



Escalas y pasos de peces

NATURALEZA Y PARQUES NACIONALES
Serie técnica

Escalas y pasos de peces

Ricardo García Díaz

ESCALAS Y PASOS DE PECES

AUTOR: GARCÍA DÍAZ, RICARDO

© ORGANISMO AUTÓNOMO PARQUES NACIONALES

NIPO: 678-22-011-2

DEPÓSITO LEGAL: M-24899-2022

ISBN: 978-84-8014-962-4

INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. ESTUDIOS PARA CONSEGUIR LA PERMEABILIDAD DE LA BARRERA	15
2.1 EFECTOS DE LA BARRERA.....	15
2.2. TIPOS DE BARRERAS TRANSVERSALES EN EL RÍO.....	16
2.2.1. Clasificación de las barreras.....	17
2.2.2. Barrera permanente.....	18
2.2.3. Barrera no permanente.....	18
2.2.4. Barreras naturales y barreras artificiales.....	18
2.3. ESTUDIO DE LAS BARRERAS.....	19
2.3.1. Datos de las barreras obtenidos “in situ”.....	19
2.3.2. Datos administrativos de las barreras.....	26
2.3.3. Plano de la barrera.....	26
2.4 ESTUDIO DE CAUDALES.....	29
2.5. LOCALIZACIÓN DE LA ESCALA.....	32
2.6. FACTORES BIOLÓGICOS CONSIDERADOS EN LOS PASOS DE PECES.....	36
2.6.1. Migración de los peces.....	36
2.6.2. Velocidades de nado de los peces.....	38
2.6.3. Capacidad de salto.....	43
2.6.4. Estudio del comportamiento de nado de tres especies piscícolas españolas realizado por el CEDEX.....	45
2.7. BIBLIOGRAFÍA.....	46
3. OTRAS ACTUACIONES DISTINTAS DE LOS PASOS Y ESCALAS.....	49
3.1. DEMOLICIÓN.....	49
3.1.1. Demolición Total.....	51
3.1.2. Demolición Parcial.....	52
3.2. CAPTURA Y TRANSPORTE.....	54
3.3. BIBLIOGRAFÍA.....	55
4. ESCALAS DE ARTESAS SUCESIVAS.....	57
4.1. DESCRIPCIÓN DEL ESTANQUE DE LA ESCALA.....	58
4.1.1. Desnivel entre estanques.....	58
4.1.2. Tipos de flujo dentro del estanque.....	58
4.1.3. Dimensionamiento de los estanques.....	60
4.1.4. Potencia disipada en el estanque por unidad de volumen.....	63

4.2. CLASIFICACIÓN DE LAS ESCALAS DE ARTESAS.....	64
4.2.1. Escala de artesas con vertedero en caída libre.....	64
4.2.2. Escala de artesas con vertedero semisumergido (o de escotadura lateral)....	66
4.2.3. Escala con vertedero de orificio sumergido.....	68
4.2.4. Escala de artesas con vertedero sumergido y orificio de fondo.....	70
4.3. DISEÑO Y CALCULO HIDRÁULICO DE LA ESCALA DE ARTESAS SUCESIVAS.....	76
4.4. ESCALAS DE ARTESAS SUCESIVAS DE HENDIDURAS VERTICALES.....	82
4.4.1. Cálculo en la escala de artesas de hendidura vertical de los niveles de agua para los caudales máximos y mínimos.....	91
4.4.2. Ejemplo numérico de cálculo de la escala de artesas de hendidura vertical con distintos niveles de agua.....	95
4.5. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE ESCALAS DE ARTESAS PARA MEJORAR LA EFICACIA.....	100
4.5.1. Mejoras en la entrada del agua en la escala.....	100
4.5.2. Mejoras en la salida del agua de la escala.....	101
4.6. BIBLIOGRAFÍA.....	101
5. OTROS TIPOS DE ESCALAS DE ARTESAS.....	103
5.1. ESCALAS DE ARTESAS CON VERTEDERO TRIANGULAR.....	103
5.2. PREBARRERAS.....	105
5.3. ESCALAS DE SABALOS.....	107
5.3.2. Capacidad de nado del sábalo.....	107
5.3.3. Comportamiento migratorio del sábalo.....	108
5.3.4. Características de los estanques de la escala de sábalos.....	110
5.3.5. Atracción y ubicación de las escalas de sábalos.....	112
5.3.6. Eficacia de las escalas de sábalos.....	112
5.5. ESCALAS DE PECES PARA ESTACIONES DE AFOROS DEL TIPO V-FLAT....	113
5.6. ESCALA DE PECES PARA ESTACIONES DE AFOROS DE CAUDALES DE SECCIONES CON CANAL SENSIBLE POR MEDIO DE VERTEDEROS NIVELADORES.....	118
5.6.1 Descripción de la estación de aforos de secciones con canal sensible.....	118
5.6.2. Investigación de la U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station sobre vertidos sumergidos.....	120
5.6.3. Método de cálculo de la escala de estanques niveladores para estaciones de aforos de canal crítico.....	122
5.6.4. Casos concretos de escalas de estanques niveladores de estaciones de aforos.....	127
5.7. BIBLIOGRAFIA.....	132
6. PASOS NATURALIZADOS.....	135
6.1. CLASIFICACIÓN DE LOS PASOS NATURALIZADOS.....	135
6.1.1. Tipos de pasos naturalizados en función de la pérdida de energía.....	136
6.1.2. Tipos de pasos según la ubicación del paso respecto del río y la barrera....	138
6.2. CONDICIONES DE APLICACIÓN DE LOS PASOS NATURALIZADOS.....	139
6.3. RAMPAS DE PIEDRAS.....	140
6.3.1. Rampa de escollera.....	140

6.3.1.1. Rampa de escollera con sección cóncava.....	140
6.3.1.2. Rampa de sección cóncava dividida en varias secciones	143
6.3.1.3. Consideraciones de diseño y construcción en las rampas de piedras.....	145
6.3.1.4. Cálculo de la rampa de escollera.....	146
6.3.2. Rampas con incorporación de piedras.....	149
6.3.2.1. Cálculo de la rampa de incorporación de piedras.....	150
6.4. RAMPAS DE RÁPIDOS Y REMANSOS.....	156
6.4.1. Rampa de rápidos y remansos con parte de la sección longitudinal de perfil trapezoidal.....	164
6.5. BYPASS. (RÍOS ARTIFICIALES).....	168
6.6. BIBLIOGRAFÍA.....	169
7. ESCALAS DE RALENTIZADORES. (ESCALA DENIL)	171
7.1. ESCALA DE FRENO HIDRÁULICO DE GARCÍA NAJERA.....	172
7.2. CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES DE APLICACIÓN DE LAS ESCALAS DE RALENTIZADORES	173
7.3. LONGITUD DE NADO Y ESTANQUES DE DESCANSO.....	175
7.4. USO Y LIMITACIONES DE LAS ESCALAS DE RALENTIZADORES.....	176
7.5. ESCALA DE RALENTIZADORES PLANOS O ESCALA DENIL.....	176
7.6. EJEMPLO DE CÁLCULO DE ESCALA DE RALENTIZADORES TIPO “DENIL”.....	181
7.7. ESCALA FATOU.....	182
7.8. ESCALA DE RALENTIZADORES DE FONDO.....	183
7.9. ESCALA DE RALENTIZADORES TIPO CHEVRON PARA PECES Y CANOAS-KAYAKS.....	184
7.10. ESCALA ALASKA.....	186
7.11. BIBLIOGRAFÍA.....	188
8. ESCALAS DE ANGUILAS.....	189
8.1. INTRODUCCIÓN A LAS ESCALAS DE ANGUILAS.....	189
8.2. CAPACIDAD DE NADO DE LAS ANGUILAS.....	190
8.3. ACTUACIONES PARA FACILITAR EL PASO DE LAS ANGUILAS.....	192
8.3.1. Actuaciones en las instalaciones de estuarios.....	192
8.3.2. Paso a través de las escalas convencionales.....	192
8.4. DISEÑO DE LAS ESCALAS PARA ANGUILAS.....	193
8.4.1. Rampas o escalas específicas de anguilas.....	193
8.4.2. Adaptación de las escalas convencionales para permitir el ascenso de las anguilas.....	196
8.4.3. Condiciones de la entrada de agua de la escala en la zona superior de la barrera.....	197
8.4.4. Ubicación de la escala.....	199
8.5. BIBLIOGRAFÍA DE LAS ESCALAS DE ANGUILAS.....	200
9. ESCLUSAS Y ASCENSORES DE PECES	201
9.1. ESCLUSA DE PECES	201
9.2. EFICACIA DE LAS ESCLUSAS DE PECES.....	204

9.3. ESCLUSA AUTOMÁTICA DE GARCÍA NÁJERA.....	205
9.4. ASCENSORES PARA PECES.....	212
9.4.1. Funcionamiento del ascensor.....	212
9.5. ASCENSOR DEL AZUD DE OLID EN EL RIO TEVERGA (ASTURIAS).....	216
9.5.1. Dispositivos previos al ascensor.....	217
9.5.2. Descripción del ascensor.	218
9.6. BIBLIOGRAFIA.	222
10. CAUSAS DEL MAL FUNCIONAMIENTO DE LAS ESCALAS DE PECES.	223
10. 1. CAUSAS DEBIDAS A LAS VARIACIONES DE LOS NIVELES DE AGUA. 223	
10.1.1 Fluctuaciones del nivel entre la escala y el río.....	224
10.1.2 Fluctuaciones del nivel aguas arriba.....	227
10.2. CAUSAS DEBIDAS A UN DISEÑO O CALCULO INADECUADO	228
10.3. CAUSAS DEBIDAS A LA FALTA DE ATRACCIÓN.	231
10.3.1. Caudal de atracción.	231
10.3.2. Velocidad del agua adecuada en el estaque donde entra el pez para conseguir la atracción.	233
10.3.3. Falta de atracción por las condiciones del flujo a la entrada a la escala....	234
10.3.4. Caudal de atracción adicional al caudal de la escala en el primer estanque	237
10.4. CAUSAS POR FALTA DE MANTENIMIENTO.	238
10.5. ESTUDIO DE LA EFICACIA DE LAS ESCALAS DE PECES EN PORTUGAL..	240
10.6. BIBLIOGRAFIA.	243
11. PASOS PARA LAS BARRERAS DE LAS INFRAESTRUCTURAS VIARIAS	
11. 1. INTRODUCCIÓN.....	245
11.2. BARRERAS PRODUCIDAS POR LAS CIMENTACIONES DE PUENTES....	245
11.3. BARRERAS PRODUCIDAS POR PONTONES, CAÑOS, TUBOS Y DRENAJES..	246
11.4. BARRERAS PRODUCIDAS POR BADENES.	246
11.4.1. Deflectores.	250
11.4.2. Ejemplo de paso con deflectores en solera de puente.	251
11.5. BIBLIOGRAFÍA.	259
12. MIGRACIÓN DESCEDENTE DE LOS PECES	261
12.1 PRINCIPALES ESPECIES DE PECES QUE REALIZAN MIGRACIÓN DESCENDENTE.	261
12.2 PROBLEMAS DE LA MIGRACIÓN DESCENDENTE.....	262
12.2.1. Paso a través del aliviadero.	262
12.2.2 Paso a través de turbinas hidráulicas.....	264
12.2.3 Predacción.....	265
12.3. MEJORAS PARA FACILITAR LA MIGRACIÓN DESCENDENTE.	265
12.3.1. Barreras físicas. Pantallas.	265
12.3.2. Barreras basadas en el comportamiento de los peces ante estímulos fisiológicos.	270
12.3.3. Barreras hidrodinámicas o del tipo “persianas”.	271
12.3.4. Condiciones de aplicación del Bypass y rejillas convencionales para la migración descendente.....	273
12.3.5. Conclusiones sobre los dispositivos de descenso para los peces.	277
12.4. BIBLIOGRAFIA	277

AGRADECIMIENTOS

Son numerosas las personas que en mayor o menor medida han ayudado a la realización de este libro. En estas líneas aparecen los nombres de algunas personas a las que el autor quiere agradecer expresamente su ayuda o colaboración, a aquellas que también hayan ayudado y su nombre no figura en este epígrafe, el autor les pide disculpas por haberse olvidado de mencionarlas y también les agradece la ayuda prestada.

A mi esposa María Vicenta Hernández Aparicio, por la revisión de gran parte de los capítulos y además de ayudarme a disponer del tiempo necesario para la realización de este libro.

A la profesora Carolina Martínez Santamaría el agradecimiento es doble porque además de realizar la revisión de varios capítulos del libro, apporto valiosas sugerencias que incrementó o modificó parte de la materia.

A Pablo Huelín Rueda. A los profesores José Carlos Robredo Sánchez, Juan Ángel Mintegui Aguirre, José Luis García Rodríguez y Fernando Torrent Bravo.

A Javier Serrano Aguilar que desde el cargo en la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, gracias a su interés se hizo viable la realización de los primeros estudios y proyectos en los ríos Guadaira y Guadamar a partir de los cuales se consiguió encontrar soluciones a problemas prácticos en las escalas de peces y que después se han expuesto en el presente libro.

A Eloy Alejandro Almazán Riballo y a Unai Fernández Urriolabeitia por los gráficos y algunos datos de cálculos.

A la empresa Incisa (Ingeniería Civil S.A., empresa adjudicataria de los proyectos de escalas de los ríos Guadaira y Guadamar con la que el autor colaboró en los citados proyectos.

A la empresa EDP España y Proyecto y personalmente a D. Emilio Fernández su gentileza al ofrecer la valiosa documentación prestada del ascensor construido en la presa del azud de Proeza en el río Teverga

A Rodrigo González Dávila por aportar datos y proyectos al autor en el inicio de esta etapa profesional dedicada a los pasos de peces.

La publicación del libro también ha sido posible por el interés mostrado por José Ramón González Pan, del Organismo Autónomo de Parques Nacionales.

A Daniel Gerardeaux como gestor de los trámites para el permiso de publicación de numerosas figuras obtenidas de la revista Bulletin Français de la pêche et de la pisciculture. A la empresa FISH-PASS por permitir usar material gráfico. A los profesores Andrés Martínez de Azagra Paredes y Francisco Javier Sanz Ronda por prestar numerosas figuras y esquemas. A Luis Pena por el permiso de publicación de figuras. A Irina Tarakona por gestionar los permisos de los esquemas originales de la FAO. A Bernhard Zeirenger por el abundante material proporcionado tanto propio como de la BOKU (Universität für Bodenkultur Wien).

1. INTRODUCCIÓN

La conservación y recuperación de los ecosistemas naturales es hoy en día una prioridad en el medio ambiente en España. Los ecosistemas acuáticos son ecosistemas, que generalmente son más frágiles y están más afectados en comparación con otros ecosistemas y hábitats.

Si bien los ecosistemas terrestres puede tener también altos grados de deterioro, normalmente suelen presentar mayores posibilidades de recuperación, especialmente en países como España donde las escasas precipitaciones generan caudales bajos y las necesidades de extracciones de los recursos hídricos para la agricultura y el consumo tanto humano como industrial provocan una disminución, alteración y deterioro de los caudales naturales fluviales, tanto por su disminución en cantidad como por la pérdida de calidad provocado, entre otras causas, por el aumento de la contaminación y por la alteración en su régimen natural. También se debe tener en cuenta las numerosas presas para las centrales hidráulicas y minihidráulicas las cuales originan numerosas barreras que impiden el paso a los peces.

Para cubrir las necesidades del abastecimiento de agua para el consumo humano e industrial y para suministrar grandes volúmenes de agua a las explotaciones agrícolas de regadío, ha sido necesario construir azudes y grandes presas. Estas obras hidráulicas crean importantes barreras transversales que impiden el libre trasiego de los peces, lo cual provoca una gran limitación de paso, creando alteraciones negativas en las poblaciones ictícolas, como la disminución de la población y pérdida de variedad genética e incluso la total desaparición de algunas especies.

También el problema a nivel mundial adquiere gran relevancia, de hecho algunos autores afirman que la fragmentación causada por presas y azudes es considerada como uno de los mayores impactos creados por el hombre sobre los peces migratorios en los sistemas de ríos.

La falta de transitabilidad perjudica en mayor o menor grado a todas las especies de peces, si bien el mayor daño se produce en las especies migradoras. En estos casos es posible que se pueda producir la total desaparición de algunas especies, como son los caso de las especies diádromas tales como la anguila (*Anguilla anguilla*) y el salmón (*Salmo salar*) que han llegado a desaparecer totalmente de numerosos ríos. Para las especies potamodromas, la

existencia de esta barrera perjudica pero no elimina todas las poblaciones de estas especies, en cuyo caso los peces consiguen realizar su ciclo vital en los tramos estancos entre barrera y barrera, aunque siempre será en peores condiciones que las que habría sin las barreras que provocan un deterioro de las poblaciones tanto cualitativa como cuantitativamente.

Este continuo declive de las poblaciones de muchas especies ha motivado la construcción de escalas y pasos de peces, las cuales están incrementando de manera importante la transitabilidad para los peces migradores en los ríos.

En el presente trabajo se exponen las posibles soluciones al problema de la falta de transitabilidad de los ríos.

Se ha dedicado un capítulo entero a los importantes estudios que son necesarios emprender previamente al proyecto de la escala o paso. Estudio que muchas veces se obvia o reduce, resultando un trabajo escaso, insuficiente e inadecuado que podría conllevar una escala ineficaz.

Además de las escalas, pasos, ascensores y esclusas que permiten el paso de los peces, existen otras soluciones distintas, como son: la demolición de la barrera y la captura y transporte de los peces. La demolición de la barrera suele ser la mejor solución ecológica al problema de la falta de libertad de tránsito. La captura y transporte de los peces puede paliar en parte el problema. Estas materias se tratan en el tercer capítulo.

Las escalas de artesas sucesivas y de hendiduras verticales son las más frecuentemente utilizadas. El capítulo cuarto corresponde a estas dos escalas. Las ventajas de las escalas de artesas sucesivas consisten en: la posibilidad de adaptarse a todas las topografías, su estudiado funcionamiento y su relativa economía. Las escalas de hendiduras verticales serán más utilizadas en el futuro porque tienen casi todas las ventajas de las escalas de hendiduras verticales sumando además, entre otras ventajas, la posibilidad de funcionamiento para un amplio rango de caudales sin variar las condiciones hidráulicas de la artesa.

El capítulo siguiente se exponen otros tipos de escalas de artesas más especializadas, en concreto escalas para sábalos, escalas con vertedero triangulares, prebarreras y escalas para estaciones de aforos.

El capítulo sexto está dedicado a los pasos naturalizados, que comprenden las rampas de piedras, los pasos de rápidos y remansos y los ríos artificiales. Estas construcciones intentan, en la medida de lo posible, reproducir la naturaleza. Si bien estos pasos tienen limitaciones de aplicación, es de esperar que por su gran valor ecológico y estético sean cada día más utilizados.

El capítulo siete comprende las escalas de ralentizadores siendo un tipo de ellas las escalas Denil. Estas escalas son sencillas y económicas si bien su aplicación se limita a especies concretas.

El capítulo siguiente está dedicado a las escalas de anguilas. Estos peces tienen dos formas de remontar los obstáculos, uno por medio del nado y otro por medio de la reptación. Esta segunda habilidad para remontar los obstáculos hace que las escalas de anguilas sean diferentes al resto de las escalas.

El capítulo noveno estudia las esclusas y ascensores; dispositivos distintos a las escalas que se aplican en ciertas condiciones.

Lamentablemente muchas escalas construidas no son eficaces. Por este motivo el capítulo décimo analiza las causas del mal funcionamiento de las escalas para que se puedan solventar durante la fase del proyecto de la escala.

Numerosos drenajes, vados y puentes producen barreras al tránsito de los peces, aunque las soluciones a este problema son fáciles y económicas, la falta de cuidado y atención a esta cuestión provoca que existan numerosas barreras en las vías de comunicación. El capítulo undécimo estudia las soluciones a las barreras en las vías de comunicación.

Los peces que ascienden hacia los tramos superiores de los ríos después descenderán para completar su ciclo vital o anual. En muchos casos este aspecto no se tiene en cuenta y provoca muchas pérdidas de peces. El capítulo doceavo trata sobre esta materia.

Como se aprecia en este libro se expone de forma general las materias relacionadas con la recuperación de la transitabilidad de los ríos. Tiene dedicación especial las escalas de artesas, las escalas de hendiduras verticales y los pasos naturalizados porque son los más importantes y los más utilizados.

Este trabajo tiene un carácter práctico con la intención de que los técnicos que vayan a proyectar escalas puedan realizarlo con cierto grado de seguridad de conseguir la eficacia de la obra, por lo tanto, que los peces puedan remontar y descender por las barreras y así recuperar o simplemente conservar la ictiofauna de nuestros valiosos ríos.

2 . ESTUDIOS PARA CONSEGUIR LA PERMEABILIDAD DE LA BARRERA

Las consecuencias de la presencia de barreras transversales en los ríos varían según las características de cada caso. En este capítulo se estudian las características de estas barreras, porque en función de las mismas se decidirá la elección y el desarrollo de la actuación que se llevará a cabo.

El tiempo en que se mantiene la infranqueabilidad de la barrera puede ser permanente o solo por un periodo determinado. Los factores que determinan la duración de la infranqueabilidad son: la altura de la barrera, el tipo de ictiofauna, y el nivel del agua por debajo de la barrera, que a su vez dependerá del caudal circulante. Si la barrera tiene poca altura, la variación de caudales hace que una barrera sea infranqueable permanentemente o tan solo durante un periodo de tiempo. Además del periodo de infranqueabilidad, las barreras tienen otras importantes características que influyen en la elección de la escala o paso como por ejemplo: disponibilidad de superficie para ubicar el paso, la topografía de los márgenes, la utilidad de la barrera etc. Por lo tanto es necesaria tomar datos del obstáculo y el estudio de la misma antes de llevar a cabo el diseño y el cálculo del paso.

Una misma barrera provoca un daño que depende de la propia barrera y de la biocenosis a la que afecte. Los peces es la fauna más perjudicada, aunque no son los únicos. También se tiene que tener en cuenta el resto de la fauna y la flora del río porque las barreras también impiden la libre propagación de plantas y semillas.

En este capítulo se estudiarán aspectos de las barreras que permitirán afrontar de la mejor forma posible la recuperación del tránsito de los peces.

2. 1 EFECTOS DE LA BARRERA.

La consecuencia principal de la presencia de la barrera es el impedimento del paso de los peces durante su ciclo vital. En general, se puede considerar que la presencia de una barrera originada por una obra hidráulica del tipo presa o azud u obras de infraestructuras en un curso fluvial crea los siguientes efectos (Elvira *et al* 1998).

Por encima de la barrera:

- Disminución de las poblaciones de aguas rápidas en favor de especies de aguas lenticas (puede fomentar la propagación de especies exóticas).
- Disminución del oxígeno.
- Modificación de la temperatura
- Disminución de la diversidad de los hábitats.
- Pérdida de lugares de puesta (pérdida de frezaderos).
- Disminución de refugios ante los depredadores.

Por debajo de la barrera:

- Regulación de caudales. Cuando el vaso de la presa tiene volumen grande, puede alterar el régimen natural con los consiguientes cambios bruscos del nivel de agua.
- Disminución de los refugios, lugares de puesta y alevinaje y los recursos tróficos disponibles para los peces como consecuencia de las alteraciones del régimen natural.

El *efecto barrera impide el paso* de los peces hacia río arriba y río abajo, tanto en los peces propiamente migratorios (peces diádromos) como en los peces holobióticos (peces potamodromos).

El daño que producen las barreras, especialmente en las grandes presas, ha llevado a la desaparición, en algunos ríos de algunas especies, como es el caso de las especies diádromas de la anguila (*Anguilla anguilla*) y el salmón (*Salmo salar*). La existencia de la barrera también produce daños al resto de las especies, si bien cuando se trata de especies potamodromas (peces que hacen todo su ciclo vital en agua dulce) no elimina toda la población de peces.

2.2. TIPOS DE BARRERAS TRANSVERSALES EN EL RÍO.

Una barrera artificial transversal de un río se puede definir como toda construcción que impida el paso de los peces autóctonos que habitan en la zona o que históricamente habían vivido de forma temporal o permanente para un porcentaje importante de la población ictícola.

También las barreras transversales pueden ser originadas por una causa natural como las cascadas y los rápidos. Lógicamente, en este caso no se producen impactos ecológicos porque la barrera lleva indefinidamente y por lo tanto los ecosistemas han ido evolucionando con esta circunstancia. En algunos casos se han construido escalas de peces en estas barreras naturales para permitir el paso de la ictiofauna, como las que se han realizado en algunos ríos de Canadá y Noruega.

Una barrera puede impedir el paso exclusivamente para algunas especies, pero no para todas. En principio se debe de conseguir la franqueabilidad de las barreras

artificiales. La decisión sobre la actuación para este fin dependerá de la importancia ecológica, económica o por otro tipo de causa. Las actuaciones que se realicen tienen que conseguir el paso del mayor número de peces en cuanto a especies y tamaños que anteriormente no podían ascender. En principio, se debe aspirar al ideal de conseguir la total franqueabilidad de la barrera, no solamente para los peces sino en general para toda la biocenosis.

2.2.1. Clasificación de las barreras

A continuación se expondrá una clasificación de barreras desarrollada en el presente trabajo. Si bien, en la publicación de “Protocolo HIDRI para la valoración de la calidad hidromorfológica de los ríos (Agència Catalana de l’Aigua, 2006) realiza una clasificación de barreras, se ha preferido exponer la clasificación que se expone a continuación porque la clasificación realizada en el protocolo HIDRI tiene como objetivo la valoración de la calidad hidromorfológica, por el contrario este libro es exclusivo de pasos y escalas de peces y la clasificación expuesta en el mismo está orientada para este fin.

Las barreras se pueden clasificar en las siguientes categorías:

1. Según su origen.
 - 1.a. Naturales (cascadas y rápidos).
 - 1.b. Artificiales:
 - Obras hidráulicas
 - Infraestructura viaria.
2. Según la permanencia en el tiempo.
 - 2.a. Permanente. Para cualquier caudal.
 - 2.b. No permanente. (Es barrera infranqueable para ciertas condiciones de caudales, por lo tanto durante un periodo de tiempo). Pueden ser:
 - Estación de aforos.
 - Azudes y presas de pequeña altura.
 - Infraestructuras viarias.
3. Según su tipología.
 - 3.1. Obras hidráulicas.
 - Estaciones de aforos
 - Azudes y pequeñas presas (hasta 3 o 4 metros).
 - Presas de media altura, (de 3 hasta 10 metros).
 - Presas de más de 10 metros (grandes presas).
 - 3.2 Infraestructura viaria.
 - Soleras y diques en puentes y vados.
 - Drenajes, pontones, caños y tubos.

2.2.2. Barrera permanente.

Cuando la barrera es siempre infranqueable para cualquier caudal y circunstancia.

Es el caso de las presas y cascadas naturales de gran altura, y obras de infraestructura viaria con grandes desniveles.

2.2.3. Barrera no permanente.

Dependiendo de los caudales y de la altura de la barrera, ésta puede ser infranqueable durante unos pocos días y el resto de los días del año ser franqueable para la mayor parte de los peces, ser infranqueable para el mayor número de días o bien casi siempre es infranqueable excepto para caudales extraordinarios.

El periodo en que los peces tienen mayor necesidad de desplazamiento por el río es durante el periodo de reproducción, por lo tanto dependiendo de la reproducción de los migradores y la duración del periodo de franqueabilidad se podrá considerar válida la situación en la que exista un periodo relativamente grande en el que la barrera es franqueable. En la figura 2.1., se muestran barreras no permanentes para grandes caudales.

2.2.4. Barreras naturales y barreras artificiales.

Como se ha comentado anteriormente, las barreras pueden ser artificiales es decir originadas por el hombre o naturales como son las cascadas y los rápidos.

En algunas barreras naturales también puede ser apropiado una actuación para permitir o simplemente mejorar el paso de los peces y así conseguir que un mayor número de ellos puedan pasar y aumentar la riqueza ictícola en el tramo superior del río. Se han construido escalas para salvar saltos naturales de cascadas en el Madaleine River en Canadá y también en la cascada Rjukanfos en el río Shire en Noruega donde se salva una altura de 27 m, con una longitud de 285 m (García Nájera, 1953).

Evidentemente, cuando se trata de pequeñas barreras provocadas por pequeñas cascadas o tramos de ríos con “rápidos” donde se producen velocidades superiores a las admitidas, la barrera actúa selectivamente permitiendo el paso solo a los ejemplares más aptos de la especie. La eliminación de la barrera probablemente no producirá un efecto negativo en el ecosistema ya que siempre han existido peces. La mejora generada por la eliminación de la barrera consiste en permitir el paso a la mayor parte de la población, de hecho este tipo de actuación se realiza frecuentemente en algunos países, como es el caso de Canadá.



A. Drenaje. En la foto de la derecha el drenaje se encuentra con un caudal medio. En la foto de la izquierda con un caudal de crecida que anega totalmente el drenaje.



B. Vado. Foto izquierda con caudal normal. Foto de la derecha con caudal extraordinario.

Figura 2.1. Barreras que son franqueables para caudales máximos.

2.3. ESTUDIO DE LAS BARRERAS.

Si es necesario conocer las barreras existentes en un río previamente al diseño de las escalas, se puede realizar este estudio según el método que se describe a continuación.

2.3.1. Datos de las barreras obtenidos “in situ”.

a) *Localización de las posibles barreras con fotografías aéreas.*

Un inventario provisional de las barreras potenciales se puede llevar a cabo por medio de fotografías aéreas de la exploración del río (ver figura 2.4.).

La visualización de las fotografías aéreas con detalle permite detectar aquellos puntos en los que *el río se remansa*. Estos remansos pueden ser producidos por alguna de las siguientes causas:

1. *Barreras transversales*. Azudes, pequeñas presas, estaciones de aforos o drenajes en vías de comunicación.

2. *Obstáculos en el río sin llegar a ser barrera transversal*. Si bien estos obstáculos no llegan a constituir una barrera provocan un remanso en el río. Los obstáculos pueden ser de origen natural o artificial

3. *Estrechamientos del río*. Provocan aguas arriba del mismo una zona de remansos.

De estas tres posibles causas solo la primera es la que impide el paso de los peces.

Se puede dar la circunstancia de que exista una barrera y aguas arriba de la misma no exista remanso de aguas, aunque esta circunstancia no es muy común, sí que puede producirse por alguna de las siguientes causas: estaciones de aforos, cascadas naturales, barreras transversales en zonas encauzadas y de aguas loticas. Para poder detectar estos casos se tendrá que volver a realizar la observación más detalladamente del río para observar alguna anomalía que delate una barrera. En algunos casos esta observación se podrá realizar con observación más detallada de fotografías aéreas, en otros casos es inevitable una inspección "in situ" del tramo del río.

b) *Toma de datos "in situ", en los puntos donde se producen remansos.*

Es importante determinar el momento en que se debe realizar la visita a la barrera porque en su inspección se observará el caudal circulante y los niveles de agua por encima y por debajo de la barrera. Si existen datos de los caudales diarios, entonces se relacionará el caudal del día de la visita con el resto de caudales del año.

Aunque en el proyecto de la escala (también en el caso de los pasos de peces) es muy recomendable y en muchos casos imprescindible, la elaboración del estudio del modelo hidráulico del río para los caudales existentes con los programas de modelización hidráulica del tipo HEC-Ras o Iber para determinar los niveles que alcanza el río, también es recomendable que el día de la visita a la barrera sea aquel en que se puede obtener los mejores datos referentes al caudal y los niveles de agua de la barrera.

El día óptimo de la visita se realizará en el periodo de la migración del pez o peces principales.

- Si el tramo tiene solamente truchas. El estudio se realizará durante el periodo de migración reproductora de las truchas, concretamente entre septiembre y febrero, dependiendo de las zonas, este es el periodo que recomienda el protocolo HIDRI de la agència catalana de l'aigua (2006). Prácticamente el mismo periodo coincide con el ascenso del salmón, si es un río salmonero, ésta especie será la principal y se la dará preferencia al resto.

- En el tramo existen otras especies conjuntamente con la trucha. La visita se realizará durante el periodo de reproducción de la trucha, si bien se tiene que tener en cuenta que los ciprínidos se suelen reproducir desde febrero hasta junio y habrá que considerar los caudales durante este periodo.

- Si no existen truchas. Entonces dependerá del periodo de reproducción de la especie principal.

Si existe variabilidad de caudales, situación muy frecuente, y si se decide actuar con la construcción de un paso y especialmente cuando es una escala, se deberá realizar el estudio de distribución de caudales y en bastantes casos el modelo hidráulico del río, con ello el dato de los niveles de agua recogidos en el día de la visita será un dato más.

Independientemente a que más adelante se estudiará las velocidades y capacidades de salto que pueden tener los peces, en este apartado se expondrán la clasificación de los peces en función de su capacidad para superar obstáculos según el Protocolo de caracterización Hidromorfológica de masas de agua en la categoría de ríos realizada por el Magrama (2015):

Las especies de peces quedan agrupadas en los siguientes grupos.

Grupo 1: corresponde a las características de especies con alta capacidad de natación y salto (p. ej: salmónidos).

Grupo 2: corresponde a las características de especies con moderada capacidad de natación y salto (p. ej: ciprínidos reófilos como bogas y barbos).

Grupo 3: corresponde a las características de especies con baja capacidad de natación y salto (p. ej: ciprínidos pequeños como bermejuelas o gobios).

Grupo 4: Anguilas

En función de estos grupos de especies se obtienen los umbrales máximos de capacidad de nado o de salto según la siguiente tabla 2.1.

Tabla 2.1 Valores limitantes por grupo de especies piscícolas.

EFECTOS BARRERA: VALORES LIMITANTES POR GRUPO DE ESPECIES PISCÍCOLAS				
Valores limitantes (m o m/s)	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
<i>Saltos verticales</i>				
Altura máxima del salto	1	0,5	0,2	
Profundidad mínima de la poza de remonte	1,25h	1,4h	1,4h	indiferente
Anchura máxima en coronación	0,5	0,5	0,5	0,5
Altura mínima de la lámina de agua en coronación	0,15	0,1	0,1	0,01
<i>Pasos entubados</i>				
Velocidad de la corriente	2,4	1,7	0,5	1,7
Altura mínima de la lámina en el paso	0,1	0,1	0,1	0,01
<i>Pasos sobre el paramento</i>				
Pendiente máxima	30 %	20 %	20 %	45 %
Velocidad máxima de la corriente	2,4	1,5	0,5	2
Calado mínimo sobre el paramento	0,1	0,1	0,1	0,01

Algunos de los valores asignados en el cuadro anterior se comentan a continuación:

La altura máxima del obstáculo de 1 m, puede ser excesiva para los peces del grupo 1°. A este grupo corresponde a los salmónidos, entre otros la trucha. Para algunos ejemplares de esta especie la altura de 1 m pueda ser excesiva, bien porque son jóvenes o simplemente porque son de pequeño tamaño por habitar en aguas con baja temperatura.

En el grupo 2° la altura propuesta de 0,5 m como máxima, también podría ser excesiva, especialmente para la boga.

Con la siguiente fórmula, se puede determinar la altura del salto con la velocidad de caída del agua y con este dato poder calcular cual será la velocidad que necesita desarrollar el pez para remontar la barrera:

$$h = \frac{v^2}{2g}$$

Dónde:

h, es la altura en (m).

V es la velocidad de salida (m/s).

g, es la aceleración de la gravedad (m/s²).

Aunque al final de este capítulo se tratará extensamente la velocidad y capacidad de nado de los peces, a continuación se expone el criterio utilizado en el protocolo HIDRI de la Agència Catalana de l'aigua (2006) respecto de las velocidades que pueden alcanzar los peces para el remonte de las barreras.

Se considera que la velocidad de impulso del pez es la velocidad máxima que puede alcanzar en un periodo de 2-3 segundos. Esta velocidad se estima que recorre en 8-12 veces la longitud del pez en un segundo, en función de la especie y de la salud del individuo (Reiser y Peacock 1985). Se ha utilizado el valor de 8 para las especies con poca capacidad de salto, grupos 3 y 4 y un valor de 10 para el grupo 1 (mayor capacidad de salto). Conocida la velocidad máxima y sabiendo el valor de la altura del salto en función de la velocidad se puede estimar de manera aproximada la altura que pueden alcanzar los peces.

Se puede afirmar que cuando la altura de la barrera es importante el pez realiza el salto de la siguiente manera.

Cuando un pez tiene que remontar una barrera de considerable altura para su capacidad de salto, lo lleva a cabo en dos partes, tal y como se muestra en la Figura 2.2 a. Alcanza una primera altura de valor h_1 , inferior a la altura total del salto. Una vez que ha agotado su impulso vertical se introduce en la lámina de agua y sigue ascendiendo nadando dentro de la lámina de agua.

Este método de remontar los saltos de agua que practica el pez es bastante más eficaz que si realizara un único salto de agua porque en este caso toda la altura la deberá realizar en un

único esfuerzo y en cambio sí lo realiza en dos etapas el esfuerzo total es la suma de los dos, por consiguiente cada uno de ellos es menor que si fuera único.

Cuando se introduce dentro del agua, la velocidad ascendente es nula o casi nula, sin embargo la velocidad longitudinal no lo es porque apenas ha disminuido y le permite introducirse en la lámina sin esfuerzo, una vez dentro comenzará a nadar con la máxima capacidad y podrá remontar la altura restante, siempre y cuando ésta no sea excesiva, necesariamente esta altura será menor que el salto por el aire. La velocidad del agua donde el pez se introduce en la lámina no es excesiva porque la altura no es muy grande, y además porque el agua cuando empieza a descender la velocidad vertical es cero.

Esta manera de saltar se ha observado en numerosas grabaciones de video realizadas en saltos de peces para remontar desniveles, especialmente para los salmones.

Cuantificar estas alturas dependerá de la especie, de la temperatura, del ángulo de ataque y sobre todo del tamaño del pez. Basándose en las investigaciones de las velocidades que puede alcanzar los peces, se podrán cuantificar las alturas correspondientes, que evidentemente siempre serán mayores que las que podría alcanzar si el salto fuera único.

En el estudio de las barreras que pueden impedir el paso a los peces es importante saber la profundidad mínima que debe tener la poza de agua por debajo de la barrera, para que los peces puedan impulsarse y remontar el salto (adquirir la velocidad de salto por medio de la aceleración con la longitud adecuada y puedan dirigir su salto con la inclinación suficiente).

Según el HIDRI, la profundidad de la poza tendrá que ser como mínimo 1,4 veces la altura "h" de la barrera para los grupos de peces 2, 3, 4 y de 1,25 veces la altura "h" para peces del grupo 1 (salmónidos), Figura 2.2.

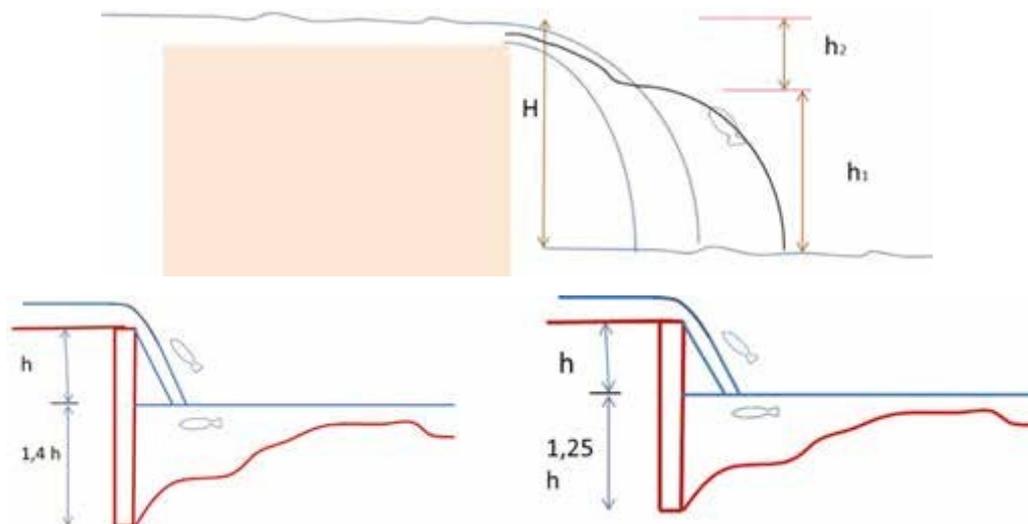


Figura 2.2. A (parte superior) Esquema de un salto de un pez. B (parte inferior) Esquema de barrera con las profundidades mínimas de las pozas para que el pez pueda remontar el salto.

Los datos obtenidos en la barrera tienen la finalidad de determinar “en situ”, si es posible el libre tránsito de los peces, y si no se tiene la certeza de que lo pueda ser o si es evidente su intransitabilidad, entonces se tomarán los datos para planificar el levantamiento topográfico para la futura actuación a llevar a cabo.

Tanto en el HIDRI de la Agència Catalana de l'aigua (2006) como el Protocolo de caracterización Hidromorfológica de masas de agua en la categoría de ríos del Magrama (2015) los datos que se toman en la barrera en el día de la visita son los únicos y definitivos que se toman, que conjuntamente con los valores de los caudales, califican la barrera para la transitabilidad de los peces.

Si la barrera es infranqueable, se realizará un proyecto de alguna de las actuaciones posibles tales como demolición, paso o escala de peces, en esta primera visita se toman los datos para posteriormente realizar los trabajos topográficos para la elaboración de planos y estudios hidráulicos.

Por ello se debe tener en cuenta que algunos de los datos obtenidos en la visita como son las velocidades y los niveles de agua dependen del caudal circulante y por lo tanto podrían variar notoriamente, si el caudal lo hace.

Los datos de la barrera que se deben tomar según el Protocolo del Magrama (2015) son (ver figura 2.3)

- Altura del salto (h),
- Profundidad de la poza (z).
- Anchura en coronación (ac).
- Altura de la lámina en coronación (alc).
- Longitud del parámetro inclinado (L).
- Anchura del azud (A)

La altura de la lámina en coronación (alc) estará en función del caudal circulante.

Con el valor de la longitud del parámetro inclinado (L) y con la altura total (h+z) se puede calcular la pendiente del talud.

Cuando se trata de un tubo en drenaje:

- D diámetro del paso.
- L, longitud del paso.
- V, velocidad del paso.
- Al, altura de la caída del agua.

Igual que en el caso anterior la velocidad del agua dentro del tubo depende del caudal existente.

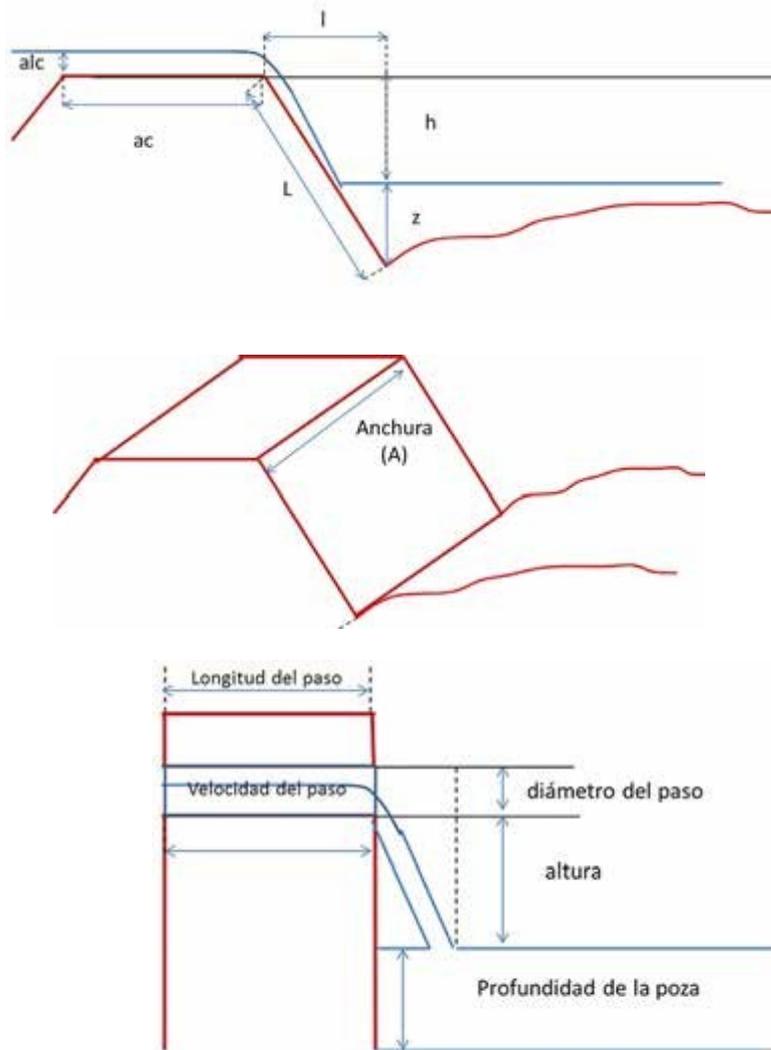


Figura 2.3. Esquema de las barreras indicando las medidas que se deben de tomar.
El primer y segundo esquema corresponden a un azud, el tercero a un drenaje.

Además de los datos propios de la barrera también se deben de tomar algunos datos adicionales.

- *Situación del curso del río.* Especialmente aguas abajo de la barrera, porque las condiciones de flujo en esta sección pueden condicionar la elección del tipo de escala y su diseño.

- *Croquis de la barrera.* Como posteriormente se levantará un plano topográfico, es recomendable realizar un croquis en el que se diferencien las zonas donde se necesita una información determinada con mayor número de puntos, y detalles concretos.

2.3.2. Datos administrativos de las barreras.

Además de los datos anteriormente mencionados y obtenidos en la visita a la barrera, es necesario complementarlos con otros datos que influirán o decidirán la actuación a realizar:

a) *Utilidad de la barrera.* Indicando la finalidad por la que se construyó la barrera y si continua siendo funcional.

a) *Propiedad de la barrera.* La posibilidad de demolición o de construcción de la escala puede variar mucho dependiendo del tipo de titularidad de la barrera, de si es pública o privada o si tiene algún tipo de derecho o concesión administrativa. Si la barrera es de propiedad particular o tiene alguna concesión que pueda impedir su demolición mientras la concesión se mantenga en vigor. Tal condición puede obligar, si se quiere recuperar la transitabilidad del río, a la construcción de una escala de peces.

b) *Declaración de monumento del patrimonio histórico.* La declaración de monumento del patrimonio histórico de una presa o azud limita las posibles actuaciones que se puedan realizar en ella. Si la barrera está declarada como patrimonio histórico artístico, las actuaciones estarán condicionadas en aras de mantener este valor patrimonial.

c) *Otros datos administrativos.* Es importante conocer el estado administrativo de la concesión y su posible mantenimiento o cancelación por la falta de uso u otro motivo.

2.3.3. Plano de la barrera.

Confirmada la existencia de una barrera que impide total o parcialmente el paso de los peces, si la opción elegida es la construcción de un paso o escala, se levantará el plano de la barrera a escala 1/100 o 1/200, dependiendo de los casos. En este plano se tendrán en cuenta todos los detalles importantes de la barrera principalmente aquellas zonas que estén relacionadas con la ubicación, diseño y construcción ya sea del paso o de la escala.

En general se denomina “paso de peces” a todo dispositivo que permite el ascenso de los peces, lo que incluye también a la escala.

Si la opción es la demolición de la barrera también es necesario levantar un plano pero en este caso el nivel de detalle es menor porque la aplicación del plano será solamente para planificar la demolición y realizar las mediciones. Si en la demolición se va a llevar a cabo la extracción de los sedimentos, entonces será necesario realizar el levantamiento topográfico de estos.

Una parte importante de la visita que se realiza a la barrera tiene como finalidad detallar las características del plano. En éste, se localizaran las zonas donde podría ir el paso de peces. Evidentemente, estas zonas deberán configurarse con más detalles, para ello se aumentarán el número de puntos con cotas altimétricas. Puede ocurrir que el día en que se realiza la visita el nivel del agua sea relativamente alto, esta situación transmite una idea equivocada del río, que de no levantarse el plano topográfico y el posterior modelo hidráulico en el que se determine los niveles

para todos los caudales, puede inducir a un grave error de diseño porque el paso y especialmente si es una escala, se puede quedar o muy alta desde el río o simplemente alejada del agua.

El plano debe recoger toda la barrera incluyendo los márgenes. Dependiendo de los casos, se tendrá que profundizar en algunas partes, por ejemplo, en la sección donde se ha pensado situar el paso de peces.



Figura 2.4. Foto aérea para la localización de barreras.

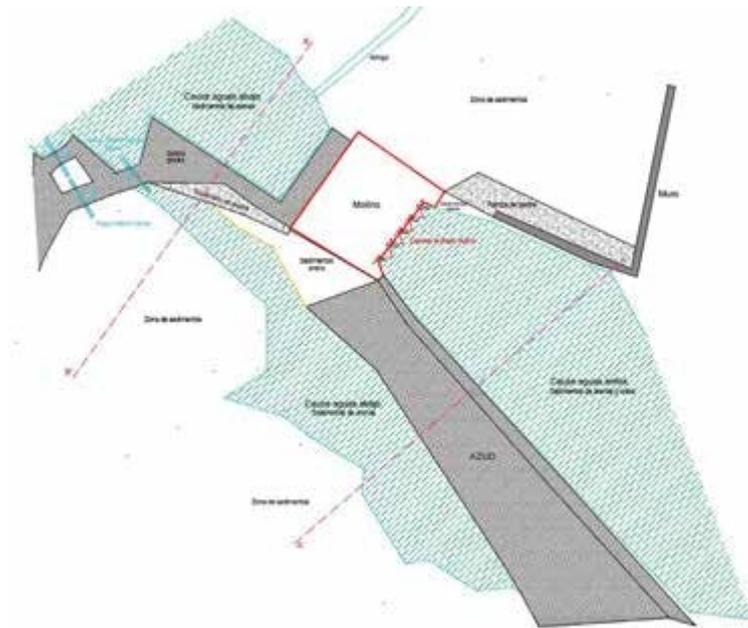


Figura 2.5 Plano general de una barrea transversal, en este caso de un azud.

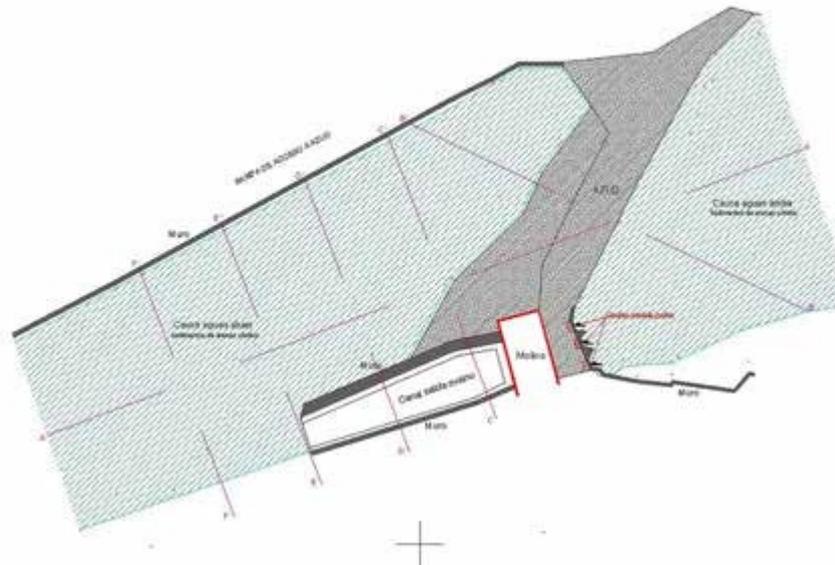


Figura 2.6. Plano general de un azud, obsérvese las líneas del perfil longitudinal y las secciones transversales

En las figura 2.5., y 2.6., se muestran los planos generales de dos barreras. Las líneas en color violeta corresponden a los perfiles longitudinales en los que se levantan secciones transversales del río. Estas figuras corresponden tan solo al plano general y no se incluyen la altimetría. Las cotas se encuentran en los planos con mayor escala y detalle.

El plano debe contener los siguientes datos:

a) *Altimetría* de los puntos característicos con precisión de 1 cm. En aquellas zonas o puntos en los que se pueda ubicar el paso o escala o que sea necesario para obtener perfiles longitudinales y transversales se indicará la altimetría.

b) *Perfiles longitudinales con secciones transversales* en todas las secciones características, es decir, aquellas que tienen una particularidad, como por ejemplo el cambio de profundidad o el de la anchura del río. En estos perfiles se detallan los datos topográficos y batimétricos necesarios para realizar el posterior cálculo con programas hidráulicos tales como el HEC-RAS y el IBER, y determinar las variaciones de la altura que alcanzará el agua durante los caudales medios, máximos y sobre todo mínimos tanto en la propia barrera como en el río, especialmente aguas abajo de la barrera. El dato del nivel del agua en la sección del río aguas abajo de la barrera es de vital importancia especialmente para caudales pequeños porque conociendo la altura del agua podremos conocer el desnivel entre el río y el primer estanque y diseñar la escala adecuada. Se suele incurrir en el error muy común de realizar la visita a la barrera en un momento de un periodo de caudales medio o medio-altos, sin conocer la situación del río cuando se producen caudales bajos, lo cual provoca que en algunas escalas la ubicación del primer estanque se queda, o bien alejada de la lámina de agua

impidiendo materialmente al pez poder acercarse tan siquiera a la escala, o bien se produce un desnivel excesivo de agua incapaz de ser superado por el pez.

La figura 2.7, muestra la perspectiva de los niveles que alcanza la lámina de agua por debajo de la barrera para los caudales de cálculo obtenidos con el programa HEC-RAS. En la figura 2.8. se muestran los niveles que alcanza la lámina de agua, también obtenidos con el programa HEC-RAS, en una sección concreta. Conociendo los niveles que alcanza la lámina de agua se está en disposición de conocer los desniveles con las estanques de las escalas.

2.4 ESTUDIO DE CAUDALES.

El caudal que atraviesa el paso de peces, especialmente si es escala, es una fracción del caudal que pasa por el río, por consiguiente influye en la escala tanto en el tipo de escala elegido como en el tamaño de la misma. Si el río es relativamente caudaloso, situación en España poco frecuente, es importante conseguir que la suma del caudal del paso y el caudal de atracción sea un porcentaje relativamente importante respecto del total del río. Cuanto mayor sea el caudal del río, mayor será la suma del caudal de la escala y del caudal de atracción. Si el paso es una escala, en algunos casos el caudal que la atraviesa no puede ser excesivamente grande porque entonces se tendría que construir una escala muy grande, con esta situación lo que se debe hacer es aumentar el caudal de atracción.

Puede ser que en el caso de que el caudal del río sea pequeño, el caudal que atraviesa la escala puede alcanzar hasta el 50 % del total y en otros ríos en cuencas con fuerte sequía, el caudal de la escala puede llegar al total del río. Por todo ello es indispensable analizar y conocer los caudales del río.

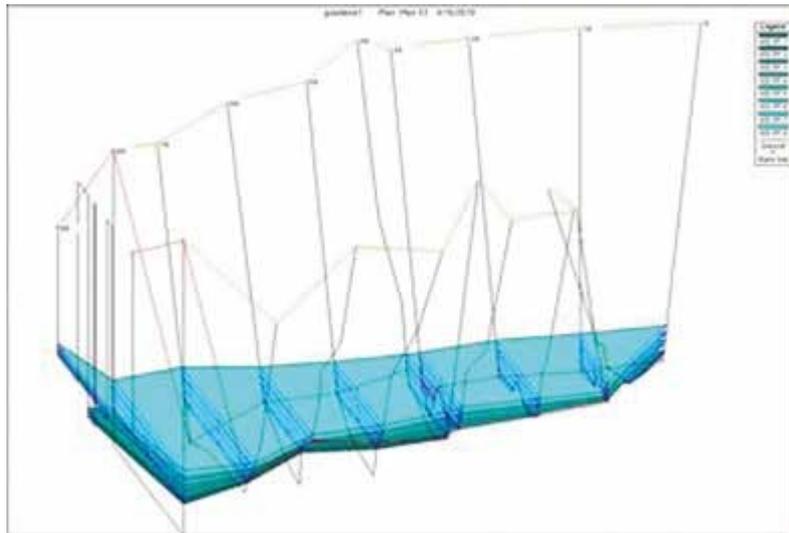


Figura 2.7. Gráfico en perspectiva del río con los distintos niveles de agua según los caudales de cálculo.

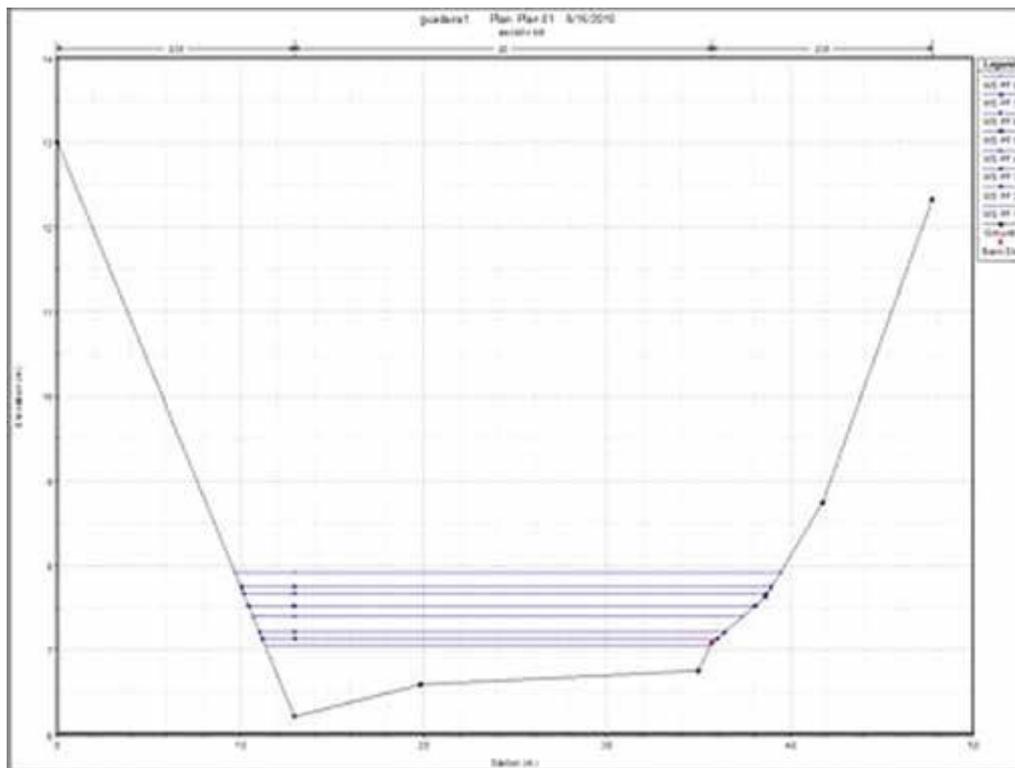


Figura 2.8. Gráfico de los niveles de agua para diferentes caudales en una sección transversal del río.

A partir de los datos que ofrecen las estaciones de aforos se estiman valores aproximados de los caudales medios en los meses de la migración para la reproducción. El periodo de migración depende de cada especie. En el caso de los peces ciprínidos, la reproducción se realiza en los meses comprendidos entre febrero y junio, dependiendo de las especies y de donde se encuentre el río. En los ríos españoles el periodo de reproducción de la trucha está comprendido entre el otoño y el mes de febrero. El salmón comienza el ascenso por los ríos también en otoño y principios de invierno.

Se recomienda que la serie de años que deben utilizarse en el estudio del cálculo de los caudales sean la correspondiente a los últimos 30 años. En algunas cuencas hidrográficas españolas el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Publicas) ofrece los datos de los caudales diarios. Estos datos son los óptimos porque procesándolos con “hojas de cálculo”, se obtienen distribuciones estadísticas con todos los datos necesarios para estimar en cada periodo, mes o semana, etc., que caudal estará atravesando el río.

Esta información es muy importante para el diseño de la escala. A partir de los caudales existentes en el río determinaremos el caudal medio, máximo y mínimo en el que el paso, o la escala pueda ser eficaz y también el periodo de validez del mismo en

función de los caudales. En ríos con fuerte estiaje los caudales bajos existentes condicionan a que gran parte de éstos pasen por la escala. En principio cuanto mayor sea el caudal del paso, su eficacia será mayor, si bien esto implica un paso de mayor tamaño, si es una escala implica una posible mayor dificultad. En algunos casos no es fácil disponer del caudal más recomendable porque las barreras tienen como finalidad la captación de esta agua para algún uso concreto, y por lo tanto, cuanto mayor sea el caudal del paso o escala, menor será el disponible para el fin al que se destinó la barrera.

Para las escalas de arquetas sucesivas, Larinier (2002) recomienda que el caudal que atraviesa la escala deba ser como mínimo entre el 1 y el 5 %. Estos porcentajes están pensados en ríos con caudales relativamente grandes en comparación con los ríos españoles. En muchos ríos españoles, con menor caudal que en el resto de Europa, estos porcentajes deberán ser aumentados.

El caudal de atracción está en relación directa con el caudal del río, cuanto mayor es éste mayor será aquel, esto debe ser así porque el pez se sentirá atraído, entre otros factores, allí donde exista mayor corriente. Larinier (2002) recomienda que el caudal de atracción deba ser el 10 % del caudal mínimo. Estos valores están entre el 1 y 5 % de los caudales altos del río utilizados para el diseño. Normalmente estos valores corresponden a dos veces el caudal medio anual. Es importante recordar una vez más que estos valores recomendados son para ríos de Francia y países centroeuropeos, la mayor parte de los ríos españoles son menos caudalosos por lo tanto los porcentajes se deberán aumentar.

En las cuencas que no dispongan de los datos diarios de los caudales se trabajará con los valores existentes, en cualquier caso siempre se dispondrá de caudales medios mensuales.

En numerosos ríos españoles, la situación más frecuente es que el caudal disminuya notoriamente, llegando incluso, en algunos casos, a desaparecer, durante los meses del estío. Los caudales bajos condicionan la entrada del agua a la escala. Más adelante se expondrá, que durante este periodo de tiempo de mayor estiaje, para que siga entrando caudal suficiente y se mantenga activa la escala, es necesario que la cota del vertedero por donde entra el agua dentro de la escala deba estar al mismo nivel o incluso por debajo de la cota de los vertederos de la presa o azud. Esta circunstancia aumenta la probabilidad de aterramiento y taponamiento de los estanques de la escala, por consiguiente este hecho se tendrá que tener en cuenta para intentar evitarlo por medio de la instalación de rejillas, complementados con una continua labor de mantenimiento y de limpieza, la cual siempre es necesaria. Según Larinier (2002) una de las causas más frecuentes de la ineficacia de las escalas es el taponamiento de los vertederos.

Cuando el río está regulado por varias presas, hecho muy frecuente en presas de centrales hidroeléctricas, el régimen de caudales varía mucho con respecto del régimen natural. Si además existe un embalse de otra presa aguas abajo de la de estudio y su lámina de agua alcanza la base de esta barrera, entonces el nivel del agua por debajo de la presa de estudio estará totalmente condicionado por el nivel de este segundo embalse.

En el caso de que la barrera tenga concesiones para algún tipo de aprovechamiento (presa hidroeléctrica, molino, riego, etc.) se tendrán que tener en cuenta en el diseño de la escala.

También se tendrán en cuenta los caudales máximos de avenida porque estos eventos pueden influir en la estabilidad de la escala y la total o parcial anegación de la misma. Es posible evitar la anegación de la escala aumentando la altura de los tabiques exteriores, para ello es necesario conocer la altura de la lámina de agua con los caudales máximos.

2.5. LOCALIZACIÓN DE LA ESCALA.

Se ha decidido incorporar esta importante materia en este capítulo sobre los estudios previos al diseño de la escala porque en la visita al campo, entre otros datos, se deben detallar las superficies que contendrán los planos, incluyendo los lugares donde se deberán instalar el paso o la escala. Esta ubicación está condicionada por las condiciones que se exponen en este apartado y cuya información se empieza a obtener en el momento de la visita a la barrera, por ello parece recomendable incluirla en este capítulo, aun así, otros autores la incluyen en los apartados donde se exponen las condiciones necesarias para la eficacia de la escala.

Si bien todas las recomendaciones que a continuación se exponen son válidas para cualquier tipo de paso, los autores las idearon y aplicaron principalmente para las escalas, porque éstas se han aplicado más frecuentemente (los pasos naturalizados son relativamente modernos), y porque las escalas requieren de mayor estudio y dedicación en cuanto a su diseño e ubicación con el objetivo de conseguir la eficacia, dado que ésta es más exigente que en los pasos, debido a que los caudales de las escalas son notoriamente menores a los de los pasos (como se verá en el capítulo de pasos naturalizados en algunos casos el caudal que atraviesa el paso puede llegar a ser el caudal total del río).

La ubicación de la escala es un factor de importantísima repercusión porque una mala localización del paso puede hacerla ineficaz.

Frecuentemente se asocia la altura de la barrera con la infranqueabilidad de la barrera, si bien este dato es el más importante de la barrera, existen además otras circunstancias que también son importantes de conocer, como por ejemplo las condiciones hidrodinámicas en el pie de la barrera: velocidad, profundidad del agua, configuración de los chorros, aireación, turbulencias, etc., y la relación de estos parámetros con la capacidad de salto y de nado de las especies.

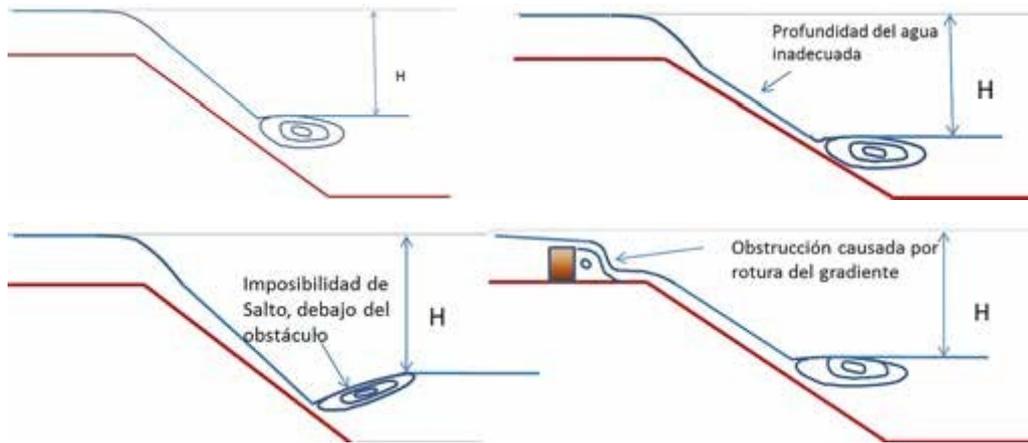


Figura 2.9. Diferentes condiciones hidráulicas a pie de la barrera.

La figura 2.9, muestra algunos problemas para que los peces puedan saltar y remontar la escala generados por las condiciones de flujo y el salto (Larinier, 2002). Se puede apreciar como para un salto de altura H , la posibilidad de que los peces puedan remontarlo depende de las condiciones hidráulicas en el pie de la barrera. De todas las figuras, solo en la primera de ellas el pez podría remontar el salto, en el resto de las figuras por alguna u otra causa existen problemas para que el pez pueda ascender. En la segunda figura, la lámina de agua que vierte por el talud de la barrera tiene poca profundidad. En la tercera figura se forman unos remolinos que impiden que el pez pueda saltar. En la última figura si bien el pez podría remontar hasta la parte superior de la barrera la existencia de un obstáculo impide remontarla por completo.

Para garantizar la eficacia de la escalas es imprescindible que el pez encuentre y pueda entrar al primer estanque; por eso la ubicación de la entrada de la escala es un factor primordial. Normalmente, la entrada de la escala es pequeña en comparación con la dimensión de la barrera, como también suele ser pequeña la fracción del caudal encauzado a la escala en comparación con el caudal total del río. Por todo esto, es muy importante conseguir la atracción de los peces hacia la entrada de la escala.

La atracción del pez hacia la entrada de la escala está muy vinculada a la ubicación de la escala en relación a la barrera y particularmente a la localización de la entrada y las condiciones hidrodinámicas en las cercanías de la entrada. La entrada no puede estar “enmascarada” por las turbulencias provenientes de la turbinas y por el aliviadero, tampoco debe de estar en zonas con recirculaciones ni en zonas con aguas quietas.

El problema de la atracción de la escala depende de cada especie considerada. Con las especies diádromas es necesario que la atracción se realice a todos los ejemplares o al mayor número posible de éstos, y que además los migradores superen el obstáculo, *sin retraso*.

Para las especies de ciprínidos y truchas, en algunos casos podría ser suficiente, que se restablezca la continuidad longitudinal en una longitud del río que contenga todos los hábitats

necesarios para el ciclo de la vida; de todas las maneras esta situación considerada como admisible no es la óptima; siempre será mejor la situación en que exista plena continuidad en el río.

La comunicación entre aguas arriba y aguas abajo evita el aislamiento de la población piscícola.

El pez debe encontrarse relativamente confortable dentro de la escala (bajas velocidades y bajo nivel de turbulencia).

La observación del comportamiento de los peces al acercarse a la barrera e intentar remontarla, aporta información del lugar donde se tiene que ubicar la entrada del paso o de la escala. En el caso de que se vaya a realizar un paso de peces en una barrera donde los peces han desaparecido, el comportamiento de los peces solo es suposible, y por lo tanto la experiencia es fundamental.

En el caso de una escala, la ubicación situada en la orilla del río es preferible a la ubicación en la mitad de la barrera (especialmente para salmónidos y sábalos) porque los migradores tienden a situarse al borde más que en el centro del río. Este comportamiento es más acentuado cuando se producen caudales altos y por lo tanto las velocidades son menores en las orillas.

Generalmente, el pez tiende a viajar aguas arriba tanto como sea posible, hasta que se les impide pasar por la existencia de un salto o de velocidades altas además de turbulencias extremas.

Si la barrera está en ángulo respecto a la dirección de la corriente, entonces la ubicación y disposición adecuada es como se muestra en la siguiente figura (Larinier 2002).

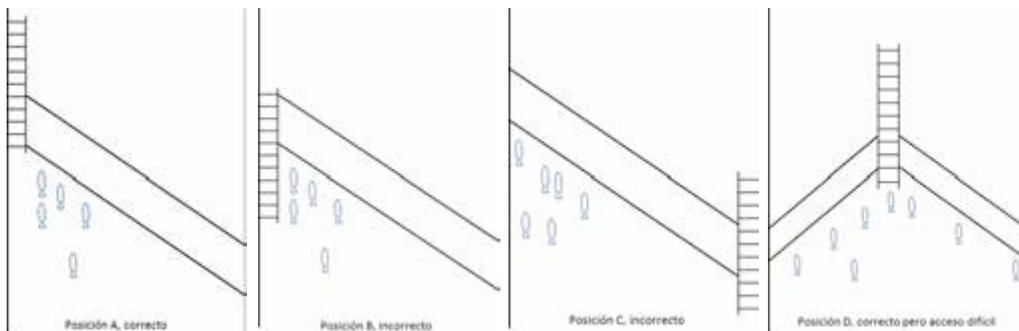


Figura 2.10. Distintas ubicaciones de la entrada a la escala en barreras oblicuas..

En la figura 2.10, las posiciones B y C son incorrectas. En el caso de la posición B la entrada de la escala está demasiado alejada del salto de agua, la posición C está alejada de la parte interior de la barrera. En el caso de la posición D es correcta y desde el punto de vista biológico es la más correcta, pero el acceso y mantenimiento son dificultosos, la posición A es correcta y de fácil acceso.

En el caso de que la barrera esté situada perpendicularmente al curso de agua, la escala debe colocarse en uno de los dos lados. Se debe tener en cuenta las posibles restricciones, incluyendo el caudal de la escala, la topografía, el lecho inmediatamente aguas abajo de la barrera, la presencia de pozas y el flujo predominante del canal. En el caso de que la barrera sea muy ancha es mejor construir dos escalas.

Puede ser recomendable la modificación de la morfología del lecho del río aguas abajo de la obstrucción para conseguir dirigir el pez a la entrada de la escala. Por ejemplo la construcción de una escollera en la parte de la barrera donde no se encuentra la escala de peces consigue formar unos “canales”, que dirigen al pez hacia la entrada de la escala.

No se debe situar la entrada de la escala o paso de peces demasiado alejada de la barrera, como a veces ocurre en los pasos naturalizados. En los casos en que se haya incurrido en este error (o haya sido inevitable), lo que se puede hacer para compensar esta situación negativa es incrementar el flujo que atraviesa el paso lo máximo posible, especialmente en el periodo de reproducción.

En el caso de las centrales hidroeléctricas, los peces migradores tienden a ser atraídos hacia los tubos de aspiración de las turbinas por donde sale el caudal. Por consiguiente, la entrada del paso o escala debe situarse adyacentemente a la central hidroeléctrica, preferiblemente en la orilla del río.

La entrada del pez debe estar localizada en la zona donde los peces se concentran aguas abajo del obstáculo. Por ello es muy importante la observación del comportamiento de los peces. Siempre que sea posible cuando los ríos son anchos y grandes, no debe posicionarse en el centro del río, o demasiado lejos del lugar de caída del agua en la barrera.

La entrada al paso o escala no debe estar dentro de zonas de recirculación, porque en éstas el pez puede quedar atrapado. Si este es el caso entonces las zonas de recirculaciones deben quedar suprimidas por medio de escolleras de protección o por la construcción de espigones, tal y como se muestran en las figura 2.11., y 2.12.

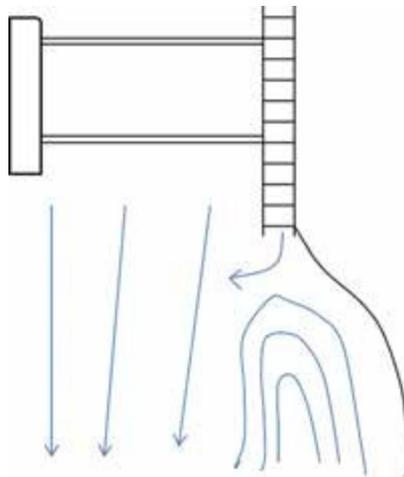


Figura 2.11. Entrada del paso o escala en zona con flujos inadecuados de recirculaciones o zonas sin velocidad.

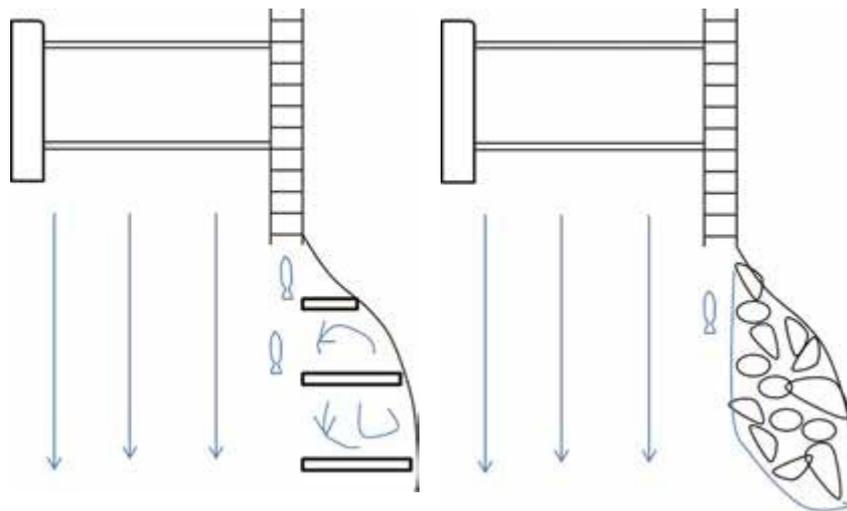


Figura 2.12. Actuaciones para mejorar las condiciones hidráulicas en la entrada de la escala.

2.6. FACTORES BIOLÓGICOS CONSIDERADOS EN LOS PASOS DE PECES.

Evidentemente, como la eficacia de cualquier paso consiste en conseguir que lo remontan el mayor número posible de peces, con la mayor variabilidad de tamaños, el mayor número de especies y durante el mayor periodo de tiempo posible, se comprende que sea necesario tener en cuenta las características biológicas (morfológicas, fisiológicas, ecológicas y etológicas) de estos peces. En este apartado expondremos los aspectos biológicos de los peces que más influyen en la elección, diseño y cálculo de los pasos y escalas de peces.

Si bien la finalidad de las escalas o pasos de peces es conseguir que los peces puedan remontar las barreras, también se debe tener en consideración la posibilidad de conseguir la transitabilidad de otros organismos de la biocenosis del ecosistema fluvial, tales como otros vertebrados (anfibios y reptiles), y también invertebrados, por tanto, en la medida de lo posible se estudiarían los aspectos biológicos de estos animales para intentar mejorar su situación.

2.6.1. Migración de los peces.

En mayor o menor grado todas las especies de peces realizan movimientos prerreproductivos en los ríos. En la mayor parte de los peces, la migración reproductiva es ascendente. Las excepciones son las especies catadromas como la anguila (*Anguilla anguilla*). La migración ascendente está relacionada con la presencia de aguas más claras y oxigenadas y la existencia de gravillas que formen frezaderos, paliar la deriva por la acción continua de la corriente a la que están sometidos los huevos, larvas, alevines y peces adultos, y alcanzar los frezaderos. En las especies bentónicas los movimientos prerreproductivos se realizan a pequeña escala. Aunque la principal causa de migración de los peces es la reproducción, también se llevan a cabo otras migraciones para conseguir alimentos, refugio, otros recursos o para evitar situaciones adversas tales como contaminación, turbulencias, etc.

Las distancias que pueden recorrer los peces en los cursos de agua dulce pueden llegar a ser grandes. Así por ejemplo en el río Danubio el salmón del Danubio (*Hucho hucho*), y los esturiones (*Acipenser gueldenstaedti*, *Acipenser stellatus*), Alosas (*Alosa sp*) puede recorrer más de 300 kilómetros. En el mismo río Danubio longitudes comprendidas entre 30 y 300 km son recorridas por el barbo (*Barbus barbus*), boga (*Chodrostoma nasus*) y distancias menores a 30 km por muchas más especies.

Los movimientos migratorios pueden estar localizados en el mar, en las aguas dulces o entre el río y el mar.

Los peces se clasifican según el tipo de migración en tres grandes grupos (Elvira *et al* 1998):

1. Diadromos. Cuando el movimiento se realiza entre el mar y el agua dulce. A su vez se subdividen en tres grupos.

1.1. Anadromos. Los peces anádromos suelen estar la mayor parte de su vida en el mar y entran al río para reproducirse (potamotocos), es el caso del salmón (*Salmon salar*) Alosa (*Alosa alosa*) etc.

1.2. Catadromos. Se reproducen en el mar (talasotocos) y asciende a los ríos para realizar su crecimiento y desarrollo, es el caso típico de la anguila (*Anguilla Anguilla*).

1.3. Anfidromos. Son los peces que se mueven entre el mar y las agua dulces o viceversa, pero no por causas de reproducción, como por ejemplo los mújoles o lisas.

2. Potamodromos.

Los peces potamodromos son peces cuyas migraciones se realizan estrictamente en aguas dulces, por ejemplo, la trucha común (*Salmo truta*).

Los peces anadromos y potamodromos realizan migraciones prerreproductivas ascendentes por los ríos para alcanzar las zonas de reproducción. Los peces catadromos realizan la migración postreproductiva en la búsqueda de alimentos y refugio en aguas dulces. Durante la migración de subida los peces deberán vencer la corriente lo cual implica un gran desgaste energético, en cambio la migración de bajada, postreproductiva en los peces anadromos y potamodromos, y reproductiva en los peces catamodromos, pueden hacerse por natación activa o por deriva, dejándose llevar por la corriente.

Los clasificación de los peces españoles según la migración para la reproducción es (Elvira B. *et al* 1998).

Anadromos.

Familia petromyzontidae.

Lamprea de río.

Lamprea marina

Lampetra fluviatilis.

Petromyzon marinus.

Familia Acipenseridae.	
Esturion	<i>Acipenser sturio.</i>
Familia Clupeidae.	
Sábalo	<i>Alosa alosa.</i>
Saboga	<i>Alosa fallax.</i>
Familia Salmonidae.	
Salmón	<i>Salmon salar.</i>
Catadromos.	
Familia Anguillidae	
Anguila	<i>Anguilla anguilla.</i>
Anfidromos.	
Familia Atherinidae.	
Pejerrey	<i>Atherina boyeri.</i>
Familia Serranidae.	
Lubina	<i>Dicentrarchus labrax.</i>
Familia Mugilidae.	
Mújoles o lisas	
Familia Pleuronectidae.	
Platija	<i>Platichthys flesus.</i>
Potamodromos.	
Familia Salmonidae.	
Trucha común.	<i>Salmo trutta.</i>
Familia Cyprinidae.	
Barbos.	<i>Luciobarbus spp.</i>
Bogas y madrillas	<i>Chondrostoma spp.</i>
Otras especies.	

2.6.2. Velocidades de nado de los peces.

La capacidad de nado y la velocidad que pueden desarrollar los peces son características importantes en el diseño de los pasos y escalas. Se comprende que a mayor capacidad natatoria la escala podrá realizarse con mayores desniveles entre estanques y velocidades más grandes, lo cual permite un diseño más versátil y una construcción de menor tamaño. Por otra parte, la altura de la barrera será infranqueable para una especie o para un tamaño de pez justamente en función de la capacidad de salto del migrador, por consiguiente para resolver esta cuestión, también es necesario saber la capacidad de nado de los peces.

Se pueden distinguir varios niveles de actividad de nado según el uso de diferentes tipos de músculos (Larinier 2002):

- **Actividad de crucero.** La actividad se puede mantener durante horas sin causar un cambio fisiológico en el organismo, es un esfuerzo aeróbico originado por los “músculos rojos”.

- **Actividad de esfuerzo.** Requiere un intenso y esfuerzo sostenido si bien no puede ser mantenido durante mucho tiempo (desde pocos segundos hasta algunas decenas, dependiendo de la especie del pez, de la longitud, y de la temperatura del agua). Este nivel de actividad está asociado con el extremo de aceleración y salto, o una actividad de corta duración. Prácticamente toda la potencia muscular es usada anaeróticamente (en el músculo blanco se transforma el glucógeno muscular en forma de ácido láctico).

- **Actividad sostenida.** Esta actividad puede ser mantenida por varios minutos, pero cansándose el pez. Cuanto mayor sea el esfuerzo mayormente serán requeridos los mecanismos anaeróuticos.

Las velocidades que pueden desarrollar los peces se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Velocidad sostenida.** Es la mayor velocidad que puede mantenerse aeróticamente, esta velocidad se puede mantener durante horas.

- **Velocidad prolongada.** Es la velocidad prolongada y consiste en una velocidad moderada que requiere energía anaeróutica (20 s- 220 min).

- **Velocidad crítica.** Es una categoría especial de velocidad prolongada. Es la velocidad de natación sostenida que un pez puede mantener *hasta llegar a la fatiga* durante un tiempo determinado.

- **Velocidad de explosión.** Es la velocidad más elevada y exclusivamente anaeróutica (< 20 s).

Se ha demostrado experimentalmente que la distancia que un pez puede alcanzar depende de las oscilaciones de propulsión que él puede realizar. De esta manera se puede relacionar la velocidad V que el pez puede desarrollar dependiendo del número de ondulaciones por segundo que realiza el pez. Las experiencias realizadas muestran que la distancia "A" que el pez realiza en cada ondulación del cuerpo, puede variar entre 0,6 y 0,8 veces su longitud (L) (Wardle, 1975):

$$V = A f$$

Donde f , es la frecuencia de ondulaciones por segundo que el pez puede realizar, y A es la distancia (m), la velocidad se obtiene en m/s.

Por lo tanto la máxima velocidad de nado es una función de la máxima frecuencia de ondulaciones de la aleta caudal. Esta máxima frecuencia está limitada por el tiempo "t" mínimo entre dos contracciones de los músculos paravertebrales que aseguran la propulsión del pez. Wardle (1975) tomo como valor medio de "A" (Distancia que recorre el pez por cada ondulación) el valor de 0,7 m, expresó la velocidad como:

$$V = 0,7 L/2t$$

Dónde:

V, es la velocidad en m/s.

L, es la longitud del pez en m.

t, es el tiempo entre dos contracciones de los músculos paravertebrales.

Los experimentos realizados por Wardle (1975) concluyen en las siguientes afirmaciones:

- El tiempo de separación entre dos sucesivas contracciones musculares es pequeño en peces pequeños.

- La contracción del musculo blanco (el que provoca el esfuerzo anaeróbico) es muy sensible a la temperatura.

- El tiempo mínimo entre dos contracciones decrece con el incremento de temperatura.

En cualquier caso, la máxima velocidad depende de la longitud del pez y de la temperatura. La resistencia depende de la reserva de glucógeno en el músculo; esta reserva es usada tan pronto como el pez excede su velocidad de crucero.

Experimentos realizados en Gran Bretaña (Wardle, 1980; Zhou, 1982; Beach, 1984) aportan expresiones empíricas que relacionan la velocidad de nado, resistencia, temperatura, tamaño y morfología del pez. Beach (1984) consiguió configurar unas gráficas a partir de las ecuaciones y experiencias realizadas, en las que se relacionan la velocidad máxima y la resistencia para diferentes temperaturas y longitudes.

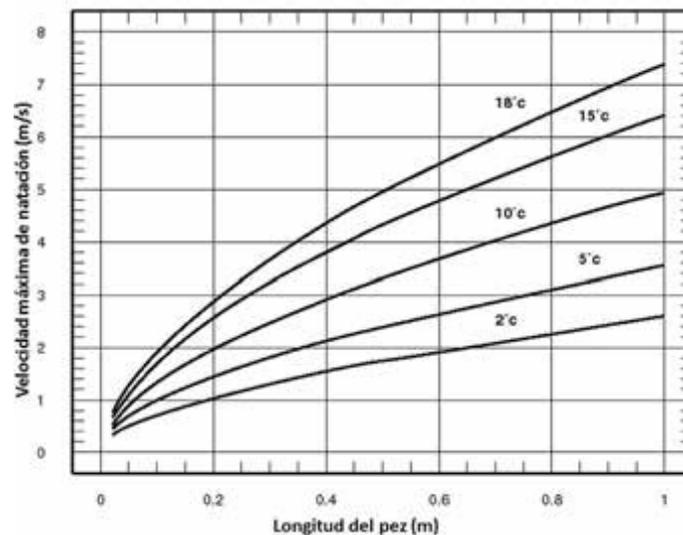


Figura 2.13 Gráfico de la velocidad máxima del pez según la longitud (Beach 1984).

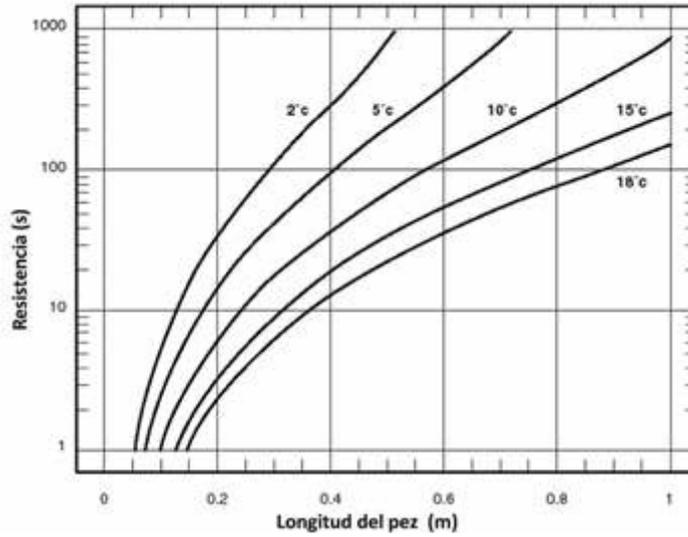


Figura 2.14. Gráfico de la resistencia (s) en función de la longitud del pez (m)(Beach 1984)

En la figura 2.13., se muestra la gráfica que relaciona la velocidad de nado relacionada con la longitud del pez y la temperatura para salmónidos. En la figura 2.14 se muestra la gráfica que relaciona resistencia de la máxima velocidad del pez en segundos en función de la longitud del pez para distintas temperaturas. (Beach, 1984).

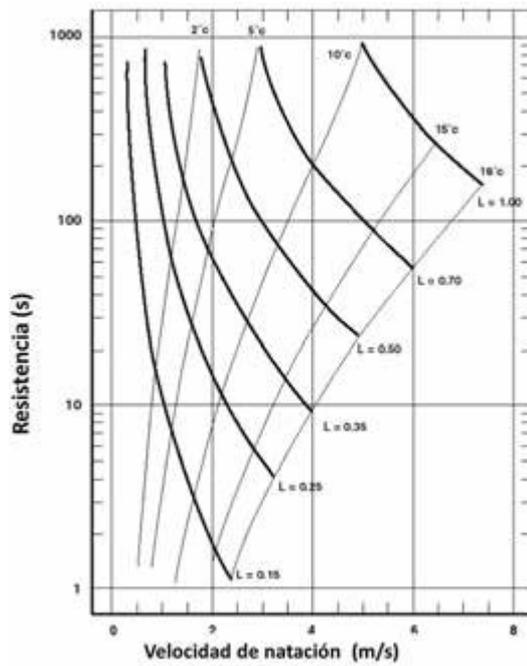


Figura 2.15. Gráfico de la Resistencia en función de la velocidad (Beach 1984).

La figura 2.15, muestra la relación de la resistencia en segundos relacionadas con la velocidad de natación para distintas longitudes del pez (salmónidos) y para distintas temperaturas.

Es posible observar la gran variedad de velocidades dependiendo de la temperatura y como el incremento de esta produce un gran aumento de aquella.

Los resultados de las investigaciones de Bell (1986) sobre las máximas velocidades posibles con condiciones favorables de temperatura muestran datos de 6 a 8 m/s para el salmón, 3 a 4 m/s para la trucha y 4 a 5 m/s para el sábalo.

Videler (1993) propone una fórmula basada en la compilación de los resultados experimentales obtenidos para peces de talla menor a 50 cm ($L < 0,5$ m). En dicha ecuación se obtiene la velocidad (m/s) en función de la longitud L (m) del pez (si bien presenta el inconveniente de que no tiene en cuenta la temperatura).

$$V_{\max} = 0,4 + 7,4 L$$

Aplicando esta ecuación para algunos valores de la longitud, se obtienen las velocidades estimadas.

Tabla 2.2. Velocidad máxima según Videler (1993).

<i>Longitud (m)</i>	<i>Velocidad (m/s)</i>
0,20	1,88
0,25	2,25
0,30	2,62
0,35	2,99
0,40	3,36
0,45	3,73
0,50	4,10

Debe hacerse notar que para un pez y una longitud determinada, un incremento de temperatura resulta una disminución significativa de resistencia. Esta disminución de la resistencia es debida al hecho de que con una temperatura alta puede desarrollar una velocidad alta, y consecuentemente un rápido agotamiento de las reservas de glucógeno en el músculo y por lo tanto una disminución de la resistencia.

La máxima velocidad de crucero (máxima velocidad en la cual el pez puede nadar continuamente sin mostrar signos de fatiga, también se asemeja a la velocidad sostenida) se incrementa rápidamente con el tamaño del pez. Videler (1993) propone la siguiente ecuación para peces menores a 0,55 m ($L < 0.55$ m), tomando la velocidad crucero en función de la longitud del cuerpo L(m).

$$V_{cr} = 0,15 + 2,4 L$$

Tabla 2.3. Velocidad de crucero según Videler (1993).

Longitud (m)	Velocidad (m/s)
0,20	0,63
0,25	0,75
0,30	0,87
0,35	0,99
0,40	1,11
0,45	1,23
0,50	1,35

También es válida la expresión:

$$V_{cr} = 2,3 L^{0,8}$$

La máxima velocidad de crucero para el salmón está comprendida entre 1,7 y 2,5 m/s, para la trucha es de 0,60 a 1,3 m/s y para ejemplares de salmón de 0,15 a 0,20 m de longitud la velocidad fluctúa entre los valores de 0,5 a 0,6 m/s.

La máxima distancia que pueden alcanzar los peces con una velocidad del agua "U" (m/s) es (Beach; 1984):

$$D = (V-U) T.$$

Dónde: D es la distancia en m, T es la resistencia en segundos, V es la velocidad del pez (m/s).

Esta expresión, conjuntamente con las ecuaciones, gráficos y demás datos aportados puede ser usadas para determinar la máxima distancia que puede cubrir los peces salmónidos para una distancia dada y expresada gráficamente tal y como lo han llevado a cabo Ziemer (1961), Evans y Johnston (1980).

Todos estos datos son útiles para estimar el grado de infranqueabilidad, es decir para qué peces y en qué circunstancias una barrera de pequeño tamaño es infranqueable.

2.6.3. Capacidad de salto.

La capacidad de salto que puede tener un pez está en función de la velocidad máxima que puede desarrollar; cuanta más velocidad desarrolle, mayor altura podrá ascender. Los salmónidos y otras especies son capaces de saltar obstáculos, por lo tanto el conocimiento de la capacidad de salto de cada especie relacionado con el tamaño es importante porque así es posible determinar las alturas de barreras que pueden ser remontadas por estos peces. Debe tenerse en cuenta, que una vez que el pez alcance la lámina de agua para poder seguir remontando el río tiene que vencer la velocidad del agua en este punto. Por lo tanto el esfuerzo no es solo el del salto, sino que además inmediatamente después del salto tendrá que nadar con velocidad superior a la del río en ese punto.

El movimiento del salto de un pez se puede comparar con la trayectoria de un proyectil.

La ecuación de una trayectoria viene expresada por la ecuación:

$$X = (v_0 \cos \alpha)t$$

$$Y = (v_0 \sin \alpha)t - 0,5gt^2$$

Donde X e Y son las distancias horizontal y vertical del proyectil (en este caso del pez), V_0 es la velocidad inicial, α es el ángulo de incidencia con el plano horizontal, g es la aceleración de la gravedad ($9,8 \text{ m/s}^2$). La trayectoria del pez es parabólica, la máxima altura alcanzada por el pez depende de su velocidad inicial y del ángulo del salto.

$$Y_{\max} = (v_0 \sin \alpha)^2 / 2g$$

La distancia horizontal corresponde a la máxima distancia X_{\max} obtenida por la expresión:

$$X_{\max} = v^2 \cos \alpha \sin \alpha / g$$

En la figura 2.16., se muestra las alturas que pueden saltar un salmón con dos ángulos de salto con respecto a la superficie del agua y en función de la temperatura (Power y Osborn, 1985).

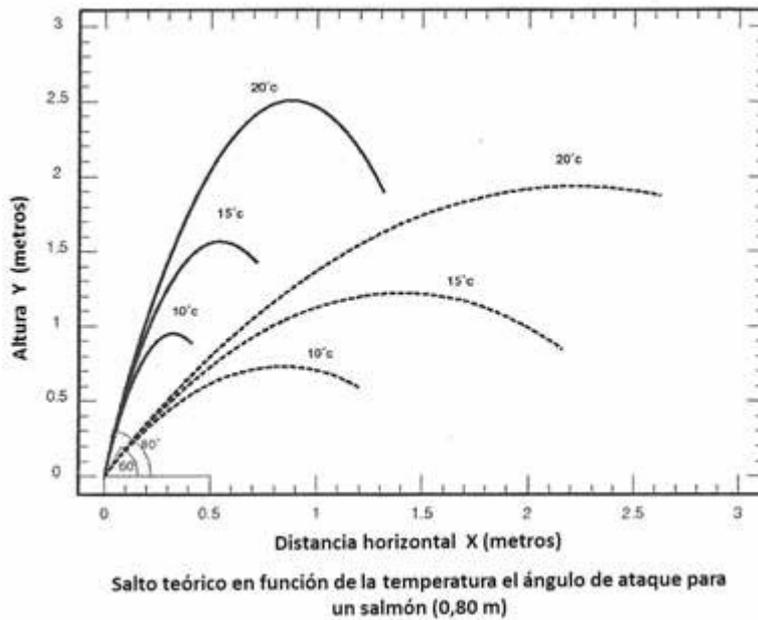


Figura 2.16. Curvas del salto teórico de un salmón (0,80 m longitud).

En el caso de que los peces tengan gran longitud, se debe de tener en cuenta que éstos continúan moviendo la aleta caudal hasta que abandonan totalmente el agua, lo cual aumenta la altura total de salto.

2.6.4. Estudio del comportamiento de nado de tres especies piscícolas españolas realizado por el CEDEX.

Por todo lo anteriormente expuesto de las investigaciones y experiencias realizadas, se aprecia que se han estudiado los salmónidos y otros peces anádromos (sábalo y saboga); sin embargo no se han estudiado suficientemente las especies de ciprínidos y de otras familias, que aun siendo mayormente peces potamodromos sí que necesitan migrar, para completar su ciclo reproductivo, así por ejemplo se ha comprobado que los barbos pueden desplazarse hasta 40 km. Bastantes peces como la trucha, el salmón, el barbo, la boga etc., necesitan frezaderos con una granulometría de gravas y gravillas, que a veces no existe en los tramos bajos y medios de los ríos donde suelen predominar los lechos limosos. Por esta causa los peces ascienden a tramos con lechos de gravillas, para alcanzar los cursos altos del río o los de sus afluentes.

En general, los peces ciprínidos están menos estudiados que los salmónidos. Este problema se acentúa en el caso de la Península Ibérica porque al estar asilada hidrogeográficamente del resto de Europa, existen bastantes endemismos y variedades genéticas, lo cual acentúa el desconocimiento de la capacidad de nado de los ciprínidos ibéricos.

Justamente para paliar en parte la falta de datos de las velocidades y condiciones de nado de los peces ciprínidos, el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos y Experimentación y Obras Públicas (CEDEX) de España ha realizado investigaciones experimentales con el objetivo de obtener datos de la velocidad, altura, distancia, etc. y el comportamiento de las siguientes especies de peces:

- trucha (*Salmon trutta*).
- boga común (*Pseudochodrostoma polilepis*).
- barbo común (*Lucibarbus bocagei*).

Los ensayos se realizaron en un modelo físico de escala de hendidura verticales (escala 1:1). El seguimiento de los peces se realizó con la técnica PIT tag, consistente en la introducción de un radiotransmisores del tipo “Transpondedor Integrado Pasivo” (PIT tags) consistente en un microchip de 11 mm (Allflex, modelo FDX-B) encapsulado insertado en la cavidad del pez con una jeringuilla activado por un emisor lector, transmite un código alfanumérico interpretado por un lector y detectado por las antenas situadas en la escala de tal forma que es posible saber el recorrido que realiza el pez durante todo el tiempo que se encuentre en la escala.

Algunas de las conclusiones obtenidas fueron (Lara *et al*, 2011):

- La especie y el tamaño de los ejemplares influye en su capacidad de ascenso a lo largo de la escala. Las bogas comunes suben en menor proporción que las truchas y los barbos. Una de las causas de este menor ascenso es debido a su menor tamaño con respecto a los ejemplares de las otras dos especies.

- El comportamiento de los peces en la escala es muy distinto al que se da en los canales de ensayo o cámaras y tuberías de natación, que habitualmente son utilizados para la obtención de sus capacidades natatorias. Gran parte del tiempo que utilizan los peces para ascender por la escala lo utilizan para estacionarse en las zonas de recirculación del agua en las paredes de los estanques, siendo en estas partes donde el agua lleva menor velocidad.

- El paso por la hendidura, es donde se dan las mayores velocidades del agua en la escala. En esta sección de pasos, los criterios basados en la velocidad crítica de natación (Peake, 2008) pueden aplicarse al diseño de una escala de hendidura vertical, aunque deben acompañarse de otros criterios que tengan en cuenta la fatiga del pez al ir ascendiendo la escala.

- Existen diferencias de resultados en el número de peces que ascienden la escala para dos caudales (100 y 250 l/s), ascendiendo el mayor número de ellos con el caudal inferior.

Con todo lo anteriormente expuesto, se aprecia que existen datos suficientes para poder conocer la capacidad de nado en los peces salmónidos, pero todavía es insuficiente para peces ciprínidos, que si bien se han comenzado a estudiar, han sido con pocas especies, por lo tanto estas investigaciones deberían extenderse a otras especies y aumentar las experiencias sobre las especies de ciprínidos estudiados..

2.7. BIBLIOGRAFIA.

AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA, 2006. *Protocolo HIDRI Protocolo para la valoración de la calidad Hidromorfológica de los Ríos*, 131 pp.

BEACH M.H., 1984. Fish pass design - criteria for the design and approval of fish passes and other structures to facilitate the passage of migratory fishes in rivers. *Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Lowestoft, Fish. Res. Tech. Rep.* 78, 45 p.

BELL M.C., 1986. *Fisheries handbook of engineering requirements and biological criteria. Fish. Eng. Res. Prog.*, U.S. Army Corps of Eng., North Pacific Div., Portland, Oregon, 290 p.

ELVIRA B., NICOLA G.G., ALMODOVAR A., (1998). *Impacto de las obras Hidráulicas en la ictiofauna*. Ed. Organismos Autónomos Parques Nacionales. Madrid.

EVANS W. A., JOHNSTON F.B., 1980. *Fish migration an fish passage: a practical guide to solving fish passage problem*. USDA FOREST Serv., Región 5, 43 p.

GARCÍA NÁJERA J.M., 1953. *Esclusa salmonera automática*. Ed. I.F.I.E. Madrid.

LARA A., ARAMBURU E., MORCILLO A., CASTILLO M., GARCIA DE JALÓN D., GARCIA R., TORRENT B., 2011. La restauración de la continuidad fluvial para las especies piscícolas migradoras. Diferencias observadas en tres especies analizadas en una escala de hendidura vertical. *1 Congreso Ibérico de restauración fluvial*. Ed. Cirof. León. Pp 444- 451.

LARINIER M., 2002. Fishways: biological basis, design criteria and monitoring. *Bulletin Français de la pêche et de la protection des milieux aquatiques*. N° 364.

MAGRAMA, (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente), 2015. *Protocolo de caracterización Hidromorfológica de masas de agua en la categoría de ríos*. Madrid

PEAKE S. J., 2008. Swimming performance and behavior of fish species endemic to Newfoundland and Labrador: A literature review for the purpose of establishing design and water velocity criteria for fishways and culverts. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 2843, v52 p.

POWER P., OSBORN J., 1985. *Analysis of barriers to upstream fish migration*. U.S. Dept. of Energy, Bonneville Power Adm. Div. of Fish and Wildlife, Final Project Rep., 120 p.

REISER D. W. y R. T. PEACOCK. 1985. *A technique for assessing upstream fish passage problems at small-scale hydropower developments*. Page 423-432 In F.W. Olson, R.G. White, and R.H. Hamre, (eds.). Symposium on small hydropower and fisheries. American Fisheries Society, Western Division, Bethesda, Maryland

VIDELER J., 1993. Fish swimming, Chapman & Hall., *Fish and fisheries series 10*, 260 p.

WARDLE C.S., 1975. Limit of fish swimming speed. *Nature*, London, 225: 725-727.

WARDLE C.S., 1980. Effects of temperature on the maximum swimming speed of fishes. pp. 519-531. In "Environmental Physiology of Fishes", *Plenum Press (ed.)*, New York and London, 723 p.

ZHOU Y., 1982. *The swimming speed of fish in towed gears, a reexamination of the principles*. Dept. of Agriculture and Fisheries for Scotland, Work. Pap. 4, 55 p..

ZIEMER G.L., 1961. *The swimming speed of fish in towed gears, a reexamination of the principles*. Dept. of Agriculture and Fisheries for Scotland, Work. Pap. 4, 55 p.

3. OTRAS ACTUACIONES DISTINTAS DE LOS PASOS Y ESCALAS

Para solucionar el problema de la imposibilidad de paso de los peces por la presencia de barreras transversales en los ríos, existen varias posibles actuaciones que consiguen recuperar la transitabilidad de la barrera.

Además de la construcción de las escalas, pasos y ascensores donde se mantiene la existencia de la barrera, de los que se tratarán en los próximos capítulos, se puede demoler la barrera o también capturar y transportar a los peces por encima a la parte superior de la barrera. En el presente capítulo se ha considerado oportuno tratar escuetamente estas actuaciones que resuelven totalmente el problema en el caso de la demolición, o por lo menos paliarlo, como es el caso de la captura y transporte de los peces.

3.1. DEMOLICIÓN.

En los ríos españoles existen numerosas presas y azudes. Algunas de estas infraestructuras están abandonadas o en desuso, por lo tanto en estos casos, si estas barreras que estén en desuso o abandonadas y no exista algún impedimento administrativo o legal, la actuación más conveniente y efectiva es la demolición total o parcial de esta barrera con el fin de restablecer la condiciones primitivas del río en el tramo correspondiente (González del Tánago y García de Jalón, 2007).

Actualmente en España existen 1.231 obstáculos fluviales clasificados como “grandes presas”, es decir, con una altura mayor de 10 m, además de una longitud de coronación superior a 500 m, una capacidad de embalse superior a 1 hm³ y una capacidad de desagüe superior a 2.000 m³/s. Según el convenio del Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses, España es el país del mundo con más grandes presas per cápita (Alonso *et al*, 2009). Se ha estimado que el número de pequeñas presas es aproximadamente de 16.000. También hay que contabilizar otros obstáculos cuyo número es aproximadamente de 4.000. El porcentaje de azudes abandonado o sin uso es del 35,75 % (Sanz *et al*, 2012). Seguramente estos porcentajes pueden ser superiores si se hiciera un estudio más detallado sobre el uso de los azudes.

La demolición de la barrera es la mejor actuación para conseguir que toda la biocenosis pueda desplazarse libremente por los ríos. No solamente la biocenosis del río recuperará la libre circulación sino que también los caudales líquidos volverán a tener su régimen natural y los caudales sólidos con los importantes sedimentos que contienen volverán a descender por el río. Aguas arriba de la barrera el río volverá a tener su hidromorfología original. Está es una ventaja exclusiva de la demolición.

Si la construcción de una obra que produce una barrera ocasiona graves pérdidas ambientales, la eliminación de la misma conseguirá recuperar gran parte de los valores perdidos en su día.

La demolición ha sido utilizada en bastantes países, así por ejemplo en Estados Unidos desde 1912 hasta 2006 se han eliminado 750 presas, principalmente por motivos de seguridad y económicos (Brufao, 2006), hoy en día también se valoran los motivos ambientales. En Francia, país pionero en la demolición de obstáculos de la Unión Europea se demolieron en 1998 dos obstáculos en la cuenca del Loira para favorecer la recuperación del salmón atlántico en la zona (Alonso *et al*, 2009)

La directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000 (Directiva Marco del Agua, DMA) dicta la recuperación de la continuidad fluvial, para que se consiga la migración piscícola, la continuidad en el transporte de sedimentos y la movilidad de toda la biota (semillas, macro invertebrados, etc.).

El Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, a través de las distintas Confederaciones Hidrográficas, desde el año 2006 está llevando a cabo actuaciones dentro de la Estrategia Nacional de Restauración de Ríos.

En el periodo 2006 hasta 2014 se ha actuado en 311 estructuras transversales, de las cuales 205 son de demolición consiguiendo recuperar la continuidad fluvial en aproximadamente unos 1.000 kilómetros de ríos, las 106 actuaciones corresponden a infraestructuras para el paso de peces (Barquero *et al*, 2015).

Tabla 3.1. Demoliciones en el periodo 2006-2014 (Barquero et al, 2015).

CUENCA HIDROGÁFICA	
Miño-Sil	4
Canta.- Occid.	49
Canta.- Orien.	34
Duero	104
Tajo	13
Segura	1
TOTAL DEMOLICIONES	205

Tabla 3.2. Pasos de peces construidos entre 2006-2014 (Barquera et al, 2015).

CUENCA HIDROGRÁFICA	
Cantábrico- Occidental	7
Duero	80
Guadiana	11
Segura	7
Tajo	1
TOTAL PASOS DE PECES	106

Si bien la mayoría de las estructuras eliminadas son de reducidas dimensiones (menores de 5 metros de altura), algunos de los azudes retirados han tenido un tamaño importante. En estos casos el proceso de retirada debe estar muy bien planificado para evitar posibles afecciones, tanto a la dinámica fluvial como al estado de la masa de agua, y por supuesto con una adecuada participación pública. En todos los casos se deben retirar los restos de la demolición.

3.1.1. Demolición Total.

La demolición total consiste en descomponer la barrera en partes transportables y la posterior extracción y transporte de los restos fuera del río.

Con la demolición total se consigue recuperar el estado original del río antes de la construcción de la barrera.

En principio la retirada de los sedimentos existentes por encima de la barrera se deben retirar.

En los casos en que los sedimentos tengan toxicidad, necesariamente se deberán extraer. En el caso de que los acarreo no sean tóxicos y que su permanencia no implique problemas de aterramientos no deseados aguas abajo ni tampoco en el lugar donde estaban mientras la barrera existía, se puede evaluar la opción de dejarlos “in situ” y que el propio río los arrastre lenta y paulatinamente con el paso del tiempo. Con esta opción el coste económico de la actuación disminuye notoriamente. En la figura 3.1., se muestra la fotografía del resto de la presa de la gotera que ha sido demolido en el río Esgueva en la provincia de (León), es posible apreciar en la misma que se ha mantenido el estribo empotrado en la ladera. Este es un ejemplo de demolición en la que no se han extraído los acarreo. El mismo río irá arrastrando los acarreo aguas abajo del lugar donde están depositados.

La demolición puede realizarse por varios métodos:

- Voladura. La voladura se realiza con explosivos.
- Rotura y extracción. La rotura se hace con elementos de percusión y/o cortantes para posteriormente extraerlos fuera del río

También se puede dar las dos técnicas. Una primera voladura y después se termina la demolición con la rotura de los muros que habían soportado la voladura.

3.1.2. Demolición Parcial.

La demolición parcial consiste en la eliminación de una parte de la barrera para que los peces puedan remontarla.

La eliminación puede consistir en la “apertura de un canal” dentro de la obra de la barrera o también puede ser el rebaje de la altura del umbral de éste hasta valores admisibles por los peces.

En este caso solo se demuele una parte pequeña del obstáculo y así permitir el libre paso tanto del flujo del agua como también el paso de los peces en sus migraciones ascendente y descendente.

Naturalmente, la demolición parcial es más económica que la total. Esto es debido a que, por una parte el volumen de obra de demolición es notoriamente menor y por otra la no extracción de los sedimentos, opción normalmente elegida, también disminuye el coste. El propio río irá transportándolos por debajo de la barrera.

La demolición no solo es una solución para la recuperación del estado natural del río sino que en muchos casos la actuación de la demolición de la obra es más económica que el mantenimiento de la misma.



Figura 3.1. Demolición de la presa de la Gotera en río Esgueva (León).



Figura 3.2. Demolición parcial en un azud del río Órbigo (León).



Figura 3.3. Escala de hendiduras terminado en un capturadero de peces.

3.2. CAPTURA Y TRANSPORTE.

La captura y transporte es también una solución para que el pez pueda alcanzar el tramo superior del río por encima de la barrera.

El método de captura y transporte consiste en coger a los peces aguas abajo de la barrera, normalmente en el periodo de reproducción y transportarlos por medio de camiones, acondicionados a tal efecto, hasta el inicio de la cola del embalse para su posterior suelta.

Los pasos y escalas consiguen permitir al pez alcanzar la lámina superior. Sin embargo si el embalse es grande, situación bastante frecuente, el embalse puede ser un hábitat extraño para el pez y puede que tenga problemas de orientación para alcanzar el tramo superior del río. Con la captura y transporte se evita este problema porque una vez que el pez se encuentra en el camión de transporte, se le conduce hasta el sitio idóneo para su introducción al río.

Los inconvenientes de este método son:

- Se debe realizar todas las temporadas.
- El número de ejemplares capturados suele ser una proporción pequeña del total de individuos, aumentar este porcentaje implica un aumento notorio de los costes.
- En bastantes casos la operación se tendrá que repetir para la migración descendente.

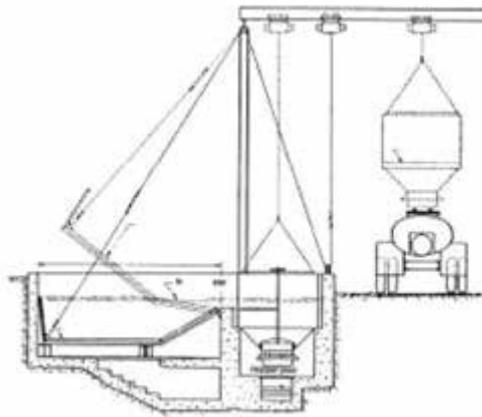


Figura 3.4. Esquema del sistema de captura y transporte.

En la figura 3.4, se muestra el equipo de un sistema de captura y transporte. Los peces se introducen en una jaula-butrón, también los migradores se puede capturar por medio de la pesca eléctrica. Una vez que los peces se encuentran en esta jaula son introducidos en un camión cisterna especialmente equipado para el transporte de peces vivos. Los camiones destinados a este tipo de transporte estarán acondicionados para que en todo momento la temperatura y oxígeno del agua tengan los niveles suficiente para garantizar que el transporte se realiza con seguridad y con cierto grado de “comodidad”.

El río Miño tiene varias presas que impiden el paso de las pequeñas anguilas en su migración hacia la parte alta de la cuenca. Para paliar en parte este problema se están implementando capturas de estos ejemplares para ser posteriormente transportados aguas arriba de las presas. En la figura 3.3, se muestra el capturadero de los peces situado al final de la escala existente en la primera presa del río Miño con que se topan las pequeñas anguilas.

Esta actuación es muy útil para el caso de que existan una serie de barreras en un tramo del río, como es el caso del río Miño, porque con una sola captura se podrá remontar todas las barreras.

La captura y transporte de los peces también es válido para permitir la migración descendente, en este caso se deben capturar a los migradores aguas arriba de la presa. Esta técnica presenta la ventaja de que elimina la mortandad producida en el paso de los peces a través de las turbina.

3.3. BIBLIOGRAFÍA.

ALONSO GONZALEZ C., BAEZA SANZ D., GORTÁZAR RUBIAL J., DE STEFANO L., SCHMIDT G., 2009. Liberando ríos. Propuestas de WWF para el desmantelamiento de presas en España. Ed. WWF España. Madrid.

BARQUERO PEREZ J. P. APARICIO MARTÍN M. FERNANDEZ FREIXEDA S. GARCÍA DÍAZ J. SANCHEZ MARTINEZ F.J. 2015 Pequeñas presas obsoletas demolidas en el marco de la estrategia nacional de restauración de ríos. Aptas II Congreso C.I.R.E.F. Pamplona. 132-141 pp.

BRUFAO P., 2006. *Demolición de presas y otras obras hidráulicas: Herramientas indispensables para la restauración de nuestros ríos y humedales. Informe de AEMS-Ríos con Vida.* www.riosconvida.es.

GONZÁLEZ DEL TÁNAGO M., GARCÍA DE JALÓN D., 2007. Restauración de ríos. Guía metodológica para la elaboración de Proyectos. Ed. Secretaría General Técnica Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.

SANZ-RONDA F.J., MARTÍNEZ DE AZAGRA A., BRAVO CÓRDOBA F.J., GARCÍA VEGA A., NAVARRO HEVIA J., RUÍZ LEGAZPI J., FUENTES PÉREZ J. F., RAMOS GONZÁLEZ N., 2012. Soluciones técnicas para la mejora de la conectividad fluvial ed. *Jornadas técnicas de restauración y voluntariado CH Segura.* Murcia.

4. ESCALAS DE ARTESAS SUCESIVAS.

La escala de estanques o artesas sucesivas es una escala compuesta de una serie de estanques dispuestos uno a continuación del siguiente, por ello el nombre de sucesivos, de tal forma, que la altura total de la barrera queda dividida en pequeños desniveles, admisibles para el mayor número de ejemplares de peces. Por lo tanto, la escala está formada por una serie de pequeños estanques, dispuestos de tal forma que un estanque queda por encima del anterior a una altura correspondiente al desnivel. El paso del agua de una a otra artesa o estanque es por medio de vertederos, por los que también asciende el pez.

Se puede considerar que las primeras escalas construidas también serían una variedad del tipo de artesas sucesivas. Evidentemente, ante el problema de salvar una altura excesivamente grande que los peces no puedan superarla de un solo salto, la solución más inmediata es dividir la altura total en pequeñas alturas admisibles para que los migradores puedan saltarla sin excesiva dificultad. Por ello, las escalas de estanque o de artesas son muy antiguas. En un estudio realizado en Francia en el siglo XIX (Philippe, 1887) revela que en el momento de realizar este estudio, es decir a finales del siglo XIX, en Francia había más de cien escalas de estanques. En general, las escalas de peces existen desde el siglo XIX.

La primera referencia que se tiene de la construcción de una obra que posibilite el acceso de peces migradores aguas arriba de una barrera es del año 1828. Esta escala fue realizada en un río irlandés para permitir el paso de los salmones, evitando con esta construcción el tener que abrir la compuerta de la presa, esta medida fue impuesta por las leyes inglesas (Guallart y Elías, 1913).

Como veremos más adelante, el éxito de esta escala se debe, entre otras causas, a la posibilidad de que la secuencia de artesas que forman la misma se puede realizar en línea recta, quebrada o plegada, por lo tanto al poder plegar las artesas es posible construir estas escalas en superficies reducidas y con topografías adversas.

La escala de artesas sucesivas ha sido estudiada exhaustivamente. Como esta escala está compuesta de estanques con forma geométrica regular, en concreto rectangular, es

más fácil determinar el comportamiento hidráulico del flujo; con ello se consigue, que el descenso del agua sea muy previsible. Con todo ello es posible conseguir con bastante probabilidad la eficacia de la escala en cuanto a velocidades, desniveles y potencias hidráulicas.

4.1. DESCRIPCIÓN DEL ESTANQUE DE LA ESCALA.

En la escala de artesis sucesivas, el primer cálculo que se realizará será determinar el desnivel entre estanques.

4.1.1. Desnivel entre estanques.

Evidentemente, cuanto menor sea el salto del agua entre estanque y estanque, el acceso de los peces será más fácil; si bien un número excesivo de estanques implica mayor longitud de escala lo cual encarece la obra y en muchos casos, donde no hay disponible mucha superficie, origina una posible complicación de diseño; por eso es necesario encontrar el equilibrio entre economía y eficacia.

El cálculo de la velocidad que alcanza el agua al bajar de un estanque al siguiente se realiza con la fórmula de caída libre:

$$v = \sqrt{2g\Delta h}$$

Siendo:

g , la aceleración de la gravedad (9,81 m/s).

Δh , el salto de agua (m).

Para las alturas de 0,15 m, 0,30 m, 0,45 m las velocidades obtenidas son respectivamente 1,7 m/s 2,4 m/s y 3,0 m/s.

La longitud total de la escala está en función de la altura total de la barrera y de la altura de desnivel elegida, evidentemente cuanto mayor sea la altura total de la barrera mayor será la longitud de la escala.

4.1.2. Tipos de flujo dentro del estanque

El flujo atraviesa el estanque de dos maneras posibles (Larinier, 2002).

El primer tipo de flujo es el llamado: “**flujo sumergido**” (*plunging flow*). Este flujo se produce cuando la lámina procedente de aguas arriba se sumerge hacia el fondo. La energía hidráulica es disipada por las turbulencias originadas y en el salto hidráulico producido en la parte inferior de la caída (Figura 4.1).

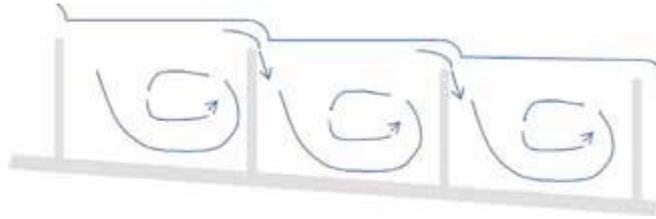


Figura 4.1. Flujo sumergido (plunging flow).

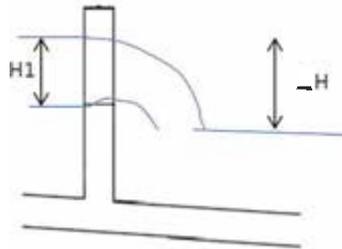


Figura 4.2. Vista de perfil del vertedero para flujo sumergido.

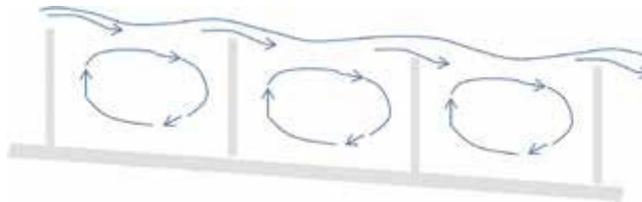


Figura 4.3. Flujo transmitido (streaming flow).

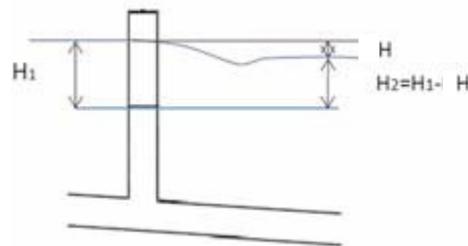


Figura 4.4. Vista del perfil del vertedero con flujo transmitido.

El flujo sumergido se produce cuando el nivel del agua del estanque inferior está por debajo de la cota del vertedero del estanque superior (se observa en la figura 4.2., que $H_1 < Dh$) y como se puede apreciar de la propia definición y de la figura, este tipo de vertido coincide con el flujo sumergido.

En este caso, si el pez atraviesa el vertedero por medio de un salto, lo tiene que realizar desde el estanque inferior al estanque superior. Este tipo de salto normalmente está reservado a los salmónidos. Para este tipo de flujo la altura de desnivel más comúnmente utilizado es alrededor de 0,30 m, siendo el desnivel máximo de 0,60 m para el salmón y la trucha de mar y 0,45 para la trucha. El flujo “plunging” debe ser evitado para escalas de sábalos.

El segundo tipo de flujo se denomina “**flujo transmitido**” (*streaming flow*). En este caso, el chorro de agua que atraviesa los vertederos, normalmente de vertederos semisumergidos o de hendidura, entre estanque y estanque se mantiene en la superficie (Figura 4.3). En el flujo transmitido la energía se disipa por los grandes remolinos producidos en la recirculaciones en sentido descendente.

El “flujo transmitido” (*streaming flow*) se produce cuando la altura del agua comprendida entre la base del vertedero de la artesa anterior hasta la lámina de agua de la siguiente artesa, es decir la altura H_2 de la figura 4.4, que también se puede definir como la diferencia entre la altura total de vertido (H_1) menos la altura de caída libre (Dh), es decir $H_2 = H_1 - Dh$, luego entonces cuando esta altura “ H_2 ” es mayor a 0,5 o 0,6 veces la altura total de vertido (H_1), como hemos dicho anteriormente se produce el flujo transmitido (Lenne, 1990) (Figura 4.4).

El tipo de flujo transmitido se utiliza en pasos de hendidura vertical o con vertederos semisumergidos, con saltos de 0,30-0,40 m para el salmón y la trucha de mar, 0,30 para la trucha y los ciprínidos con mayor capacidad de salto (barbos), de 0,20 a 0,30 para el sábalos (preferiblemente 0,25 m), para el resto de ciprínidos, el lucio y la perca de 0,15 a 0,25 m, teniendo en cuenta que cuanto menor es el tamaño del pez menor debe ser el salto.

La transición entre el flujo sumergido (*plunging flow*) y el flujo transmitido (*streaming flow*) es inestable y está caracterizado por una marcada histéresis.

4.1.3. Dimensionamiento de los estanques

Las dimensiones de los estanques deben de cumplir las siguientes condiciones y recomendaciones recopiladas por Larinier (2002):

1) Volumen de agua en los estanques

El volumen de los estanques debe ser lo suficiente grande para que el flujo no resulte ni demasiado turbulento ni demasiado esponjoso para los peces.



Figura 4.5. Escala de artesas sucesivas de vertedero lateral y orificio de fondo.

El volumen de cada artesa es

$$V = B * L * t_{med}$$

Donde:

V ; es el volumen de la artesa o estanque (m^3).

L ; es la longitud de la artesa, es decir longitud entre dos vertederos (m).

t_{med} ; es el calado medio (m).

B , es la anchura de la artesa en (m).

2) Longitud del estanque (L).

La longitud del estanque debe ser siempre mayor que la anchura de la artesa “B”;

$$L > B.$$

Normalmente, la longitud del depósito “L” es mayor a 2,3 m y menor a 4 m.:

$$2,3 \text{ m} < L < 4 \text{ m}.$$

Los valores más frecuentes están comprendidos entre: 2,5 y 3,5 m.

También por consideraciones biológicas se recomienda que la longitud L sea mayor a tres veces la longitud del pez:

$$L > 3 * L_{pez}.$$

La longitud del depósito “L” también deberá cumplir los siguientes requisitos:

$$\text{La longitud debe cumplir: } 7 C < L < 12 C.$$

Siendo C , algunas de las siguientes características del chorro:

- En los vertederos de tabiques vertientes o vertedero libre corresponde a la altura de la carga de vertido.
- En los vertederos de hendiduras verticales, la anchura de la hendidura
- En los vertederos semisumergidos (o de escotadura lateral), el valor más pequeña entre la anchura del estanque o el desnivel entre las láminas..
- En los pasos de orificios sumergidos, el diámetro o la dimensión más pequeña del orificio.

La longitud “L” del estanque también se relaciona con la anchura del vertedero por medio de la relación:

$$7 < L/b < 11$$

Siendo:

b , es la anchura del vertedero (m).

L, es “la longitud del estanque (m).

3) Anchura del estanque (B).

En cualquier caso la anchura “B” debe ser mayor a 0,5 m.

Normalmente se tiene en cuenta la relación entre B (anchura del estanque) y b anchura del vertedero):

$$4 < B/b < 8$$

Si bien en escalas de vertedero semisumergido esta relación puede disminuir.

4) Profundidad del estanque.

La profundidad mínima depende de cada especie. En el caso de grandes salmones, la profundidad mínima debe ser de 1 m. Para la trucha puede ser suficiente 0,6 m.

En las escalas con flujo sumergido (plunging flow), la profundidad del estanque en el punto inmediatamente por debajo de la caída debe ser como mínimo dos veces la diferencia de alturas entre estanques, y así facilitar el paso a los peces porque en este caso normalmente los peces ascienden al estanque superior por medio de salto.

El calado o profundidad medio de la artesa se calcula por medio de la fórmula:

$$t_{med} = p + h - \frac{\Delta h}{2}$$

Dónde:

t_{med} : es la profundidad media (m).

p, es la altura del tabique del vertedero (m).

Δh , es la altura de vertido libre (m).

h, es la altura de vertido total (m).

También la artesa debe cumplir la condición de “máxima potencia hidráulica disipada” por unidad de volumen. Esta condición consiste en no sobrepasar un umbral máximo de energía hidráulica disipada en el salto entre artesa y artesa. Si la potencia hidráulica fuera grande, se producirían excesivas turbulencias, que podrían desorientar a los peces o exigirles un excesivo esfuerzo para remontar al siguiente estanque. Más adelante, se tratará con más detalle la potencia hidráulica disipada.

Los peces descansan en los estanques después de realizar el salto o paso desde el estanque anterior, para que este descanso sea posible el flujo de agua debe estar algo “tranquila” y por lo tanto las dimensiones de los estanques tendrán que contener el volumen mínimo que produzca la disipación de la máxima potencia hidráulica propia de cada especie.

5) Deflector

Para que el flujo discurra convenientemente por el estanque es necesario añadir un deflector en el tabique separador de estanques y cercano al vertedero. Su situación se puede observar en la figura 4.10.

La longitud del deflector es $c = b - 0,05$ m.
Siendo b la anchura del vertedero (m).

El deflector se sitúa en el lugar que se indica en la figura 4.10., es decir a una distancia igual a la longitud del deflector.

La función del deflector es orientar el flujo saliente hacia el vertedero por el que descenderá al siguiente estanque.

El material utilizado para la construcción de las escalas de artesas sucesivas es el hormigón armado y la mampostería hidráulica. En el caso del hormigón armado, el espesor utilizado para todos los tabiques tanto exteriores como interiores es de 0,30 m. Si bien la normativa vigente del hormigón armado permitiría espesores menores, no es recomendable disminuir el espesor de 0,30 m porque estos muros están sometidos a golpes e inundaciones, un espesor inferior podría afectar al recubrimiento de las armaduras. También, se construye frecuentemente los muros exteriores de mampostería hidráulica y los tabiques separadores de los estanques de hormigón armado, esta distribución favorece la estética de la escala.

4.1.4. Potencia disipada en el estanque por unidad de volumen.

La dificultad del paso para los migradores se incrementa a medida que aumenta la turbulencia y aireación de los estanques. Por este motivo, se debe “medir el grado de turbulencia” que se produce en cada estanque; esta medición se realiza por medio de la cuantificación de la pérdida de energía hidráulica generada en el salto de un estanque al siguiente. Cuando los peces realizan la remonta deben de encontrar el flujo de agua con cierta “tranquilidad”, es decir que no exista excesiva turbulencia, y así poderse orientar. En numerosas investigaciones se ha podido comprobar, que gran parte de los peces, especialmente los más pequeños y con menor capacidad de salto, necesitan descansar; para tal fin es necesario que el agua que se encuentre dentro de los estanques no sufra turbulencias o con zonas de mínima velocidad o incluso recirculaciones (más adelante se profundizará sobre este aspecto).

La energía hidráulica disipada en la caída de un estanque al siguiente se calcula por la expresión:

$$N = \frac{\rho * g * Q * \Delta h}{B * L * t_{med}} [W / m^3]$$

Dónde:

ρ es la densidad del agua (Kg/m³).

g , es la aceleración de la gravedad (m/s²).

Q, es el caudal en m³/s.

Dh, es la altura de vertido libre (m).

B, es la anchura de la artesa (m).

L, es la longitud de la artesa (m).

t_{med}, es la profundidad media (m).

La potencia no debe sobrepasar los siguientes valores establecidos para cada grupo de peces:

- N < 200 W/m³. Salmónidos.
- N < 175 W/m³ ciprínidos con buenas condiciones natatorias.
- N = 100-125 W/m³, para el sábalo y la saboga y resto de ciprínidos.

En escalas cortas de muy pocas artesas se puede aumentar la potencia disipada en 25 o 50 W/m³, incluso en las escalas del tipo prebarreras, Larinier (2002) permite sobrepasar notoriamente estos valores.

Por lo tanto, el volumen mínimo de una artesa debe ser mayor que el volumen mínimo necesario para disipar las potencias anteriormente cifradas.

El diseño del estanque debe evitar el fenómeno de “cortacircuito”. El cortacircuito consiste en el fenómeno por el que el chorro saliente de un vertedero tiene una velocidad grande y llega al estanque inferior sin que haya disipado la suficiente energía cinética, por consiguiente esta energía se transmite al estanque siguiente. Este fenómeno es perjudicial, y se tiene que evitar. La forma de evitarlo es conseguir que el flujo del agua describa trayectorias curvas que ayudan a disipar la energía.

También, se debe evitar que el chorro del agua proveniente del vertedero golpee con demasiada velocidad a los muros de la escala porque puede producir disturbios en el comportamiento de los peces y afectar a la eficacia de la escala. Este fenómeno puede producir que el pez corra el riesgo de lesionarse al saltar o incluso saltar fuera de la escala.

4.2. CLASIFICACIÓN DE LAS ESCALAS DE ARTESAS.

El criterio de la clasificación de las escalas que se expone a continuación está en función del tipo de vertedero utilizado para que el flujo pase de un estanque al siguiente.

4.2.1. Escala de artesas con vertedero en caída libre.

La Escala de artesas con vertedero en caída libre, como su propio nombre indica, tiene un vertedero del tipo de caída libre (tal y como se expone en la figura 4.6).

La ubicación habitual del vertedero es en la parte central del estanque, aunque también es posible ubicarla en otras partes.

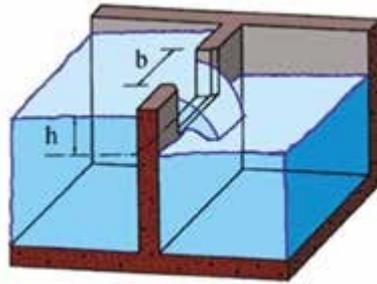


Figura 4.6. Escala de artesas con vertedero en caída libre (Fuente Martínez de Azagra, 1999).

El caudal que atraviesa el vertedero se estima por la siguiente fórmula (Larinier, 2002):

$$Q = C_d * b * \sqrt{2g} * \Delta h^{1,5}$$

Dónde:

Q es el caudal que atraviesa el vertedero (m³/s)

C_d, es el coeficiente del vertedero varía entre 0,38 para vertederos de cresta ancha hasta 0,5, cuando el perfil produce una lámina sin adherencia. El valor más común es 0,4.

g, es la gravedad (9,8 m/s²).

b, es la anchura del vertedero (m).

h, es la altura de vertido (m).

Son varios los inconvenientes de este vertedero:

- Con la variación de altura de vertido, el caudal varía considerablemente y viceversa, lo cual es un inconveniente porque para caudales no excesivamente grandes las alturas de desnivel generadas entre los estanques puede ser excesivas.

- Las variaciones de nivel del río en la parte inferior repercuten sobre el primer estanque, de manera que si la altura es grande dificulta el salto a los peces, si la altura es pequeña se llega a anegar y entonces se pierde la atracción de los peces.

Por estos motivos, este tipo de vertedero se utiliza poco, si bien se puede aplicar en combinación con otros vertederos y en estos casos presenta algunas ventajas.

Las escalas de vertedero libre han sido utilizadas frecuentemente en el pasado. En muchos casos, estas escalas antiguas resultaron ineficaces por distintos motivos, entre otros por el expuesto en el párrafo anterior y también el hecho de que al estar diseñadas y construidas hace bastante tiempo el nivel de conocimientos existentes en ese momento era muy reducido, por lo tanto la posibilidad de ineficacia de la escala era mayor.

4.2.2. Escala de artesas con vertedero semisumergido (o de escotadura lateral).

El vertedero semisumergido también llamado sumergido o de escotadura lateral consiste en una escotadura de relativa altura casi siempre ubicado en posición lateral, de tal forma que el vertido del agua se realiza a través de esta escotadura. Se diferencian dos tipos de vertidos (Figura 4.7). Cuando el agua empieza a verter por el vertedero lo hace en caída libre, esta situación se mantiene hasta que la altura de vertido alcanza el valor de la diferencia de cotas existentes entre dos artesas sucesivas, a partir de este momento el vertido se realiza de dos maneras, es decir, se mantiene el vertido libre (que como máximo puede valer el desnivel entre las cotas de las dos artesas) y el vertido sumergido con la altura correspondiente a la diferencia de la altura total de vertido menos la altura de vertido libre, por eso siempre se tiene que producir el vertido libre, porque para que se produzca vertido es necesario que exista un desnivel entre las dos láminas de agua en las artesas.

Hay que tener en cuenta que la altura de caída libre entre estanques solamente coincide con la diferencia de cotas entre estanques cuando por la escala está circulando el caudal de cálculo, si éste aumenta, entonces la variación más frecuente es un aumento respecto del caudal de cálculo y produce normalmente, aunque no siempre, una disminución del desnivel entre las láminas superior e inferior de la barrera, entonces la altura de caída libre varía no coincidirá con la altura de desnivel entre estanques. Esta altura de caída libre disminuirá si disminuye el desnivel de las láminas inferior y superior de la barrera (en el apartado de las escalas de hendiduras se tratará con más detenimiento esta cuestión).

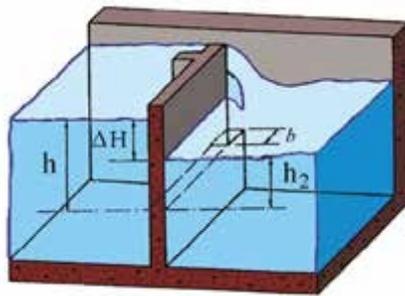


Figura 4.7. Escala de artesas con vertedero semisumergido (Fuente: Martínez de Azagra, 1999).

En la figura 4.7., se muestra el vertedero semisumergido con los parámetros hidráulicos que definen el vertido. Como se aprecia en esta figura, la parte del caudal que atraviesa el vertedero en forma de vertido libre corresponde a la altura con el salto Dh ; el resto de la altura de vertido (en concreto la diferencia, $h-Dh$) se realiza en vertido sumergido; por lo tanto el caudal total que atraviesa el vertedero corresponde a la suma de los dos vertidos.

Como se ha dicho anteriormente, la máxima altura de vertido libre (Dh) que se puede producir es la correspondiente a la altura del desnivel entre estanques. El resto de la altura de vertido corresponde al vertido sumergido, estas dos alturas son parámetros de la fórmula que determina el caudal que atraviesa el vertedero (Larinier, 2002):

$$Q = \left(1 - \left(\frac{h - \Delta h}{h} \right)^{1.5} \right)^{0.385} C_3 * b * \sqrt{2g} * h^{1.5}$$

Esta fórmula es válida para intervalos de sumergencia:

$$0,5 < \left(\frac{h - \Delta h}{h} \right) < 0,9$$

Dónde:

C_3 , es el coeficiente del vertedero, varía desde 0,38 hasta 0,5.

g , es la gravedad.

b es la anchura del vertedero.

h , es la altura total de vertido.

Δh , es la altura de vertido libre.

La anchura “ b ” del vertedero suele variar entre 0,20 y 0,45 m, incluso se puede este valor; lo que no es recomendable es disminuirla porque entonces el pez correría el riesgo de rozarse con las paredes.

Para escalas que se diseñan con flujos transmitidos (“streaming flows”), la anchura del vertedero (también en el caso de escalas de hendidura vertical) debe ser al menos de 0,30-0,40 m para los grandes salmónidos, y 0,45 m para lo sábalos, pudiendo disminuir a 0,20 m para la trucha.

El coeficiente C_3 toma valores entre 0,33 y 0,5 (los mismos valores que los del coeficiente del vertedero en caída libre). La característica que más influye en el valor del coeficiente es el perfil del vertedero y el espesor de la pared divisoria en la que se encuentra este vertedero. De igual manera, que en el caso del orificio y de la hendidura, el biselado y el redondeado de la cresta aguas abajo aumenta los valores del coeficiente de descarga. Este varía entre 0,33 para vertederos formadas por anchas paredes hasta 0,5 para perfiles que esta conformados para conseguir un vertido sin adherencia. Los valores más frecuentes son cercanos a 0,4.

Para valores del cociente entre alturas menores a 0,5 el flujo se asemeja a una caída libre.

El caudal de un vertedero semisumergido también es posible calcularlo por medio del método de la FAO-DVWK (2002), expuesto en el capítulo de los pasos naturalizados.

El valor de Δh , es decir el desnivel entre dos estanques más frecuentemente utilizados son (Larinier, 2002):

- 0,3-0,4 m para el salmón y la trucha de mar.
- 0,25-0,3 m para la trucha común y el barbo.
- 0,2-0,3 m para el sábalos.
- 0,15- 0,25 m para la mayoría de los ciprínidos.

El vertedero semisumergido presenta notorias ventajas:

- Permite un mayor intervalo de caudales mínimos y máximos porque aún manteniendo el desnivel entre las láminas (Δh) de agua con valores pequeños, como el caudal total que atraviesa la escala, está en función de la altura total "h" del vertedero. Este puede tomar valores grandes, que permitirá que la escala funcione con caudales relativamente altos. Cuando el caudal es pequeño, la altura de vertido mínima necesaria para que el pez pueda remontar al siguiente estanque, puede ser lo suficientemente grande para que no sufra choques o rozaduras, puesto que la anchura del vertedero "b" puede ser relativamente pequeña.

- Como el vertido se realiza en parte sumergido y en parte libre; cuando los peces remontan al siguiente estanque pueden optar por alguna de las dos posibilidades; Aunque la mayor parte de los peces suelen remontar por la parte del vertido sumergido, algunos remontan por la parte de vertido libre (esta ventaja es la misma que la existente en el caso de las escalas de hendiduras verticales tal y como veremos más adelante).

4.2.3. Escala de orificio sumergido.

En este caso la escala tiene un orificio sumergido por donde atraviesa el flujo y también los peces (Figura 4.8).

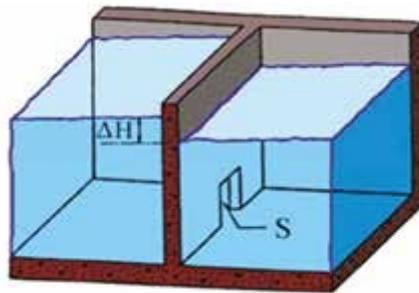


Figura 4.8. Escala de artesas con orificio de fondo (Fuente: Martínez de Azagra, 1999).

Como se muestra en la figura 4.8., la comunicación entre dos artesas es por medio de un orificio situado en el fondo del estanque. Los peces lo atravesarán siempre de forma sumergida. Esta condición implica que aquellos peces que no atraviesen los orificios sumergidos no puedan ascender por este tipo de escala, como son los casos de los sábalos y de las sabogas. Por este motivo las escalas que únicamente poseen vertedero de orificio sumergido están limitadas a ciertas especies.

Los caudales dependen de las dimensiones del orificio y del desnivel del agua entre las artesas. En condiciones normales no admite muchas variaciones de caudales.

El caudal que atraviesa el orificio se calcula por la siguiente fórmula (Larinier, 2002):

$$Q = C_1 * S * \sqrt{2g\Delta h}$$

Siendo:

c_1 es el coeficiente de descarga, que toma valores comprendidos entre 0,65 y 0,85.

g , es la constante de gravedad (9,81 m/s²).

Δh , es la altura de desnivel entre las dos láminas (m).

S , es la superficie del orificio (m²).

En el coeficiente de descarga, los factores que más influyen son la forma del vertedero (circular, cuadrado, rectangular etc.), el perfil del orificio (borde afilado, biselado o redondeado en el borde aguas arriba) el espesor de la pared transversal en la que está el orificio y la posición del orificio en la pared. En la actualidad, prácticamente todos los orificios se hacen rectangulares o cuadrados.

Las dimensiones del orificio siempre deben ser superiores a 0,15 m, los valores de altura y/o anchura más recomendables 0,20 m, 0,25 m o superiores.

Geometría de los orificios:

- $c = d$, (Recomendado).
- $c \cdot d \geq 0,09 \text{ m}^2$ para el salmón.
- $c \cdot d \geq 0,04 \text{ m}^2$ para la trucha.

Pueden hacerse orificios con dimensiones menores con el objetivo de que los orificios realicen principalmente la función de autolimpieza y el vaciado de las artesas: orificios desarenadores; si bien cuanto más pequeño es el orificio más fácilmente será su taponamiento. En general, es recomendable hacer los orificios de un tamaño no excesivamente pequeño.

Uno de los inconvenientes del orificio es que algunos peces son reacios a atravesar los orificios.

El funcionamiento de esta escala es de la siguiente manera: cuando los caudales son muy pequeños, el caudal atraviesa el orificio sin llegar a taparlo. En este caso el caudal no se puede determinar por la fórmula expuesta anteriormente, las condiciones hidráulicas que determinan el flujo se podrían determinar como un estrechamiento en flujos para canales abiertos. En esta situación la profundidad en el estanque es muy pequeña, parecida a la que alcanzaría en el orificio. A medida que el caudal sigue ascendiendo llegará un momento en que el nivel del agua este por encima de la altura del orificio; a partir de este momento el depósito se llenará de agua y entonces el caudal que atraviese el orificio será el obtenido por la aplicación de la ecuación anterior, con el desnivel de agua correspondiente a la diferencia de alturas entre las dos láminas de los estanques. Una vez, que por el orificio pasa el máximo caudal que es capaz de absorber, el exceso de caudal que no pueda pasar por el orificio caerá por el tabique, que separa los estanques, o bien por otro vertedero en el caso de que éste existiera.

Puede ser interesante considerar los caudales menores al caudal máximo del orificio, porque en numerosos ríos españoles con fuertes sequías estivales, durante un periodo de tiempo importante, se pueden producir caudales menores a este caudal. En estas circunstancias el estanque no se llena al nivel normal sino que alcanza un nivel de agua dentro del estanque algo superior a la altura de vertido en el orificio o inferior a la altura de éste; aun así este bajo nivel de aguas puede ser suficiente para que algunos peces puedan remontar la escala.

Las escalas con un único orificio sumergido están en desuso puesto que presenta inconvenientes que son fácilmente subsanables para el resto de tipos de escalas con otros vertederos.

Las desventajas del orificio son las siguientes:

- Fácil obstrucción.
- Intervalos de caudales de funcionamiento muy pequeños.
- Caudales relativamente pequeños.
- Algunas especies no remontan a través del orificio.

La ventaja de este tipo de escala de orificio sumergido, además de poder permitir el paso con caudales muy pequeños, consiste en que la escala puede autolimpiarse para algunos sedimentos de pequeñas dimensiones.

El interés del orificio sumergido consiste en aplicarlo en combinación con la escala de vertedero semisumergido.

4.2.4. Escala de artesas con vertedero semisumergido y orificio de fondo.

La escala de artesas con vertedero semisumergido (también llamada de vertedero sumergido) y orificio de fondo es una escala en la que se han dispuesto los dos tipos de vertederos que anteriormente se han descrito, es decir el vertedero semisumergido y el orificio sumergido. La distribución de los vertederos se realiza de forma alterna, con ello se consigue que el flujo atraviese el estanque con un trazado serpenteante para conseguir una mejor autolimpieza y un flujo más accesible al nado de los peces.

Con la combinación de los dos vertederos se consigue conjuntar las ventajas de ambos, por una parte se aumenta el intervalo de caudales debido al vertedero sumergido lateral y por otra parte la existencia del orificio de fondo consigue cierto grado de autolimpieza.

El ancho de la escotadura determina la anchura mínima del estanque. Por otra parte, los valores mínimos del estanque vienen fijadas por los valores máximos aceptables de la energía disipada. La longitud del estanque se elige en función de las condiciones que se expusieron anteriormente.

Sin embargo, las condiciones hidráulicas en este tipo de escala no son las óptimas, puesto que no todo el volumen de agua del estanque contribuye a la disipación de la energía. El flujo

que sale del vertedero lateral sigue siendo relativamente compacto; este flujo en forma de tubo de corriente impacta contra la pared. El remolino de recirculación, formado en el lado de la corriente principal de la pared transversal del estanque inferior, tiene poco efecto para la disipación de la energía.

Por lo tanto, es importante maximizar el ratio entre la longitud del estanque y la anchura del vertedero (L/b) y reducir el ratio entre la anchura del estanque y la anchura del vertedero (B/b) Larinier (2002).

En la Figura 4.9, se aprecia la escala con vertedero semisumergido y con orificio sumergido.



Figura 4.9. Escala de artesas con vertederos lateral semisumergido y orificio de fondo.

El caudal que pasa por la escala será la suma de los dos caudales, en concreto el caudal que atraviesa el orificio más el caudal que atraviesa el vertedero lateral semisumergido. También se debe considerar la situación en la cual además de los caudales anteriormente descritos el agua atraviesa el tabique por encima de la pared de separación en toda su longitud, en este caso el vertido es en forma de vertido libre sobre un vertedero rectangular. Esta situación en la que el flujo vierte en toda la anchura del tabique será aceptable siempre que se cumplan las condiciones de disipación máxima de energía y que el desnivel creado sea el admitido. En cualquiera de los casos esta situación solo se debe producir con caudales grandes.

Actualmente, esta escala, junto con la escala de hendiduras verticales que explicaremos más adelante, son los tipos de escalas de artesas más utilizadas.

Como se ha comentado anteriormente, las escalas de artesas sucesivas, en su modo más sencillo, consisten sencillamente en una sucesión de pequeñas artesas de sección rectangular dispuestas una a continuación de la siguiente, con un determinado desnivel suficientemente pequeño para que sea accesible a la mayor parte de la población de los peces de la especie objetivo. Dada su sencillez, versatilidad y adaptabilidad a topografías difíciles, la escala de artesas sucesivas ha sido la escala más utilizada y consecuentemente también ha sido la más estudiada, lo cual contribuye a su vez a garantizar su funcionamiento y su eficacia.

En la Figura 4.10, se muestra las vistas de los vertederos de los estanques que forman la escala de artesas sucesivas detallando las dimensiones características que determinan la escala.

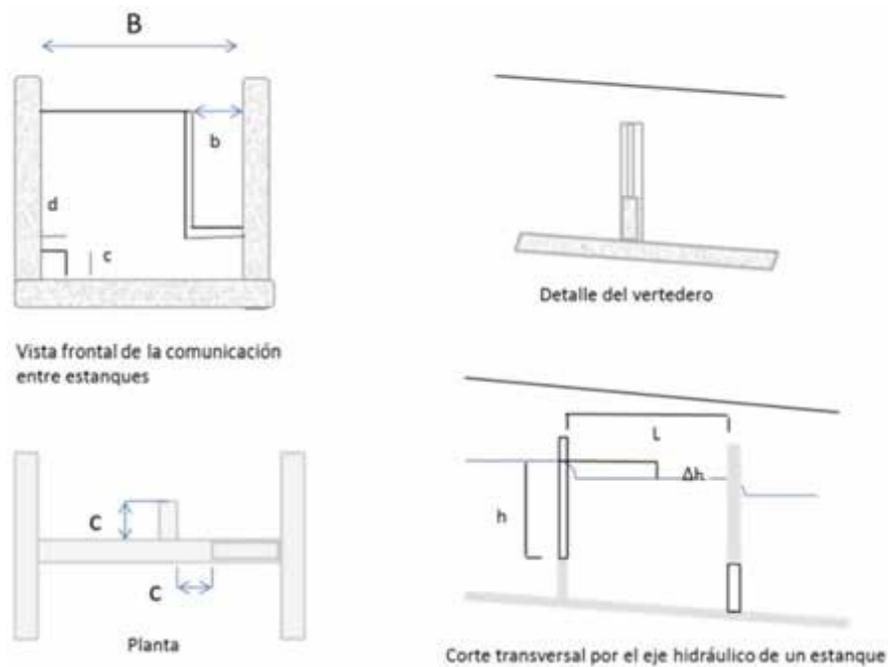


Figura 4.10. Escala de artesas sucesivas con vertedero semisumergido y con orificio de fondo.

Como se aprecia en la Figura 4.10, en la vista de la planta (tercera figura, inferior izquierda), en el tabique transversal se ha introducido un deflector o elemento paralelepípedo perpendicular al tabique, con él se consigue mejorar la circulación del flujo en el estanque y el paso del agua a través del vertedero.

El diseño de las artesas, deben seguir las siguientes normas (Larinier 2002).

La altura del desnivel entre artesa y artesa depende de la especie objetivo (especie principal del pez para la que se proyecta la escala). Así para las especies más importantes de los ríos españoles el desnivel no debe sobrepasar los siguientes valores (Larinier 2002b).

Salmón: 0,60 m.

Trucha: 0,45 m.

Trucha de mar (reo): 0,30 – 0,40 m.

Trucha y ciprínidos con mayor capacidad de salto (barbos): 0,30 m.

La mayor parte de los ciprínidos: 0,10 – 0,25 m.

Las dimensiones de los vertederos semisumergidos deben cumplir las siguientes condiciones:

Anchura mínima (b_{\min}).

- $b_{\min} > 0,15$ m para evitar colmatajes y atrampones.
- $b_{\min} = 0,2$ m para la trucha.
- $b_{\min} = 0,3$ m para el salmón.
- $b_{\min} = 0,45$ m para el sábalo.

Altura del umbral del vertedero (p).

- $p \approx 0,6$ m para las truchas.
- $p \approx 0,8$ m para los sábalos.
- $p \approx 1,0$ m para los salmones.

Si bien Larinier (2002) indica valores máximos de desnivel de 0,60 m para el salmón y 0,45 para la trucha. Algunos autores comentan, que el salto del agua en caída libre no debe sobrepasar en ningún caso el valor de **0,30 m**. Aunque este valor puede ser excesivamente bajo para los salmones, se debe considerar que normalmente en la mayor parte de los tramos salmoneros, también viven otras especies a las que también se les debe permitir el paso. De no ser así, es decir que solo exista salmón, está justificado aumentar el valor de 0,30 m.

En investigaciones realizadas se ha comprobado que la mayor parte de los peces remontan el salto entre estanque y estanque en la parte sumergido y no en la parte del vertido libre, como podría pensarse en un principio. Este comportamiento de los peces aumenta las razones para optar por vertederos semisumergidos, (también son válidas las escalas de hendiduras verticales).

Si se quiere conseguir el flujo transmitido (streaming flow), se deberá evitar el inestable régimen que se produce entre el flujo transmitido y el flujo sumergido (plunging flow), para lo cual la altura mínima del vertedero debe ser un poco mayor a dos veces el desnivel entre estanques. El ratio " L/b " (siendo b el valor menor de la anchura del vertedero o el desnivel entre láminas de agua) varía normalmente entre 8 y 10 y el ratio entre " B/b " (anchura del estanque, anchura del vertedero) varía entre 4 y 6.

El tipo de paso con flujo transmitido (streaming flow) es difícil de diseñar para caudales pequeños y no puede ser diseñado para flujos menores a 150 l/s. En estos casos es mejor optar por el clásico flujo sumergido (plunging flow), diseñando la escala con poca altura de desnivel y vertedero lateral.

Los cambios de dirección se deben realizar con directriz curva, con las siguientes recomendaciones (figura 4.11):

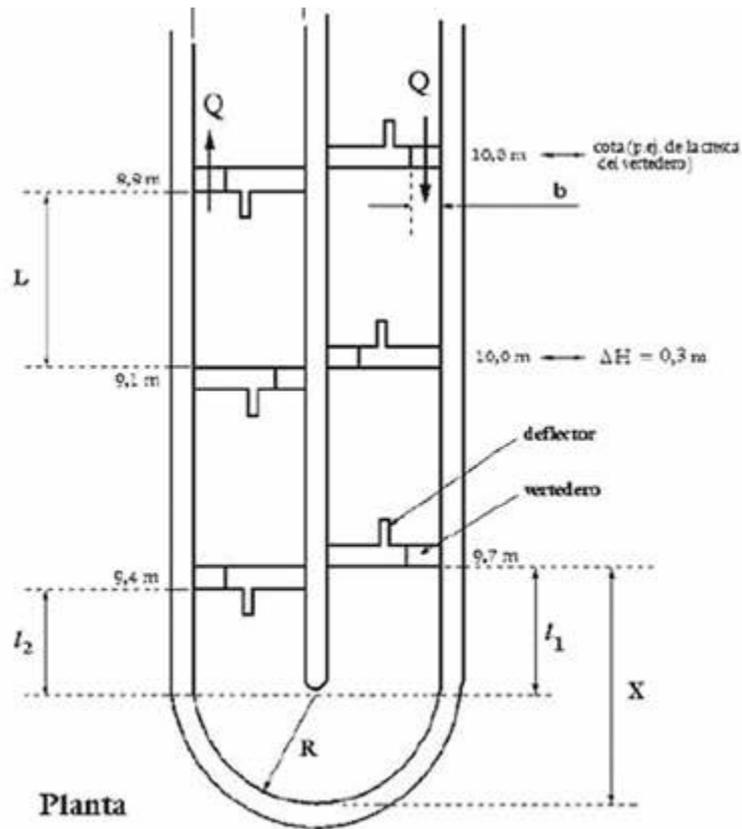


Figura 4.11. Ejemplo de cambio de dirección en la escala de artesas sucesivas con directriz curva. (Original de Martínez de Azagra, 1999).

Se deben cumplir las condiciones siguientes:

$$X \approx L$$

$$l_1 + l_2 \approx L$$

$$R \approx B \text{ (para evitar ángulos rectos).}$$

La principal ventaja de este tipo de escalas es la facilidad de construcción y la posibilidad de acomodarse a variaciones significativas en el nivel de las láminas, tanto superior como también inferior, sin necesidad de instalar controles para estas fluctuaciones, ventaja que también presentan las escalas de hendiduras verticales.

Como se ha comentado anteriormente, también se puede considerar el tabique transversal como un vertedero más, es decir el flujo atravesaría la escala por el orificio de fondo sumergido, por el vertedero lateral y por el tabique transversal, en este último caso el tabique transversal funciona como un vertedero de caída libre, esta opción de aprovechar el tabique como vertedero no es aprobado por algunos autores, y si se aplica se debería realizar con

pocas alturas de vertido, porque el resultado puede crear situaciones poco conocidas y experimentadas, además de que construir estos tabiques con los bordes redondeados para que los peces no se hieran con los posibles roces.



Figura 4.12. En la parte superior una escala de artesas sucesivas. En la parte inferior, escala de artesas sucesivas de la presa de Mugo, río Duero. Detalle del vertedero lateral y del orificio de fondo de la artesa.

Más adelante se estudiará la escala de hendidura vertical, esta escala puede ser diseñada para el esturión, También se puede diseñar una escala de esturiones con el tipo de escala de artesa sucesivas con un único orificio de fondo pero de enormes dimensiones ya que por él debe ascender el esturión según FAO-DVWK. (2002).

En concreto las dimensiones de la escala de esturión son las siguientes:

Longitud del estanque:	5-6 m.
Anchura del estanque:	2,5-3 m.
Profundidad del agua en el estanque:	1,5-2 m.
Dimensiones del orificio sumergido:	
Anchura:	1,5 m.
Altura:	1 m.
Caudal	2,5 m ³ /s.
Máximo desnivel entre estanques:	0,20 m

4.3. DISEÑO Y CALCULO HIDRÁULICO DE LA ESCALA DE ARTESAS SUCESIVAS

Realizada la visita a la barrera y los cálculos hidráulicos para determinar las cotas de las láminas de agua a partir de los datos de los caudales y del levantamiento topográfico, conocidos también los datos biológicos referentes a la especie o especies objetivo y tamaños de sus ejemplares se realizará el cálculo y diseño de la escala de la siguiente manera.

1. Diferencia de alturas entre las láminas de aguas arriba y aguas abajo.

La diferencia de las alturas existentes entre las láminas del río por encima y por debajo de la barrera dependerá de los caudales del río. El máximo desnivel se producirá, con mucha probabilidad, durante el periodo de sequía. Este valor se conocerá por medio de la diferencia de cotas.

$$\text{Desnivel, (Ht)} = \text{CLA aguas arriba} - \text{CLA aguas abajo}$$

2. Altura desnivel entre estanques (Dh).

Como ya se ha comentado anteriormente, esta altura está en función de la especie objetivo, los valores varían entre 0,10 o 0,15 m para peces con poca capacidad de salto (ciprínidos), hasta 0,50 o 0,60 m para salmones. Evidentemente cuanto más pequeña sea esta altura mayor número de peces podrán pasar por la escala, aunque también se debe tener en cuenta que disminuir la altura del desnivel entre estanques aumenta la longitud de la escala y por tanto su coste. Los valores más frecuentes de los desniveles entre estanques varían entre 0,20 y 0,30 m.

3. Número de estanques.

Para conocer el número de estanques primeramente se debe calcular el número de saltos en que queda dividido toda la altura total.

$$n^{\circ} \text{ saltos} = \frac{Ht}{\Delta h(\text{desnivel})}$$

Dónde:

H_t , es la altura total del desnivel de las láminas de agua.

D_h , es el desnivel entre estanques elegido para la escala.

Como el número de saltos es un número entero la aproximación del cociente se realizará por exceso.

El número de estanques que tendrá la escala será igual al número de saltos disminuido en una unidad, porque la entrada del agua al estanque superior se realiza por medio de un salto y la salida del agua del estanque inferior también se realiza por otro salto.

$$n^{\circ} \text{ depositos} = n^{\circ} \text{ saltos} - 1$$

4. Dimensionamiento de los estanques.

El dimensionamiento de los estanques se realiza siguiendo las normas anteriormente expuestas.

5. Cálculo del caudal de la escala.

A partir de los valores de los caudales del río se decide cual será el caudal medio de cálculo que atravesará la escala.

El caudal que atraviesa la escala puede variar mucho de una barrera a otra.

En ríos con caudales normales es imprescindible que el pez se sienta atraído hacia la escala, es decir que se produzca el “efecto llamada”, éste será mayor cuanto mayor sea el caudal que atraviesa la escala, si bien lógicamente esto implica que los estanques tendrán que ser de grandes dimensiones, situación que encarece y complica la obra y en algunos casos es difícil de llevar a cabo, bien por falta de espacio o por otros motivos. Esta situación de insuficiente “efecto llamada” se solventa construyendo una conducción adicional para transportar un “caudal de atracción”; más adelante este importante aspecto se tratará con más detalle.

En los ríos españoles con caudales relativamente grandes, no muy abundantes en España, se recomienda que el caudal de la escala debe ser el 5 % como mínimo (Larinier, 2002), pero como se ha dicho anteriormente en bastantes ríos españoles los caudales medios son bajos lo cual implica que el caudal de la escala representa un porcentaje bastante superior al 5 %, incluso, en ríos con fuerte estiaje, el caudal de la escala puede suponer el total del caudal del río.

Con el caudal de cálculo se dimensiona el vertedero lateral, por el que pasará la mayor parte del agua, tanto en la anchura del vertedero como en la altura. A partir de este parámetro y con las normas anteriormente expuestas se dimensiona el estanque.

El caudal que atraviesa el orificio de fondo es bastante pequeño y en condiciones normales no representa una cantidad importante respecto del total. Las dimensiones del mismo se realizan en función del tipo de especies de peces que existen en el río siguiendo las normas expuestas, e independientemente del caudal total de la escala.

6. Cálculo del caudal que atraviesa la escala.

La exposición del cálculo del caudal se realizará por medio de varios ejemplos.

Ejemplo 1.

Supongamos que tenemos una escala con una diferencia de altura entre estanques de 0,15 m con los siguientes vertidos en los estanques:

- 1º) Orificio sumergido de 0,15 m de altura y anchura.
- 2º) Vertedero semisumergido de 0,45 m de anchura y 0,35 m de altura.

A continuación se realiza el cálculo de los caudales que vierten por los mismos y el caudal máximo que admitiría esta escala.

Caudal 1. Vertido por el orificio sumergido.

$$Q = C_1 * S * \sqrt{2g\Delta h}$$

Dimensiones del orificio:	0,15 m.
Sección del orificio (S):	0,0225 m ² .
Diferencia de altura entre las láminas de agua (Dh):	0,15 m.
Coefficiente de gasto del orificio C ₁ :	0,7 m.

Por lo tanto:

$$Q = 0,7 * 0,0225 * \sqrt{2 * 9,81 * 0,15} = 0,027 \text{ m}^3/\text{s}$$

Este caudal es el máximo que puede pasar por el orificio porque el desnivel 0,15 no va aumentar.

Caudal 2. Vertido por orificio sumergido y vertido libre por el vertedero semisumergido.

Se produce cuando la carga de vertido no es superior a 0,15 m, a partir de esta altura el vertido se produciría con una altura en caída libre de 0,15 m y el resto sumergido.

$$Q = Q_{orif} + Q_{ver.libre} = C_1 * S * \sqrt{2g\Delta h} + C_d * b * \sqrt{2g} * \Delta h^{1,5}$$

Donde.

C _d , es el coeficiente de gasto del vertedero:	0,4.
Dh, es el desnivel en caída libre:	0,15.
b es la anchura del vertedero:	0,45.

$$Q = 0,7 * 0,0225 * \sqrt{2 * 9,81 * 0,15} + 0,4 * 0,45 * 0,15^{3/2} * \sqrt{2 * 9,81}$$

$$Q = 0,027 + 0,046 = 0,073 \cdot \text{m}^3 / \text{s}$$

Caudal 3. Vertido por orificio sumergido y vertido por vertedero semisumergido.

Cuando el caudal aumenta por encima de la cantidad anterior, entonces existe una altura de vertido sumergido denominada h_s , (además de la altura de vertido libre o desnivel entre las láminas que es de 0,15 m) siendo esta altura la diferencia entre la carga de vertido total (toda la altura de agua que atraviesa el vertedero) y el desnivel entre las láminas de agua.

La fórmula utilizada es una variación del anterior. La variación consiste en introducir un coeficiente “k” de sumergencia.

$$Q = Q_{orif} + Q_{ver.libre} = C_1 \cdot S \cdot \sqrt{2g\Delta h} + k \cdot C_d \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{1,5}$$

Siendo “k” el coeficiente de sumergencia que tiene como expresión:

$$k = \left[1 - \left(\frac{h_s}{h} \right)^{1,5} \right]^{0,385}$$

Esta ecuación es válida cuando se cumple que el coeficiente “k” varía entre:

$$0,5 < \frac{h - \Delta h}{h} < 0,9$$

El caudal para la máxima altura de carga de vertido es $h = 0,35$ m, en cuyo caso el vertido sumergido tendrá el siguiente valor:

Por una parte un caudal excesivo por la escala implica unas dimensiones grandes de los estanques, si:

$$h_s = h - \Delta h = 0,35 - 0,15 = 0,20m$$

Con estos datos se cumple:

$$0,5 < \frac{h - \Delta h}{h} = \frac{0,2}{0,35} = 0,57 < 0,9$$

$$k = \left[1 - \left(\frac{0,2}{0,35} \right)^{1,5} \right]^{0,385} = 0,8$$

$$Q = 0,7 \cdot 0,0225 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,15} + 0,8 \cdot 0,4 \cdot 0,45 \cdot 0,35^{3/2} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81}$$

$$Q = 0,027 + 0,132 = 0,159 \frac{m^3}{s}$$

Por lo tanto el caudal total será :

$$Q = Q_{orif} + Q_{ver.libre} = C_1 \cdot S \cdot \sqrt{2g\Delta h} + k \cdot C_d \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot \Delta h^{1,5} = 0,027 + 0,132 = 0,159 \text{ m}^3/\text{s}$$

7. Ubicación y trazado de la escala.

Una de las ventajas de la escala de artesas sucesivas radica en la gran versatilidad con que se puede realizar el trazado de su directriz. De esta manera es posible optar por distintas opciones de trazados, adaptándolas a las limitaciones de espacio o a las peculiaridades de la topografía. Existe la posibilidad de “plegar” la escala, es decir de hacerla girar 180° para cambiarla de dirección y adherirlo al tramo anterior. Esta característica permite construir escalas en espacios limitados, lo cual es una gran ventaja en comparación con otros tipos de escalas.

Consecuentemente el diseño de la escala se puede llevar a cabo con bastante libertad de trazado, y así es posible situar el último estanque (primero de la escala) en aquel punto en que sea mayor la “atracción”. Este lugar suele estar normalmente muy cercano a la caída del agua desde la barrera y lo más interior de la misma en orientación desde aguas abajo. También esta la escala de artesas permite orientar la entrada a la escala para los peces en la misma dirección con la que baja la corriente del río.

Los estanques en donde la escala cambie de dirección se debe cumplir que la pared exterior debe ser curva, tal y como se muestra en la figura 4.13, con ello se consigue que el flujo cambie de dirección sin brusquedad y también evita que los peces salten fuera de la escala por confundir la pared con el siguiente estanque.

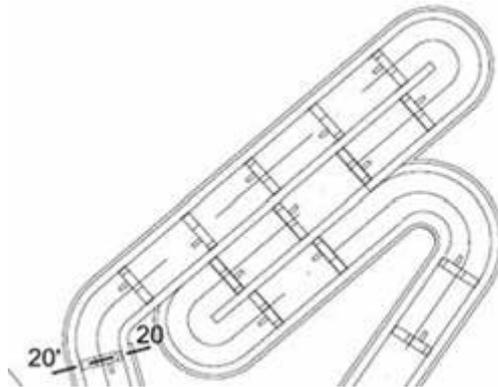


Figura 4.13. Trazado curvo de la pared de los estanques donde se cambia de dirección.

8. Dimensionamiento de los estanques y cálculo de la energía disipada.

A partir de los valores de los caudales y del desnivel entre estanques se dimensionan los estanques siguiendo la normativa expuesta.

Simultáneamente al dimensionado del estanque y conocidos los caudales circulantes por la escala se calcula la energía disipada para el caudal máximo. Si el dimensionamiento no cumple con los valores máximos admisibles de la energía disipada, entonces los estanques se redimensionarán aumentando sus dimensiones.

En los ríos, que presentan un fuerte estiaje con un mínimo caudal, puede darse el caso de que todo el caudal del río atraviese la escala.

9. Cálculo del último estanque con la aportación adicional del caudal de atracción.

Todo lo anteriormente expuesto corresponde al caso normal en el que los estanques de la escala son iguales. Por estos estanques circula el mismo caudal y los vertederos son los convencionales para la escala de vertederos semisumergidos. Como las valores tanto del caudal como las dimensiones de los estanques son idénticas, entonces las condiciones de flujo son también las mismas. Ahora bien, en bastantes casos es necesario intensificar el “efecto llamada” en el último estanque, primero por el que ascienden los peces desde el río, ello implica que en este estanque circula un caudal superior y por lo tanto requiere un cálculo particular del mismo y distinto al resto de los estanques.

La modificación que se debe realizar consiste en dirigir parte del caudal de atracción a este estanque. Consecuentemente en este último estanque se concentran el caudal proveniente del estanque superior, es decir el caudal de la escala, y el caudal proveniente del caudal de atracción.

Por lo tanto este estanque necesita de un diseño y calculo distintos al resto de los estanques. Por ello, los vertederos suelen ser distintos, normalmente más grandes para conseguir que pueda verter todo el caudal entrante de forma coordinada con el estanque superior y con el nivel del río, con el objetivo de conseguir que con todos los caudales, el desnivel entre el estanque superior y el desnivel entre este último estanque y el río sea inferior al desnivel máximo admitido.

En las figura 4.14 se observa el perfil longitudinal y la planta del final de una escala de artesas sucesivas. Se aprecia como el primer estanque es más grande que el resto y tiene mayor número de vertederos a distintas alturas con la finalidad de presentar distintas alturas de desnivel con el río en función de los distintos caudales.

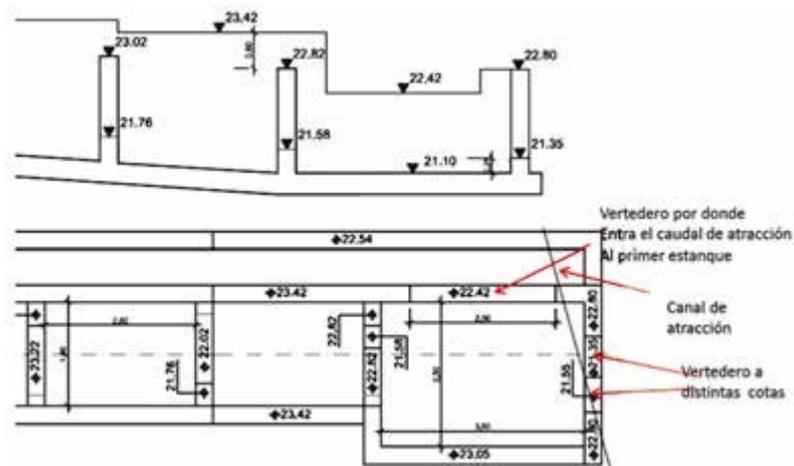


Figura 4.14. Perfil y planta de la escala con los primeros estanques

El cálculo de este último estanque es distinto a todos los restantes de la escala. La manera óptima de realizar este cálculo es por medio de una “hoja de cálculo” operando de tal forma que a medida que se incrementa el caudal y por lo tanto la altura de vertido se puede ir dimensionando los vertederos a la altura y la longitud adecuada para que se consiga el ajuste de los desniveles entre los vertederos y el río. Este ajuste será posible realizarlo, si se tienen los datos de la fluctuación de la lámina inferior del río obtenidos por los cálculos hidráulicos realizados con los programas correspondientes. También es posible conocer el desnivel entre la escala y el río en el caso de que el nivel del río esté regulado por medio de dique-vertedero-regulador.

4.4. ESCALAS DE ARTESAS SUCESIVAS DE HENDIDURAS VERTICALES.

En este trabajo se ha considerado que las escalas de hendiduras verticales son un tipo de escala de artesas sucesivas. Se ha decidido por esta opción porque esta escala está también compuesta de estanques situados uno detrás del otro. Algunos autores consideran que estas escalas son una categoría en sí mismas.

Lo que es definitivamente cierto es que estas escalas serán cada día más utilizadas debido a su gran eficacia y a las ventajas que presentan en comparación con el resto de escalas.

Las escalas de hendiduras verticales son escalas donde los vertederos consisten en hendiduras de anchura relativamente pequeña y extendida en casi toda la altura de la artesa. También se podría definir esta escala como un “canal rectangular en pendiente dividido en artesas mediante tabiques transversales comunicados entre sí por una hendidura vertical, prácticamente prolongada en toda su altura”.

La gran ventaja de la escala de hendiduras es permitir grandes variaciones de niveles del flujo, hasta de 1 m, sin requerir de un control de secciones (Larinier, 2002).

Las primeras escalas de hendiduras verticales fueron construidas en el paso “the Hell’s Gate” en el río Fraser en Canadá (Clay 1961). El primer modelo utilizado consistió en una escala con enormes estanques de 5,5 m de longitud y de 6,1 m de ancho, con dos hendiduras verticales de 0,60 m de anchura. Los dos flujos provenientes de las hendiduras convergía en el centro de la sección resultando una disipación eficiente de energía, y creando zonas de calma en las dos paredes laterales aguas abajo de las paredes.

El modelo actual más frecuentemente utilizado es el que contiene una sola hendidura. En la figura 4.15. se muestra este tipo de escala, (Clay, 1961, Andrew, 1990).

Como se aprecia en Figura 4.16, en el fondo de la hendidura se construye un zócalo o umbral. La existencia de este zócalo se debe a dos razones; la primera es para conseguir guiar y estabilizar mejor la diagonal del chorro y prevenir cortacircuitos, la segunda razón es evitar que el chorro golpee las paredes con mucha velocidad porque este efecto produce alteraciones en el comportamiento del pez y disminuye la eficacia de la escala.

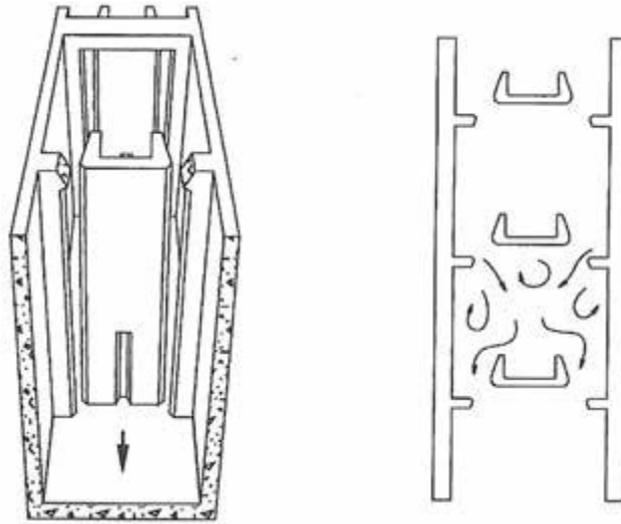


Figura 4.15. Escala con dos hendidura verticales. (Fuente Larinier 2002)

La altura de este zócalo debe ser como mínimo de 0,20 m (Larinier 2002). Además de estas características, la presencia de este zócalo condiciona algunas diferencias del comportamiento del flujo, si se compara con la situación en la que este zócalo no existiera. En concreto, la presencia de este zócalo hace que parte del volumen se remanse lo que permite el funcionamiento de la escala con caudales inferiores a los que se deberían producir sin la existencia del mismo debido a que el zócalo mantiene siempre un calado mínimo, aún en situaciones en que se produzcan caudales mínimos o incluso inexistentes. Esta circunstancia es muy interesante para muchos ríos españoles en los que los caudales son pequeños durante grandes periodos de tiempo. Por otra parte, la autolimpieza de la escala necesariamente es menor cuando existe este zócalo. En realidad, cuando se incorpora el zócalo la escala se acerca al modelo convencional de escala estanques sucesivos con vertedero semisumergido.

A igual que el resto de escalas de estanques, se debe cumplir la condición de disipación máxima de energía. En este tipo de escala la energía disipada en cada estanque debe ser siempre inferior a 200 W/m^3 (Larinier, 1992).

Ventajas de la escala de hendiduras (Sanz J. 2010).

- **Permite grandes variaciones de los niveles del agua.** Por este motivo es interesante que cuando se diseña una escala de artesas, la entrada del agua en el primer estanque de la escala de artesas sea un estanque con hendiduras verticales, independientemente del tipo de escala que exista. Con ello se consigue el funcionamiento para distintos niveles.

- **Elección de la profundidad** por los peces en la que pueden remontar según las condiciones de luz y de flujo (la mayor parte de las especies prefieren remontar por la parte de la hendidura por la que fluye el flujo sumergido).

- **Buenas condiciones de descanso.** Por la formación de recirculaciones en las paredes laterales de la escala.

- **Menor probabilidad de atramparse.** Esta ventaja se debe a que la hendidura está sobre el propio suelo o muy cercano a él, por lo que no es fácil que se atrampe.

- **Amplio rango de caudales:** 100 l/s a varios m³/s.

- válida para la **migración aguas descendente.**

- **no se produce desorientación de los peces** debido a que la velocidad no varía a lo largo de la vertical y las velocidades en esta dirección son insignificantes frente a las velocidades horizontales (Pena *et al* 2006).

Inconvenientes. (Sanz J. 2010).

- **mayores dimensiones de los estanques** para profundidades y anchos de escotadura similares respecto vertederos libres o sumergidos.

- **necesidad de grandes caudales para migradores de gran tamaño,** es necesario caudales mayores a 0,7 m³/s y no funciona para caudales menores a 100 l/s.

- **mayor mantenimiento y peor integración paisajística** respecto a ríos artificiales o rampa (este inconveniente es común a la escala de artesas sucesivas).

-**algunos peces (alosas sp) pueden desorientarse** en las zonas de recirculación.

El diseño de este tipo de escala es análogo al diseño de los otros tipos de escalas de artesas, si bien los diferentes elementos que forman el estanque deben seguir algunas particularidades.

Según Gebler (1991), las dimensiones mínimas de la escala para un ancho de hendidura de 0,15 a 0,17 m deben tener como longitud de estanque “l_b” 1,90 m y anchura “A” 1,2 m.

Larinier (2002) recomienda las siguientes condiciones de dimensionamiento en función de la anchura de la escotadura “b” (ver figura 4.17.):

- longitud del estanque entre 8 y 10 veces el ancho de la escotadura (algunos autores amplían el intervalo a entre 7 y 12 veces), en el caso de doble hendidura serían de 9-10 veces.

- anchura del estanque entre 6 y 8 veces el ancho de la escotadura. En el caso de escala con dos escotaduras la anchura sería de 9 a 10 veces el ancho de la escotadura.

El caudal que atraviesa por la hendidura se cuantifica por medio de la ecuación (Larinier 2002):

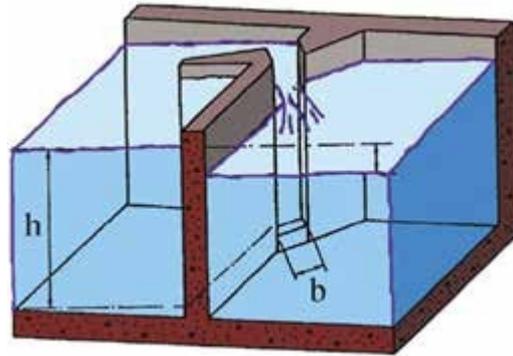


Figura 4.16. Escala de hendidura vertical. (Fuente Martínez de Azagra 1999.).

$$Q = C_d \cdot b \cdot h \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \quad [m^3 / s]$$

Dónde:

b, es la anchura de la escotadura (m).

h, es la altura total del agua que atraviesa la escotadura (m).

Δh , es la altura del desnivel del agua entre dos estanques.

C_d es el coeficiente de vertido, varía entre 0,65 y 0,85, dependiendo de la forma y el tipo de la hendidura, cuanto el borde aguas arriba esté más redondeado tendrá mayor valor.

- El dimensionamiento también debe cumplir la condición de disipación de la energía.

P_v = energía disipada.

P_v debe ser $< 200 \text{ W/m}^2$ para salmónidos.

$P_v < 125-150 \text{ W/m}^3$ para ciprínidos.

Se admite que estos valores pueden ser sobrepasados para caudales grandes poco frecuentes o bien en escalas pequeñas.

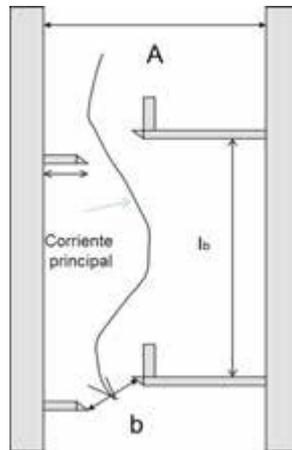


Figura 4.17. Planta de escala de hendidura.

En la Figura 4.17, se muestran los elementos que constituyen un estanque de hendidura.

En las investigaciones realizadas sobre este tipo de hendidura por Pena *et al* (2006) se observa que el trazado realizado por el agua dentro de la escala realiza un bucle de recirculación tal y como se muestran en las figura 4.18 correspondiente a distintas pendientes (este comportamiento no es solamente exclusivo de este tipo de escalas, normalmente también se produce en mayor o menor grado en todas las escalas de artesas sucesivas), en la figura 4.18, se muestran los esquemas de las trayectorias de los flujos.

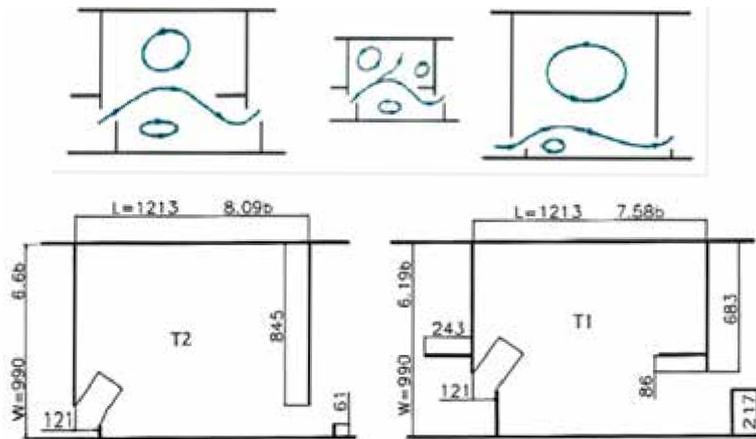


Figura 4.18. Circulación del agua dentro de la escala de hendiduras y los modelos T1 y T2 utilizados en la investigación de Pena *et al* (2006). (Fuente Pena *et al*, 2006).

Justamente en las zonas de recirculación son donde se estaciona el pez para descansar porque en estas zonas la velocidad del agua es menor o incluso negativa. En el mismo sentido se ha podido constatar por las investigaciones llevadas a cabo por Bermúdez *et al* (2012), que los peces descansan en los estanques, para ello eligen las zonas con mayor tranquilidad y menor velocidad, siendo estas zonas los puntos situados en las paredes laterales, porque justamente en estos puntos se producen recirculaciones y las aguas están más tranquilas.

Según las investigaciones realizadas por Pena *et al* (2006) entre otras, se han comprobado que la velocidad de un punto depende de:

- a) Su posición relativa dentro del estanque.
- b) Del diseño del estanque y de la pendiente, pero se mantiene independiente del caudal que discurre por la escala.

Esta última propiedad constituye una gran ventaja respecto de otras escalas, ya que mantiene su funcionamiento hidráulico constante frente a las variaciones naturales del caudal. También se ha comprobado que el flujo producido es un flujo bidimensional lo que produce que la velocidad sea constante en toda la altura de la hendidura, independientemente de la profundidad, y que la velocidad vertical es insignificante en comparación con la velocidad

horizontal (flujo bidimensional). Esta característica evita la desorientación de los peces, el gasto innecesario de energía en la búsqueda de las zonas más favorables y les permite elegir la profundidad de natación según las preferencias en cuanto a condiciones de luz, turbidez etc., Pena *et al* (2006). Además, el flujo turbulento asociado a estas escalas reduce la sedimentación en los depósitos de la escala así como también provee una gran capacidad de atracción, si bien el mal funcionamiento debido a la colmatación por cuerpos flotantes es relativamente corriente en ésta escala como también en la de vertedero lateral.

En los ensayos experimentales de esta investigación (Pena *et al* 2006) se utilizaron dos diseños de la escala de hendiduras verticales denominados por los códigos T₁ y T₂, tal y como se muestran en la figura 4.18. Parte de los resultados obtenidos fueron, entre otros:

1°) Relación entre los caudales y calados por medio de una expresión adimensional. Se definió un caudal unitario Q^A por medio de la siguiente expresión.

$$Q^A = Q / \sqrt{g * b^5}$$

Se consiguió relacionar los valores del caudal unitario con el valor del calado medio de la sección transversal central “y_o”, y la anchura de la hendidura “b”, por medio de la siguientes expresión.

$$Q^A = \alpha \left(\frac{y_o}{b} \right)^\lambda$$

Dónde:

Q^A es el caudal unitario.

Q es el caudal total.

g, es la gravedad (9,81 m/s²).

y_o es el calado medio de la sección transversal central de estanques (m).

b es la anchura de la hendidura (m).

α, es un coeficiente que depende de la pendiente y del tipo T₁ o T₂.

El λ es el coeficiente de regresión, si bien en todos los casos el valor es muy cercano

a 1. El valor del coeficiente α, toma los siguientes valores:

Para el modelo T₁.

Pendiente %	coeficiente α
5,7	0,631
10	0,888

Para el modelo T₂.

Pendiente %	coeficiente α
5,7	0,687
10	0,999

La velocidad en la hendidura tiene como expresión.

$$V_b = 0,93 \alpha \sqrt{g * b}$$

Por lo tanto se puede conocer la velocidad en la hendidura y por lo tanto la velocidad que debe conseguir el pez para poder atravesarla.

Obsérvese que la velocidad no depende ni del calado ni del caudal, sino tan solo del coeficiente a y de la anchura “ b ”. Dando algunos valores a estos parámetros se obtienen velocidades que no son muy altas, lo que permite el acceso a peces con capacidad natatoria relativamente baja.

Los calados mínimos que debe tener el estanque para que los peces puedan remontar varían en función de la especie, así para la trucha el calado es 0,4 m y para el salmón es 0,5 m. Los caudales necesarios para que se produzca estos calados dependen de las condiciones de flujo, concretamente, en el modelo tipo T_1 con una anchura “ b ” de 0,30 m y una pendiente de 5,7 % el caudal necesario para la trucha es 0,167 m^3/s , en el caso del salmón para las mismas características es 0,204 m^3/s . A partir de estos valores, los caudales necesarios aumentan a medida que aumentan los parámetros de vertido: anchura de la hendidura y la pendiente.

En la tabla 4.1 se exponen las dimensiones que deben tener los elementos de la escala en función de la especie objetivo (Katapodis, 1990, Gebler, 1991 y Larinier 1992), estas dimensiones están destinadas a escalas con una hendidura. Si la escala tiene dos hendiduras, entonces el ancho de la escala debe ser el doble.

Tabla 4.1. Dimensiones de las escalas de hendiduras verticales.

	Timalos, breña, cacho y otros		Esturión.
	Trucha común	Salmón atlántico, trucha de mar, salmón del Danubio.	
Anchura de hendidura (b)	0,15-0,17	0,30	0,60
Anchura del estanque (A)	1,20	1,80	3,00
Longitud del estanque (l_e)	1,90	2,75-3,00	5,00
Longitud del deflector (c)	0,16	0,18	0,40
Distancia del bloque-deflector. (a)	0,06-0,10	0,14	0,30
Anchura del bloque-deflector (f)	0,16	0,40	0,84
Diferencia de nivel de agua (Δh)	0,20	0,20	0,20
Profundidad mínima de agua (h_{min})	0,50	0,75	1,30
Caudal requerido (m^3/s).	0,14-0,16	0,41	1,40

La diferencia de nivel de las láminas libres del agua “ Dh ” coincide, en algunos momentos, con la diferencia de cotas entre estanque y estanque, aunque no siempre, tal y como se expondrá más adelante, el valor de este parámetro suele ser de 0,20 m. Si bien Larinier (2002), acepta que para salmónidos puede ser 0,30 m. El resto del caudal vierte por la hendidura como flujo sumergido, este caudal sumergido será proporcional a la altura de la profundidad del agua.

La profundidad mínima (h_m) debe ser mayor a 0,50 m, es importante que el caudal que atraviesa la escala no sea demasiado pequeño y la profundidad del agua dentro del estanque también debe ser relativamente grande para que el pez pueda nadar fácilmente. Por otra parte, cuanto mayor volumen de agua tenga la artesa, más fácilmente se cumplirá el requisito de que la energía hidráulica disipada esté por debajo de los valores máximos admitidos.

Además de las dimensiones citadas en la anterior tabla, otros autores han desarrollado otra relación de medidas, como por ejemplo la investigación llevada a cabo por Lenne (1990) tal y como se expone en la figura 4. 19. Siendo el ángulo que forma la hendidura de 20° cuando la escala es pequeña y en pasos con hendidura grande entonces es 35 a 40° .

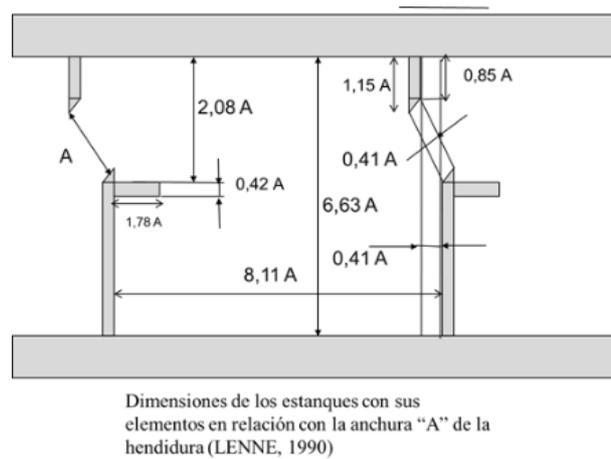


Figura 4.19. Dimensiones del estanque de hendiduras verticales.

Las escalas de hendiduras verticales pueden clasificarse en las siguientes clases:

Según el número de hendiduras:

Una hendidura

Dos hendiduras.

Dirección del eje longitudinal.

Recto.

En zig-zag.

Helicoidal.

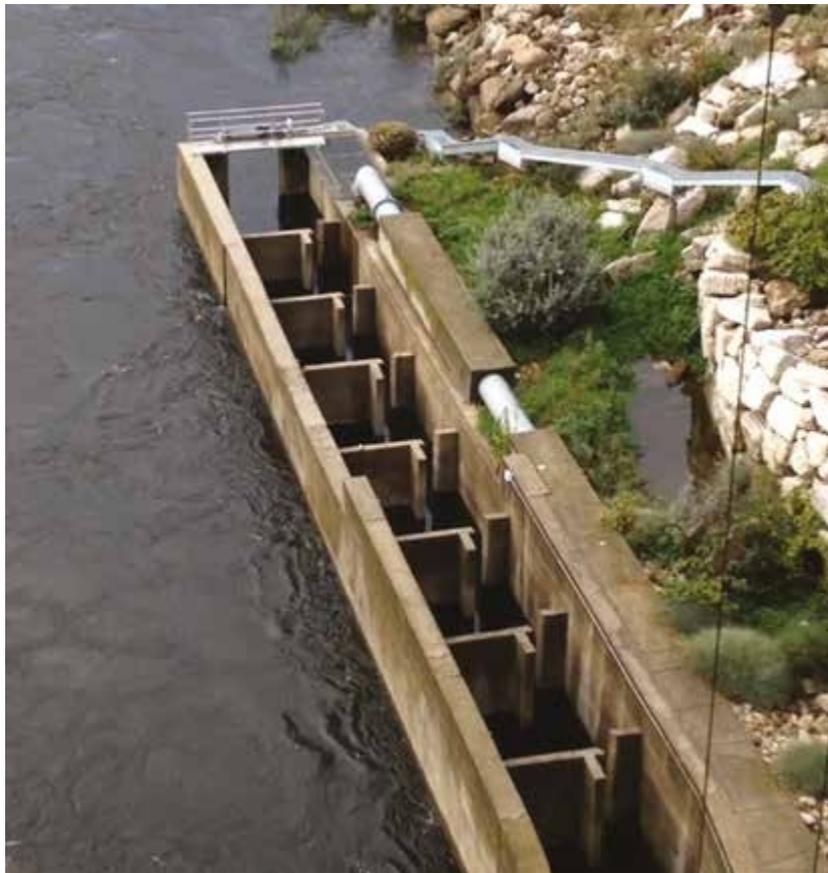


Figura 4.20. Escalas de hendiduras verticales.

4.4.1. Cálculo en la escala de artesas de hendidura vertical de los niveles de agua para los caudales máximos y mínimos.

El estudio que a continuación exponemos, trata sobre el cálculo de una escala de hendiduras y las consecuencias que se producen en el flujo por la variación de la diferencia de alturas de las láminas debidas a la variación de los caudales.

La situación más frecuente es que la lámina inferior no dependa de la cola de otro embalse por debajo de la barrera del estudio. Esta circunstancia, no depende del tipo de escala sino de las condiciones de la barrera; consecuentemente parte de los resultados y conclusiones que se obtienen en este capítulo se pueden hacer extensibles a las escalas de artesas sucesivas.

Supongamos que de la barrera de un río se conocen las cotas de la lámina superior e inferior con caudales máximos (CLsCmx y CLiCmx), como también las cotas de la lámina superior e inferior para caudales mínimos (CLsCmi), (CLiCmi).

En este estudio se supone que la diferencia entre las cotas para los caudales máximos son menores que para los caudales mínimos, es la situación normal de los azudes y de algunos tipos de presas, en estos casos los vertederos de las barreras suelen ser más grandes que la anchura de los ríos (si fuera al revés, el análisis sería semejante si bien con resultados contrarios). El estudio se realiza primeramente para el caso de caudales mínimos y después para los caudales máximos:

a) cálculo para caudales mínimos.

1. Desnivel entre artesas D_h y anchura del vertedero (ver figura 4.21.)

La elección del desnivel entre artesas Δh y la anchura del vertedero se realiza en función de la especie o especies objeto según las tablas expuestas anteriormente.

2. Número de estanques.

Para determinar el número de estanques primeramente es necesario saber el desnivel total en la barrera. Existen dos desniveles dependiendo si los caudales son máximos o mínimos.

Caudales máximos: Desnivel total = $CLsCmx - CLiCmx = D CLmx$.

Caudales mínimos: Desnivel total = $CLsCmi - CLiCmi = D CLmi$.

Como ya se ha comentado anteriormente, el máximo desnivel se produce normalmente con caudales mínimos.

Como la altura de desnivel entre estanques elegida es Δh el número de saltos será:

nº de saltos = Desnivel entre láminas (caudales mínimos) / desnivel entre estanques:

$$n \text{ (saltos)} = DCLmi / Dh$$

El número de estanques es igual al número de saltos menos uno.

$$n^{\circ} \text{ de estanques} = n \text{ (saltos)} - 1$$

3. Altura de vertido mínima (h_m).

Se recomienda que la altura de vertido mínima (h_m), no sea inferior a 0,50.

4. Cota de los vertederos.

La cota a la que se ubicará el vertedero de entrada del agua en el primer estanque tendrá que tener el valor adecuado, para que cuando se produzca el caudal mínimo exista una profundidad de 0,50 m de caída de vertido.

Consecuentemente, teniendo en cuenta que la cota del agua en la lámina superior para caudales mínimos es "CLsCmi", la cota del primer vertedero puede ser: CLsCmi - 0,5.

El agua entra en el estanque 1 por el vertedero procedente del río (Figura 4.21), como en total hay "n" vertederos, uno más que el número de estanques, y se considera una diferencia de altura entre estanques de Dh , la cota del segundo vertedero será la cota del primer vertedero disminuida en el valor de Dh , así sucesivamente hasta el último vertedero, desde el cual el agua caerá al río con una altura de Dh . En la figura 4.21 se representa esquemáticamente todo lo expuesto.

Tal y como se ha desarrollado el diseño en función de los caudales mínimos, las alturas de vertido y la caída libre entre estanques son iguales para todos estos.

Esta situación solo se mantiene para caudales mínimos por lo tanto cuando se produzcan otros caudales los valores de las alturas y de los Dh serán distintos en cada vertedero.

5. Cálculo del caudal.

El caudal que atraviesa la escala se determinará aplicando la siguiente fórmula:

$$Q = C_d \cdot b \cdot h \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \dots [m^3 / s]$$

Dónde:

C_d es el coeficiente de descarga, que varía entre 0,65 y 0,85.

b , es la anchura de la hendidura (m).

Δh , es la altura de caída libre (m).

h , es la altura total de vertido (m).

g , es la gravedad (9,81 m/s²).

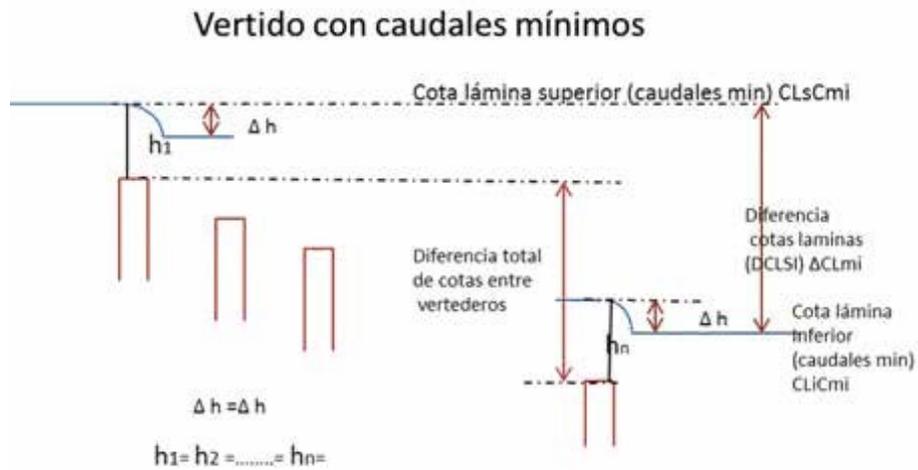


Figura 4.21. Perfil hidráulico con caudales mínimos.

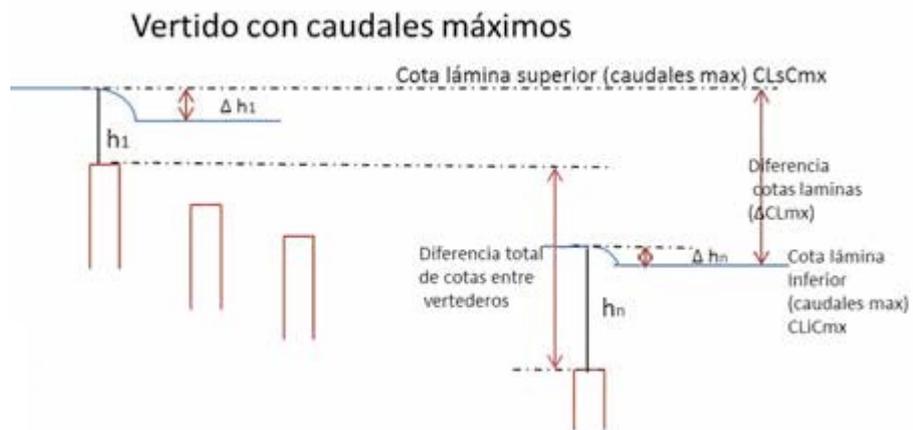


Figura 4.22. Perfil hidráulico con caudales máximos.

b) cálculo para caudales máximos.

Una vez fijadas las cotas de los vertederos, que como se ha visto anteriormente, se ha realizado en función de las cotas de las láminas para los caudales mínimos, se va a estudiar cómo se produce el vertido cuando las cotas de las láminas han cambiado, concretamente para los caudales máximos (ver figura 4.22).

Con los caudales máximos el desnivel entre láminas es:

Caudales máximos: Desnivel total = $CLsCmx - CLiCmx = DCLmx$.

En la parte superior de la barrera la altura de vertido es conocida y determinada por la diferencia de cotas entre la lámina de agua y la del vertedero, porque ya se ha fijado la cota de los vertederos de los estanques, así:

$$h_1 = CLsCmx - \text{cota del vertedero 1}$$

Una parte de esta altura corresponde a la altura de vertido libre del vertedero “ Dh_1 ”, que por el momento es desconocida.

También se conoce la cota de la lámina de agua inferior $CLiCmx$, y la cota del último vertedero, la altura total de vertido h_n será el valor de la diferencia entre $CLiCmx$ y la cota del vertedero más el valor de la altura de caída libre desde este último vertedero Dh_n

En la figura 4.22, se han esquematizado cada uno de los parámetros.

En este caso no existe igualdad de alturas de vertidos “ h_i ”, como tampoco las alturas de vertido libre “ Dh_i ”.

Al no coincidir la diferencia de las cotas de las láminas superior e inferior de los caudales mínimos con los caudales máximos y como se fijaron las cotas de los vertederos en función de los caudales mínimos, cuando se producen los caudales máximos, normalmente la diferencia de alturas para este segundo caso de caudales es inferior al primero, entonces con los caudales máximos, la altura de vertido en el primer vertedero es inferior a la altura de vertido del último vertedero.

La altura de vertido en el primer vertedero “ y_1 ” viene determinada por:

$$h_1 = CLsCmx - \text{cota del vertedero 1}$$

La altura de vertido en el último vertedero será:

$$h_n = CLsCmx - \text{cota del vertedero } n + \Delta h_n$$

Lo habitual es que estas alturas no coincidan; al no coincidir, evidentemente para que el caudal sea el mismo en los dos vertederos obliga a que la altura de caída libre “ Dh ”, en cada caso tendrá que ser la debida para que se produzca el mismo caudal, según la fórmula del caudal (cuanto más grande es Dh mayor es el caudal), por eso las caídas libres van variando para ajustar el caudal.

La variación de las caídas libres estarán en función de la diferencia de alturas de vertido entre el primer vertedero y el último, estas a su vez están en función de las diferencia de las

alturas de desnivel entre las láminas de la barrera para cuando se producen los caudales máximos o mínimos, cuanto mayor sea la diferencia del vertido entre los vertederos, mayor será las diferencias de las caídas libres “ Dh_i ” de los vertederos.

El cálculo para cuantificar los valores de “ Dh_i ” se realiza por medio de programación con algoritmos. Como normalmente ocurre que la altura de vertido en el primer vertedero es inferior a la altura de vertido en el último vertedero, implica que la altura de caída libre tendrá que ser mayor en el primer vertedero, sí por el contrario fuera de manera inversa, es decir que la altura de vertido en el primer estanque fuera superior a la del último, entonces necesariamente la altura de caída libre en el último será mayor.

Es recomendable realizar estos cálculos para conocer las variaciones de las alturas de caída libre porque pueden tener consecuencias de cierta consideración. En concreto, Larinier (2002) recomienda que la altura de caída libre desde el último estanque hasta el río no sea inferior a 0,20 m. Por lo tanto, una disminución acentuada de la altura de caída libre en el último vertedero puede disminuir el “efecto llamada o de atracción”.

4.4.2. Ejemplo numérico de cálculo de la escala de artesas de hendidura vertical con distintos niveles de agua.

Supongamos que una barrera existente en un río impide el paso a los peces. Realizados los estudios hidrológicos e hidráulicos pertinentes se obtienen los siguientes resultados: la lámina superior cuando el caudal es máximo tiene cota de 170,20 m.s.m., y cuando el caudal es mínimo 170,00 m. s. m. La cota de la lámina inferior cuando el caudal es máximo es de 168,40 m.s.m., y cuando el caudal es mínimo 168,00 m.s.m. Las especies objetivo del río son la trucha común y el barbo. La escala elegida es la de artesas con vertederos de hendiduras verticales.

a) cálculo para caudales mínimos.

1. Elección del desnivel entre artesas y anchura del vertedero.

Como las especies existentes son la trucha y el barbo se ha optado por un desnivel de 0,25 m. La anchura del vertedero elegida para las especies objetivo es de 0,17 m.

2. Número de estanques.

El número de estanques depende del desnivel total en la barrera.

Caudales máximos: Desnivel total = C.L.S- C.L. I. = 170,20-168,40= **1,80** m.

Caudales mínimos: Desnivel total= C.L.S- C.L.I.= 170,00-168,00 = **2,00** m.

Primeramente se diseñará la escala con los caudales mínimos porque es con estos caudales cuando se produce el máximo desnivel, en concreto 2,00 m.

La altura del desnivel entre estanques elegida es 0,25 m, con este valor el número de saltos será:

n° de saltos = altura total / desnivel entre estanques = $2,00 / 0,25 = 8$ saltos.

El número de estanques es igual al número de saltos menos uno.

n° de estanques = $8 - 1 = 7$ estanques.

3. Altura de vertido mínima (h_m).

Con el desnivel elegido el desnivel entre estanques de 0,25 m, se procede a estimar cual será la altura de vertido mínima (h_m), como se ha visto es recomendable que no sea inferior a 0,50 m, por lo tanto se elige una altura de vertido de 0,50 m para el caudal mínimo.

4. Cota de los vertederos.

La cota del vertedero de entrada del agua al primer estanque será lo correspondiente para que cuando se produzca el caudal mínimo permita una profundidad de vertido de 0,50 m. Por lo tanto como la cota del agua en la lámina superior para caudales mínimos es 170,0 m, la cota del primer vertedero será: $170,0 - 0,5 = 169,5$ m.

El agua entra en el primer estanque por el vertedero que comunica con el río, a la cota de 169,5 m, como el número total de vertederos es de 8 (uno más que el número de estanques, es decir 7), y como se ha considerado una diferencia de estanques de 0,25 m la cota del segundo vertedero será la cota del primer vertedero menos 0,25, y así sucesivamente hasta el vertedero 8 que tendrá de cota 167,75 m, cantidad resultante de restar 7 veces 0,25 m de la cota 169,5 m, desde este último vertedero el agua caerá al río.

5. Cálculo del caudal.

Aplicando la fórmula anteriormente expuesta, el caudal que pasará por la escala será:

$$Q = C_d \cdot b \cdot h \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \dots [m^3 / s]$$

Dónde:

C_d es el coeficiente de descarga: 0,75.

b , es la anchura: 0,17 m.

h , es la altura de vertido: 0,5 m.

Dh , es la altura de caída libre: 0,25 m.

Aplicando estos valores a la fórmula anterior resulta el valor de:

$Q = 0,141 \text{ m}^3/\text{s}$.

b) Cálculo de los caudales máximos.

Cuando se producen los caudales máximos la altura del desnivel entre láminas es:

$$170,2 - 168,4 = 1,8 \text{ m.}$$

En este caso el flujo no vierte de la misma manera que cuando los caudales son mínimos.

En el primer vertedero, la altura de vertido (h_1) es conocida y fijada por la diferencia de cotas del agua (170,2) y la cota del vertedero (169,5), siendo su diferencia de 0,7 m, de esta cantidad una parte corresponde a Dh_1 .

Sabemos que en el último vertedero la cota de la lámina de agua está a 168,4 y la cota del vertedero "8" es 167,75, por lo tanto la altura de vertido en este vertedero (h_8) será la diferencia de estas dos alturas más el valor de la altura de caída libre desde este último vertedero al río $h_8 = (168,4 - 167,75) + Dh_8 = 0,65 + Dh_8$ (Figura 4.23).

La situación de cotas y alturas se puede ver de forma esquemática en la Figura 4.23.

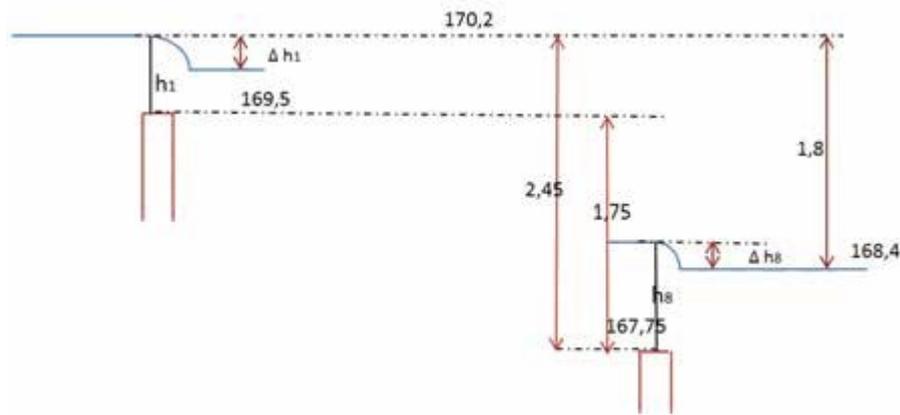


Figura 4.23. Cotaciones de los niveles de agua para caudales máximos.

Al no ser las alturas de vertido las mismas aguas arriba y aguas abajo, pues ya hemos visto que la entrada del agua por el primer vertedero se produce con la altura de vertido $h_1 = 0,7 \text{ m}$ ($170,2 - 169,5$) y la altura de vertido en el vertedero 8 es $h_8 = 0,65 + Dh_8$, no se puede producir una caída libre (Dh) idéntica entre estanques, puesto que el flujo tiene que mantener el caudal constante. Por lo tanto, en cada caída entre estanques, el flujo tendrá que ajustarse de tal forma que el valor de la altura total de vertido " h_i " con el valor de $+ Dh_i$ para que el caudal sea constante en todo momento. Al ser la altura de vertido entrante en el primer estanque menor que la altura saliente del último estanque, analizando la fórmula del caudal, implica que necesariamente la altura de caída libre (Dh) será mayor en el primer vertedero que en el último, para que el caudal sea el mismo en los dos casos.

En cualquier caso y en todos los vertederos, siempre se debe de cumplir que una vez estabilizado el flujo, el caudal debe ser constante.

$$Q_i = Q_j$$

Aplicando la ecuación del caudal anteriormente expuesta (Larinier 2002).

$$Q = C_d \cdot b \cdot h \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \dots [m^3 / s]$$

Particularizando para el vertedero j.

$$Q_j = C_d b h_j \sqrt{2 * g * \Delta h_j}$$

Y para el vertedero j'.

$$Q_{j'} = C_d b h_{j'} \sqrt{2 * g * \Delta h_{j'}}$$

y simplificando se llega a la siguiente igualdad:

$$h_j^2 * \Delta h_j = h_{j'}^2 * \Delta h_{j'}$$

Esta igualdad se debe cumplir para todos los vertederos.

El cálculo para conocer los valores de las alturas de vertido “ h_i ” y de las alturas de caída libre “ Δh_i ”, se realizan por medio de un programa informático.

Para conocer los valores concretos cuantificados de las variables se debe de tener en cuenta, que las diferentes combinaciones posibles de niveles a la entrada y a la salida de la escala de peces, determinan un caudal concreto que circula por la misma. La determinación cuantitativa de dicho caudal se debe de hacer buscando la situación de equilibrio que se crea en la secuencia de estanques para cada situación. Las tres variables que entren en juego: el caudal, el nivel a la entrada y el nivel a la salida, tienen una relación entre ellas, y partiendo de dos valores conocidos podemos determinar el tercero.

La forma más operativa de realizar el cálculo es iniciarlo desde el extremo más bajo. Fijado un valor de caudal, se van calculando los niveles requeridos en los estanques, a partir del nivel inferior, para que pueda circular el caudal prefijado. Conocidos todos los valores resultantes de las relaciones entre las tres variables, cuya representación gráfica serían superficies tridimensionales, podemos analizar a posteriori la influencia que tiene una variación de una de las variables sobre el valor de las demás.

A partir una fórmula del caudal circulante entre estanques, por ejemplo, la anteriormente expuesta, se desarrolla un proceso interactivo que va calculando los niveles de agua en los estanques, comenzando en el extremo inferior de la escala, partiendo del nivel del río en la lámina inferior de la barrera y fijado un caudal, para terminar, determinando el nivel correspondiente en el otro extremo.

Este cálculo se realiza por medio de algoritmo desarrollado en un programa informático.

En la figura 4.24 se describe un modelo de algoritmo que se puede utilizar.

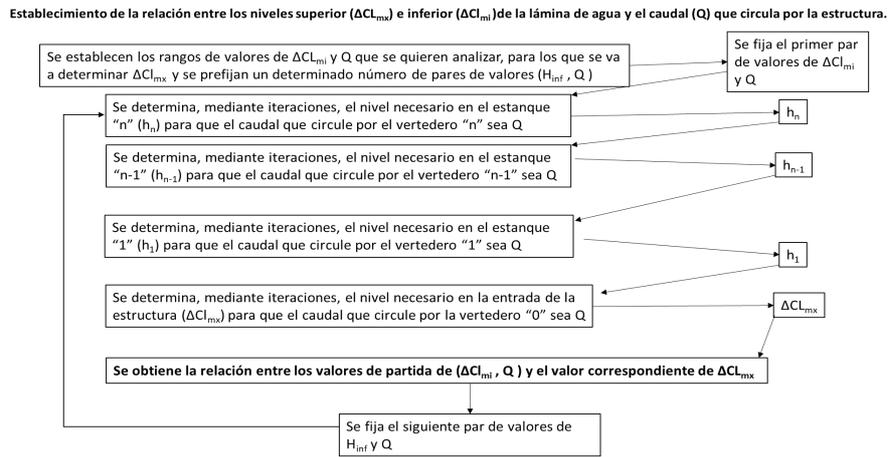


Figura 4.24. Cotas de los niveles de agua para caudales máximos (fuente. Robredo Sánchez J.C.)

Además de aplicar este algoritmo en este caso concreto de la variación de los niveles aguas arriba y aguas abajo de la barrera debido al caudal máximo, distintos a los existentes de la situación original de diseño, que como se recuerda se realizó para el caudal mínimo. Este método es también válido para aplicarlo a cualquiera otro caso en que por cualquier otro motivo los niveles de agua originales son modificados, como, por ejemplo; datos erróneos originales, variación de las condiciones de vertido por modificación de la barrera, del cauce o del régimen hídrico en el río, etc.

Por lo tanto, independientemente de la causa de la modificación de los niveles de agua arriba y debajo de la barrera, respecto de la situación original en la que se realizó el cálculo de la escala, las consecuencias de estas modificaciones, siempre van a ser que las alturas de vertido y las alturas de caída libre van a variar respecto de la situación original y van a ser distintas en cada vertedero.

3º) Dimensionamiento del estanque.

Conocida la anchura del vertedero “b”, que en el caso de la trucha se recomienda que este comprendida entre 0,15 y 0,17 m. Elegir una mayor o menor obertura influirá en el caudal vertiente que atraviese la escala, en este caso como el caudal mínimo del río es relativamente grande, se opta por 0,17 m. La ventaja de los caudales grandes es que favorece el efecto de “atracción”. Por el contrario, los caudales grandes en la escala implican que los estanques tendrán que ser más grandes para poder disipar la energía hidráulica de caída.

A partir de este valor siguiendo el criterio de Larinier (2002), se dimensiona la longitud y la anchura y el resto de parámetros se determinan por el criterio de Lenne (1990) se redimensiona toda la escala:

Longitud del estanque: 1,7 m (se podría aumentar a una longitud, cercana a 2,0 m.)
Anchura 1,36 m (entre la horquilla de valores que da Larinier, 6 a 8 veces la anchura, se elige la mayor: 8)).
Longitud de deflector: (según Lenne 1,78 b) 0,30 m.
Distancia del vertedero a la pared: (según Lenne 1,15 b) 0,19 m.
Distancia del deflector a la pared: (según Lenne 2,08 b) 0,35 m.

Se considera como profundidad mínima del agua " h_{\min} ": 0,50 m. Esta altura corresponde a la altura de vertido, en el caso de que se opte por un zócalo de 0,20 m, la profundidad dentro del estanque sería la altura de vertido más la altura del zócalo.

4.5. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE ESCALAS DE ARTESAS PARA MEJORAR LA EFICACIA.

En este apartado, se expone algunas actuaciones con el objetivo de mejorar la eficacia. Estas consideraciones están destinadas especialmente para barreras situadas en ríos con muchas variaciones de caudales y con fuertes sequías, como es el caso de numerosos ríos españoles.

Algunos de los aspectos que se van a exponer a continuación no son aplicaciones exclusivas para estas escalas, sino que también se pueden y deben aplicar a otros tipos de pasos en las mismas circunstancias.

4.5.1. Mejoras en la entrada del agua en la escala.

Para conseguir que la entrada del agua sea con el caudal y el nivel adecuados se pueden construir algunos dispositivos, que permitan una gran variación de nivel. Evidentemente, se deberá tener en cuenta las variaciones del nivel aguas arriba de la barrera, dependiendo de la fluctuación de este desnivel se procederá a incorporar el sistema de vertederos adecuados.

Variaciones grandes del nivel aguas arriba de la escala, (por ejemplo entre 0,5 y 1 m) y caudales mínimos no demasiado pequeños.

La solución frecuentemente utilizada es la instalación de un vertedero de sección rectangular con la base relativamente pequeña para que las variaciones de caudales no sean excesivas para grandes variaciones de nivel, este vertedero en realidad es análogo al de las escalas de hendiduras verticales. Esta opción es apropiada para gran número de ríos con estas características. El primer estanque se situará a la altura adecuada para que el desnivel existente entre el vertedero y el estanque sea o bien inexistente o la mínima posible.

El método puede ser aplicado a la salida del agua de la escala hacia el río para conseguir que las fluctuaciones del nivel del agua del río por debajo de la barrera no generen un desnivel excesivo.

Variaciones grandes de los niveles por encima de la barrera y con periodos de caudales muy pequeños por fuerte estiaje.

En este caso, se debe hacer que la entrada del agua en la escala se realice con un vertedero compuesto a distintas cotas. Con ello se consigue que cuando los caudales son bajos, el agua se concentre y el calado sea suficientemente grande para que el pez pueda remontarlos sin problemas; este es el caso de caudales exiguos, casi nulos.

Cuando ya los caudales aumentan, interesa que a medida que asciende ligeramente el calado, aumente notoriamente el caudal. Este objetivo se consigue aumentando la anchura de entrada del agua.

Para ajustar el desnivel del agua desde la entrada hasta el primer estanque lo ideal es situar el estanque con el menor desnivel posible, y ajustar los desniveles entre las dos láminas para todos los caudales en función de la anchura de la entrada del agua.

4.5.2. Mejoras en la salida del agua de la escala.

Mantenimiento de desniveles pequeños entre el primer estanque y el río para caudales pequeños. Este problema y sus soluciones se comentarán detalladamente en el capítulo sobre las principales causas del mal funcionamiento de la escala. Allí se verá como una posible solución es la construcción de un pequeño dique-vertedero nivelador de muy pequeña altura, tan solo 10 cm de altura desde la base y con ello se mantiene el desnivel de agua entre el primer estanque y el río de forma constante.

4.6. BIBLIOGRAFÍA.

ANDREW F.J. (1990) , The use of vertical-slot fishways in British Columbia, Canada. *Proc. Int.Sump. On fishways*, Gifu; Japan , 267-274 p.

BERMÚDEZ, M; RODRÍGUEZ, A; CEA, L; MORCILLO, F; CASTILLO, M. Y ARAMBURU, E. 2012. Implications of Fish Behaviour for Vertical Slot Fishways Design. Resúmenes del IX *Simposio Internacional de Ecohidráulica, Vienna, Austria 9th Internationa*.

CLAY, C. H. 1961, *Design of fishways and other fish facilities*. Dept. of Fisheries, Ottawa, Canadá 301 p.

GEBLER, R. J. 1991. Naturgemäe Bauweisen vonSohlenbauwerken und Fischaufstiegen zur Vernetzung der Fliegewässer. Diss. Univ. Karlsruhe, Mitteilungen des Institutes für Wasserbau und Kulturtechnik, Nr. 181.

GUALLART y ELIAS, E. 1913. *Pasos y escalas salmoneras*, 86 pp. Madrid.

FAO-DVWK. 2002. *Fish passes, dimensions and monotoring*. Published FAO and DVWK

KATAPODIS, C. 1990. Advancing the art of engineering fishways for upstream migrants. *Proc. Intern. Symplosium on Fishways '90*, Giuf, Japan, Okt 1990.

LARINIER M. 1992. Passes a bassins succesifs, prébarrages et rivières artificielles. Bull. Fr. *Pêche Piscic.* 326/327, 73-94.

LARINIER M. 2002. Pool fishways, pre-barrages and natural bypass channels. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 364 suppl. pp 54-82.

LENNE D. 1990. *Circulation des poissons migrateurs: franchissement des buses et etude hydraulique des passes à basssuccessifs.* ENITRS-CEMAGREF Rep., 70 p.

MARTÍNEZ DE AZAGRA A., 1999. *Escala para peces.* Ed. E.T.S.I.A.A Universidad de Valladolid 38 pp. Palencia.

PENA J., PUERTAS J., TEJEIRO T., PEÑA E.(2006) Dispositivos de remonte para peces: Escalas de hendiduras verticales. *Ingeniería del Agua. Vol. 13 n° 2 pp 112-128.* Córdoba (España).

PHILIPPE L., 1897. Rapport sur les échelles à poissons (Report on fish ladders). *Ministry of Agriculture. Committee for improvements in agriculture and forestry,* 27 p.

SANZ J. (2010). *Apuntes del curso de escala de peces (sin publicar).* Palencia.

5. OTROS TIPOS DE ESCALAS DE ARTESAS.

5.1. ESCALAS DE ARTESAS CON VERTEDERO TRIANGULAR.

El diseño de las escalas de estanques con vertedero triangular fueron desarrolladas en la costa oeste de Estados Unidos (Bates, 1990), con el objetivo de obtener una escala de peces válida para grandes variaciones de caudales y de niveles de agua en la lámina superior de la barrera, sin tener que requerir a otros flujos auxiliares o de dispositivos de regulación del flujo aguas arriba de la barrera.

Con un caudal bajo, la escala se comporta como una escala clásica con el tipo de flujo sumergido (*plunging flow*) y la energía es disipada en cada estanque. Con altos caudales y con buenas condiciones de paso se pueden mantener el flujo sumergido (*plunging flow*) en los bordes del estanque, mientras que en la sección central de la escala se producen velocidades altas y flujo de tipo transmitido (*streaming flow*).

Los estanques funcionan como una escala cuando los caudales son bajos, y como un canal rugoso cuando los caudales son altos, donde los mismos tabiques de separación entre estanques producen la rugosidad del canal.

En la figuras 5.1, y 5.2, se muestran las características de la escala construida en la presa de Town en el River Yakima en Estados Unidos. La pendiente es cercana al 10 % y el caudal se aproxima a 10 m³/s. La pendiente del vertedero triangular debe estar comprendida entre 1/4 a 1/3.

Este tipo de escala tiene la ventaja de permitir el paso de detritos y acarreo debido a los grandes orificios de fondo. Los estanques y vertederos no deben construirse con saltos mayores a 2 metros, porque todavía no han sido suficientemente estudiados (Bates, 1997).

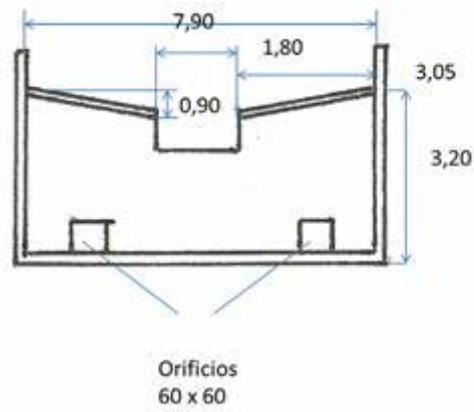


Figura 5.1. Vista en alzado de la escala triangular (Bates, 1990).

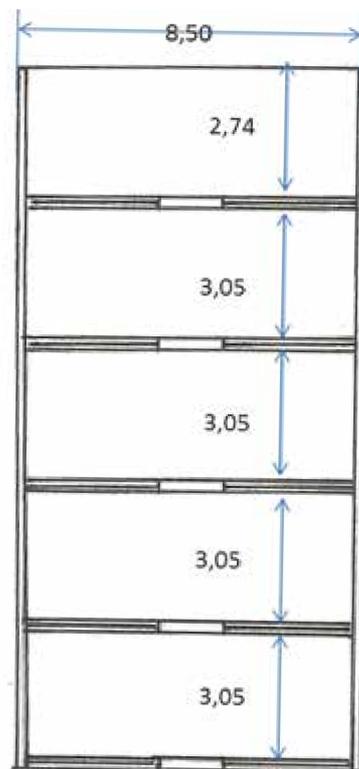


Figura 5.2. Vista en planta de la escala triangular

En los ríos franceses de Adour, Salat, Neste y Lot, se han construido escalas de diferentes tamaños siguiendo los modelos desarrollados por el Instituto Hidráulico de Ingeniería de Toulouse (Francia). En estas escalas, la energía se disipa en cada uno de los estanques para todos los niveles de agua.

El método de diseño de este tipo de escalas, todavía no se ha desarrollado. Esto es debido principalmente a la dificultad de definición de las condiciones hidráulicas apropiadas para esta escala. En la práctica, la escala de vertederos triangulares se usa solo con pequeñas alturas de desniveles entre estanques y cuando el nivel de aguas arriba fluctúa con poca variación durante el periodo de migración de las especies objetivo.

La ventaja que ofrece esta escala es que además de permitir el paso a los peces también puede ser usada por canoas y kayaks.

5.2. PREBARRERAS.

La prebarrera es un tipo de escala que consiste en un conjunto de estanques construidos aguas abajo de la barrera (de aquí el nombre de prebarrera), de tal forma que la altura del salto queda dividido según el número de estanques que se vayan a construir más uno. La separación entre estanques se realiza por medio de tabiques y hendiduras que hacen las veces de vertederos. Para que el pez pueda superar el desnivel sin dificultad la altura del desnivel debe ser suficientemente pequeña.

La mayor ventaja de las estas estructuras es que consigue crear una gran atracción al pez, porque un alto porcentaje del caudal pasa a través del paso.

La altura de desnivel entre estanques depende de las especies existentes en el río, lógicamente cuanto menor sea esta altura mayor número de estanques se tendrán que construir. Los valores recomendados para grandes salmónidos son 0,35-0,40 m (Larinier, 2002):

Si se opta por esta solución, para recuperar la franqueabilidad del curso de agua, se deben tener en cuenta los siguientes consejos (Larinier, 2002):

1. Asegurar que exista el suficiente desnivel para que el pez sea atraído.

Independientemente del flujo en el curso de agua. Durante los caudales mínimos todo el flujo se concentra en la escotadura, entonces se debe garantizar que el desnivel sea 0,20 o 0,30 m. Evidentemente, cuando la prebarrera atraviesa toda la anchura del río, y por lo tanto todo el caudal del río pase por la misma, no es necesario tener en cuenta el efecto llamada, porque sencillamente el pez tiene que ascender necesariamente por la prebarrera. En estos casos se puede disminuir la altura del salto tanto como se quiera. En Francia, se han realizado prebarreras con saltos de tan solo 0,10 m.

2. Mantener más o menos constante el desnivel entre los estanques.

Si la prebarrera se extiende en toda la anchura del río, es decir va de orilla a orilla, entonces todo el curso de agua pasara por la prebarrera, circunstancia que debe tenerse en cuenta en el diseño y cálculo de los vertederos.

3. Los vertederos deben tener la forma y el perfil apropiados para que el pez pueda ascender sin dificultad de un estanque al siguiente.

Los muros deben ser de 0,20 o 0,30 m de ancho o incluso más para asegurar la estabilidad y seguridad de la estructura. Si estos muros son rectangulares, por razones de simplicidad, entonces los vertederos serán de cresta ancha. La anchura excesiva dificulta el paso de los peces, por ello se recomienda hacer el perfil suave redondeado o por lo menos biselado. Con esta mejora, además de facilitar el paso a los peces se consigue que el vertido sea adherente. Especial atención debe realizarse en la escotadura superior porque normalmente está situada en el muro. El desnivel del primer salto en la parte inferior de la barrera puede incrementarse notoriamente en los momentos de caudales mínimos, porque el nivel inferior del agua se incrementa más rápidamente que el nivel superior aguas arriba de la barrera y consecuentemente, cuando aumenta el caudal aumenta la sumergencia del salto inferior más rápidamente.

4. Asegurar la durabilidad de los muros y proteger la solera.

La manera de proteger los muros y la solera es incorporar grandes bolos, hormigón o bien introduciendo el muro en el suelo.

5. Estanques suficientemente profundos.

La profundidad debe ser mayor a dos veces el desnivel entre estanques.

6. Los estanques deben tener el volumen mínimo, en función del flujo y del salto para que su capacidad de disipación pueda ser la admisible en los momentos en que los caudales son grandes. Normalmente, en las prebarreras el número de estanques es pequeño lo cual permite aumentar el valor de la potencia máxima disipada en el estanque. Por ello se pueden diseñar los estanques con un valor de 50 W/m^3 o incluso menos para condiciones de caudales bajos y permitir hasta 500 W/m^3 con caudales de varios metros cúbicos por segundo (Larinier, 2002).

Las prebarreras son generalmente utilizadas para ríos con salmónidos.

Este tipo de escala tiene que evitarse para la mayoría de las especies ribereñas, particularmente para el sábalo ya que el flujo en la mayoría de los casos es del tipo "sumergido" (plunging).

En la Figura 5.3, se muestra un azud con tres prebarreras dispuestas en toda la anchura del río. El pez remonta la primera, después la segunda y así sucesivamente hasta llegar a la hendidura situada en el azud.

En la Figura 5.4, se aprecia otro tipo de disposición de las prebarreras, también para un azud.

En la Figura 5.5, se observa el perfil longitudinal del azud y de las prebarreras.

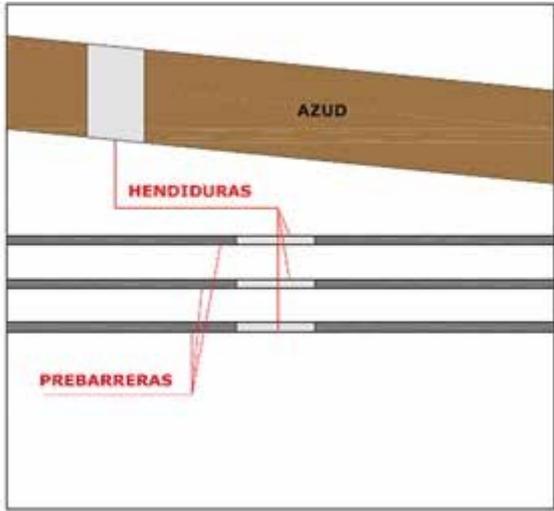


Figura 5.3. Prebarrera en toda la anchura del río.

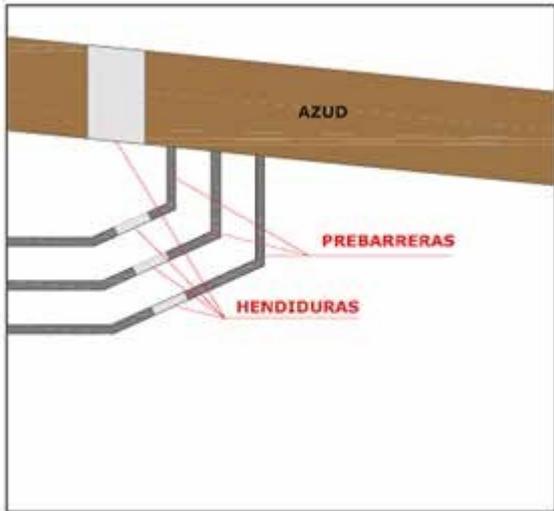


Figura 5.4. Prebarrera situada en una parte de la barrera.

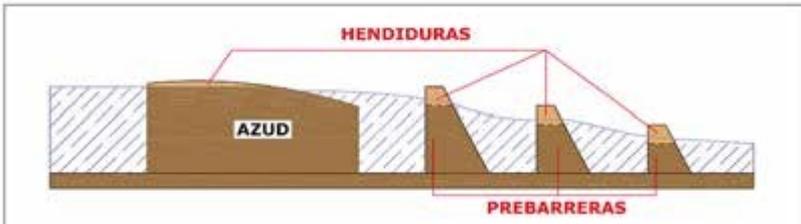


Figura 5.5. Perfil longitudinal de una prebarrera.

Las prebarreras están sometidas a las riadas, y por lo tanto sus dimensiones deben derivarse de la aplicación de cálculos de estabilidad. Como dato orientativo, se recomienda que los muros construidos en mampostería hidráulica tengan un espesor mínimo en coronación de 0,5 m.

El número de prebarreras dependerá de la diferencia de cotas de las alturas entre las láminas superior e inferior del azud, y también de la diferencia de alturas entre cada muro de prebarrera y el siguiente.

Siempre que sea posible, la prebarrera puede ser una sencilla y eficaz solución para conseguir recuperar la transitabilidad de los peces, porque además de su sencillez, también garantiza el efecto llamada.

5.3. ESCALAS DE SABALOS.

Por las experiencias y las observaciones realizadas se ha podido comprobar, que aun siendo el sábalo un gran nadador tiene menos capacidad que el salmón o la trucha de mar. De hecho, según los estudios realizados en Francia, la mayor parte de las escalas construidas en este país son ineficaces para el paso de los sábalos (*Alosa alosa*). A partir del momento, en que se instala una presa o azud creando una barrera transversal, las poblaciones de este pez por encima de la barrera o se hacen raras o gran parte de ellas desaparecen.

Muy pocas escalas han sido efectivas para esta especie, entre otras se ha comprobado la eficacia de las enormes escalas construidas en la presa de Bonneville, de 10 m de anchura, en el río Columbia, lo cual provoca que estas escalas tuvieron un coste muy alto, aproximadamente el 10 % del coste de la presa (Dalley, 1980)

5.3.2. Capacidad de nado del sábalo.

Observaciones de campo muestran (C.T.G.R.E.F., 1981) que con una velocidad del agua tan solo cercana a 2 m/s constituye una dificultad para muchas ejemplares de sábalos, cuando la distancia que se tiene que atravesar es superior a varias decenas de metros (cuanto mayor es la distancia menor velocidad puede mantener el pez).

Las observaciones realizadas en la presa de St. Laurent des Eaux en el río Loire, (Litaudon, 1985), con temperatura de 16 y 17 ° C mostraron que la velocidad de explosión varía entre 3,1 m/s y 4,7 m/s dependiendo del individuo. Esta velocidad solo se puede mantener durante un periodo pequeño de tiempo (alrededor de 6 o 7 segundos). La máxima velocidad de nado que el sábalo puede sostener por unos pocos segundos fue estimada entre 4,1 m/s y 6,1 m/s.

Investigaciones realizadas en USA (Weaver, 1965), obtuvieron los resultados siguientes:

- Para las distancias de 9 m, 7,1 m y 5,7 m se obtuvieron velocidades respectivas de 3,5 m/s, 3,85 m/s y 4 m/s con temperatura de 21°C (la temperatura más favorable). De acuerdo con estas investigaciones la máxima velocidad de nado para el sábalo está entre 4,3 y 4,6 m/s.

- En general, se puede concluir que velocidades cercanas a 3,5 m/s a 4 m/s sobre distancias de pocos metros representan obstáculos, que son difíciles para los sábalos. Estas velocidades se generan con saltos menores a un metro, por ejemplo 0,8 m.

Esto significa que incluso pequeños obstáculos de moderada altura pueden constituir serios obstáculos a la migración de los sábalos, particularmente en flujos sumergidos (plunging).

Como regla general, se sugiere que la máxima distancia que puede remontar un sábalo, es menos de:

- 3 metros con velocidad de flujo de 3,25 m/s.
- 5 metros con velocidad de flujo de 3,0 m/s.
- 10- 12 metros con velocidad de flujo de 2,5 m/s.

Con temperaturas óptimas las velocidades anteriores pueden aumentarse en 1 m/s.

5.3.3. Comportamiento migratorio del sábalo.

El sábalo suele moverse cerca de la superficie del agua, por lo tanto las escalas de peces deben permitir que el paso se realice en la superficie (no sería válido el paso por un orificio de fondo).

El sábalo también se mueve en bancos de peces lo cual obliga a que la anchura del paso sea lo más grande posible para así evitar bloqueos.

El sábalo necesita una corriente de agua para orientarse. En aguas estáticas o muy turbulentas se puede desorientar, por eso prefiere aguas con flujo sin muchas turbulencias, flujos transmitidos “streaming”, incluso con velocidades de cierta intensidad. No son zonas óptimas para el sábalo, aquellas que tiene muchas turbulencias y aireaciones, remolinos aguas abajo de saltos, resaltos o surgencias provenientes de turbinas. En todas estas situaciones los sábalos se desorientan más fácilmente que los salmónidos.; a diferencia de éstos los sábalos no saltan, por este motivo este pez tiene mucha dificultad para remontar por flujo sumergido (plunging).

Las observaciones realizadas demuestran que los sábalos se quedan fácilmente atrapados en las esquinas, y también son inducidos a las zonas de recirculación formadas por repentinos ensanchamientos en el canal. Por ello, es necesario asegurar que en los lugares donde caiga el agua, no exista el menor volumen de recirculación y así prevenir el fenómeno de cortacircuitos entre los estanques que podría afectar a la eficacia hidráulica del agua.

También se ha observado al pie de las obstrucciones, que en algunos casos, los sábalos exploran bastante menos que los salmónidos. Los sábalos tienden a quedarse en las zonas “confortables” por un considerable tiempo, este comportamiento ralentiza la emigración

Se ha podido comprobar que el sábalo es muy sensible a los cambios bruscos de luz; por ello es necesario iluminar las secciones sin luz y particularmente algunas zonas oscuras o áreas que fácilmente se oscurecen por las sombras.

5.3.4. Características de los estanques de la escala de sábalos.

La eficacia de las escalas de sábalos se consigue cuando se cumplan los siguientes requisitos:

- *El flujo debe ser “transmitido” (streaming), y no “sumergido” (plunging).* Esta condición es necesaria para que el pez se oriente con las corrientes en superficie sin necesidad de saltar.

- *No deben construirse orificios de fondo.* No se deben construir orificios de fondo para que el sábalo no quede atrapado en las contracorrientes, que se forman por encima de las superficies de las columnas de agua situadas encima de los orificios. De hecho, algunas escalas de peces con orificios de fondo construidas en la costa oeste de Estados Unidos han tenido que ser abandonadas después de producirse importantes mortandades de peces debido al bloqueo de los mismos (Monk *et al.*, 1989). Similares bloqueos han sido observados en el estanque en la parte superior de la escala de deflectores de la presa Bazacle en el río Garona, en Francia (Dartiguelongue, 1990).

- *Las escotaduras de los vertederos deben situarse en los laterales, nunca en el centro.*
Al menos se deben proveer de una escotadura o de una hendidura en los laterales, si bien es mejor proveer una en cada lado.

También se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

En la medida de lo posible debe evitarse alguna zona de recirculación porque el pez tiende a quedarse atrapado en ellas.

El sábalo se mueve en grandes cardúmenes, por ello es necesario asegurar que no se queden atrapados en las escalas. Para tal fin, los estanques deben ser lo más anchos posibles.

Las escotaduras y las hendiduras deben tener como mínimo una anchura de 0,45 o 0,50 m.

La profundidad de los estanques será como mínimo de 1,20 m. La potencia máxima volumétrica disipada debe ser inferior a 150 W/m³.

El desnivel entre estanques será inferior a 0,30 m. Es preferible usar desniveles menores, en concreto 0,20 y 0,25 m, con estos desniveles el flujo “transmitido” (streaming) es más fácil de conseguir y más aún si la anchura de la escotadura o de la hendidura es grande.

Además de las condiciones anteriormente expuestas, los caudales necesarios para estas escalas tienen que ser relativamente grandes, generalmente más de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ y en el mayor número de los casos los estanques tiene un volumen de 12 m^3 .

En las siguientes figuras se muestran algunos ejemplos de escalas de sábalos en las que se ha comprobado su eficacia.

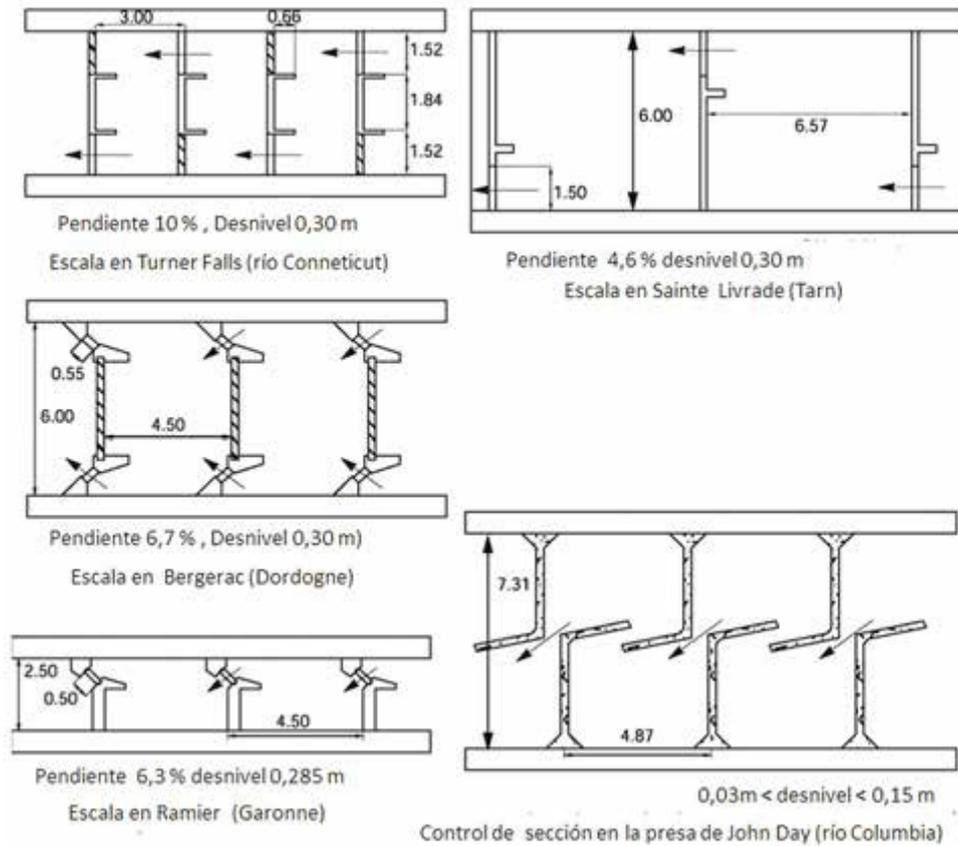


Figura 5.6. Esquemas de escalas de sábalos.

Las escalas de Columbia (Bonneville, John Day, etc) y Connecticut (Turner Falls) ríos de Estados Unidos tienen un vertedero único, la abertura es de 0,40 m y crea el flujo del tipo transmitido (Rideout *et al.*, 1985).

La escala de Bergerac en el Dordogne tiene una hendidura vertical de 0,55 m de ancho.

En las escalas con una sola hendidura, o escala de vertedero de escotadura lateral profunda, se prevé que la anchura sea suficientemente grande, alrededor de 0,45 o 0,50 (escala de las presas de Ramier y Bazacle en el Garona, presa de Sainte-Livrade en el Tarn, presa Arduis en el Aveyron) en este tipo de hendidura vertical, el grado de las zonas de

recirculaciones deben ser minimizadas por medio de la reducción del ratio anchura-longitud tanto como sea posible, y por lo tanto dirigir el flujo adecuadamente dentro del estanque hacia el tercio inferior de la pared lateral. La altura del umbral (zócalo) debe reducirse tanto como sea posible.

La gran ventaja del este tipo de escala es la casi ausencia de grandes zonas de recirculación, porque incluso cuando la altura del desnivel entre los estanques debe ser pequeña, (alrededor de 15 cm máximo) es imprescindible construir escalas de grandes dimensiones.

5.3.5. Atracción y ubicación de las escalas de sábalos.

El emplazamiento del paso para los sábalos debe ser más exigente que en el caso de los salmones, especialmente en la posición de la entrada a la escala. También es más exigente conseguir la atracción porque requiere mayores condiciones (velocidad, flujo de descarga y tipo de flujo en la entrada).

Generalmente, el sábalo explora el área al pie de la barrera mucho menos que los salmones. En algunos casos de escalas para salmones, una única entrada puede considerarse suficiente, sin embargo, esto no es válido para los sábalos. Cuando la anchura de la central hidroeléctrica es mayor a 20 m, es necesario realizar varias entradas para asegurar una eficacia aceptable. La experiencia demuestra que cuando solo hay una entrada, las operaciones de las turbinas tienen que realizarse con mucho cuidado, para permitir que los sábalos puedan encontrar la entrada a la escala, como son los casos de las centrales hidroeléctricas de Bazacle en el río Garona y Mauzac en el río Dordoña.

La entrada tiene que estar situada a lo largo de la orilla y la velocidad debe ser relativamente alta (alrededor de 2 m/s).

Por medio de las grabaciones de video realizadas se ha podido comprobar, que debe existir un caudal auxiliar de atracción para prevenir el desvío hacia otro sitio; así se asegura que los peces son guiados hacia la entrada de la escala.

5.3.6. Eficacia de las escalas de sábalos.

La eficacia de las escalas de los sábalos es significativamente menor que en las escalas de los salmones. En el caso de los salmones se pueden obtener eficacias entre el 95 y el 100 %. En el caso de las escalas de sábalos, el 75 % de eficacia es excepcional, el 50 % es excelente, y desafortunadamente del 10 % al 20 % es el porcentaje más frecuente. La evaluación de la eficacia de las escalas de sábalos ha demostrado, que incluso teniendo medios adecuados, la eficacia evaluada es muy baja, de hecho no es raro encontrar zonas favorables de reproducción entre las barreras.

En las dos barreras: Essex y Pawtucket en el Río Merimack en la costa este americana, estando separados 15 km aproximadamente, el porcentaje de sábalos que atraviesan de una planta a otra es de media el 10 %, variando desde el 3 % hasta el máximo del 23 %.

Entre 1989 y 1996, el porcentaje de sábalos que pasaron a través del ascensor Golfech en el Río Garona y que ascienden por la escala de Bazacle, situada 100 km aguas arriba, varía entre el 6 % y el 34 % con una media de 18,5 %. El porcentaje de sábalos que pasaron a través de la escala de Bazacle y que ascendieron por la escala de Ramier situada inmediatamente aguas arriba fue estimada en más del 70 % en 1990 (Dartiguelongue, 1990). Este porcentaje excepcionalmente alto se debió en parte a las óptimas condiciones hidrológicas. Concretamente, caudales muy bajos en el río, que hacen que la entrada a la escala sea muy atractiva.

En el río Dordogne, la proporción de sábalos que usan la escala de estanques en Mauzac varía entre el 6 % y 56 % del número observado en el ascensor de Tuilières situado 15 km aguas abajo. Esta gran variación puede ser debida a dos factores: el primero es la variación en el caudal de descarga del Dordogne durante el periodo de migración (las escalas son más eficaces con caudales bajos). El segundo es más o menos el efecto perturbador de las descargas de las turbinas Kaplan cerca de la entrada de la escala de Mauzac.

5.5. ESCALAS DE PECES PARA ESTACIONES DE AFOROS DEL TIPO V-FLAT.

Un gran porcentaje de las estaciones de aforos originan barreras a la migración de los peces. Dependiendo del tipo de estación de aforos y las peculiaridades de cada una de ellas, serán infranqueables, parcialmente franqueables o transitables para cualquier caudal.

La mejor solución al problema de las estaciones de aforos, tanto del tipo V-flat como de cualquier otro tipo, es la construcción de un “bypass” con una escala de peces, donde lógicamente, se debe realizar la medición del caudal que pasa por esta escala y sumarlo a la medición del caudal que atraviesa la propia estación de medición. Estas actuaciones se han realizado en algunos ríos de la Comunidad Autónoma de Cataluña (España) en concreto en las estaciones de aforos del paso de Sant Vicenç dels Horts, en la estación de aforos de la Riera de Llémena y en la estación de aforos de la Riera de Merlès. Esta solución puede ser totalmente válida si la escala que se construya se hace correctamente.

Las estaciones de aforos del tipo v-flat, son frecuentes en España y en general en cuencas mediterráneas, si bien los caudales de los ríos en las que se construyen este tipo de estación suelen ser más grandes que los existentes en los ríos donde se ubican las estaciones del tipo de secciones con canal sensible.

Una estación de aforo v-flat consiste en un pequeño azud dentro del cauce del río, con cresta en forma de “v-tendida” (V-flat) que provoca un vertido crítico ($F_r = 1$) (figuras 5.7 y 5.8). La ventaja de esta estructura consiste en permitir mediciones precisas también para caudales bajos (Sanz Ronda *et al*, 2010).

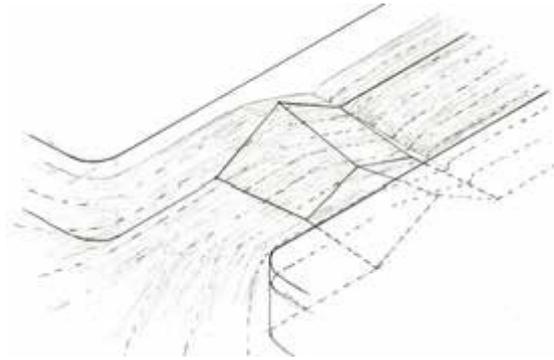


Figura 5.7. Esquema de una estación de aforo del tipo V-Flat.

Este tipo de estación es uno de los sistemas de aforo bastante utilizado. El problema es que también provocan algunos problemas. Los siguientes investigadores: Beach (2004), White & Woods-Ballard, (2003), Sanz Ronda *et al*, (2008), exponen algunos de los problemas generados por las estaciones V flat:

- Velocidades excesivas en el paramento de aguas abajo (3,5-4 m/s), la cual solo es superada por los ejemplares con mayor capacidad de nado de contadas especies de peces.
- Profundidades escasas para la natación con caudales medios y bajos ($< 0,1$ m).
- Desnivel elevado entre la cota del agua arriba y abajo del aforador ($> 0,5$ m), lo que provoca la imposibilidad del salto y aumenta la distancia a recorrer por el paramento.
- Descalce de la estructura aguas abajo, originado por la erosión del flujo acelerado sobre el cauce (común en pendientes > 1 %).
- Escasa profundidad en la losa de aguas abajo y velocidades fuertes. Si además de estos dos inconvenientes hay descalce entonces existe gran dificultad en la aproximación al obstáculo.
- Existencia de fuertes torbellinos a ambos lados del resalto hidráulico formado en la base (cuando la losa no está anegada) o de la inmersión del chorro del agua, es decir: del cachón que se forma (remolino que se forma en el inicio del resalto).



Figura 5.8. Estación de aforos del tipo V-flat, en el río Carrión.

En la investigación realizada por Sanz Ronda *et al.* (2010), en un modelo biocinético con condiciones de caudal y temperatura propias de la época migratoria, concluyen que si no existe un estanque de descanso, ningún pez es capaz de superar un obstáculo V-flat de 0,5 m de altura, puesto que las velocidades en el paramento (2,5- 3 m/s de velocidad media del agua y de 2,5 a 3 m de longitud) y en la losa (2,5 m/s de velocidad media y 5 m de longitud) son muy elevadas. Por lo tanto es imprescindible construir un estanque de descanso que produzca los siguientes efectos beneficiosos (ver figura 5.9).

- Elimine el efecto agotador de las velocidades en la losa.
- Reduzca la distancia de paramentos a recorrer por los peces.
- Disminuya la velocidad media del agua en el paramento, al estar anegadas las zonas de menor cota donde se producen velocidades máximas.
- Rebaje el desnivel entre la cota del agua por arriba y por abajo del aforador.
- Ahogue el resalto hidráulico, formando un remolino vertical que favorezca la impulsión de los peces y su salto, llegado el caso (esto se mejora mucho con el truncado del paramento, contemplado en la norma ISO 4377-2002, relativa a la medición de caudales en estaciones de aforo tipo V-flat).



Figura 5.9. Estación de aforos V-flat con dique de descanso

Si se construye una estructura por debajo de estación de aforos con la finalidad de embalsar el agua de tal forma que tenga la mitad de la altura de la cresta, la distancia a recorrer sobre el paramento se reduce un 50 % y la velocidad media disminuye un 25 % (Sanz Ronda *et al.*, 2008). Con estas condiciones se puede asegurar que la gran mayoría de los ejemplares de trucha en edad de reproducción, es decir de longitud mayor a 0,2 m, de alosas y de todos los salmones puedan remontar. Además, para que la estación sea remontable se debe cumplir que la altura de vertido en la cresta sea superior a 0,10 y 0,15 m en el paramento para que con estas profundidades el pez pueda nadar con soltura y no tenga que dar coletazos. En el caso de las anguilas y las lampreas la ascensión no se realiza por nado en la corriente sino por “reptación” por los bordes de agua, cuando la lámina de agua no cubre toda la anchura de la estación.

Para el resto de las especies ibéricas se sabe por medio de observaciones directas y encuestas a pescadores y vigilantes de pesca que para especies del género *Luciobarbus sp* (barbus) de tamaño mayor a 0,40 m son capaces de ascender cuando la losa aguas abajo de la estación está inundada, por el contrario los individuos más pequeños del género *Luciobarbus* y los del género *Pseudochondrostoma* (bogas), no consiguen remontar esta estación.

Según las investigaciones realizadas por Sanz Ronda *et al.* (2008) y otros investigadores, es posible dar criterios de diseño que compatibilizan las funciones de la estación de aforos con la migración de los peces. De todos estos criterios los cinco primeros son imprescindibles y el resto son muy recomendables. Todos los valores están referidos a condiciones de caudal de la época de migración.

1. El desnivel máximo entre la cresta de la V-flat y la cota de lámina de agua por debajo de la obra de la estación debe ser inferior a 0,30 m (JNHFP, 2001).

2. La profundidad en el estanque de aguas abajo (o sobre la losa, en caso de no existir éste) ha de ser superior a 0,30 m (JNHFP, 2001) o a 1,25 veces el desnivel máximo (Gallagher, 1999).

3. La profundidad mínima en el paramento de aguas abajo de la V-flat ha de ser superior a 0,10 m y superior a 0,15 m sobre la cresta (Sanz Ronda *et al.*, 2008).

4. La velocidad máxima en el paramento de aguas abajo debe ser inferior a 3-3,5 m/s (Beach, 1984).

5. La potencia por unidad de volumen que ha de disiparse por debajo de la estación de aforo V flat conviene que sea inferior a 200 W/m³ para los salmónidos y de 150 W/m³ para el resto de peces (Larinier *et al.*, 2002).

6. La velocidad media en el estanque de aguas abajo (o sobre la losa, en caso de no existir éste) ha de ser inferior a 0,7 m/s para salmónidos y los 0,3 m/s para ciprínidos (JNHFP, 2001).

7. La sección de control hidráulico del estanque de aguas abajo (natural o artificial) ha de situarse a más de 3 m desde la base de la estación de aforo (JNHFP, 2001).

8. El cachón (ondas producidas por la inmersión del chorro en el estanque) debe formarse sobre el paramento de aguas abajo, no sobre la losa o el estanque (Beach, 1984).

9. La zona de aguas turbulentas que forma el cachón debe ser inferior a 1/3 de la altura total del obstáculo (Gallagher, 1999).

10. Resulta preferible trincar el paramento de aguas abajo para que el remolino del chorro favorezca la ascensión de los peces (Beach, 1984) y para que la potencia hidráulica disipada por unidad de volumen sea menor (Sanz Ronda *et al.*, 2008). En cualquier caso, se debe diseñar el truncado de tal forma que quede por debajo del nivel del agua.

En la figura 5.10, se muestra la solución para una estación de aforos V-flat (Sanz Ronda *et al.*, 2010)

Esta estación tiene 12 m de anchura, 0,5 m de altura de cresta y 1 m de descalce entre la lámina de agua de la losa y del río. La solución consiste en la construcción de 3 “presas” de escollera con hormigón, la fijación de bloques de piedra embebidos en hormigón en la losa

(para favorecer el descanso de los peces) y en el truncado del paramento de aguas abajo de la estación de aforos, según la norma ISO. El presupuesto de ejecución material de toda la construcción es cercana a 21.000 €.

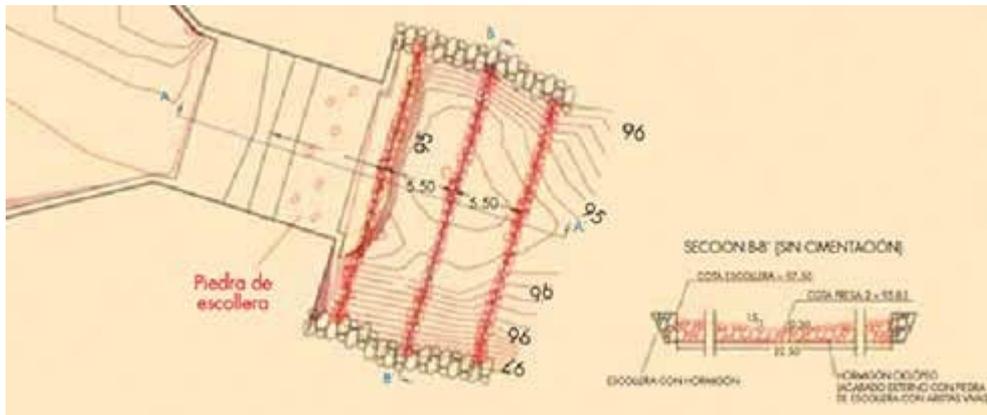


Figura 5.10. Solución para una estación de aforos V-flat (Original Sanz Ronda et al ,2010).

Los muros para embalsar el agua funcionarían como una prepresa. El diseño y cálculo del vertedero tienen que cumplir los siguientes requisitos (Sanz Ronda *et al* (2010):

- Que no llegue a inundar la cresta de la V-flat para flujos ordinarios.
- Que consiga concentrar el agua en caudales bajos.
- Que en la curva de gasto, el cociente entre el caudal “Q” y la carga de vertido “H” sea ligeramente superior al existente en la V-flat. De esta manera, el desnivel entre la lámina de aguas arriba y de aguas abajo de la estación no aumenta con el caudal y así no se incrementa la energía disipada en las prepresas.
- Que la carga de vertido para los caudales de los meses de migración sea superior a 0,15 m.

Después de realizar el estudio de distintos tipos de vertederos Sanz Ronda *et al* (2010), se ha llegado a la conclusión que vertedero que mejor funciona para los objetivos propuestos es un vertedero triangular de pendiente 15H: 1V (figura 5.11).

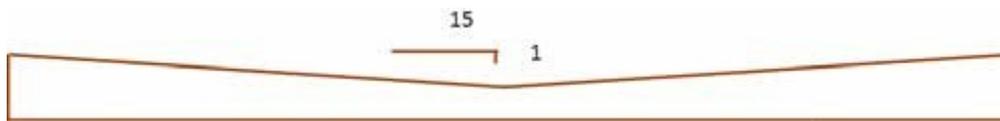


Figura 5.11. Vertedero para prebarreras previas a la estación de aforos V-flat

En el caso de no existir un limnígrafo aguas abajo, la medición del caudal se ve alterada por las prepresas para caudales altos (vertido anegado), una vez cada 10-20 años, según los casos (régimen hídrico, estructura del estanque de descanso) (Sanz Ronda *et al*, 2010).

En resumen, las estaciones v-flat son una barrera infranqueable para gran parte de los peces ciprínidos y para los salmónidos con menores capacidad de nado. Las anguilas y lampreas pueden remontarlo cuando los caudales son bajos y la escala no está totalmente cubierta de agua, estos peces pueden remontar por el borde del agua.

La construcción de prepresas puede disminuir notablemente el efecto barrera para bastantes especies y ejemplares con menor capacidad de nado.

5.6. ESCALA DE PECES PARA ESTACIONES DE AFOROS DE CAUDALES DE SECCIONES CON CANAL SENSIBLE POR MEDIO DE VERTEDEROS NIVELADORES.

5.6.1 Descripción de la estación de aforos de secciones con canal sensible.

El tipo de estación de aforos de secciones con canal sensible es utilizada en ríos españoles donde se produce sequía estival. En el figura 5.12, se muestra el esquema de la estación de aforos de secciones con canal sensible. El esquema que se presenta corresponde a la estación de Gerena del río Guadiamar afluente de la Cuenca del río Guadalquivir en la provincia de Sevilla en la Comunidad Autónoma de Andalucía (España). La figura 5.13 muestra una imagen de esta estación de aforos.

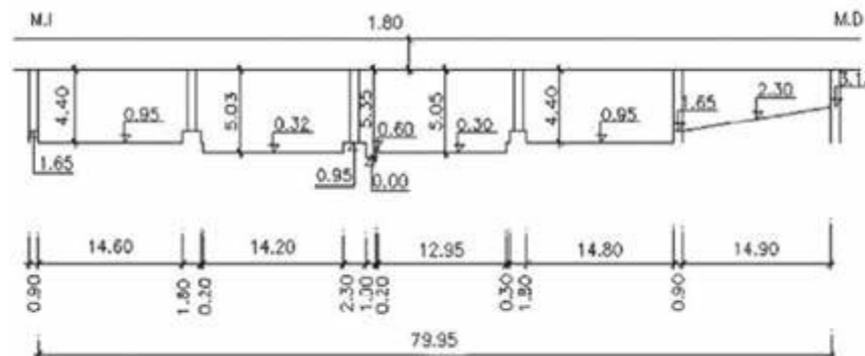


Figura 5.12. Esquema de la estación de aforos del tipo de secciones con canal sensible, las dimensiones anotadas son están en m.



Figura 5.13. Vista general de la estación de aforos de Gerena.

Como se puede observar en el esquema en la figura 5.12, se observa que la sección de la estación está dividida en varios vanos. Los vanos tienen varias anchuras y se aprecia que están a distintas cotas. El vano más pequeño está situado en la cota más baja, tiene como función la medición de los caudales más pequeños. Justamente porque debe de realizar las mediciones de los flujos más pequeños tiene una anchura menor, por lo tanto cuando hay poco caudal todo el caudal pasa solamente por este canal y la medición se realiza de manera más “sensible”, por este motivo se denomina a este canal como “canal sensible” o “canal de mínimos”. A medida que el caudal aumenta entonces el nivel del agua en la parte superior de la estación también aumenta, cuando la cota del agua alcanza la cota del siguiente vano, el agua empieza a verter también por éste segundo vano y así sucesivamente según va aumentando el caudal y por consiguiente el nivel del agua.

En las estaciones de aforos del tipo de canal sensible pueden generar dos tipos de barreras.

1 Barrera. Velocidad excesiva en el canal sensible. Se puede considerar, sin mucho error, que para la mayor parte de los caudales que atraviesan el canal sensible, en el tramo donde se encuentra la sección de medición se produce un flujo permanente y uniforme, en esta situación la velocidad depende de la pendiente, del valor del calado o profundidad y de la rugosidad (estas conclusiones se obtienen del análisis de las ecuaciones de las velocidades de flujo, como por ejemplo la fórmula de Manning), por consiguiente cuanto mayor es el caudal mayor es la velocidad, es en esta situación cuando se pueden producir velocidades elevadas para algunos ejemplares de peces y de especies, si bien esta velocidad no suele ser superior a las velocidades puntas que desarrollan las especies más importantes, pero en algunos casos sí que pueden llegar a ser un impedimento de tránsito para los peces, en cada caso dependiendo de las dimensiones del canal y del valor de los caudales se puede hacer una estimación de los periodos para los que los peces de cada especie y para cada tamaño son capaces de sobrepasarlo.

El intentar disminuir la velocidad dentro del canal sensible implicaría necesariamente una modificación de la sección del canal. Podría pensarse como una solución al problema

introducir deflectores dentro del canal, pero tal acción entraña una alteración de la sección rectangular de medición por otra de mucha mayor complicación y consiguientemente una nueva calibración de la sección de gasto, la cual sería además de gran heterogeneidad. Todo ello desaconseja cualquier tipo de actuación dentro del mismo canal. Como se afirmó anteriormente, este canal es solo una barrera infranqueable, en momentos concretos y de peces con poca capacidad natatoria, circunstancias que relativizan el problema de la falta de paso.

2. *Barrera. Salto de agua al final del canal sensible.* Además de esta potencial barrera producida por el propio canal sensible, suele producirse otra barrera al final de este canal porque en la mayor parte de los casos suele existir un salto de agua impracticable para los peces para condiciones normales de caudales; justamente es esta segunda barrera la que se puede solucionar con el método de cálculo expuesto en este apartado.

5.6.2. Investigación de la U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station sobre vertidos sumergidos.

El método de cálculo que se va a explicar a continuación está basado en la aplicación de la investigación desarrollado a cabo por el *U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station* (1952), (esta cita presenta las siguientes características, en el pie de figura entre paréntesis dice “U.S. Army Engineers Waterways Experiments Station”, en el texto se hace mención diciendo que el gráfico fue una recopilación realizada por U.S. Army Engineers Waterways Experiments Station, publicado en la referencia anterior “Corps of engineers hydraulic design.....”). Las conclusiones de esta investigación se exponen en el ábaco que se muestra más adelante.

La investigación realizada por la institución americana tiene como objetivo determinar el error existente en un vertido sumergido en función del grado de sumergencia entre la lámina inferior formada aguas abajo del canal y la lámina existente en el canal.

Con el ábaco gráfico mostrado en la figura 5.14, es posible determinar la reducción que se debe de realizar en el coeficiente de vertido debido a la influencia de la lámina inferior una vez que el flujo ha salido del vertedero; en este caso se puede asimilar el umbral del canal sensible como vertedero. Dependiendo del número de Froude que tenga el flujo dentro del canal la sección crítica puede estar situada a lo largo del canal o al final del mismo, es decir cuando se produce el vertido, en el primer caso es decir cuando la sección crítica se produce en un punto del canal, está más alejado que en el caso de un vertedero de cresta ancha, el error producido por la sumergencia de la lámina vertiente, es menor dado que la sumergencia se produce al final del canal y por lo tanto notoriamente alejada de la sección crítica, consecuentemente como el ábaco de los resultados de la investigación consultada está desarrollado para vertederos, los errores reales que se producirán en la aplicación práctica en las estaciones de aforos, cuando en el canal se produce flujos supercríticos (Número de Froude > 1) serán inferiores a los obtenidos teóricamente por la aplicación del ábaco.

En la figura 5.14, correspondiente al ábaco donde se determina el error por la sumergencia, se ha marcado en línea de color violeta al área correspondiente a los puntos resultantes de la aplicación del método de cálculo a los casos concretos de algunas estaciones de aforos. Como

se puede observar los valores de los errores varían desde un mínimo de 0 % hasta un máximo de 1,5 %, si bien se debe recordar que estos valores de los errores, solo se producen en el canal sensible, por lo tanto como los errores máximos que se producen en el canal sensible son en los momentos de mayor caudal, parte de éste, vierte por los restantes vanos, consecuentemente el error en valor absoluto es notoriamente menor, en ningún caso ha sido mayor del 1 %.

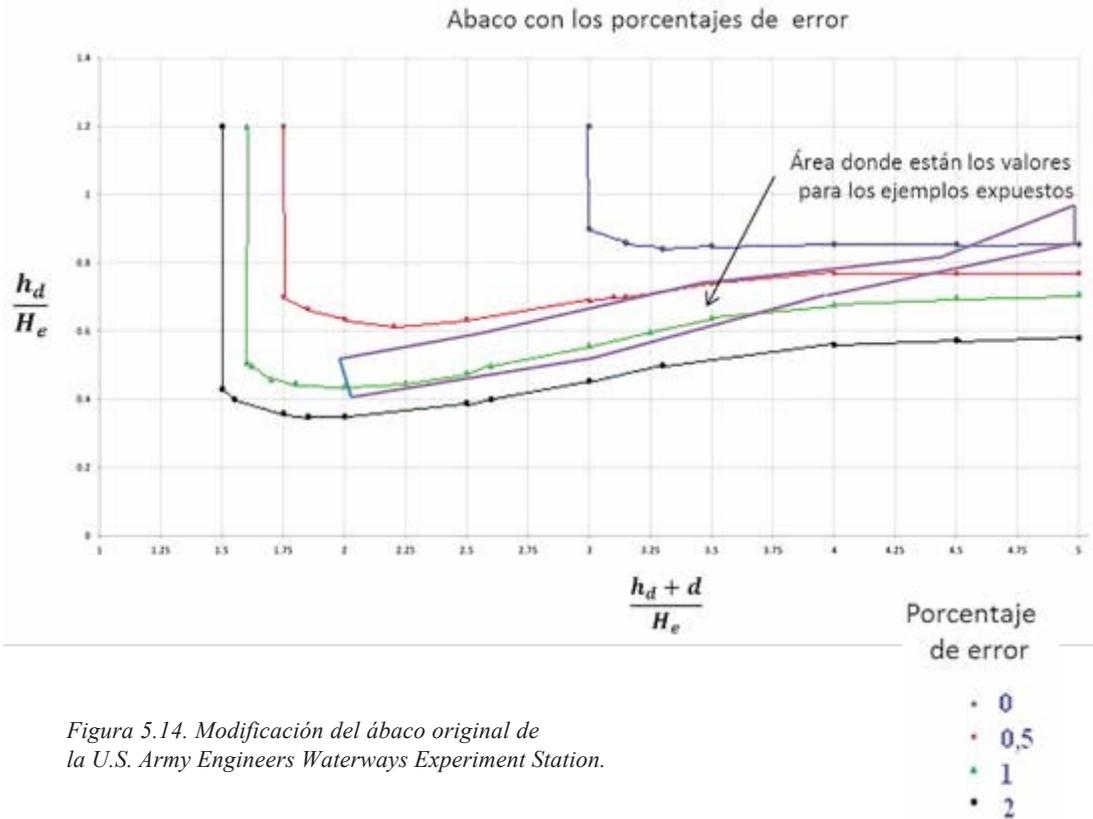


Figura 5.14. Modificación del ábaco original de la U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station.

En el eje de abscisas está el parámetro, que se define como parámetro I, tiene la expresión:

En el eje de ordenadas el parámetro, que se define como parámetro II y tiene la expresión:

Cada una de las variables de las que están compuestos estos dos parámetros anteriores se describe en el esquema de la figura 5.15:

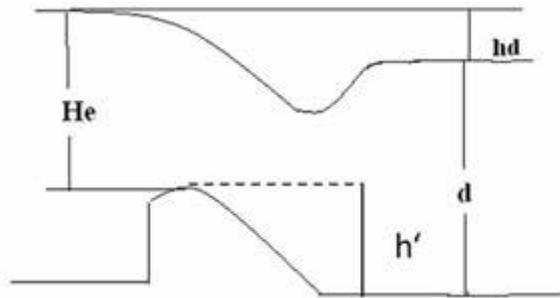


Figura 5.15 Esquema de los parámetros hidráulicos (todas las medidas están en metros).

Las variables son (ver figura 5.15):

- h_d altura del desnivel de las láminas de agua del canal sensible y del estanque por debajo de la estación de aforos (m).
- H_e altura de vertido (m).
- d altura de la lámina de agua que tiene el flujo por debajo del vertedero, es decir en el primer estanque por debajo del canal sensible (m).
- h' Desnivel entre la cota del canal y la cota del fondo del estanque aguas abajo del canal (m).

Se observa en el ábaco que para la zona definida para valores del parámetro I, es decir el parámetro de los valores del eje de abscisas, superiores al valor 3,0 y para valores del parámetro II superiores a 0,85, no existe reducción del coeficiente de vertido es decir no se produce ningún tipo de modificación en el vertido, luego consecuentemente todos los vertidos que se produzcan en esta área o por encima de ella no producirán ningún error.

La zona definida entre los valores del parámetro I comprendidos entre 1,5 y 3 y los valores del parámetro II comprendidos entre 0,62 y 0,85 tienen una disminución del vertido comprendida entre 0,5 y 0 %.

5.6.3. Método de cálculo de la escala de estanques niveladores para estaciones de aforos de canal crítico.

Con toda la información contenida en el ábaco de los resultados de esta investigación, es posible determinar los desniveles mínimos entre las láminas superior e inferior, para que los errores producidos sean cuantificables con precisión y conseguir que estén por debajo de los valores considerados como admisibles (en los casos aplicados varía entre 0,5 %, o 1,5 %, de error en el canal sensible, si bien es inferior al 1 % de error total producido para el conjunto de toda la estación, incluyendo el resto de los vanos).

Con el método que se expone a continuación si es posible eliminar la barrera del salto de agua producido por el desnivel existente desde el final del canal sensible también llamado canal de mínimos caudales hasta el río, normalmente infranqueable para los peces, que se produce en ese tipo de estaciones de aforos.

Aplicando esta metodología se consigue respetar la constancia de la curva de remanso, y así es posible garantizar la medición de caudales tal y como se ha estado realizando hasta el momento. Con este método expuesto, se han diseñado cinco escalas de peces por García Díaz R., correspondientes a cinco estaciones de aforos de este tipo, en dos proyectos de escalas de peces. Tres de estas escalas se encuentran en el Río Guadiamar, en concreto en las estaciones de Gerena, de El Guijo y de Aznalcollar y las otras dos restantes están en el Río Guadaira, corresponden a las estaciones de Encauzamiento y del Puente Sifón. Los dos ríos pertenecen a la cuenca del río Guadalquivir (España).

A continuación se expone el proceso de cálculo, la explicación es para el valor concreto de caudal y del calado correspondiente. Se entiende que cada uno de los pasos se debe de repetir para todos y cada uno de los valores de los caudales y por consiguiente de los calados producidos en el canal sensible, comprobándose que para cada valor, el error resultante de la aplicación del ábaco anteriormente citado, está por debajo del valor admisible. Los cálculos se realizan por medio de una hoja de cálculo.

En la figura 5.16, (**ver página siguiente**), se ha esquematizado el diagrama de flujo con todos los cálculos que se realizan.

En el diseño del primer estanque de la escala se debe tener en cuenta la siguiente consideración:

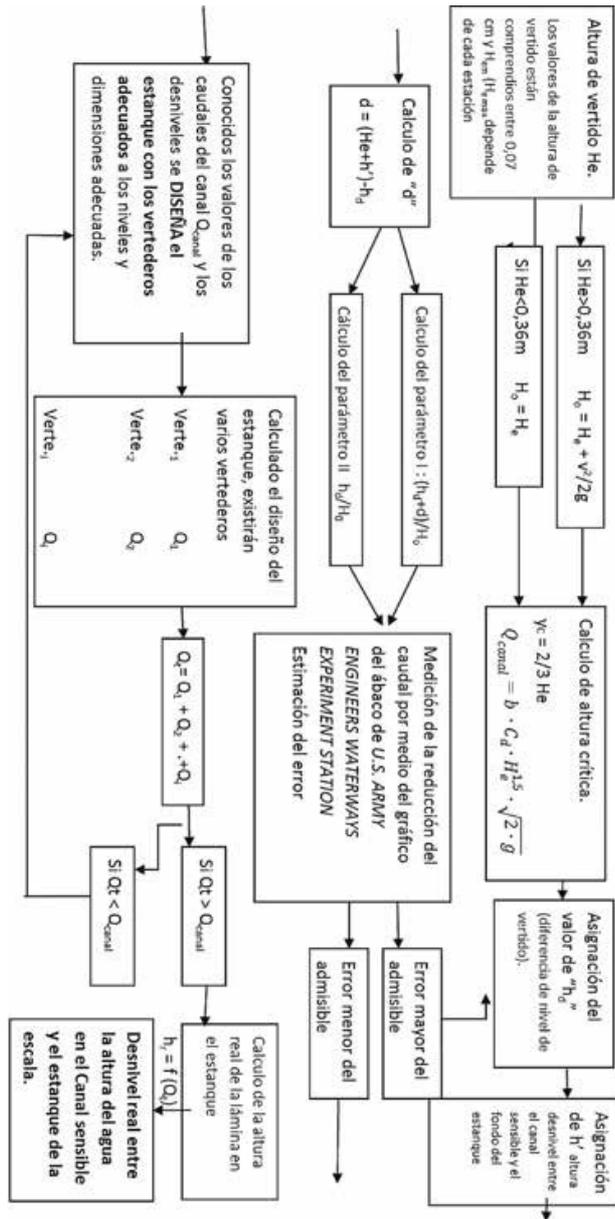
El desnivel mínimo entre la lámina del canal sensible y la del primer estanque es la primera e imprescindible condición que debe de cumplir el conjunto de los vertederos diseñados con el fin de que se garantice la no alteración de la curva de remanso. Pero no es la única condición dado que por este estanque deben de ascender los peces, también debe cumplirse la condición de que la potencia disipada en el estanque deberá ser menor que un valor máximo, en el caso de los peces ciprinidos este valor es 150 w/m^3 . Por el segundo motivo, este primer estanque suele ser de dimensiones grandes, porque el caudal vertiente en el canal sensible, puede ser de considerable cuantía y la energía generada por la caída de toda la masa de agua deberá ser disipada por debajo del umbral de 150 w/m^3 .

El método de cálculo sigue el siguiente proceso:

- Elección de los caudales mínimos y máximos de cálculo.

El caudal mínimo de estudio ha sido determinado de tal forma que la altura de la lámina generada dentro del canal sea lo suficientemente pequeña para que la altura del desnivel entre esta lámina y la existente en el primer estanque sea por una parte pequeña para que los peces puedan remontarlo y por otra parte se produzca la mínima o nula sumergencia para que no existan error en la medición de los aforos. Después de varios tanteos en los cálculos realizados para la aplicación de este método a las cinco estaciones de aforos estudiadas, se ha llegado a la conclusión de que el valor del caudal que garantiza con plena seguridad esta condición anterior es el que genera un calado dentro del canal sensible $\$ 0,07 \text{ m}$. Por otra parte alturas inferiores a esta cantidad pueden llegar a ser pequeñas para que el pez pueda nadar con facilidad.

ESQUEMA DEL PROCESO DE CÁLCULO.



EL CALCULO SE DEBE DE REALIZAR PARA TODOS LOS VALORES DE LAS ALTURAS DE VERTIDO.

Figura 5.16. Esquema del método de cálculo para el diseño de las escalas de estanques niveladores (todas las unidades están en sistema Internacional ó Giorgi).

El caudal máximo será aquel que pertenezca a un percentil lo más alto posible, en los casos estudiados se ha elegido un caudal superior que no exceda al percentil 95 durante el periodo de reproducción, siendo este periodo en el caso de los peces ciprínidos de los ríos estudiados los meses de marzo, abril, mayo y junio. De esta manera se consigue que la mayor parte de los días la escala sea practicable, el valor del percentil elegido para estos ejemplos no debe ser definitivo para cualquier caso; se comprende que en otros casos este valor del percentil puede variar debido a limitaciones generadas por diferentes causas. Se debe tener en cuenta que cuando el nivel del agua entrante alcanza la cota de la segunda sección o vano, parte del caudal pasará por este vano, como este segundo vano siempre es de anchura superior al canal sensible, consecuentemente, a medida que aumenta el caudal la proporción de caudal que atraviesa el canal sensible irá disminuyendo y por lo tanto es posible admitir mayor error en la medición de la parte del caudal que solo atraviesa el canal sensible.

- *Influencia de la velocidad del agua en el canal.* Se considera que para los valores de los caudales correspondientes a los calados inferiores a 0,36 m, el flujo del río lleva un valor de velocidad que puede despreciarse para los cálculos de la energía. Cuando la altura es superior a 0,36 m, si se conoce el valor de la anchura y de la pendiente del canal se puede calcular la velocidad y calcular el sumando cinético ($v^2 / (2 \cdot g)$).

- Se calcula la energía específica H_0 ($H_0 = H_e + v^2/2g$)

Dónde: H_0 es la energía específica en m, H_e es la profundidad del flujo en el canal en m, “v” es la velocidad en m/s, y “g” es la aceleración de la gravedad (9,81 m/s²).

- A partir del valor de la altura de vertido H_e y de velocidad inicial V (en el caso de que se tengan en cuenta), se calcula la energía específica H_0 . A continuación se calcula el caudal del canal “ Q_{canal} ”, pero tomando como altura de vertido el valor de H_0 .

El caudal se estima por la fórmula del vertedero de cresta ancha:

$$Q_{canal} = b \cdot C_d \cdot H_e^{1.5} \cdot \sqrt{2 \cdot g}$$

Dónde:

b, es la anchura (m).

C_d es el coeficiente de vertido (en este caso 0,36).

H_e , es la altura de vertido (m) dependiendo de los casos será H_e , sin tener en cuenta la velocidad ó H_0 , teniendo en cuenta la velocidad.

g, es la aceleración de la gravedad (9,81 m/s²).

- Conocida la energía específica H_0 , se calcula el valor del calado crítico “ y_c ” (en metros) ($y_c = 2/3 H_0$).

- El valor y_c , de la profundidad crítica tiene como objetivo orientar sobre el valor elegido (como primer tanteo) de la altura que alcanzará la lámina aguas abajo del vertedero (es decir

el valor definido como el desnivel " h_d ") de tal forma que no produzca un error por encima del admisible. Esta aproximación se realiza para todos los valores de los calados analizados, es decir desde 0,07 m, hasta la altura máxima analizada correspondiente al valor del caudal máximo considerado, por lo tanto todos los cálculos se tienen que reiterar desde el valor del calado mayorizado H_e , correspondiente al caudal mínimo hasta el valor del calado correspondiente al caudal máximo considerado. Obsérvese que el valor de " h_d " correspondiente al desnivel real que se producirá entre las láminas del canal y la del primer estanque se podrá conocer una vez establecido el sistema de vertederos que se diseñaran justamente para que este desnivel no sea superior al admisible, por lo tanto es un "sistema de vertederos niveladores" porque consigue controlar el nivel del agua en el estanque aguas abajo de la estación.

- Conocida el valor de " h_d " se elige un valor de la dimensión definida por " d " (ver figura 5.15) es decir de la profundidad del estanque justamente aguas abajo del final del canal sensible, la elección de este parámetro es de suma importancia, debido a que cuanto mayor sea este valor, la lámina vertiente quedará más amortiguada y quedará menos perturbada dado que "rompe" la conectividad con la lámina superior, esta circunstancia se confirma al realizar los cálculos de los parámetros hidráulicos; por todo ello, en los casos en los que el río no presente mucha profundidad, si es posible, se excavará en el lecho del mismo para aumentarla.

- Asignados los valores de " d " y de " h_d ", se calculan los parámetro I y II anteriormente explicados:

- Calculados estos parámetros se determina gráficamente en el ábaco de la figura 5.1.4, el valor del error cometido (a partir de la reducción del coeficiente de gasto del vertedero), cuando este error es superior al admisible se vuelve a asignar un nuevo valor de h_d , con mayor diferencia respecto al nivel de la lámina de vertido y se vuelve a recalcular para obtener un segundo valor del error inferior al primero. Este proceso se repetirá todas las veces que sean necesarias. En el ábaco de la figura 5.14, se ha marcado con línea en tinta violeta la región del ábaco correspondiente a los cálculos realizados. Se observa que los errores obtenidos varían desde 0 % hasta 1,5 %. Este valor máximo corresponde a los valores de los máximos caudales que atraviesa el canal sensible, si bien como se ha dicho anteriormente, el error total referido a toda la estación es menor porque cuando se producen los caudales máximos en el canal sensible el parte del caudal del río vierte ya por algunos de los restantes vanos de la estación, por consiguiente el valor del error producido en la medición del caudal que atraviesa el canal sensible es mayor que el error total de medición en toda la estación porque éste corresponde a la totalidad del caudal atravesada en la estación, es decir por todos los vanos, siendo el caudal del canal sensible un porcentaje del total, que disminuye a medida que aumenta el caudal.

- Calculados los valores de h_d para todos los valores de las alturas de vertido y por lo tanto para los valores de los caudales afectados, se está en situación de diseñar y calcular la escala con los vertederos más adecuados de tal manera que para todos los caudales la

diferencia de desnivel entre el valor de la altura del flujo en el canal sensible " H_0 " o " H_e " y la altura del flujo aguas abajo del vertido " h_d " sea siempre inferior a los límites previamente establecidos.

- La escala estará dotada de los vertederos necesarios para conseguir el desagüe necesario. Para tal finalidad se van añadiendo vertederos con la longitud de vertido y a la cota adecuados para que se garantice que la capacidad de desagüe de todos los vertederos sea siempre superior al caudal original proveniente del canal sensible y por lo tanto en cualquier situación la diferencia de niveles reales entre la lámina del canal sensible y la lámina en el estanque tiene que ser superior al desnivel " h_d " admisible, obteniéndose como resultado los estanques que se muestran en las figuras de los esquemas de los escalas. Este proceso de diseño se realiza de manera reiterativa en base a las comprobaciones de las alturas de las láminas resultantes con los niveles de vertido. La elección de la cota y longitud de los vertederos se realiza por aproximaciones; primeramente se elige el vertedero de menor cota y su longitud, este vertedero definirá el desnivel existente entre las láminas del canal sensible y del primer estanque para los caudales mínimos, a partir del mismo se irán ampliando el número de vertederos a mayor cota y con la longitud adecuada.

- En el caso de que la diferencia de cotas sea notoriamente grande con respecto a la teórica, previamente fijada, se deberá de rediseñar los vertederos, para así llegar al desnivel adecuado, es decir inferior al previamente obtenido pero sin llegar a ser excesivamente grande.

Todo lo que se ha explicado hasta el momento en cuanto a cálculo y diseño es para el primer estanque, dado que es en este estanque donde se produce el primer vertido y la lámina de agua formada, debe mantenerse la diferencia de nivel mínima con la lámina de agua procedente del canal sensible. Por lo tanto dependiendo de la altura total existente entre el final del canal con respecto al fondo del río, se diseñarán nuevos estanques para fraccionar esta altura.

5.6.4. Casos concretos de escalas de estanques niveladores de estaciones de aforos.

Dependiendo del valor del desnivel original entre el canal sensible y el río se deberán construir el número de estanques necesarios para eliminar esta barrera. En las figuras 5.17, 5.18, 5.19, 5.20 y 5.21 se muestran esquemas de las escalas de las estaciones de aforos en los que se ha proyectado este tipo de escala. Este diseño está a nivel del proyecto, en el momento de la publicación de este libro aún no se han construido, por ser un diseño totalmente novedoso pudiera ser que durante el proceso de construcción se observará alguna posible mejora, lo cual conllevaría la correspondiente modificación del diseño original.

Las tres primeras escalas corresponden a estaciones del río Guadamar y las dos últimas al río Guadaira. En los casos de las estaciones del Guijo del río Guadamar y de Encauzamiento del río Guadaira solo ha sido necesario realizar un estanque. En la escala correspondiente a Alcalá de Guadaira (figura 5.20), se ha construido un canal de atracción.

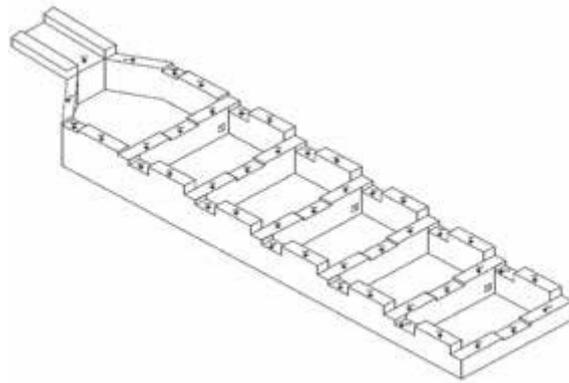


Figura 5.17. Esquema de la escala diseñada en la estación de Gerena.

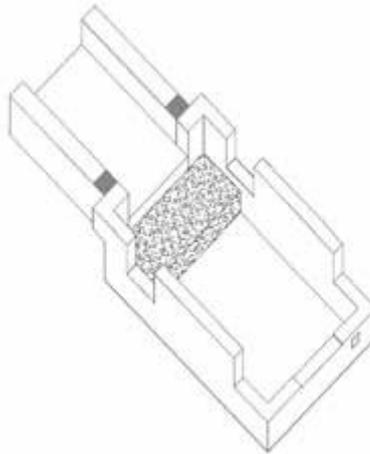


Figura 5. 18. Esquema de la escala de la estación de El Guijo.

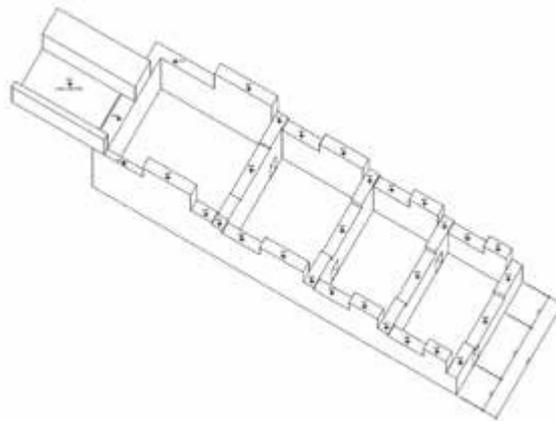


Figura 5. 19. Esquema de la escala diseñada para la estación de Aznalcazar

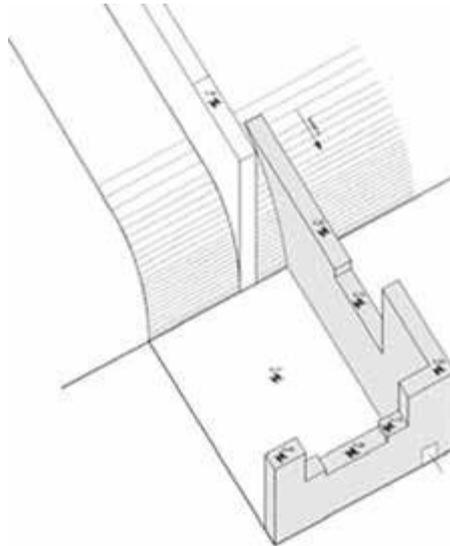


Figura 5.20. Esquema de la escala de la estación de aforos Encauzamiento

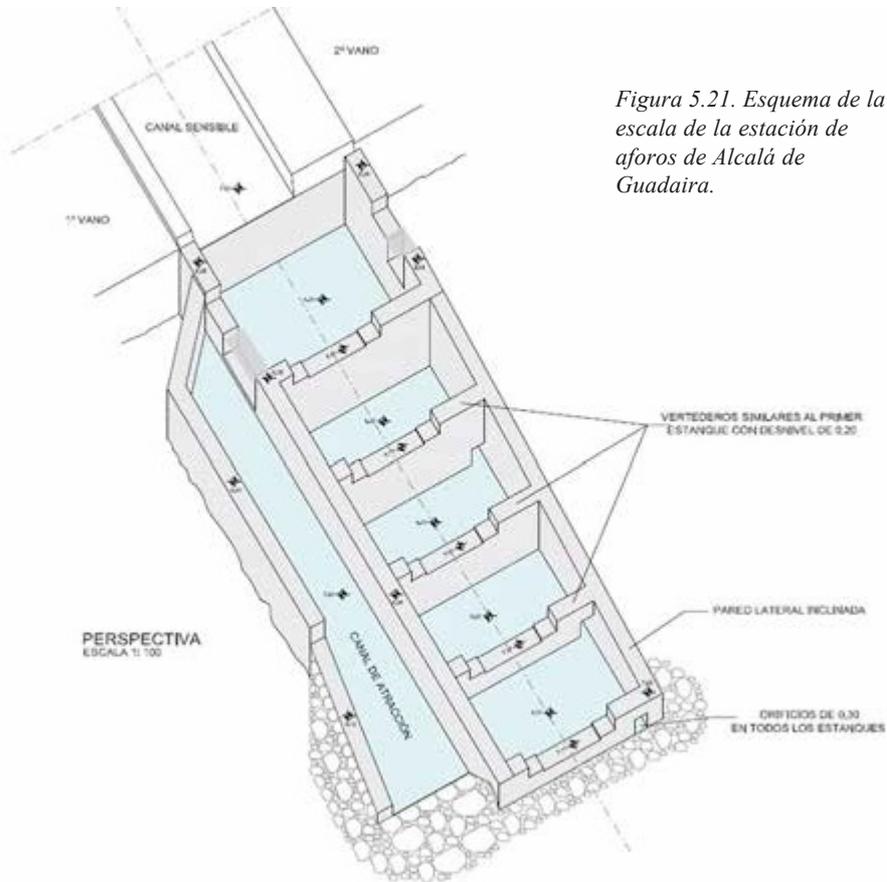


Figura 5.21. Esquema de la escala de la estación de aforos de Alcalá de Guadaira.

Una vez diseñado el primer estanque, siendo este el de mayor complejidad debido a las condiciones impuestas, como se ha explicado anteriormente, el diseño de los siguientes estanques es más sencillo y rutinario, siendo el método de cálculo similar al convencional para escalas de estanques sucesivos. Normalmente no es necesario mantener todo el caudal vertiente dentro de la escala, es decir que parte del caudal que vierte desde el canal sensible, una vez que ha volcado al primer estanque es posible desviarlo hacia el río y mantener solo una parte de todo el caudal dentro del resto de los estanques, siempre y cuando esta desviación del flujo no afecte o disminuya al efecto llamada. Con esta medida se consigue disminuir las dimensiones del resto de los estanques y de esta manera se ha realizado en aquellas escalas compuestas de varios estanques.

También se aprecia que en cada estanque se han construido varios vertederos a diferencia de la escalas convencionales de artesas sucesivas en las cuales solamente suele haber uno (más el orificio sumergido, el cual también ha sido dispuesto en las escalas de estanques niveladores). Además estos vertederos de los estanques de estas escalas por donde desciende el agua al estanque siguiente son muy distintos a los vertederos de las escalas de artesas sucesivas convencionales, esto es debido a que en el caso de la escala de los estanques niveladores los vertederos son de mayor longitud y de menor altura. La razón por la cual se disponen varios vertederos es porque cuanto mayor número de vertederos se construyan, mayor es la precisión a la que se puede situar la cota de la lámina de agua inferior formada en el estanque. Como se ha comentado, el paso del agua de un estanque a otro se realiza por vertederos de gran longitud y de pequeña profundidad; la longitud grande consigue desaguar mucha cantidad de agua con poco desnivel, de esta forma se consigue que la cota de la lámina de agua no descienda excesivamente.

En las tablas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5, se exponen los valores de las cotas y de las longitudes de los vertederos del primer estanque de cada uno de las escalas.

Tabla 5.1. Longitudes cotas y desniveles de los vertederos del primer estanque de la escala de Alcalá de Guadaira.

ESTACIÓN DE AFOROS DE ALCALA DE GUADIARA.			
Cota de los vertederos (m.s.m.)		Cota del canal 8,10 (m.s.m.)	
Vertedero	Cota	Desnivel (m).	Longitud (m).
Vertedero 1	8,20		1,5
Vertedero 2	7,95	0,15	3,0
Vertedero 3	7,91	0,19	1,5

Tabla 5.2. Longitudes cotas y desniveles de los vertederos del primer estanque de la escala de la estación de Guadamar Sevilla.

ESTACIÓN DE AFOROS DE GUADIAMAR SEVILLA			
Cota de los vertederos (m.s.m.)		Cota del canal 5,30 (m.s.m.)	
Vertedero	Cota	Desnivel (m).	Anchura (m).
Vertedero 1	5,15	0,15	3,0
Vertedero 2	5,05	0,15	1,5

Tabla 5.3. Longitudes cotas y desniveles de los vertederos del primer estanque de la escala de la estación de Gerena.

ESTACION DE AFOROS DE GERENA			
Cota de los vertederos (m.s.m.)		Cota del canal 53,76 (m.s.m.)	
Vertedero	nivel	Desnivel (m).	Longitud (m).
Vertedero 1	53,68	0,08	3,30
Vertedero 2	53,59	0,17	1,00

Tabla 5.4. Longitudes cotas y desniveles de los vertederos del primer estanque de la escala de la estación de aforos de El Guijo.

ESTACIÓN DE AFOROS DE EL GUIJO			
Cota de los vertederos (m.s.m.)		Cota del canal 26,68 (m.s.m.)	
Vertedero	Cota ver	Desnivel (m).	Longitud (m).
Vertedero 1	26,57	0,18	1,70
Vertedero 2	26,52	0,16	3,50
Vertedero 3	26,50	0,18	1,80

Tabla 5.6. Longitudes cotas y desniveles de los vertederos del primer estanque de la escala de la estación de aforos de Aznalcazar.

ESTACIÓN DE AFOROS DE AZNALCAZA			
Cota de los vertederos (m.s.m.)		Cota del canal 9,16 (m.s.m.)	
Vertedero	nivel	Desnivel (m)	Longitud (m).
Vertedero 1	9,09	0,07	9,5
Vertedero 2	9,02	0,14	1,6
Vertedero 3	8,98	0,18	2,0

La necesidad de construir un canal de caudal de atracción dependerá del volumen de los caudales circulantes, en los casos en que los caudales sean pequeños, no será necesario realizar este canal, porque la mayor parte de los días, todo o casi todo el caudal pasará por el canal sensible. Cuando aumente el caudal y el nivel alcance al vano siguiente, si bien empezará a verter por éste, el calado que se produzca en el mismo será de poca cuantía y no producirá problema de orientación a los peces. Por el contrario si los caudales aumentan pueden ser recomendable construir un canal de atracción adicional.

La distribución de los estanques elegida es la lineal, tal y como se muestra en las figuras. Se ha optado por esta distribución, después de haber estudiados varias alternativas porque esta distribución es la que menos altera a la estación de aforos y la que mejor se acopla a la construcción del canal del caudal de atracción. Como se puede observar los estanques tiene planta rectangular y las dimensiones son mayores que las dimensiones habituales de los estanques que se construyen en estas escalas para peces ciprínidos.

5.7. BIBLIOGRAFIA.

BATES K., 1990. Recent experience in cost efficient fish passage in Washington state. Proc. Int. Symp. On fishways, Gifu, Japan, 335-341.

BATES K., 1997. Fishway design guidelines for Pacific salmon. Working paper, 110 p.

BEACH. M. H. 1984. Fish pass design criteria for the design and approval of fish passes and other structures to facilitate the passage of migratory fish in rivers. MAFF Fisheries Technical Report, 78.

C.T.G.R.E.F., 1981. Migration des aloses dans le bas-Rhône: observations effectuées en 1979 et 1980. Unpublished Rep., 10 p.

DALLEY P.J. (1980). A review of fish passage facilities for American shad. Northeast Fish and Wildlife Conf., Ellenville, New York, 32 p.

DARTIGUELONGUE J., 1990 Suivi de la migration de dévalaison et de montaison à la passe à poissons du Ramier au printemps 1990. SCEA Rep., 41 p.

GALLAGHER, A. S. 1999. *Barriers*. In Bain, M. B. and N. J. Stevenson, eds. Aquatic habitat assessment: Common methods, 135-147. American Fisheries Society, Bethesda, MD.

JNHFGP. Joint National Hydrometry and Fish Pass Group. 2001. *Guidance on the design and construction of Crump and Flat-V gauging weirs in relation to fish passage*. Environment Agency Memo

LARINIER M. TRAVADE, F., & PORCHER, J. 2002. Pool fishways, pre-barrages and natural bypass channels. Bull. In Bunch F. & Fournier M.S., editors, Fishways: biological basis, design criteria and monitoring, volume Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture, No 364 supplement: 54-82.

LITAUDON, A., 1985. Observations préliminaires sur le franchissement du seuil de Saint-Laurent-des-Eaux (Loire) par l'aloise (*Alosa alosa*) (Preliminary observations on the passage of Allis shad (*Alosa alosa*) at Saint-Laurent-des-Eaux (Loire) weir). EDFRep. HE/31/85-37, 63 p.

MONK B., WEAVER D., THOMPSON C., OSSIANDER F. (1989) Effects of flow and weir design on the passage behavior of american shad and salmonids in an experimental fish ladder. *Am. J. Fish. Man.*, 9: 60-67.

RIDEOUT S., THORPE L., CAMERON L., 1985. Passage of American shad in an Ice Harbor style fish ladder after flow modifications. Symp. on small hydropower and fisheries, Aurora, Colorado, 251-256.

SANZ RONDA, F.J., BRAVO CORDOBA, F.J., MARTINEZ DE AZAGRA, A., NAVARRO HEVIA, J. & SAIZ ROJO, A. 2008. *Estudio para la adaptación a la migración de la ictiofauna de las estaciones de aforo V-Flat: Fase I*. Informe técnico. Universidad de Valladolid. E.T.S. de Ingenierías Agrarias de Palencia.

SANZ RONDA, F.J., BLANCO F.J., MARTINEZ DE AZAGRA A. 2010 “Estaciones de aforo V-flat y peces migradores de la Península Ibérica problemas y soluciones”. *Ingeniería Civil* nº 158. pp. 111-119.

WEAVE C.R. 1965. Observations on the swimming ability of adult American shad (*Alosa sapidissima*). *Trans. Am.fisch. Soc.*, 94 (4): 382-385.

WEAVER C.R., 1965. Observations on the swimming ability of adult American shad (*Alosa sapidissima*). *Trans. Am. Fish. Soc.*, 94 (4): 382-385.

WHITE W.R. & WOODS-BALLARD, B.A. 2003. *The Investigation and specification of flow without significantly compromising flow measurement accuracy, with the potential to influence the production of suitable British Standards*. Environment Agency, Technical Report: W6-084/TR1.

6. PASOS NATURALIZADOS.

Los pasos naturalizados (Natural Like Pass, “NLP”) son un tipo de pasos de peces en las que se intenta que el paso se asemeje a un río natural.

Si bien las escalas o pasos de peces tienen como finalidad permitir el ascenso y descenso de los peces, evidentemente cuanto mayor biocenosis y flujo abiótico permita circular el paso o escala más completa será la rehabilitación del ecosistema. Actualmente los pasos naturalizados son el tipo de escala que consigue mayor permeabilidad, no solamente para casi la totalidad de la ictiofauna sino que además permiten el paso de macrobentos y de caudales sólidos. De hecho ya se hacen pasos naturalizados que permiten el libre tránsito a la ictiofauna, e incluso consiguen que algunos peces frecen y críen en el propio paso, como es el caso de un “by pass” construido en Canadá en los años 50 del siglo XX que ha incrementado la reproducción del salmón del Pacífico en este río. Para conseguir que el salmón se sienta atraído y frece en el mismo paso, es necesario reproducir las condiciones naturales del río (Leung Y.W. 1994).

Los pasos naturalizados, también genéricamente llamadas rampas, cuya terminología anglosajona corresponde con el término de *Fish ramps* (FAO-DVWK 2002), son un tipo de escalas relativamente modernas. Sin embargo, como son los más ecológicos en comparación con el resto de tipos de pasos (debe recordarse que la solución más ecológica es la demolición de la presa) serán más utilizados en el futuro.

Aunque los pasos naturalizados tienen limitaciones que desaconsejan su aplicación en barreras muy altas y/o con otras características que hacen más apropiado optar por otro tipo de solución, aun con estas limitaciones, al ser los pasos naturalizados más ecológicos que el resto de escalas y también presentar la enorme ventaja de disminuir las obstrucciones, su uso se incrementará en aquellas barreras en las que sean viables.

6.1. CLASIFICACIÓN DE LOS PASOS NATURALIZADOS.

Los pasos naturalizados se clasifican según dos criterios (ver figura 6.1.):

- a) Forma en que se produce la pérdida de energía dentro del paso.
- b) Ubicación del paso respecto de la barrera y el río.

Según se aprecia en la figura 6.1, se aprecia que los dos grandes grupos de pasos clasificados según la pérdida de energía son, los pasos de rápidos y remansos, y las rampas.

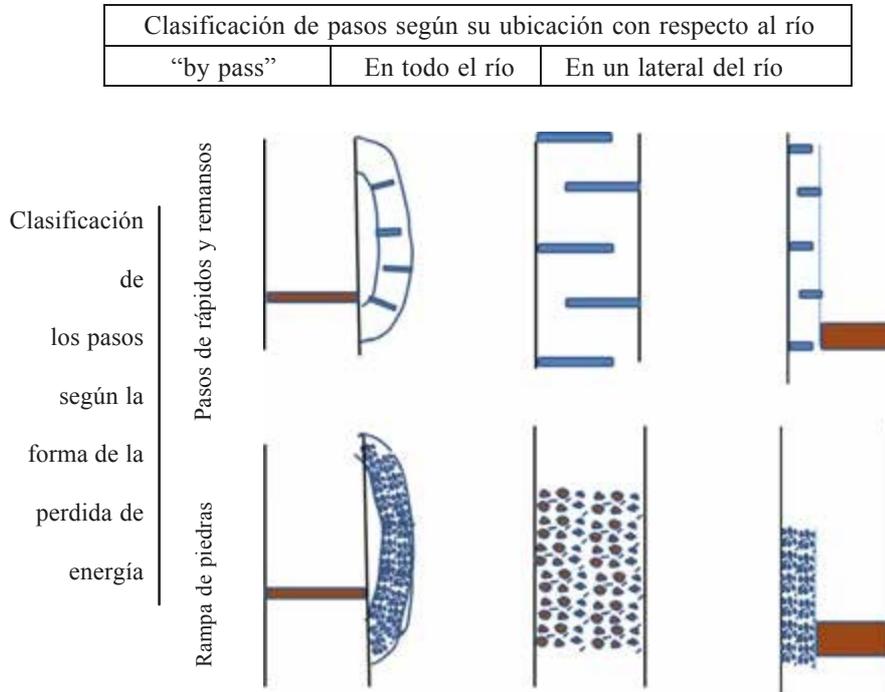


Figura 6.1. Clasificación de los tipos de pasos naturalizados según su situación en el río y según su estructura (forma pérdida de energía).

6.1.1. Tipos de pasos naturalizados en función de la pérdida de energía.

La energía se pierde principalmente de dos maneras:

1º) *Pérdida de energía por rozamiento por lecho macrorugosos* (Rampas de piedras). El gran rozamiento que sufre el flujo al descender por un rampa con un lecho macrorrugoso originado por la existencia de piedras de gran tamaño produce la mayor parte de la pérdida de energía.

2º) *Pérdida de energía por medio de la amortiguación del flujo vertiente* (Pasos de rápidos y remansos). Al caer el flujo vertiente dentro del seno del agua existente en un estanque (efecto colchón).

a) Rampa de piedras.

Los tipos de pasos de la primera clasificación corresponden a las *rampas de piedras* propiamente dicha. En concreto este paso consiste en un plano inclinado en el que se insertan piedras con las que se crea una gran rugosidad con las que se consigue disminuir la velocidad por el mayor rozamiento.

Dentro de esta clase de rampas se realizará una segunda subdivisión en función del tamaño de las piedras y de su distribución en la rampa.

a).1. Rampa de escollera (Embebed-boulder construction). Si las piedras son del tipo escollera y distribuidas de manera homogénea a lo largo de todo el curso de agua, las dimensiones de estas piedras están comprendidas entre 0,6 y 1,2 m (ver figura 6.2).

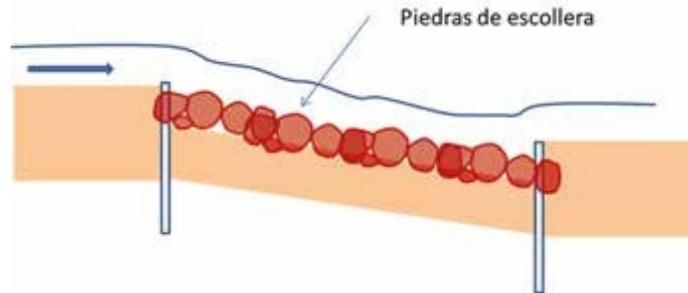


Figura 6.2. Esquema de rampa de escollera.

a).2. Rampa con incorporación de piedras (Rockfill construction). Esta rampa es el tipo de paso donde se incorporan a la rampa piedras de gran volumen con dimensiones comprendidas entre 0,6 y 1,2 m de diámetro (tamaño que coincide con la piedras de la rampa de escollera). Las piedras se suelen colocar en distribución “al tresbolillo” y con una distancia de separación entre ellas adecuadamente calculada para conseguir la rugosidad y resistencia precisas en función de la pendiente y del caudal, con el fin de que la velocidad sea la adecuada.

b) Escala de rápidos y remansos.

La escala de rápidos y remansos es el segundo tipo de pasos naturalizados.

La escala de rápidos y remansos sería equivalente a dos tipos de escalas de la clasificación de FAO-DVWK (2002), la primera es “Bottom ramps and slope”, en concreto la Dispersed/Cascaded Construction; y la segunda sería el tipo de By pass of the Boulder Sill,.

Esta rampa consiste en una sucesión de tramos o pequeños estanques consecutivos separados entre sí por umbrales de piedras por los cuales el agua vierte con un desnivel de altura generado por la diferencia de cotas entre un estanque y el siguiente.

En este caso la mayor parte de la pérdida de energía se consigue por medio de la amortiguación producida al caer el agua entre estanque y estanque.

El agua que discurre dentro del estanque creado entre un umbral y el siguiente, lo hace con velocidad pequeña, por lo tanto es un tramo de remanso; por el contrario cuando el agua desciende o cae por los umbrales de las piedras, debido a la diferencia de nivel, la velocidad aumenta provocando un rápido. Por otra parte cuando el agua cae en el estanque inferior queda amortiguada por el agua embalsada en este estanque.

6.1.2. Tipos de pasos según la ubicación del paso respecto del río y la barrera (ver figura 6.3).

La segunda clasificación de los pasos naturalizados se realiza según la ubicación del paso en relación al río y a la barrera. En este caso se sigue la clasificación descrita por FAO-DVWK (2002).

Las dos clasificaciones no son excluyentes, por lo que un tipo de paso según la primera clasificación pertenecerá también a otro tipo de la segunda clasificación.

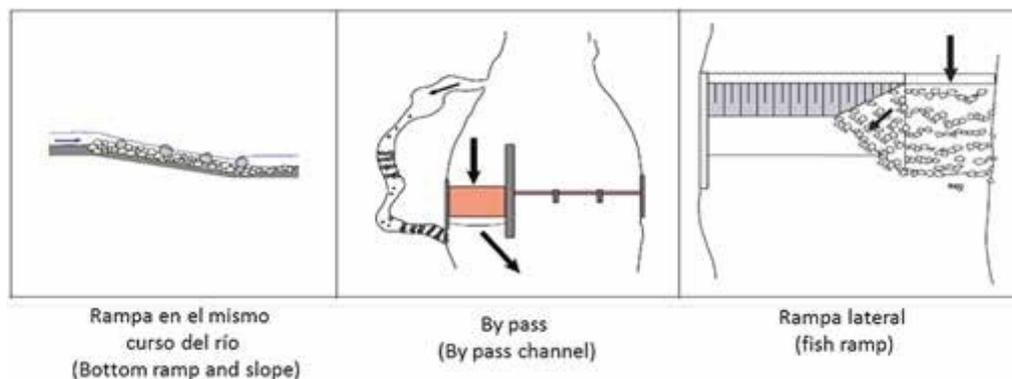


Figura 6.3. Tipos de pasos naturalizados según su ubicación del paso respecto del río y la barrera (Fuente FAO-DVWK).

a) Rampa en el mismo curso del río (*Bottom ramps and slopes*).

Son las rampas que se construyen en el mismo curso de agua y en toda su anchura. La denominación de este tipo de paso según la clasificación de la FAO-DVWK (2002) corresponde a ***Bottom ramps and slopes*** (la traducción literal de este rampa puede conducir a error porque no hace referencia a la ubicación, sin embargo el concepto que la propia publicación de la FAO describe es justamente la que se ha descrito).

b) “By pass”.

Los “by pass” son los pasos naturalizados que se construyen en una derivación lateral del río.

Situar el paso de peces en una derivación respecto del curso principal presenta grandes ventajas. Con la separación del bypass se consigue aislar hidráulicamente de la dinámica del río y así se evitan algunos de los daños que generan los ríos cuando se producen caudales extremos. Los daños pueden ser socavaciones, erosiones, roturas o sedimentaciones.

La derivación también tiene la ventaja de facilitar el acceso para realizar revisiones, obras o reparaciones.

Al ser el “by pass” una construcción nueva y aislada del río es más fácil hacer mejores actuaciones que favorezcan la integración paisajística y conseguir que el paso sea un “río artificial” (nombre muy comúnmente utilizado para designar algunos tipos de pasos naturalizados).

c) Rampa lateral (Fish ramp).

La rampa lateral es la rampa o paso que se realiza en uno de los laterales de la barrera y en el propio margen de la misma. La denominación del paso equivalente de esta rampa según la clasificación de la FAO-DVWK (2002) es “*Fish ramp*” (igual que en el caso anterior la traducción literal de este nombre puede inducir a error).

Resumiendo, el primer criterio de clasificación se basa en la forma en cómo se produce la mayor parte de la pérdida de energía, ésta puede ser principalmente por el rozamiento y el choque con grandes rugosidades, como es el caso de las rampas de piedras o puede ser por la amortiguación del agua en un estanque, como es el caso de las rampas de rápidos y remansos. El segundo criterio de clasificación es la ubicación del paso con respecto al curso de agua y a la barrera. Se comprende que un mismo paso será de un tipo según la primera clasificación y de otro tipo según la segunda clasificación.

6.2. CONDICIONES DE APLICACIÓN DE LOS PASOS NATURALIZADOS.

Como ya se ha comentado anteriormente, los pasos naturalizados son los dispositivos de mayor permeabilidad y los que más se aproximan al estado original del río, por este motivo es de esperar que cada vez sean más utilizados.

Si bien, para la aplicación de este tipo de pasos es recomendable que se cumplan las siguientes condiciones:

1. Condiciones de la barrera.

1. 1. La variación del nivel del agua por encima de la barrera para la mayor parte de los caudales no debe ser muy grande. De no ser así, entonces durante los eventos de crecidas se produciría la total anegación de la rampa de rápidos y remansos y el consiguiente perjuicio para la misma, en el resto de tipos de rampas los daños no serían tan perjudiciales. En el caso contrario en el que se producen los caudales mínimos, algunas de las secciones quedarían al descubierto con la consiguiente pérdida de estética, si bien esta segunda cuestión no es una limitación.

1.2. La altura de la barrera no debe ser muy grande, entendiéndose por tal el valor cercano a 2,5 o 3,0 m. Puesto que en estas rampas la pendiente es relativamente pequeña lo cual obliga a que la longitud del paso sea considerable cuando la altura de la barrera es relativamente

grande. Realmente este inconveniente no es limitativo porque siempre que se disponga del suelo disponible se podrá construir una rampa tan larga como sea necesario, de hecho existen pasos naturalizados de varios kilómetros de longitud como es el caso de la escala sobre el río Danubio en Melk (Austria) con más de 2 km de longitud.

2. Condiciones de la velocidad y profundidad dentro de la escala.

La velocidad no debe ser mayor a **2 m/s**.

La profundidad del agua debe ser siempre mayor a **0,3 o 0,4 m**.

6.3. RAMPAS DE PIEDRAS.

Como se comentó anteriormente, el paso de rampa de piedras consiste en un paso formado por un plano inclinado que salva el desnivel de la barrera, el lecho del paso se construye con gran rugosidad y así se consigue conseguir disminuir la velocidad del flujo.

En este tipo de rampas se diferencian varias subclases.

6.3.1. Rampa de escollera.

La rampa de escollera consiste en un plano inclinado (la rampa propiamente dicha) con piedras de escollera, tanto, en el lecho como en las paredes laterales.

Las piedras serán del tamaño adecuado y estarán dispuestas de la forma precisa para que se produzca una gran rugosidad y así conseguir frenar la velocidad del flujo a los límites adecuados para que los peces de la especie objetivo del paso puedan remontarla sin dificultad (ver figuras 6.2).

Las características de este tipo de rampa son:

Las piedras tendrán un tamaño comprendido entre 0,6 y 1,2 m (tamaño que coincide con las piedras de las rampas de incorporación de piedras), dispuestos ordenadamente incluso a veces unidos entre sí.

La Pendiente máxima de estas rampas es del 10 % para los salmónidos y del 5 % para los ciprínidos.

El calado mínimo en las rampas no debe ser inferior a 0,3 o 0,4 m.

La velocidad máxima no debe sobrepasar 2 m/s.

6.3.1.1. Rampa de escollera con sección cóncava

Dentro del tipo de rampa de escollera, se puede diferenciar una variedad en la que la sección transversal se construya con un perfil cóncavo y asimétrico. Esta disposición tiene como finalidad crear un gradiente de velocidades desde el centro, donde la velocidad es mayor

porque el calado también lo es, hacia los laterales, en los cuales la velocidad va disminuyendo a medida que disminuyen los calados (figuras 6.4.a, y 6.4.b)

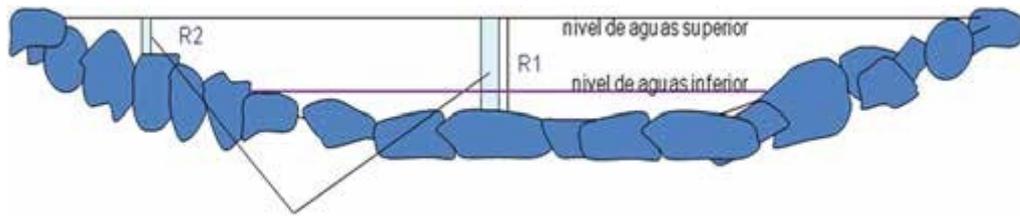


Figura 6.4. Esquema de una rampa de escollera con sección cóncava.



Figura 6.5. Rampa de escollera con sección cóncava en Alar del Rey (Palencia).

En el esquema de la figura 6.4, se aprecia que cuando el caudal es pequeño el calado y/o el radio hidráulico también lo es, y por lo tanto la velocidad es pequeña en toda la sección de la rampa, puesto que la velocidad está en relación directa con el calado. Para caudales más grandes, en la zona central aumenta notoriamente la profundidad, y consecuentemente la velocidad; sin embargo al ser la sección cóncava el calado es pequeño en los márgenes, y por lo tanto en estos puntos la velocidad es pequeña. Por lo tanto, el nivel del agua es grande, los peces pueden remontar la rampa por los márgenes donde el calado y la velocidad son pequeños; de esta manera se consigue que la rampa sea prácticamente practicable en todo momento.

La fotografía de la figura 6.5, corresponde a una rampa de piedras en el río Pisuerga en la localidad de Alar del Rey en la provincia de Palencia. Es posible observar en esta rampa que en los extremos afloran las piedras por encima del agua. Como las piedras son del mismo tamaño, la sobre elevación de las piedras situadas en los márgenes demuestra que el perfil de la sección tiene concavidad, si bien ésta es de escasa entidad.

En la Figura 6.6, se muestra otra rampa de sección cóncava.



Figura 6.6. Rampa de piedras con sección cóncava.

Si se analiza alguna de las ecuaciones de la velocidad, siendo apropiado optar en el caso de las rampas por una ecuación de flujos macrorrugosos, como por ejemplo la ecuación de Darcy-Weisbach (1985).

$$V_m = \left(\frac{1}{\sqrt{\lambda}} \right) \sqrt{8gR_h I}$$

Dónde:

I, es la pendiente (m/m).

l, es el coeficiente de rugosidad.

R_h , es el radio hidráulico (m).

Se puede observar que la velocidad está en función del radio hidráulico " R_h ", cuando la anchura es cuatro veces mayor a la profundidad, situación que se produce en la mayor parte de los casos, el radio hidráulico se puede sustituir por el calado, por lo tanto cuanto mayor sea el calado mayor será la velocidad. Si se construye una sección en la cual se consigue que en todo momento exista una franja de la sección donde el calado es pequeño, entonces se conseguirá una velocidad baja apta para que los peces puedan remontar el paso.

Siempre que sea posible se recomienda construir la rampa con *sección asimétrica*, tal y como aparece en el esquema de la figura 6.7. Así se consigue un rango más grande de velocidades y también se asemeja aún más a los cursos naturales. Esta sección asimétrica es la existente en los tramos de los ríos con curvatura. Al ser asimétrica la sección una de las pendientes de los márgenes posee mayor longitud por lo tanto el rango de velocidades aumenta más lentamente en el margen con menor pendiente lo cual posibilita la existencia de más hábitats y consecuentemente la biodiversidad. En la figura 6.8, se muestra una rampa de escollera asimétrica en la que la margen izquierda es la de mayor pendiente.

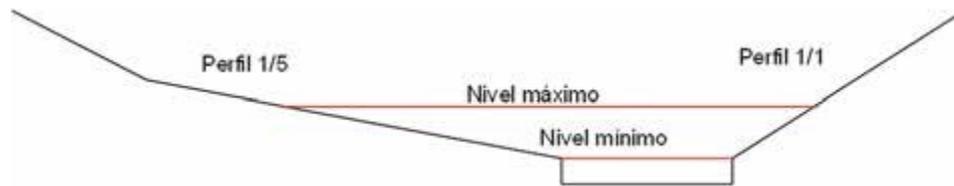


Figura 6.7. Esquema de rampa con sección asimétrica.



Figura 6.8. Rampa con Sección asimétrica, margen izquierda con menor velocidad.

6.3.1.2. Rampa de sección cóncava dividida en varias secciones

Una variación del tipo de rampa de escollera con sección cóncava corresponde a la rampa dividida en varias secciones todas ellas con perfil cóncavo (ver figura 6.9 y figura 6.10).

Con esta disposición de tres secciones se consigue mayor superficie de zonas con poca velocidad, siendo estas zonas justamente donde afloran las escolleras y consecuentemente habrá mayor sección de paso para los peces en momentos de grandes caudales.

Si en el tramo de la parte central, el umbral de entrada del agua se sitúa a una cota inferior de los otros dos tramos y con una directriz curva semicircular, lo cual crea una mayor longitud de vertedero de esta parte central, este umbral central queda a una altura inferior en referencia a los otros dos umbrales colaterales, con todo ello se consigue una mayor longitud de vertido y el caudal se concentrará en mayor cantidad en esta sección central que en las otras dos, por estar el vertedero de esta sección central en una cota inferior a las otras dos; entonces en momentos de mínimos caudales la mayor parte del caudal se concentrará en esta sección y al ser esta relativamente pequeña se producen calados suficientemente grandes para que los peces puedan remontar por esta barrera.

En la rampa de la fotografía de la figura 6.10., se aprecia la modificación anteriormente comentada consistente en que el umbral de la sección central se construye con una curvatura semicircular y a una cota inferior a los otros dos tramos. Al situar la cota de este vertedero central por debajo de los otros dos se consigue que el agua entre en mayor cantidad por este punto, y especialmente cuando se producen caudales mínimos la mayor parte del mismo se concentrará en esta sección permitiendo que se produzcan flujos con suficiente profundidad para que los peces puedan ascender sin problemas. Al construir el vertedero de esta sección central con directriz semicircular, aumenta la longitud del mismo concentrando aún más los caudales por esta sección. Obsérvese también como en la escala de la fotografía de la figura 6.10, las piedras no sobresalen de la lámina de agua, lo cual mejora notoriamente la estética de la rampa.



Figura 6.9. Rampa de piedras con sección dividida en tres secciones cóncavas.



Figura 6.10. Vista de rampa de tres secciones. Obsérvese que al no sobresalir las piedras de los umbrales se consigue un gran valor estético.

6.3.1.3. Consideraciones de diseño y construcción en las rampas de piedras.

Aspectos estéticos.

Uno de los grandes méritos de este tipo de pasos es su gran valor estético y paisajístico.

Para conseguir la integración paisajística y un aspecto similar a los ríos naturales, se deben de intentar conseguir las siguientes condiciones:

- Las piedras deberán ser de la *misma naturaleza* que las existentes en el río.

- *Las piedras serán de baja altura.* Por este motivo una vez colocadas las piedras en la rampa, en la medida de lo posible, no sobresaldrán o nada o casi nada sobre la lámina de agua, si se consigue esta condición el efecto visual obtenido será que la lámina de agua cubre toda la superficie, tal y como se aprecia en la figura 6.10 donde toda la sección está cubierta por el agua.

- En los márgenes de la rampa, siempre que sea posible, se utilizará *bioingeniería*.

Protección al final de la rampa.

Tanto en la rampa de escolleras como en la rampa con incorporación de piedras se deben realizar obras de disipación de la energía y refuerzos de la cimentación. La longitud de estas protecciones debe estar comprendida entre 3 y 5 m para cualquier método elegido. En la figura 6.14, se observa que la protección al final de la rampa en forma de poza de disipación de energía.

Curvatura para rampas en ríos de anchura mayor a 15 m.

En los casos en que la anchura del río sea superior a 15 metros, se recomienda que la rampa tenga curvatura en vez de directriz perpendicular al río como sería lo habitual. Esta curvatura tendrá dos radios correspondientes a la sección final e inicial de la rampa, así para la sección aguas abajo, el radio de curvatura será 1,25 veces de la anchura menor del río en el tramo donde se encuentre la rampa; el radio de curvatura para la sección aguas arriba será 1,25 veces de la anchura máxima del río en el tramo de estudio del río (Schauberger, 1975) (ver figura 6.11).

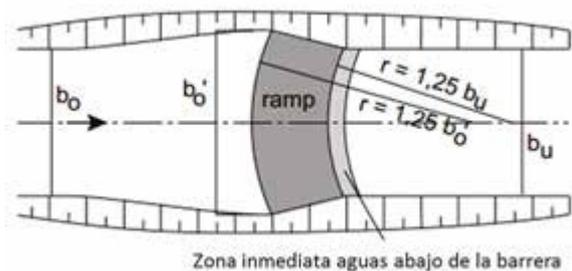


Figura 6.11. Curvatura de la rampa según Schauberger.

6.3.1.4. Cálculo de la rampa de escollera.

Los datos y método de cálculo que se describe a continuación se han extraído, en su mayor parte, de la publicación FAO-DVWK (2002).

1. Cálculo de la velocidad.

El cálculo de la velocidad media V_m se realiza como si fuera un canal abierto. Se recomienda aplicar la ecuación de Darcy-Weisbach (1985) porque esta fórmula es adecuada para lechos macrorugosos.

$$V_m = \left(\frac{1}{\sqrt{\lambda}} \right) \sqrt{8gR_h I}$$

Dónde:

I , es la pendiente.

R_h es el radio hidráulico.

λ es el coeficiente de resistencia.

g , es la aceleración de la gravedad.

El radio hidráulico " R_h " es el cociente entre la sección mojada (A), es decir la superficie transversal ocupada por el agua, y el perímetro mojado (P_m), es decir el total de la longitud de la sección del lecho que está en contacto con el agua.

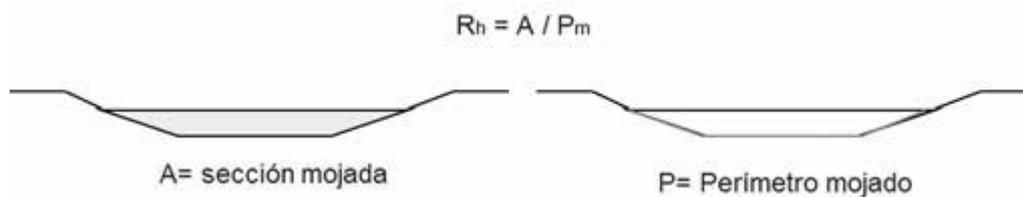


Figura 6.12. Esquema de la sección mojada y el perímetro mojado.

Cuando la anchura del canal es superior a cuatro veces la profundidad del flujo, se admite como aproximación válida que el radio hidráulico toma el valor de la profundidad o calado " y ".

Dependiendo de la rugosidad relativa (relación entre el radio hidráulico y la altura de la rugosidad), el cálculo de la rugosidad se realiza de dos maneras:

Si se define " k_s " como el diámetro de la rugosidad "equivalente de la arena", este parámetro se puede reemplazar por alguno de los siguientes valores:

- el diámetro medio de la roca d_s reemplazaría al parámetro " k_s " en el caso de la roca de fondo.
- el d_{90} del diámetro del tamaño del grano cuando las piedras del sustrato tienen diferentes tamaños de gravas.

Por lo tanto como se ha comentado anteriormente el cálculo de la rugosidad “l” se debe calcular por alguna de las dos ecuaciones siguientes dependiendo del valor que adquiera el parámetro “ks”:

1. Si $ks < 0,45 r_{hy}$ la rugosidad tiene el valor de:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \frac{k_s / r_{hy}}{14,84}$$

l, es la rugosidad

r_{hy} , es el radio hidráulico (m).

K_s , es el diámetro de la rugosidad “equivalente de arena” explicado anteriormente (m).

2. Si $ks > 0,45 r_{hy}$ la rugosidad con bloques de piedras (Scheuerlein, 1968).

El segundo método de cálculo de la rugosidad es por medio de la fórmula de Scheuerlein (1968). Esta fórmula se desarrolló para flujos sobre escollera y se aplica cuando el flujo se produce de forma turbulenta y en un canal rugoso, y/o en rampas de bloques de piedra con revestimiento de piedras ordenadas en la base, sin tener en cuenta el aire contenido en el agua y asumiendo que el factor de empaquetamiento es de 0,5 para el revestimiento y las piedras ordenadas.

El cálculo de la rugosidad se realizará con la expresión:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -3,2 \log \left[(0,425 + 1,01 * I) \frac{k}{h_m} \right]$$

h_m es la profundidad media del agua (m).

I es la pendiente.

El valor de la rugosidad de piedras ordenadas “k” se puede estimar por medio de:

$$k \approx \frac{1}{3} d_s \dots \frac{1}{2} d_{ds},$$

Esta ecuación es aplicable con las siguientes condiciones:

Pendientes (I) comprendidas entre 1:8 y 1:15 (m/m).

Piedras de diámetro medio “ d_s ”, comprendido entre 0,6 y 1,2 m

Dado que la rugosidad depende de la profundidad del calado y esta a su vez de la velocidad, necesariamente la aplicación de esta fórmula se realiza por medio de aproximaciones sucesivas.

El caudal se puede calcular por medio de la ecuación de continuidad:

$$Q = A V_m$$

Comprobación de la estabilidad de la escollera.

Elegida la escollera que se quiere instalar se debe comprobar su estabilidad, para ello se aplica el método de Rouvé (1987).

Primeramente se realiza el cálculo del diámetro mínimo de la escollera en función de su estabilidad.

La tensión de arrastre que se produce en el flujo de agua se calcula con la fórmula:

$$\zeta = \gamma_{fluid} R_h * I * c$$

Z, es la tensión tractiva de la corriente (kp/m²).

γ_{fluid} es el peso específico del líquido (kp/m³).

R_h es el radio hidráulico (m).

I , es la pendiente del río (m/m).

c, es el coeficiente de corrección y depende del lugar donde se calcule.

Lecho c = 0,97.

Taludes c = 0,75.

Los cálculos han de hacerse para el caudal de avenida para el periodo de retorno de 25 o 50 años.

Conocida el valor de la tensión de arrastre del flujo se determina el diámetro mínimo que soporta esta tensión de arrastre del flujo de la corriente y que indicará el tamaño medio mínimo de los diámetros de las piedras.

$$\zeta_o = 0,047 * (\gamma_{mat} - \gamma_{fluid}) * d_m * s * k$$

Dónde:

ζ_o , es la tensión crítica de los materiales de arrastre (kp/m²).

γ_{mat} , es el peso específico del material (kp/m³).

γ_{fluid} , es el peso específico del fluido (kp/ m³).

d_m , es el diámetro medio del material (m).

s, es la corrección por sinuosidad:

Ligeramente sinuoso: s = 0,9

Moderadamente sinuoso: s = 0,75

Sinuoso: s = 0,6.

k, es el coeficiente de corrección para la ubicación dentro de la sección transversal y toma el valor 1 en el lecho.

En el talud toma el valor siguiente.

$$k = [1 - (\text{sen } ^2 \theta / \text{sen } ^2 \varphi)]^{1/2};$$

Siendo:

U el ángulo del talud .

ψ , es el ángulo de fricción interna de los materiales (°). “ ψ ” se tomará como 80° debido a que la escollera no va a ser vertida, sino colocada ya que el talud puede aguantar este ángulo.

A partir de esta ecuación se despeja el valor del diámetro d_m

$$d_m = \zeta_o / (0,047 (\gamma_{mat} - \gamma_{fluid}) sk)$$

6.3.2. Rampas con incorporación de piedras.

Las rampas con incorporación de piedras son análogas a los pasos definidos según la FAO-DVWK como “rockfill constructions, Loose construction”.

Este tipo de rampa consiste en una rampa compuesta de dos capas de piedras. El lecho se cubre primeramente con una capa de gravas homogéneas de tamaño intermedio, el espesor de esta capa debe ser al menos dos veces el mayor tamaño de las piedras. Sobre este lecho, se incorporan piedras de mayor tamaño, normalmente de diámetro comprendido entre 0,6 y 1,2 m, con la finalidad de aumentar la rugosidad y disminuir la velocidad hasta los valores admisibles para que puedan remontar los peces. Incluso se pueden realizar algunos umbrales con el fin de conseguir que se produzca la profundidad mínima recomendable, aunque si estos se hacen regularmente y de forma metódica cubriendo toda la anchura del canal la rampa se transformaría en una rampa de rápidos y remansos (ver figura 6.13).

En este tipo de rampa la pendiente debe ser inferior a 1:15

Esta rampa es más ecológica que la rampa de escollera porque permite el paso a mayor biocenosis.

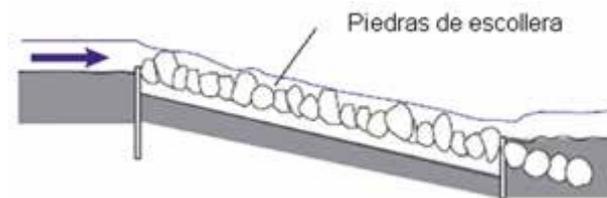


Figura 6.13. Perfil longitudinal de la rampa con incorporación de piedras. (Fuente: FAO/DVWK)

En todas las rampas es imprescindible asegurar la estabilidad de la misma, para ello se construyen dispositivos disipadores de energía al final de la misma y/o otro tipo de fijación, como por ejemplo filas de columnas de madera o también redondo de acero incrustados en las piedras y así aumentar la resistencia de las piedras, la longitud de esta protección varía entre 3 y 5 m.

La Figura 6.14, muestra el perfil de una rampa con incorporación de piedras donde se diferencia la zona de protección posterior a la propia rampa.

En las figuras 6.15, y 6.16, se muestra en planta y alzado la rampa de piedras con las distancias de separación entre las piedras, a_x de separación longitudinal y a_y de separación transversal.

La disminución de la velocidad se produce en menor parte por la rugosidad creada por las piedras que forman el lecho, y en mayor parte por el freno que genera el roce y choque del flujo con las grandes piedras insertadas en el lecho. Este segundo freno es mucho más intenso y por este motivo es por el que se introducen estas grandes piedras, lógicamente cuanto más piedras y más grandes sean, el freno será mayor.

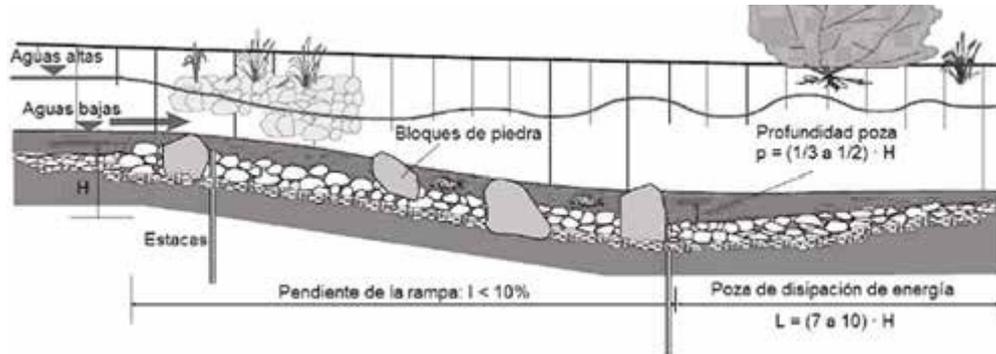


Figura 6.14. Perfil longitudinal de una rampa (Fuente FAO-DVWK).

6.3.2.1. Cálculo de la rampa de incorporación de piedras.

El cálculo de la velocidad se realiza por la ecuación de Darcy-Weisbach (1985) anteriormente explicada (ver figuras 6.15 y 6.16):

$$V_m = \left(\frac{1}{\sqrt{\lambda}} \right) \sqrt{8gR_h I}$$

Dónde:

I , es la pendiente (en tanto por uno).

R_h , es el radio hidráulico (m).

l es el coeficiente de resistencia.

g , es la gravedad (9,81 m/s²).

El cálculo de la rugosidad se realiza por medio de la fórmula de macrorugosidades de ROUVE (1987). En esta expresión la rugosidad se divide en dos partes, una primera corresponde a las gravas del lecho y otra segunda a las grandes piedras. La rugosidad total viene expresada según la siguiente ecuación:

$$\lambda_{tot} = \frac{\lambda_s + \lambda_o(1 - \epsilon_o)}{(1 - \epsilon_v)}$$

es la rugosidad debida a las grandes piedras y se puede calcular por la expresión:

$$\lambda_s = C_w \frac{4 \sum A_s}{I I_h}$$

Dónde:

“Cw” es el coeficiente de resistencia, “As” es la superficie en proyección horizontal de la piedra, “I” es la longitud del tramo e “Ih” es el perímetro mojado, ax, es la separación longitudinal y ay, es la separación transversal. As es la superficie en proyección ortogonal de la piedra que ofrece a la corriente (m²), se estima por la ecuación: As= ds h. donde ds es el diámetro medio de la piedra y h la profundidad del agua, el total de todas las piedras será el sumatorio. cw es el coeficiente de resistencia de forma, normalmente vale 1,5.

es el coeficiente de rugosidad del fondo, se calcula por la expresión utilizada para el casode las rampas de escolleras:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \frac{k_s / r_{hy}}{14,84}$$

Dónde:

ks, es el equivalente de la rugosidad de la arena (m), y se sustituye por el valor de ds, Diámetro medio de las piedras del fondo cuando tienen las mismas dimensiones o por d90 cuando es una mezcla de piedras.

rhy, es el valor del radio hidráulico (m).

$\epsilon_v = \frac{\sum V_s}{V_{total}}$; es la relación del volumen sumergido de las piedras dividido por el volumen total.

$\epsilon_a = \frac{\sum A_{os}}{A_{total}}$; es la relación de la superficie que ofrece todas las piedras al flujo en proyección ortogonal de e las piedras divididas por toda la sección total (cada piedra es AOs=h * dd. y Atotal es la superficie del canal en proyección vertical.

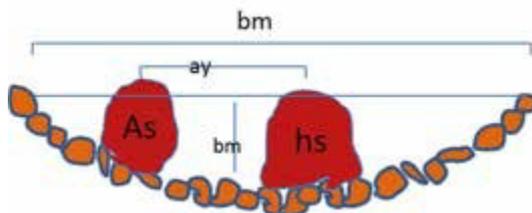


Figura 6.15. Alzado de una rampa con incorporación de piedras.

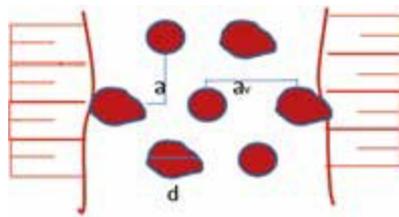


Figura 6.16. Planta de rampa con incorporación de piedras.

Para realizar los cálculos se deben conocer además los siguientes datos.

Suponiendo una sección transversal trapezoidal donde:

b , es la anchura inferior del canal (m).

T es el talud del canal, expresado como tangente $T= y/x$, en tanto por uno.

d_s , es el diámetro medio de la piedra (m).

Q , es el caudal de cálculo, será el máximo y el mínimo (m^3).

A partir de los datos existentes y conociendo las fórmulas anteriormente expuestas y las que se irán describiendo a continuación se desarrollará el proceso de cálculo con el objetivo de conocer la velocidad, el número de Froude, y se comprobará si los valores obtenidos son menores a los admisibles. Se considera como valores máximos admisibles para cualquier punto del canal, la **velocidad de 2 m/s** y el **número de Froude 1,70**. Estos valores no pueden ser sobrepasados en ninguna zona de la sección. Las zonas de mayor velocidad corresponden a la sección con el mayor estrechamiento.

Calado “h”. El cálculo se inicia dando un valor aproximado al calado “h”, el cual se reajustará o no, dependiendo de los resultados obtenidos.

Para realizar los cálculos se considera un tramo del canal con una longitud de “10 m”.

Calculo de:

- Área mojada máxima (de flujo). Es el área mojada en la que no hay piedras, como la superficie es un trapecio.

$$A = \left(\frac{b + b + 2d}{2} \right) * h = (b + d) * h = \left(b + \frac{h}{T} \right) * h$$

A_F es el área mojada (m^2).

b , es la anchura del canal en la base (m).

T es la pendiente del talud (tanto por uno).

d , es la anchura del talud (proyección ortogonal del talud) (m).

h , es la profundidad o calado del flujo (m).

- Perímetro mojado I_h :

$$I_h = b + 2 \left(\sqrt{h^2 + \left(\frac{h}{T} \right)^2} \right)$$

Todos los parámetros son conocidos.

- Radio hidráulico, r_h (m):

$$r_h = \frac{A_F}{I_h}$$

- Porcentaje de inmersión de piedras.

$$\varepsilon_v = \frac{\sum V_i}{V_{total}}$$

V_{total} , es el volumen total del canal y se calcula por medio de (m^3): $V_{total} =$ superficie mojada (A_F) * longitud del canal = $10 A_F$, suponiendo la longitud del tramo de 10 m (m^3).

A_F , es el área de la superficie de flujo (m^2).

Donde $\sum V_i$ el volumen mojado de todas las piedras.

$$\sum V_i = N_p \frac{\pi}{4} d_i^2 h$$

Siendo N_p el número de piedras en el tramo. Se puede calcular con la expresión que se detalla a continuación (la anchura se amplía 0,2 m porque se considera que las piedras ocupan una pequeña parte del talud):

$$N_p = \frac{10 * (b + 0,2)}{a_x * a_y}$$

Donde a_x , a_y , son la separación longitud y transversalmente entre piedras respectivamente (m).

- Porcentaje de superficie ocupado por las piedras en proyección ortogonal:

$$\varepsilon_0 = \frac{\sum A_{os}}{A_{total}} = \frac{N_p * \frac{\pi}{4} * d_s^2}{I * I_h}$$

Dónde:

A_{os} : es la superficie en proyección ortogonal que la piedra ofrece al flujo (m^2).

d_s , es el diámetro de las piedras (m).

r_h es el radio hidráulico (m).

- coeficiente de resistencia de las grandes piedras.

$$\lambda_s = C_w \frac{4 \sum A_s}{I I_h}$$

Donde c_w , es el coeficiente de resistencia, " A_s " es la superficie en proyección horizontal de la piedra, " I " es la longitud del tramo e " I_h " es el perímetro mojado.

- Coeficiente de resistencia del fondo λ_o (ecuación que se explicó anteriormente).

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_o}} = -2 \log \frac{k_s / r_{hy}}{14,84}$$

- Coeficiente de resistencia total se calcula a partir de la ecuación de la resistencia según Rouvé (1987), también explicada anteriormente:

$$\lambda_{tot} = \frac{\lambda_s + \lambda_o (1 - \varepsilon_o)}{(1 - \varepsilon_v)}$$

También se puede despreciar los valores de ε_o y ε_v y entonces:

$$\lambda_{total} = \lambda_s + \lambda_o$$

En este caso:

$$\lambda_s = 4 * C_w \frac{A_{os}}{a_x * a_y}$$

Siendo $A_{os} = d_s * h$

Con todos los parámetros anteriormente calculados es posible determinar la velocidad media del flujo por medio de la fórmula anteriormente descrita:

$$V_m = \left(\frac{1}{\sqrt{\lambda_{tot}}} \right) \sqrt{8gR_h I}$$

- El caudal se determina con la ecuación de continuidad:

$$Q_c = V_m * A_F$$

Si este Q_c es suficientemente próximo al caudal Q de cálculo prefijado, entonces se dan por válidos los cálculos realizados, de no ser así, (se debe recordar que el valor del calado “h” se introdujo de manera aproximada) se deberá realizar los cálculos nuevamente de tal forma que el nuevo valor del calado incremente o disminuya en el sentido que indique la desviación del caudal calculado “ Q_c ” en relación con el caudal mínimo “ Q_{min} ”.

Cuando se ha llegado a un valor válido de V_m y del caudal Q_c , entonces se continuarán con los siguientes cálculos.

La velocidad “ V_m ” calculada corresponde a la velocidad media en una sección en que no existen grandes piedras (recuérdese que el cálculo de la sección A_F se ha realizado con una sección sin piedras). Sin embargo, cuando el flujo atraviesa la sección más estrecha posible en las que pueden existir varias piedras, la sección transversal disminuye aumentando notoriamente la velocidad. El número de piedras máximo (N_{pmax}) que puede haber en una sección transversal depende de la anchura del canal y de la distancia de separación transversal “ a_y ” entre las piedras (para una anchura en la base “b” de 2,4 m el número de piedras es “ N_{pmax} ” suele ser dos o tres piedras).

En la fotografía de la figura 6.17, se puede observar una rampa con incorporación de piedras construida en el río Tormes. Es posible diferenciar las piedras propias del lecho correspondientes a las de menor tamaño, y las piedras incorporadas de grandes dimensiones y que son las que producen la mayor parte de la rugosidad.



Figura 6.17. Rampa con incorporación de piedras (Fuente: Sanz J.)

Por lo tanto, la velocidad máxima será la que alcanza el flujo en una sección donde están las piedras. El valor de la velocidad máxima viene expresado por:

$$V_{mx} = \frac{V_m}{1 - \frac{\sum A_{pie}}{A_F}}$$

Donde $\sum A_{pie}$ es el sumatorio de todas las áreas de las piedras (m²) y valdrá:

$$\sum A_{pie} = N_{pmax} * d_s * h$$

Dónde:

d_s es diámetro de la piedra (m).

h , es la profundidad del agua (m).

N_{pmax} es el número de piedras máximo en una sección.

Si:

$$V_{max} < 2 \text{ m/s}$$

Entonces la velocidad máxima es admisible, sí no es así se deberá volver a diseñar la rampa para disminuir la velocidad por debajo de 2 m/s.

El tipo de flujo existente en el canal se determina con el número de Froude.

- Número de Froude para el flujo cuando se produce el flujo más lento, es decir el que se produce en la sección sin piedras, viene expresado por la ecuación.

$$F = \frac{V_m}{\sqrt{g * y_l}}$$

Dónde:

V_m , es la velocidad media (m/s).

g , es la aceleración de la gravedad 9,81 m/s².

y_l , es el la profundidad del flujo (m/s).

$b_e = b_{\max} - n \cdot d_s$
n número de piedras máx. sección

Para el caso de flujo lento entonces “y” se calcula:

$$y_l = \frac{\text{area del flujo}}{\text{anchura de la lamina libre}} = \frac{A_F}{b + 2 * T * h}$$

Dónde:

A_F , es el área mojada del flujo (m^2).

b es la anchura de la base del lecho (m).

T es la pendiente del talud.

h , es la profundidad (m).

Normalmente estos flujos tienen un número de Froude menor a 1, siendo por lo tanto flujos subcríticos.

- Número de Froude en la sección de mayor velocidad.

$$F_r = \frac{V_m}{\sqrt{g * y_r}}$$

La sección de mayor velocidad es la sección donde hay mayor número de piedras. En este caso la profundidad y_r se calcula:

$$y_r = \frac{\text{área con piedras}}{\text{anchura más estrecha}} = \frac{A_F - \sum A_{pie}}{b_e}$$

$b_e = b_{\max} - n * d_s$;

n número de piedras máx. sección

b_{\max} , es la anchura superior.

Todos los parámetros han sido explicados anteriormente.

Este segundo número de Froude correspondiente al flujo con mayor velocidad necesariamente tiene que ser mayor que el número de Froude anterior correspondiente a la sección de menor velocidad.

El valor del número de Froude máximo admisible se cifra en 1,70.

$$F_r < 1,70$$

Si resultara un número de Froude superior a esta cantidad, será necesario volver a diseñar la rampa para que se obtenga un número de Froude inferior. Para ello se deberá disminuir la velocidad y aumentar el calado.

6.4. RAMPAS DE RÁPIDOS Y REMANSOS.

La rampa de rápidos y remansos corresponde con el paso definido por la FAO-DVWK (2002) como el tipo de rampa de “Embeddeed rocky sills constructions”, y si esta rampa se realiza en una derivación del río, entonces también será un “by Pass”.

Las rampas de rápidos y remansos consisten en un paso compuesto de tramos o pequeños estanques consecutivos separados entre sí por umbrales-vertederos de piedras por los cuales

el agua vierte con el desnivel de altura correspondiente a la diferencia de cotas entre estanques. Con este sistema se intenta conseguir el efecto existente en los ríos naturales de “rápido-poza”, donde el rápido sería el umbral vertedero y la poza el propio estanque.

Mientras el agua atraviesa los tramos o estanques lo hace con baja velocidad, por lo tanto es un tramo de remanso. Por el contrario; cuando el agua desciende por los umbrales, debido a la diferencia de nivel aumenta la velocidad provocando un rápido realizándose en parte como vertido sumergido y en parte como vertido libre.

El comportamiento hidráulico de esta escala se asemeja a la escala de estanques sucesivos porque también hay un desnivel entre los estanques, en este caso el tramo de remanso, y la mayor parte de la pérdida de energía se produce en la caída del agua.



Figura 6.18. Rampa de rápidos y remansos en el río Pisuerga en San Salvador de Cantamuda (Palencia). Original de Sanz J.

El diseño y cálculo de este tipo de rampa se realiza de manera análoga a como se realiza el cálculo en los estanques sucesivos, si bien en este caso, cuando se producen caudales grandes siempre se considera como vertedero toda la sección del umbral de piedras.

Se recomienda que la sección longitudinal cumpla las siguientes condiciones:

- Las piedras que forman el umbral debe tener un diámetro medio “ d_s ” comprendido entre 0,6 y 1,2 m.
- Estas piedras que forman el umbral deben estar embebidas a una profundidad suficientemente grande para asegurar su estabilidad. También se pueden proteger con filas de pilas de maderas o de redondos de acero.
- En los casos que se prevean eventos en los que se produzcan inundaciones con grandes caudales que originen turbulencias y estas produzcan inestabilidades en el lecho, se recomienda disponer de una escollera de base en el fondo de toda la rampa para después construir los umbrales o barras con grandes piedras fijadas al fondo.
- El calado del agua será mayor a 0,30 o 0,40 m. incluso para caudales bajos.
- La pendiente de las rampas con mucha rugosidad debe ser menor a 1:20 (también puede llegar a 1:15). En rampas con poca rugosidad la pendiente debe ser inferior a 1:30.

- La velocidad no debe sobrepasar en ningún punto los valores comprendidos entre 1,6 y 2,0 m/s.
- El sustrato del lecho mejora cuando existen muchos huecos, rugosidad, continuidad y conexión del fondo con el lecho del río (siempre y cuando no haya problemas de estabilidad).
- Se puede mejorar la estabilidad de la rampa construyéndola en la directriz de arco.
- La distancia entre umbral y umbral deberá ser como mínimo la correspondiente a la que produzca un desnivel máximo de 0,2 m.

Como se comentó, anteriormente este tipo de rampas se realiza construyendo segmentos transversales o tabiques a lo largo del canal para así formar estanques por los que el agua vierte de estanque a estanque entre los huecos que se dejan intencionadamente entre las grandes piedras de cada tabique transversal, formándose así pequeños vertederos (ver figuras 6.19 y 6.20).

En la figura 6.19, se muestra un esquema de una escala de rápidos y remansos, donde se aprecia que la zona de rápidos corresponde a los umbrales que funcionan como vertederos y los remansos son los estanques limitados por estos umbrales.

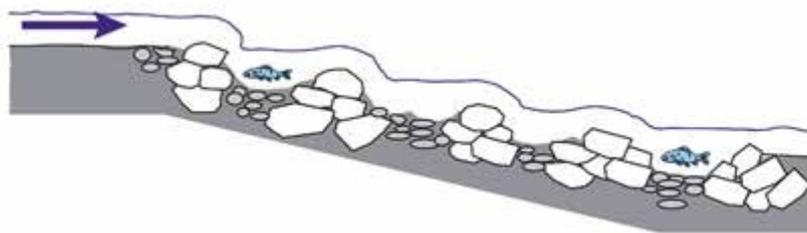


Figura 6.19. de Rampa de rápidos y remansos, Fuente FAO-DVWK (2002).

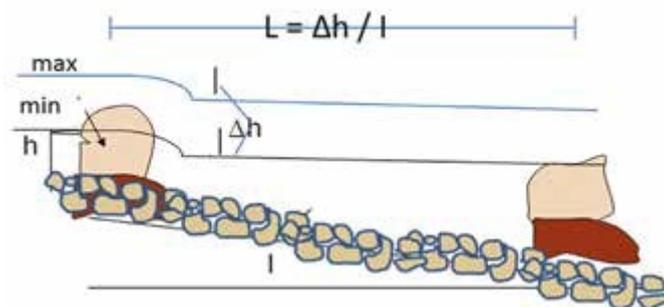


Figura 6.20. Esquema del perfil longitudinal de una escala de rápidos y remansos

En la figura 6.20, se muestra un esquema de un estanque donde se ha indicado el nivel que alcanza la lámina de agua con caudales mínimos y máximos. Estéticamente es importante que el agua cubra todo el vertedero.

Los parámetros que aparecen en la figura son:

L , es la distancia entre umbrales (m).

I , es la pendiente de la rampa.

h , es la altura de vertido (m).

Dh , es el desnivel entre estanques (m).

Para los caudales medios y altos, toda la longitud del umbral-vertedero funciona como vertedero, es decir el agua vierte por toda la anchura de la sección, dando al paso un mayor aspecto de curso natural, para conseguir tal fin, se deben realizar los cálculos de la escala para que estos flujos viertan por toda la anchura del umbral. Cuando el agua cubre todo el vertedero la similitud con un río natural es casi perfecta tal y como se puede observar en la figura 6.21, correspondiente a un paso natural de rampa de rápidos y remansos en “by pass”.



Figura 6.21. Dos pasos naturalizados de rampa de rápidos y remanso en “by pass”.

Los estanques están limitados por los muros donde se encuentran los vertederos por ellos fluye el canal. Se recomienda que en total se construyan tres vertederos (ver figura 6.22):

1. Orificio sumergido de sección cuadrada siendo las dimensiones utilizadas variables entre 0,15 m y 0,25 m. Con el objetivo de realizar la autolimpieza y facilitar la remonta a los peces bentónicos.

2.1. Vertedero compuesto semisumergido. Este vertedero será de sección rectangular o trapezoidal y semisumergido, si bien la forma del vertedero se puede modificar y también puede estar formado por varias secciones, y así conseguir con estas dos modificaciones aumentar las irregularidades y se consigue mayor semejanza con la naturaleza. Las dimensiones de este vertedero también varían para cada caso. La altura del vertedero está en función de la altura de la barrera y de las condiciones de construcción de cada escala. Las longitudes de los vertederos lógicamente también están en función de la altura y del caudal de cálculo que vierta, es recomendable que no sea inferior a 0,40 m para evitar taponamientos.

2.2. Vertedero semejante al de hendidura vertical. Sería un vertedero que llegase al fondo del lecho, el vertido se realizaría en toda la altura del umbral, semejante al vertedero de hendidura vertical. En este caso no será necesario construir un orificio sumergido.

3. Vertedero de toda la sección del umbral. Cuando el caudal aumenta entonces toda la anchura del umbral funciona como vertedero. Esta situación no debe ser exclusiva para grandes caudales, porque cuando se produce esta situación de vertido donde la lámina de agua cubre todas las piedras, es cuando el paso se asemeja más a un río natural.

En la siguiente figura se muestra un esquema de una sección transversal de una rampa o paso de rápidos y remansos con los tres vertederos. Como se puede apreciar en la figura las dimensiones del paso, como por ejemplo la anchura, las longitudes del vertedero son pequeñas, esto es debido a que el paso se proyectó en un río con caudales muy pequeños.

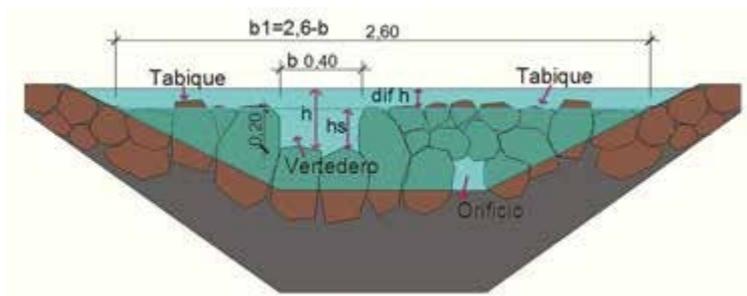


Figura 6.22. Ejemplo de una sección transversal del umbral de un paso de rápidos y remansos.

El caudal que atraviesa el umbral depende de los vertederos que estén en funcionamiento y estos a su vez del nivel del agua en el estanco superior. Por lo tanto, se pueden diferenciar tres caudales que atraviesan el umbral.

Q_0 , Caudal del orificio.

Se calcula por la misma fórmula que se utiliza para las escalas de artesas sucesivas (Larinier, 2002):

$$Q = C_1 * S * \sqrt{2g\Delta H}$$

Siendo:

Q, es el caudal que atraviesa el orificio (m³/s).

C₁ es el coeficiente de descarga que toma valores entre 0,65 y 0,85.

g, es la constante de gravedad (9,81 m²/s).

ΔH, es el incremento de altura entre las dos láminas (m).

S, es la superficie del orificio (m²).

En el coeficiente de descarga el factor que más influye es la forma del vertedero (circular, cuadrado, rectangular etc.) y en el perfil del orificio (con el borde afilado, biselado, borde redondeado aguas abajo) el espesor de la pared transversal en la que está el orificio, y la posición del orificio en la pared.

En los orificios de sección cuadrada, los valores de los lados más usados son de 0,20 m o 0,25 m o superiores, si bien los caudales pequeños se pueden diseñar con 0,15 m.

Geometría de los orificios

- c = d ,(recomendado).
- c · d \$ 0,09 m² para el salmón.
- c · d \$ 0,04 m² para la trucha.

El orificio mínimo es de 0,025 m².

Q_v caudal de los vertederos rectangulares y del caudal de toda la sección.

En la medida de lo posible en todo momento el flujo que atraviese los vertederos deberá ser semisumergido. De igual manera, que en el caso de la escala de artesa sucesivas, para conseguir esta situación se deben diseñar las escalas de tal forma que la altura de desnivel entre dos estanques sucesivos deberá ser similar o inferior a ΔH, siendo este valor la altura de vertido libre, si bien esta condición implica pendientes pequeñas, lo cual requiere longitudes grandes entre los pasos. En la figura 6.23, se muestra un esquema del perfil longitudinal de un paso de rápidos y remansos en el que se puede apreciar la altura ΔH de la caída de vertido y la altura total de vertido “h”, una parte de ella ΔH - h se produce de manera sumergida permitiendo el paso a los peces que prefieren optar por remontar la escala en esta parte sumergida del vertido. Como se ha comentado anteriormente, el vertedero podría llegar hasta el mismo lecho a semejanza del vertedero de hendidura vertical.

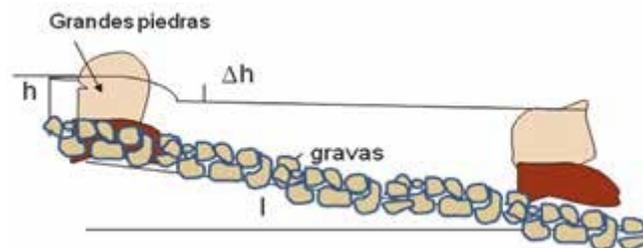


Figura 6.23. Esquema de perfil longitudinal en escalas de rápidos y remansos. h es la altura de vertido.

Δh es la altura del desnivel entre estanques (m), que coincide con la altura de vertido libre.

El caudal que atraviesa el vertedero rectangular semisumergido, se puede calcular por medio de la fórmula de Larinier (2002) para escalas de artesas sucesivas con vertedero lateral semisumergido expuesta en el capítulo de las escalas de artesas sucesivas.

Además de esta fórmula, el caudal de este vertedero también se puede calcular por medio de la ecuación de Poleni (FAO-DVWK, 2002). Este método es el más recomendado para este tipo de pasos.

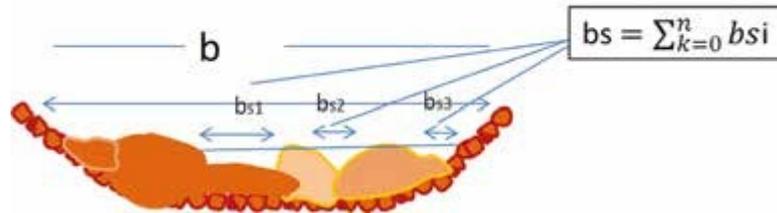


Figura 6.24. Esquema de sección transversal con las anchuras de los vertederos.

La ecuación de Polleni es:

$$Q = \frac{2}{3} \mu \sigma \sum b_s * \sqrt{2g} * h_{head}^{3/2}$$

Dónde:

$\sum b_s$ es la suma de las anchuras de los huecos (equivalente a la anchura del vertedero). en esta ecuación todas las secciones deben estar a la misma altura.

σ , es el factor de sumergimiento del flujo y se calcula por el medio del gráfico de Polleni expuesto en el gráfico de la figura 6.25.

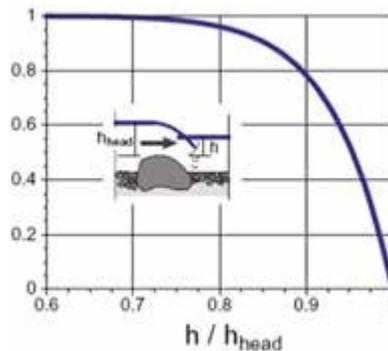


Figura 6.25. Gráfico de Polleni.

Como se puede observar en el gráfico de Polleni, este coeficiente depende del grado de sumergencia, es decir del cociente h/h_m , donde h es la altura del flujo aguas abajo del vertedero y h_{head} es la altura total de vertido. En el caso de que el cociente de las alturas sea 0,7 o inferior el coeficiente toma el valor de la unidad.

El flujo debe de ser calculado sección por sección teniendo cuidado en la determinación del valor del coeficiente de vertedero . Este coeficiente depende de que la cresta sea aguda o ancha, dependiendo del tipo de roca empleado para cada caso:

0,5 o 0,6 para vertederos de cresta ancha, de rocas de borde afilado, y con aristas, tomando el valor de 0,6 a 0,8 para piedras redondeadas. Como se puede observar el coeficiente varía mucho dependiendo de cómo sea el borde de las piedras que forman el vertedero.

Es recomendable que la anchura del canal sea superior a 2,5 veces la anchura de la suma de los vertederos verticales.

Cuando el agua vierte por toda la anchura, el tamaño y profundidad de los estanques formados entre barrera y barrera debe garantizar que solo se produzcan pequeñas turbulencias en el flujo y también que el pez migrador pueda encontrar refugio y sea capaz de recuperarse de los esfuerzos natatorios.

Potencia disipada.

Como en cualquier otra escala, se debe cumplir el requisito de que la energía hidráulica disipada no puede ser superior a un valor determinado.

El valor de la potencia volumétrica disipada máxima admisible se calcula por la fórmula ecuación:

$$E = \frac{\rho g \Delta h Q}{b h_w I_w}$$

Dónde:

h_m , es el calado dentro del estanque (m).

b , es la anchura del estanque (m).

A , es la sección transversal del estanque (m²).

I_w , es la longitud total del canal menos las anchuras de las piedras (m).

Dh , es el desnivel del salto en caída libre.

$$I_w = I - d_s.$$

La energía máxima admitida que se disipe en un estanque varía según las especies entre los valores de 150 y 200 W/m³:

El proceso del cálculo se resume en los siguientes pasos:

1. Cálculo del desnivel a salvar.
2. Elección del desnivel entre estanques que depende de la especie y su capacidad de nado y de salto.
3. Número de estanques, cociente entre la altura total y el desnivel entre estanques menos uno.

4. Elección del tamaño de las piedras.
5. Profundidad media del estanque.
6. Diseño de los vertederos.
7. Caudales máximos y mínimos.
8. Calculo de las velocidades en los vertederos.
9. Potencia disipada.

6.4.1. Rampa de rápidos y remansos con parte de la sección longitudinal de perfil trapezoidal.

Una variedad de la rampa de rápidos y remansos ideada por Fernández *et al* (2011) es aquella en la que se ha modificado la sección longitudinal de tal forma que la parte superior de la misma, aproximadamente a la mitad de la longitud total, presenta sección trapezoidal, tal y como se muestra la figura 6.26.

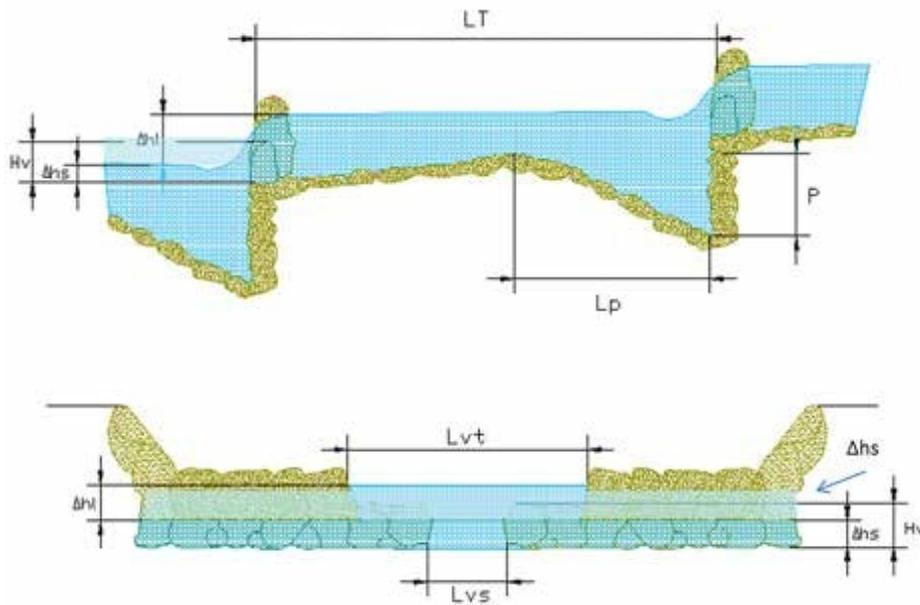


Figura 6.26. Esquema de rápidos y remansos con perfil longitudinal trapezoidal (fuente: Fernández *et al.*)

Los conceptos de cada una de los parámetros de las figuras se explican en la tabla 6.1.

En la parte superior de la figura 6.26, se aprecia que el perfil de la sección longitudinal no es horizontal en su totalidad sino que en la mitad anterior se ha preferido hacerlo inclinado. Con esta disposición se consigue formar una poza con mayor profundidad que el resto del estanque, para que el pez disponga de mayor profundidad en el sitio donde tiene que hacer el mayor esfuerzo para poder ascender al estanque superior. Además este perfil presenta como ventaja adicional que es más fácil disipar la energía porque el chorro de agua vertiente cae en esta sección y al ser más profunda se amortigua mejor.

Además de esta variación, en este modelo de paso, el umbral vertedero que comunica dos estanques sucesivos, es decir la zona del rápido, se diseña con un vertedero compuesto a dos alturas (ver figura 6.27).

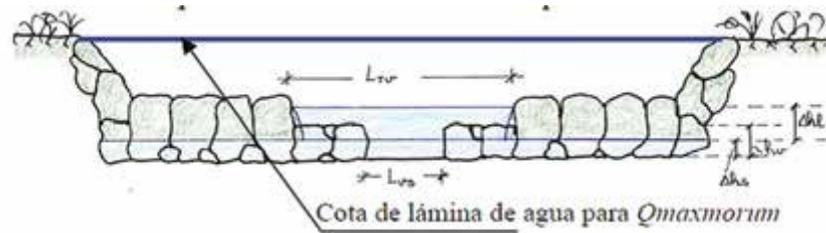


Figura 6.27. Sección transversal del vertedero. (Fuente Fernández J. A. et al).

El vertedero inferior tiene una anchura de L_{vs} y en la parte superior el vertedero tiene una anchura L_{rv} de mayor longitud que el anterior. Con esta disposición, se consigue que con caudales mínimos en el vertedero pequeño se mantenga una altura mínima de vertido suficiente, para que el pez pueda pasar sin sufrir posibles rozaduras. Además también se consigue que parte del vertido se produzca sumergido (puesto que para caudales pequeños se sigue cumpliendo la condición de vertido semisumegido, es decir que la altura de vertido es superior a la diferencia de cotas entre estanques), permitiendo así que los peces que carecen de capacidad de salto puedan ascender por esta zona al estanque superior. A medida que el caudal va aumentando, una parte del mismo pasará por el vertedero superior, o incluso por el resto del umbral, y al ser de gran longitud no provoca un excesivo desnivel entre los estanques.

Otra particularidad de esta variedad de rampa es construirla con gran anchura, tal y como se aprecia en la figura 6.27. Con esta disposición se consigue que en los eventos de grandes caudales, gran parte del caudal o su totalidad vierta por toda la anchura en la sección del umbral. De esta manera, el flujo descenderá encauzado produciendo menos daños de los que se producirían si no lo hiciera de esta manera.

Es muy importante que parte del vertido sea sumergido (“ventana sumergida”), para conseguir que con cualquier caudal parte del mismo vierta en forma sumergida es imprescindible que la diferencia de cotas entre dos vertederos consecutivos sea menor a la diferencia de cotas de las láminas de agua entre dos estanques sucesivos.

Los parámetros de la escala se pueden apreciar en el esquema de las figuras 6.26 y 6.27 (Fernández J. A. et al 2011).

Tabla 6.1. Parámetros de la escala rampa de rápidos y remansos con perfil longitudinal trapezoidal.

SIMBOLO	DESCRIPCIÓN.	CARACTERÍSTICAS
Dhl	Diferencia de cotas entre láminas de agua de estanques sucesivos	Depende de cada especie y en principio toma valores similares al desnivel entre estanques.
Dhs	Altura de la lámina de agua en el paso sumergido	Suficiente para que permita el paso a los peces sin capacidad de salto (Dhs > 0,15 m)
Ltv	Anchura total del vertedero.	Se puede considerar como mínimo 0,60 m.
Lvs	Anchura del vertedero sumergido	Mayor a 0,40 m.
Dhv	Diferencia de cotas entre dos vertederos sucesivos	Dhv= Dhl (para caudales mínimos)
hv	Altura del umbral del vertedero que define el paso sumergido	Se debe cumplir: Dhs < hv < Dhl + Dhs (*)
LT	Longitud del tramo entre estanques	Disipación de energía dentro de los límites. (LT > 2,5 m)
P	Profundidad de la poza	Suficiente para que los peces puedan propulsarse y ascender
Lp	Longitud de la poza	Lp > (0,15 m - Dhs) / I siendo I = Dhl / LT

(*) Con la condición Dhs < Dhl + Dhs se consigue que siempre se produzca que una parte del vertido sea sumergida.

De igual manera, que en el resto de escalas y de pasos el número de estanques viene definido por la división entre la altura total del desnivel de la barrera entre las láminas de agua superior e inferior en situación de caudales mínimos, dividido por la diferencia de cotas entre dos estanques sucesivos, eligiendo este valor en función de la especie objetivo.

Cálculo del caudal circulante.

El caudal que atraviesa el paso es la suma de los caudales que atraviesan el vertedero superior y el vertedero inferior:

$$Q_t = Q_s + Q_i$$

Según el caudal circulante se pueden producir distintas situaciones:

- Si el caudal es pequeño entonces solo pasará flujo por el vertedero inferior, que según las condiciones expuestas casi siempre será semisumergido (solo para caudales muy pequeños se producirá el caudal con vertido exclusivamente libre y en este caso se aplicará la fórmula de vertido libre). Por lo tanto, se aplicará la fórmula del caudal en vertederos semisumergidos expuesta en el capítulo de escalas de artesas sucesivas (Larinier 2002).

$$Q = \left(1 - \left(\frac{\Delta h_s}{\Delta h_l + \Delta h_s} \right)^{1,5} \right)^{0,385} C_3 * b * \sqrt{2g} * (\Delta h_l + \Delta h_s)^{1,5}$$

Esta expresión es válida para intervalos de sumergencia comprendidos:

$$0,5 < \frac{\Delta h_s}{\Delta h_l + \Delta h_s} < 0,9$$

Dónde:

C_3 , es el coeficiente del vertedero que varía desde 0,38 para vertederos de cresta ancha hasta 0,50 cuando el perfil produce una lámina sin adherencia. El valor más normal es 0,40.
 g , es la gravedad (9,81 m/s²).

b , es la anchura del vertedero (m). Solamente se tendrá en cuenta la correspondiente a la longitud del vertedero superior una vez descontada la longitud del vertedero inferior.

$\Delta h_l + \Delta h_s$, es la altura total de vertido.

Δh_l , es la altura de vertido libre.

Como se vio anteriormente para el caso de las artesas sucesivas, el coeficiente C_3 toma valores entre 0,33 y 0,50 dependiendo del espesor de la pared y del biselado redondeado de la cresta. Los valores más frecuentes son cercanos a 0,40.

Al aumentar el caudal, el nivel del agua aumentará. Por lo tanto el flujo seguirá vertiendo por el vertedero inferior (siempre de forma semisumergida) y empezará a verter agua por el vertedero superior. En este vertedero, en principio el vertido se realizará como vertido libre y por eso se aplicará la fórmula:

$$Q = C_d * b * \sqrt{2g} * \Delta h_l^{1,5}$$

Dónde:

Q es el caudal que atraviesa el vertedero (m³/s).

C_d , es el coeficiente del vertedero que varía entre 0,38 para vertederos de cresta ancha hasta 0,5, cuando el perfil produce una lámina sin adherencia, el valor más normal es 0,4.

g , es la gravedad (9,81 m/s²).

b , es la anchura del vertedero (m) solamente se tendrá en cuenta la correspondiente a la longitud del vertedero superior una vez descontada la longitud del vertedero inferior.

Δh_l , es la altura de vertido (m).

A medida que aumenta el caudal también el vertido que se produce por el vertedero superior será semisumergido. Por lo tanto, a partir de este momento la fórmula que se aplicará será la del vertedero semisumergido anteriormente explicada.

Para conocer los desniveles entre las láminas de agua entre estanques, para cualquier caudal se puede aplicar el método de cálculo expuesto en capítulo de estanques sucesivos y escalas de hendidas.

6.5. “BYPASS” (RÍOS ARTIFICIALES).

Los “bypass” son pasos construidos en una derivación independiente del curso del río.

En España los “bypass” son frecuentemente llamados ríos artificiales ó canales naturalizados. Por esta ramificación se deriva parte del caudal de manera controlada para alimentar el río artificial. Al ser una construcción artificial presenta la ventaja de que se puede diseñar de la forma más apropiada (dentro de las limitaciones topográficas o de otro tipo que pueda existir en el lugar de la construcción).

Los bypass deben cumplir algunos requisitos:

- La entrada de los peces (el final del paso) debe situarse en la zona de bloqueo de los migradores, justo al pie del obstáculo como se ha visto en capítulos anteriores (esta condición es genérica para todos los pasos y escalas).

- En ríos pequeños, siempre que sea posible, se puede destinar la mayor parte del caudal del río hacia la escala. En general la entrada a la escala debe ser tal que permita el rango de caudales $Q_{min} < Q < Q_{max}$.

- La aplicación de este tipo de obra se recomienda para barreras con pendiente débil y escasa altura.

- El nivel del agua por encima de la barrera debe variar muy poco, porque de no ser así los caudales entrantes en el río artificial variarían mucho pudiéndose producir en situaciones de crecidas problemas de desbordamientos, inestabilidad y procesos de erosión.

- Debido a que normalmente la mayor parte del caudal se dirigirá por el curso principal el “efecto llamada o atracción” se debe producir en todo momento.. Si no se tiene en cuenta el efecto llamada, los peces se desorientaran.

En el diseño del río artificial se debe intentar reproducir el aspecto, sustrato y las condiciones naturales de la pendiente, utilizando para ello materiales similares a los del río; es decir se debe integrar el dispositivo en el paisaje de la zona.

Según la clasificación expuesta en el principio de este capítulo los pasos naturalizados se clasificaban según la forma en que se produce la pérdida la energía, también esta clasificación se puede aplicar a los “by pass”.

1. Rampas de piedras. La pérdida de energía se realiza principalmente por medio de la gran rugosidad originada principalmente por piedras de grandes dimensiones.

2. Rampas de rápidos y remansos. En este caso la energía se pierde a través de saltos de agua producidos por los desniveles entre los umbrales que delimitan los estanques escalones.

El diseño y cálculo de los pasos en ríos artificiales es el mismo que se ha descrito para el caso de las otras rampas. Por lo tanto todo lo anteriormente explicado para las rampas es aplicable a los ríos artificiales. Hidráulicamente funcionan igual, la única diferencia es que en el caso de las rampas de piedras el paso se realiza en toda o parte de la sección del río y por el contrario en el caso de los ríos artificiales se realiza en una canalización artificial fuera del curso de agua.

Cuando los caudales de los ríos sean grandes, siempre que sea posible, suele ser más frecuente optar por la construcción de los pasos naturalizados se construyan en “by pass” puesto que los caudales de los ríos normalmente son excesivos para poder construir una rampa en todo el río, además con la construcción del by pass se obtiene la ventaja de poder realizar la rampa con mayor libertad y eficacia.

En todos los casos se debe de prever la estabilización de la rampa. Esta estabilidad se consigue por medio de la construcción de un dissipador de energía. El tipo de dissipador más utilizado es el de una poza al final de la rampa que cumpla las condiciones:

- La longitud de la poza debe ser mayor a 3 m para rampas con poca pendiente ó 5 m cuando la pendiente es mayor.

- La profundidad de la poza debe estar comprendida entre 1/2 a 1/3 de la altura de la rampa.

6.6. BIBLIOGRAFÍA.

FAO-DVWK. 2002. *Fish passes, dimensions and monitoring*. Published FAO and DVWK.

FERNÁNDEZ J.A., MARTINEZ C. GONZALEZ G. (2011). Cauces artificiales para la transitabilidad de la Ictiofauna: Criterios hidráulicos de dimensionado. Actas de la II reunión sobre Hidrología Forestal. Ed. S. E.C.F. N° 32. Madrid.

LARINIER M. 2002. Pool fishways, pre-barrages and natural bypass channels. *Bull. Fr. Pêche Piscic. 364 suppl.* pp 54-82.

LEUNG, Y.W. (1994) Spawning channels in Pacific Canada. 1994 River Front – Fish habitat and stream improvement forum. Tokyo.

ROUVE et al. 1987. Hydraulische Probleme beim naturnahen Wasserbau- DFG-Forschungsbericht, (VCH Verlagsgesellschaft).

SCHAUBERGER, W. (1975): Die räumliche Krümmung von Gefällestufen und Sturbettensed schwellen.- Wasser und Boden, Heft 10.

SCHEUERLEIN, H. 1968. Der Raugherinneabflu?.- Berich der versuchsanstalt für Wasserbau der TU München 14.

7 . ESCALAS DE RALENTIZADORES (ESCALA DENIL).

La primera escala de ralentizadores, también llamada escala de deflectores, fue desarrollado en Bélgica por el ingeniero Denil en el año 1909, por este motivo a las escalas de ralentizadores también se les denominan escalas Denil. La escala Denil propiamente dicha es un tipo concreto de escala de ralentizadores, y actualmente es el tipo más utilizada y estudiada. La escala que desarrolló el ingeniero Denil se construyó para conseguir que el salmón pudiera remontar una presa en Angleur en el río Ourthe, Bélgica (Denil 1909). La propiedad que caracteriza a las escalas de ralentizadores consiste en la reducción de la velocidad del flujo por medio del freno que producen los ralentizadores situados en el suelo y en las paredes del canal. Esta escala tiene una pendiente relativamente grande en comparación con el resto de escalas.

Los ralentizadores pueden tener secciones muy complejas, y producen una corriente secundaria helicoidal que a su vez provocan una importante disipación de la energía en el flujo.

Uno de los primeros modelos que se han desarrollado para este tipo de escala es la escala Camaré (técnico francés de principio del siglo xx), en esta escala se disminuye la velocidad del flujo de agua descendente por medio del fenómeno del freno hidráulico. El freno se conseguía por medio de unos chorros ascendentes surgidos de unos orificios que comunicaban con la conducción inferior a la vena libre. Posteriormente se aplicó con asiduidad la escala Mac-Donald, también basada en el freno hidráulico. En esta escala, el caudal forzado ascendente es de mayor cuantía, se consigue forzando una parte del caudal transcurra por el “tramo ascendente”, provocando así un freno a la velocidad de la capa superior del flujo por donde asciende el pez.

La escala Mac-Donald se ha utilizado en Estados Unidos (Guallart y Ellias E., 1913). Con los sistemas basados en el freno hidráulico se permiten pendientes del 30 %. Aunque estas escalas se llegaron a construir, actualmente prácticamente están desplazadas por el modelo Denil, o otras modelos de deflectores, mayormente estudiados y aplicados.

Posteriormente a los ensayos y estudios realizados por Denil (Denil, 1936-1938), otros autores han continuado las investigaciones con el objetivo de simplificar el tamaño original de los deflectores que origina el freno en la corriente descendente, sin perder la eficacia hidráulica: Mcleod A.M. y Nemenyi P.(1940) en USA, White y Nemenyi P. (1942) en Gran Bretaña , García J. M.(1949) en España y más recientemente Larinier (1978); Larinier y Miralles (1981) en Francia, Rajaratnam y Katapodis (1984, 1991) en Canada, entre otros.

7. 1. ESCALA DE FRENO HIDRÁULICO DE GARCÍA NAJERA.

En España, el Dr. Ingeniero de Montes José María García Nájera (García J.M., 1949) ideó una escala de freno hidráulico que se va a describir resumidamente. Básicamente esta escala consistía en una variación de la escala Mac-Donald. Según se puede apreciar en la figura 7.1, el freno hidráulico se producía por la existencia de unas corrientes que entraban en una conducción inferior (A) al flujo en superficie de descenso para después resurgir a la superficie a lo largo de unas rejillas (a, b, c, ...) distribuidas por toda la pendiente de la escala, cuando la rejilla está más abajo, la presión es mayor y así el freno que produce es también mayor, con este método de freno hidráulico teóricamente sería posible realizar escalas con una gran pendiente.

El funcionamiento hidráulico de la escala fué desarrollado por el autor y teóricamente funcionaría en mayor o menor grado de acuerdo a las fórmulas y resultados expuestos en la publicación citada. Aunque no se ha construido ninguna escala de este tipo y por lo tanto no se ha podido constatar su funcionamiento real, es posible aventurar que tal comportamiento hidráulico sería válido y bastante similar al teórico (habría que calibrar los coeficientes de gasto). Por todo ello se puede asegurar con bastante aproximación que el flujo hidráulico generará una velocidad de descenso admisible para los peces objeto de este tipo de escalas. Tal circunstancia aporta la ventaja que teóricamente tiene esta escala es que se podría aplicar con pendientes muy altas, lo cual conlleva menor gasto y también menor espacio.

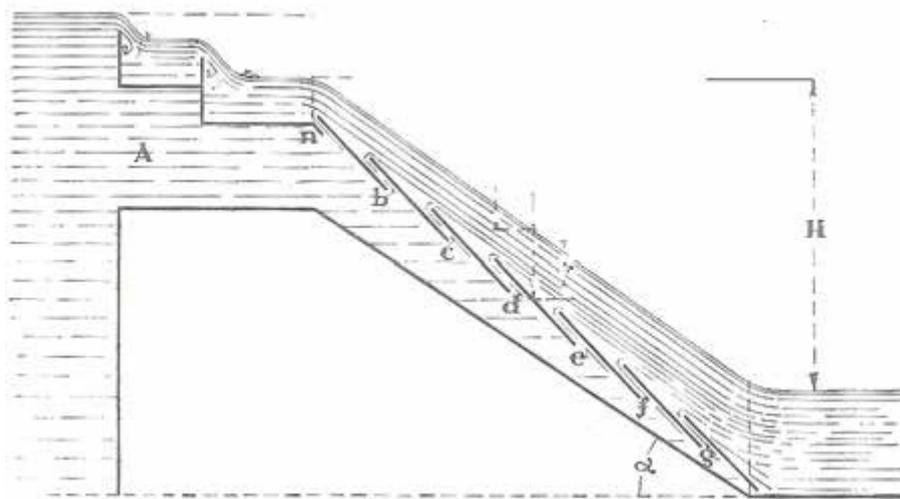


Figura 7.1. Escala de J. M. García Nájera.

Es necesario recordar que la eficacia de la escala no solo se consigue cuando se produce una velocidad de flujo admisible por los peces, además deberá cumplir el resto de requisitos que garantizan la eficacia de la escala, tales como: el efecto atracción, posibilidad de mantenimiento, etc. Justamente en esta escala, según el modelo ideado por el autor podría producirse fácilmente la obstrucción por detritus u objetos flotantes debido a la configuración de la escala y de los deflectores.

7. 2. CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES DE APLICACIÓN DE LAS ESCALAS DE RALENTIZADORES.

Las escalas de ralentizadores consisten básicamente en un cajón longitudinal de sección rectangular en el que se insertan ralentizadores de diferentes formas y disposiciones para que se produzca un freno al flujo descendente.

El elemento principal y caracterizador de esta escala es el ralentizador.

Los ralentizadores se pueden clasificar según su inserción en el canal de la escala según los siguientes clases (Larinier 2002).

- *Ralentizadores fijados solo en el fondo del canal.* Con este método se pueden construir escalas de peces de grandes anchuras por medio de la unión de ralentizadores. Este tipo de escalas es muy versátil, con ello se consigue que la escala pueda tener un gran rango de caudales de funcionamiento. Por el contrario, tiene la desventaja de que con esta disposición la velocidad de bajada del agua aumenta notablemente, para variaciones pequeñas de nivel en la parte de aguas arriba.

- *Ralentizadores fijados en el fondo y en las caras de las paredes del canal.* Está disposición presenta la ventaja de permitir grandes variaciones del nivel aguas arriba de la barrera. El inconveniente que presenta es que el tamaño del migrador está limitado por las dimensiones del ancho de los ralentizadores y del canal. Además también presenta la limitación de que el caudal de bajada no puede exceder de varios cientos de litros por segundo.

- *Ralentizadores situados solo en las paredes del canal.* (Larinier y Miralles, 1981). Esta disposición tiene la ventaja de soportar mayores variaciones del nivel aguas arriba de la barrera, esta clase de ralentizadores es también muy eficaz. Sin embargo, la mayor desventaja consiste en la facilidad de bloqueo por los arrastres que transportan las aguas, como por ejemplo ramas, y por lo tanto requiere de excesivos mantenimientos. Este inconveniente se puede solucionar por la construcción de una rejilla que evite la entrada de los arrastres.

Las características de los ralentizadores están dadas en forma adimensional. Todas las dimensiones están referenciadas a una o dos dimensiones (el ancho del canal y la altura del ralentizador). No se deben cambiar las características geométricas del ralentizador, porque si se cambia la forma o espaciamiento del ralentizador, entonces se produciría una pérdida de eficacia.

Las condiciones hidráulicas y biológicas son específicas para unas dimensiones determinadas del ralentizador.

Funcionamiento Hidráulico eficaz.

Caudal mínimo. Para que se produzcan las corrientes helicoidales que actúan como freno al flujo principal de descenso, es necesario que exista un caudal mínimo. Los caudales inferiores a este umbral no producirán estas corrientes e inhabilitarán la eficacia de la escala, en esta situación la escala funcionaría como una escala de pequeñas artesas (en algunos casos esta situación podría ser válida con peces con poca capacidad de salto).

Caudal máximo. Por encima de los valores máximos de los caudales admisibles, dependiendo de la pendiente del canal y del tipo y tamaño de los ralentizadores se pueden comenzar a producir olas que barren la escala desde la parte superior a la inferior. Con estos grandes caudales las corrientes helicoidales solo se forman ocasionalmente, progresivamente el flujo se convierte en supercrítico y los ralentizadores no realizan su función de disipación de la energía.

Funcionamiento biológico eficaz.

La escala de ralentizadores es adecuada a ciertas especies y tamaños de peces. El rango de variación de los parámetros hidráulicos de una especie en concreto es decir la pendiente del canal, las dimensiones del ralentizador, el caudal, se puede saber solo por medio de los datos y conocimientos adquiridos por medio de la monitorización y ensayos en la escala.

Mientras que el rango operativo de las condiciones hidráulicas de las escalas se puede conocer rápida y fácilmente por medio de estudios de modelos hidráulicos realizados en laboratorios, las condiciones biológicas necesitan de una evaluación más prolongada en el tiempo. Esta evaluación se puede realizar por medio de monitorización, o por medio de trampas situadas en la parte superior de la escala, tanto para diferentes condiciones de flujo: caudales, longitud de escala, altura, pendiente del canal; como también de temperatura.

Se debe tener en cuenta que consecuencias se producen con las siguientes modificaciones (Larinier 2002):

- *Un incremento del tamaño del ralentizador.* Si la pendiente de canal permanece constante, cuando se incrementa el tamaño del ralentizador resulta un incremento en el tamaño de las corrientes helicoidales. Si el tamaño de estos remolinos se hace demasiado grande comparado con el tamaño del pez, entonces pueden producirse efectos en la eficacia de la escala. El pez deberá orientarse a sí mismo en relación con la componente local de la velocidad.

- *Reducción del tamaño del ralentizador.* La reducción del tamaño del ralentizador (con respecto al resto de parámetros de la escala) produce desventajas, porque al reducir el tamaño, también se reduce el rango de variación admisible de aplicación de la escala.

- *Ralentizadores pequeños.* Siempre y cuando se mantengan dentro de los límites de funcionamiento hidráulico se deben usar ralentizadores pequeños, esto maximizará el tamaño de los peces que puedan utilizar el paso.

- *Disminución de la anchura del canal.* La disminución de la anchura del canal puede causar un aumento de la velocidad en el primer ralentizador de la parte superior de la escala.

El nivel del agua, al pie de la escala, es decir por donde entra el pez, debe estar lo suficientemente sumergido para prevenir una aceleración local en el flujo o un salto, lo cual provoca una disminución de la eficacia de la escala.

La entrada óptima del pez en la escala debe ser por natación, no por salto, porque si la realizase de esta última forma podría dañarse. El ralentizador más bajo debe estar sumergido en el agua, incluso en los periodos de mínimos caudales, con al menos la misma profundidad que la que existe en el ralentizador más elevado.

7. 3. LONGITUD DE NADO Y ESTANQUES DE DESCANSO.

En las escalas de ralentizadores dada la configuración de la escala el pez pasa de uno a otro ralentizador a través de continuados esfuerzos, sin una zona de descanso. Cuando la altura total del salto (y consecuentemente su longitud) es demasiado grande, entonces el pez tendrá que realizar un gran esfuerzo durante un periodo de tiempo que puede ser excesivo para su resistencia. En los casos que se produzcan estas condiciones, se deberán construir algunos estanques de descanso.

Normalmente los estanques de descanso se construyen cada 1,8 o 2,5 m de salto de altura para la trucha y el salmón respectivamente y la longitud de nado estará comprendida entre 10 y 12 metros entre estanque y estanque. Si no se respetasen estos valores umbrales, la escala solo sería remontada por los ejemplares más grandes.

Para truchas comunes de pequeño tamaño o barbos el desnivel máximo que debe tener la escala entre estanque de descanso debe ser de 1,2 o 1,5 m, y la longitud máxima no excede de 6 u 8 m.

El nado que tiene que hacer el pez dentro de la escala será recto, por este motivo el canal que forma la escala debe ser siempre recto, si es necesario cambiar de dirección, está tendrá que hacerse en el estanque de descanso. Si el cambio de dirección es de ángulo grande entonces el estanque de descanso será de mayores dimensiones con la finalidad de que la fuerza que genera el chorro al cambiar de dirección, como también parte de la energía propia del flujo por el descenso del mismo, sea absorbida por la masa de agua existente en el estanque. Por lo tanto en estos casos los estanques se construirán con dimensiones superiores a las convencionales.

Longitud mínima del estanque. La longitud mínima para un estanque de descanso es $10d$, siendo d la dimensión más pequeña del chorro entrante en el estanque, esta dimensión puede

ser bien la anchura del ralentizador o la profundidad del agua sobre el bafle. El mínimo de profundidad puede ser 0,5 m. También es necesario tener en cuenta el criterio del volumen del estanque para la disipación de la energía usado para los escalas de estanque sucesivos.

7. 4. USO Y LIMITACIONES DE LAS ESCALAS DE RALENTIZADORES.

El flujo en la escalas de ralentizadores está caracterizado por su alta velocidad, turbulencia y aireación. Este tipo de paso es usado para especies diádromos tales como el salmón, el reo, la lamprea marina (remonta este tipo de escala fácilmente) y algunas especies potamodromos como la trucha y el barbo. El tamaño medio de los peces que atraviesan esta escala es aproximadamente 30 cm.

También es posible utilizar esta escala para pequeñas truchas, siempre y cuando el tamaño de los ralentizadores y la longitud de la escala se reduzcan significativamente.

Normalmente, los peces pequeños no poseen suficiente resistencia para remontar este tipo de escalas. El esfuerzo que necesitan realizar en las escalas de ralentizadores, con las dimensiones normales, requiere de ellos una velocidad que está en el rango de las velocidades de explosión, que solo pueden ser mantenidas durante pocos segundos; consecuentemente la longitud de nado se tendría que limitar a pocos metros, todo ello condiciona a que se hace impracticable el uso de este tipo de paso para peces pequeños.

Las características hidráulicas de la escala (velocidad, tamaño o corrientes helicoidales), podrían adaptarse a los peces más pequeños para que las velocidades estén dentro del rango de las “velocidades sostenidas” (sustained speeds) que el pez puede mantener durante varias decenas de segundos. Sin embargo esto conllevaría las siguientes desventajas: el funcionamiento del flujo está muy limitado (tan solo decenas de litros por segundo), la atracción está limitada, se incrementaría la obturación e inhabilitaría la posibilidad de una variación del nivel aguas arriba, por todo esto, en estos casos es mejor optar por otro tipo de escala.

Si bien la escala de ralentizadores no es la recomendable para los peces pequeños, sí que se ha comprobado que pasan peces pequeños en algunas circunstancias. Concretamente, se ha observado como los peces usan los ralentizadores como “miniestanques” de paso, descansado en el espacio comprendido entre ralentizador y ralentizador cuando el nivel de aguas es bastante bajo e insuficiente para crear corrientes helicoidales. En otros casos donde los pasos funcionaban normalmente, se ha observado que los peces utilizan las zonas entre los ralentizadores donde existe una relativa calma para que los migradores puedan ascender salto a salto a través de la escala (Schawalme y Mckay, 1985).

7. 5. ESCALA DE RALENTIZADORES PLANOS O ESCALA DENIL.

La escala Denil (nombre del ingeniero que la diseño) es la escala más comúnmente utilizada dentro del tipo de escalas de ralentizadores. Su principal característica es la simplicidad de construcción de los ralentizadores (en muchas publicaciones se le llama deflector).

Esta escala consiste en un canal rectangular en el que se añaden ralentizadores planos insertos en el fondo y en las paredes laterales con la finalidad de forzar contra corrientes en mayor o menor grado ascendentes o helicoidales consiguiendo frenar la velocidad de bajada del flujo, la forma de los ralentizadores puede variar según los subtipos de escalas existentes en función de la forma y tamaños de los ralentizadores, si bien el tipo de deflector más utilizado es el que se muestra la figura 7.2.

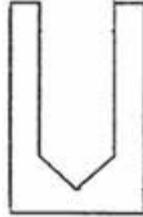


Figura 7.2. Tipo de ralentizador plano estándar para escala Denil.

Como se puede observar el ralentizador es plano y de forma rectangular en el que en la zona central se ha vaciado en forma cóncava tal y como se aprecia en la figura anterior.

Estos ralentizadores son insertados regularmente en el canal con la inclinación adecuada para que generen el freno por medio de las contracorrientes (ver figura 7.3.).

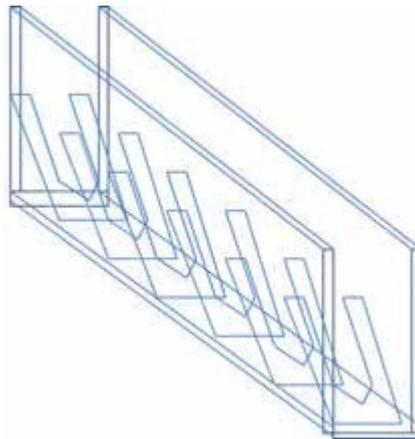


Figura 7.3. Canal con ralentizadores planos.

Por lo tanto las escala Denil, es una escala consistente en un canal rectilíneo de fuerte pendiente (10 % hasta 29 %) con ralentizadores (también llamados deflectores) que frenan el flujo principal, consiguiendo velocidades aptas para que los peces puedan remontarlo

Los ralentizadores son planos y colocados con un ángulo de 45° respecto de la solera del canal. El ancho "L" puede variar entre 0,60 y 1,00 m y la pendiente del canal entre 0,12 y 0,20 (12 % al 20 %).

El material de construcción normalmente es el acero. La anchura del deflector varía entre 8 o 10 mm. También se pueden utilizar madera u hormigón, en estos casos la anchura máxima del ralentizador es $L/20$. Donde L es el ancho del canal.

Este tipo de escala ha sido ampliamente aplicada en Europa (Francia, Gran Bretaña, Irlanda y Suecia), para el salmón atlántico y la trucha de mar. En la costa este de USA se ha utilizado para el salmón del Atlántico y la alosa.

En la figuras 7.4 y 7.5, se muestran las características geométricas de la escala Denil.

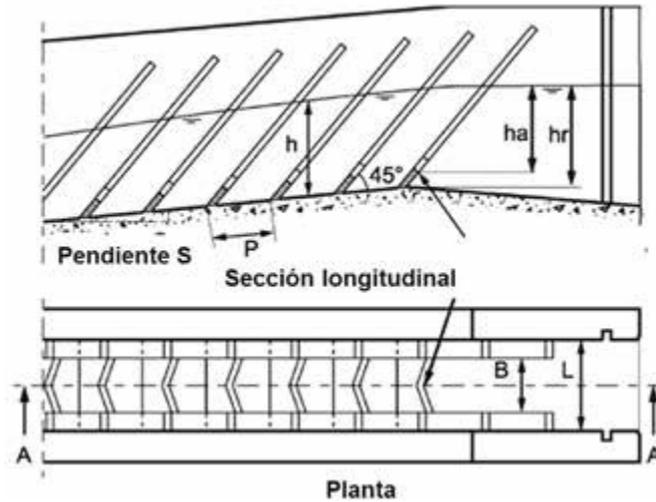


Figura 7.4. Vistas de la escala Denil con las dimensiones características. (Original de Larinier, 2002).

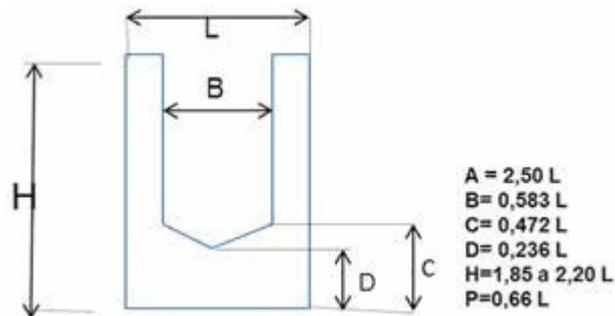


Figura 7.5. Dimensiones características del ralentizador plano de la escala Denil.

El método de cálculo que se expondrá a continuación procede de Larinier (2002). Se ha elegido éste entre varias opciones por ser el que ofrece mayor número de datos, lo cuales permiten determinar mejor los parámetros que definen el flujo descendente por la escala.

En la figuras 7.6, 7.7, y 7.8, se muestran los ábacos para distintas pendientes:

1º) “ h_a/L ” es el cociente entre la altura del calado de agua en el primer ralentizador “ h_a ”, tomando como base el vértice del ralentizador y la anchura interior del canal “ L ” (ver figura 7.4) y el caudal y la velocidad para las pendientes de 10 %, 15 % y 20 %.

2º) “ h/L ” es el cociente entre h , el tirante (calado) dentro del canal y la anchura del canal “ L ”, y el caudal y la velocidad para las pendientes de 10 %, 15 % y 20 %.

Siendo Q^* y V^* el caudal y velocidad unitarios:

$$Q^* = \frac{Q}{\sqrt{g \cdot L^{2.5}}} ; \quad V^* = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}}$$

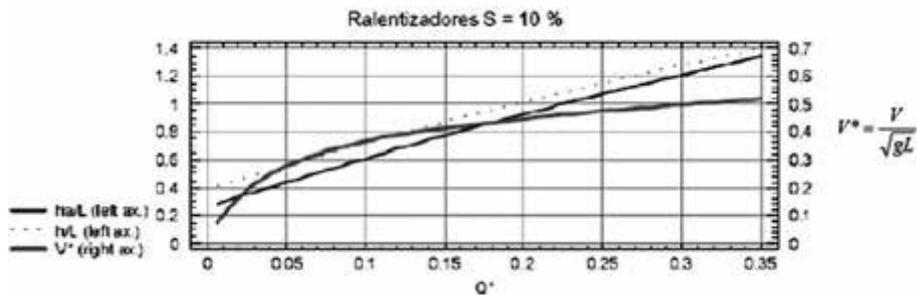


Figura 7.6. Gráfico de los parámetros hidráulicos para pendientes de 10 %(Original de Larinier, 2002)

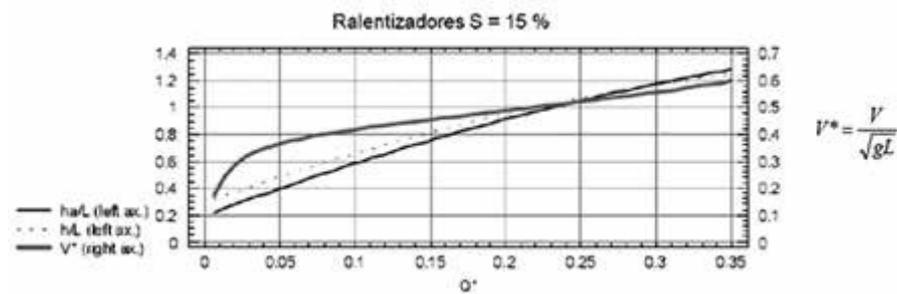


Figura 7.7. Gráfico de los parámetros hidráulicos para pendientes de 15 %(Original de Larinier, 2002).

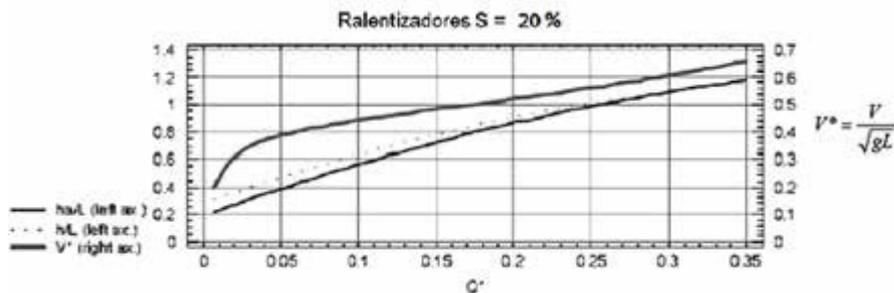


Figura 7.8. Gráfico de los parámetros hidráulicos para pendientes de 20 %(Original de Larinier, 2002)

Como se ha comentado, “ h_a ” es el valor de la profundidad del agua (m) en la parte superior definida desde el vértice inferior de la escotadura del ralentizador (el punto inferior), este parámetro no debe ser confundido con el calado total en la parte superior “ h_r ” (m) el cual corresponde a la profundidad de la superficie del agua desde el fondo del canal inmediatamente antes del primer ralentizador en la parte superior de la escala.

Entre las dos medidas existe la siguiente relación:

$$h_r = h_a + 0,236 L \operatorname{sen} (45^\circ + \operatorname{arccot} S)$$

Donde la pendiente del canal varía desde 10 % hasta el 20 %, $S = 0,1 \dots 0,2$.
 L , es la anchura del ralentizador (m).

Larinier (2002) realiza las siguientes recomendaciones.

Grandes salmónidos:

Pendiente máxima 20 %.

Anchura del canal “ L ” entre: 0,8 y 1,0 m.

Cuando se opta por grandes dimensiones del ralentizador existe el inconveniente de que se producirán grandes velocidades, en este caso se debe construir la escala con pendientes más pequeñas para conseguir velocidades aceptables. Además de este inconveniente también existe el problema del incremento de las corrientes helicoidales, lo cual perjudica a los peces de menor tamaño.

Trucha.

Pendiente máxima: 20 %.

Anchura del canal “ L ” entre: 0,5 y 0,7 metros.

Se deben utilizar ralentizadores pequeños y separados por distancias cortas.

El límite inferior permitido de la escala de ralentizadores está determinado por dos factores: Profundidad mínima “ h_a ” en el primer ralentizador que asegure las corrientes helicoidales y la profundidad mínima dentro del canal “ h ” que proporcione la profundidad suficiente para que el pez pueda nadar. Por ello el ratio $h/L = 0,5$ debe ser el límite, con ello se consigue que la profundidad mínima del agua disponible por encima de la cresta del ralentizador para el paso del pez sea $0,33 L$.

El límite superior del ralentizador no es tan fácil de definir porque depende de la capacidad de nado del pez. El ratio máximo de h/L entre 1,0 y 1,1 es razonablemente válido.

El proceso de cálculo es de la siguiente manera.

- Elección de la pendiente (en función de las condiciones de la barrera y de la topografía).
- Elección de la anchura L del ralentizador (el valor de L fluctúa entre 1,0 y 0,6 m para el salmón hasta la trucha o el barbo).

- Elegido L se deduce cuáles son los valores máximos y mínimos de h (calado o tirante) dado que

$$0,5 < h/L < 1$$

- Conocidos estos valores se entra dentro del ábaco de la pendiente correspondiente, entrando por el eje de ordenadas a la altura del cociente h/L (eje de ordenadas izquierdo) se traza la horizontal hasta cortar la línea correspondiente a h/L, desde el punto de corte se traza la vertical hasta cortar el eje de abscisas donde nos determina el valor de Q*.

- Conocido el valor de Q*, se calcular el valor de Q según la expresión $Q^* = Q / (g^{0.5} L^{2.5})$.

- También a partir del valor Q* se determina el valor de h_a/L por medio del ábaco (eje de ordenadas izquierdo). Levantando una vertical desde el valor del eje de abscisas "Q*" hasta cortar la línea de h_a/L , a partir del punto de corte se traza una horizontal hasta cortar el eje vertical llegando así a determinar el valor de h_a/L , a partir de este valor es inmediato el valor de h_a (la carga del vertido a la entrada del ralentizador).

- De manera análoga se determina el valor de la velocidad (eje ordenadas derecho).

- El mismo proceso se repite para el caso del valor de h/L=1. En este caso, la velocidad determinada deberá ser menor a la admisible para el pez. El caudal resultante de este caso en que h/L = 1 correspondería al caudal máximo Q_{max} , y también se determina el valor de la velocidad, en este caso sería la velocidad máxima y se debe comprobar que es inferior a la capacidad de nado de los peces.

7. 6. EJEMPLO DE CALCULO DE ESCALA DE RALENTIZADORES TIPO "DENIL".

Elección de la pendiente (en función de las condiciones topográficas y de la barrera).

Elección de la anchura del canal "L".

En este ejemplo se elige L = 0,7 y la pendiente de 15 %.

Se debe cumplir $0,5 < h/L < 1$.

Valores mínimos. $h/L = 0,5$. (ver figura 7.9).

- Desde el punto donde igual a 0,5 en la ordenada izquierda del ábaco correspondiente a la pendiente del 15 % se traza la horizontal hasta cortar la línea correspondiente a "h/L" a partir de este punto se desciende en vertical hasta cortar el eje de abscisas de Q*, llegando al punto de $Q^*_{min} = 0,06$.

- Se calcula el caudal correspondiente por medio de la expresión $Q^*_{min} = Q_{min} / (g^{0.5} L^{2.5})$ resultando el valor del caudal mínimo $Q_{min} = 0,077 \text{ m}^3/\text{s}$.

- Se determina el valor de $h_{a,min}/L$ (h_a es el valor de la carga a la entrada de la escala), para Q^*_{min} con el valor de 0,06 se levanta la vertical hasta cortar la línea correspondiente a $h_{a,min}/L$

a partir de este punto se traza la horizontal hasta cortar el eje izquierdo de ordenadas, obteniéndose en este caso el valor 0,42 a partir de este valor es inmediato el cálculo de h_a , igual a 0,29 m.

- Por un procedimiento análogo se podría calcular el valor de la velocidad mínima v^*_{\min}

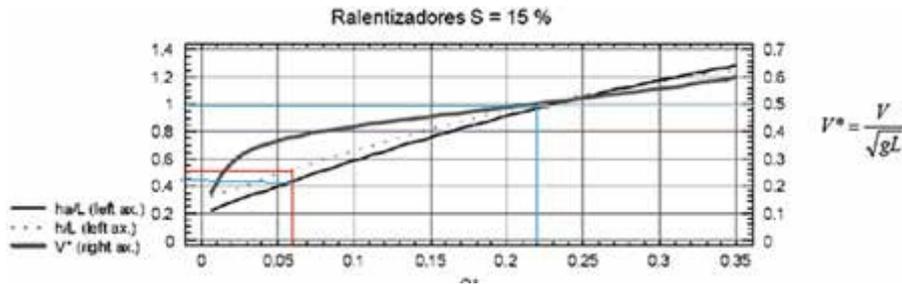


Figura 7.9. Ejemplo de cálculo.

Se vuelve a repetir el proceso para el valor máximo $h/L = 1$.

- Se obtiene un valor de Q^*_{\max} de 0,22 m^3/s , un valor de $h_{a\max}/L = 0,975$ y por lo tanto un valor de h_a de 0,71.

- En este caso es imprescindible el cálculo de la velocidad para lo cual desde el punto de Q^*_{\max} de 0,22 se traza la vertical hasta cortar la línea de v^* , a partir de este punto se traza la horizontal hasta cortar el eje de ordenadas de la derecha obteniéndose el valor de v^*_{\max} de 0,5, a partir de este valor se calcula el valor de $v_{\max} = v^*_{\max} (g L)^{0,5}$, obteniéndose el valor de 1,3 m/s.

- Con este valor de la velocidad se comprueba cual es el tamaño de las truchas que pueden acceder por la escala por medio de los ábacos de BEACH (1984).

7. 7. ESCALA FATOU.

La escala tipo Fatou es una escala directamente inspirada por el prototipo desarrollado por el ingeniero Denil (1909). El modelo Fatou es muy eficiente desde el punto de vista hidráulico, sin embargo, tiene varios inconvenientes: la construcción de los ralentizadores es difícil por la forma de los mismos; se obstruye fácilmente con las ramas y otros cuerpos flotantes traídos por la corriente y aunque presenta una gran eficacia hidráulica, sin embargo, los ralentizadores limitan la energía cinética del chorro a la entrada del paso resultando una débil atracción en la entrada de la escala.

La diferencia de la escala Fatou con la escala Denil radica en que en la primera, el ralentizador no es plano sino que cada ralentizador está compuesto de dos placas unidas entre sí formando un ángulo, de tal forma que cada placa está orientada oblicuamente a la dirección longitudinal del canal, además de estar inclinada con respecto a la vertical.

Esta disposición ofrece un mayor freno al descenso del flujo, por lo tanto la eficacia hidráulica es mayor que en la Escala Denil (ver figura 7.10), sin embargo justamente esta característica que la hace más eficaz hidráulicamente también crea el problema de aumentar la facilidad de taponamiento, como también una mayor dificultad de la construcción. Por todo ello la aplicación de este tipo de escala es limitado, normalmente cuando se decide por una escala de ralentizadores se usa la escala Denil.

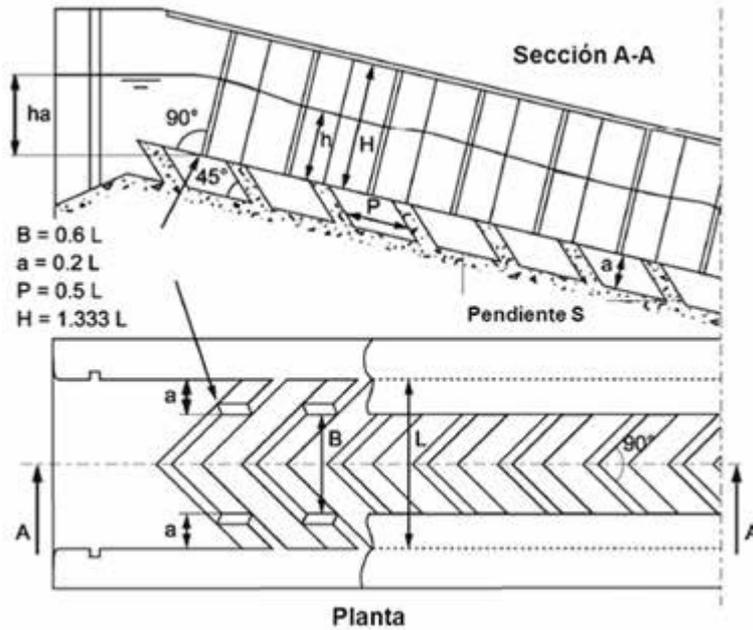


Figura 7.10. Parámetros característicos de la escala con ralentizadores Fatou (Original Larinier 2002)

Larinier expone el método de cálculo con los ábacos correspondientes, de manera similar al de la escala Denil. Remitimos a los lectores interesados en este tipo de escala a la publicación “Bulletin Français de la Peche et de la protection des milieux aquatiques. Baffle fishways” de Larinier (2002).

7. 8. ESCALA DE RALENTIZADORES DE FONDO

Las escalas de ralentizadores de fondo son conocidas según Larinier (2002) como “Super-active tipe bottom baffle fishway”.

Esta escala está compuesta de unos ralentizadores en forma de “espina de pescado” emplazados en el fondo del canal. En este caso, existe la posibilidad de diseñar la escala por medio de numerosas unidades yuxtapuestas y conseguir una gran anchura del canal, y por lo tanto un gran canal, consiguiéndose un gran “efecto de atracción”. Una faja longitudinal de la misma altura que la del ralentizador consigue separar las filas de ralentizadores de la pared del canal para conseguir estabilizar el flujo.

Este tipo de ralentizador fue desarrollado en modelos hidráulicos (Larinier y Miralles, 1981) inspirado por el modelo RIRO (Denil, 1936-1938; Larinier, 1977), y fue utilizado en la presa de Roermond y en Meuse en Holanda. Si bien, la escala ha sido usada principalmente en Francia, recientemente se ha utilizado bastante en Gran Bretaña. Los ralentizadores son fabricados en acero (8-10 mm. de espesor) y su altura, normalmente, varía entre 0,08 y 0,20 m. Los lectores interesados en conseguir más información sobre este tipo de escala pueden obtenerla en la publicación de LARINIER, M. (2002). Bulletin Français de la Pêche et de la protection des milieux aquatiques.. 364 suppl. Baffle fishways.

7. 9. ESCALA DE RALENTIZADORES TIPO CHEVRON PARA PECES Y CANOAS-KAYAKS.

En algunas escalas de peces además de permitir el el ascenso de los peces, también pueden facilitar el paso de canoas-kayak, siendo además posible el descenso de los peces que anteriormente ascendieron de forma más eficiente que en otras tipos de escalas.

Un ejemplo de este tipo de escala es la denominada escala “Chevron”. Esta escala estudiada en modelos desarrollados por Larinier (1984) tiene semejanza con la escala de ralentizadores de fondo de la que se la han realizado algunas modificaciones.

Los ralentizadores utilizados son gruesos y de madera. Se han desechado los ralentizadores de acero porque son más peligrosos para las embarcaciones. Los ralentizadores son de sección cuadrada (a diferencia del resto de escalas, en las cuales la sección es rectangular con un espesor pequeño), las dimensiones del lado del rectángulo es de 8 a 15 cm, normalmente es de 10-12 cm.

Con el fin de que pueda pasar una canoa-kayak es necesario que el canal de la escala tenga la anchura suficiente para permitir el paso de la embarcación. Este requisito se consigue adjuntando unidades de ralentizadores hasta conseguir una anchura comprendida entre 1,40 y 2,10 m. La pendiente máxima admitida es de 15-16 %.

Otra modificación que es necesario realizar consiste en añadir unas bandas longitudinales al modelo original con el fin de conseguir disminuir posibles daños por rozamientos. Estas bandas longitudinales provocan un incremento del caudal por lo tanto su anchura debe ser restringido tanto como sea posible.

La principal desventaja de esta escala para los peces migradores es que esta escala tiene menor eficacia hidráulica que otras escalas de ralentizadores de fondo. De hecho, este tipo de ralentizadores fueron abandonados originalmente por los ralentizadores de fondo. Por este motivo el rango operacional biológico, que depende de la capacidad de nado de los peces está reducido y limitado a especies para las cuales el paso es útil.

En la práctica este tipo de escalas solo son usadas para grandes salmónidos, mayores de 40 cm, y solo cuando el nivel aguas arriba no varía significativamente. El rango de caudales para grandes salmónidos, expresado en términos de flujo unitario, está comprendido entre 250

l/s/m y 800-900 l/s/m, lo que corresponde a una variación del nivel aguas arriba de aproximadamente 30-40 cm. El rango de variación para la trucha es muy bajo (alrededor de 10 cm) lo que restringe considerablemente el uso de esta escala para esta especie.

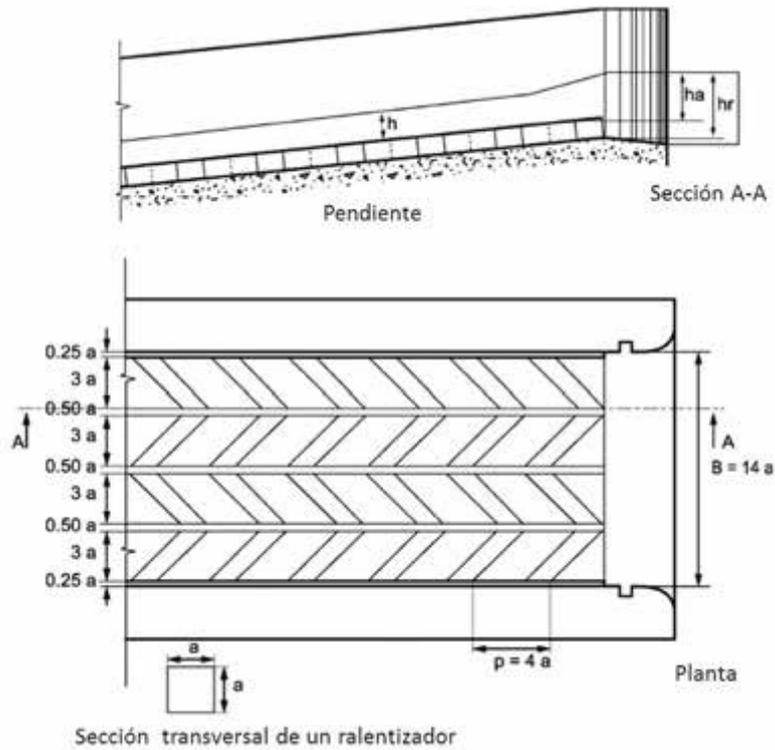


Figura 7.11. Parámetros característicos de la escala de ralentizadores Chevron (Original Larinier, 2002)

En la siguiente fórmula se expone la relación entre el flujo unitario q^* y el flujo por unidad de anchura que desciende por la escala q (ver figura 7.11).

$$q^* = \frac{q}{\sqrt{2ga^{1.5}}}$$

Siendo:

q es el caudal por unidad de anchura ($m^3/s \cdot m$).

“ a ” la altura y anchura del ralentizador (m).

g , es la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$).

El calado aguas arriba (h_a/a) el calado principal del agua (h/a) y la velocidad media que viene determinada por la fórmula:

$$V = \frac{a \cdot q^*}{h}$$

Siendo h la altura del calado del flujo del agua (m).

Válida para algunos valores de la pendiente S en formato adimensional.

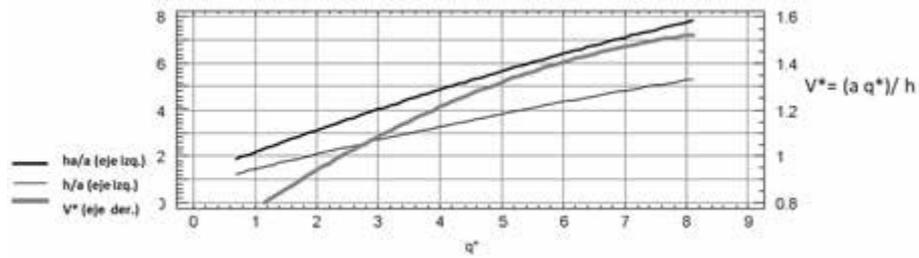


Figura 7.12. Gráfico de la relación entre los valores de q^* , h/a , h/a y V^* con pendiente 10 %. (Original de Larinier 2002).

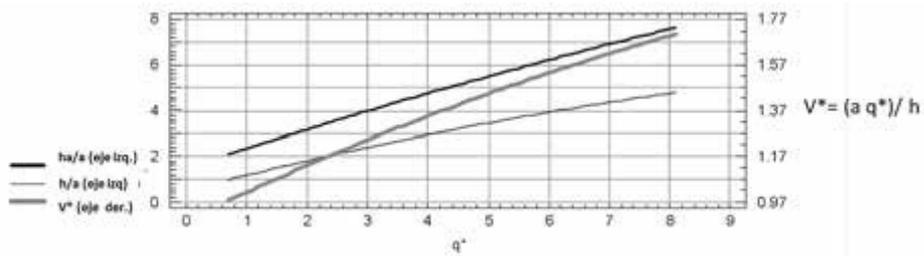


Figura 7.13. Gráfico de la relación entre los valores de q^* , h/a , h/a y V^* con pendiente 15 %. (Original de Larinier 2002).

El calado aguas arriba “ h_a ” es la elevación aguas arriba de la superficie del agua en relación con el punto inferior (vértice) del primer ralentizador (correspondiente a la elevación del agua antes de la aceleración en el comienzo de la escala, ver figura). La relación entre la profundidad inicial por encima del ralentizador “ h_a ” y la profundidad a la entrada de la escala h_r es expresado de la siguiente manera.

$$h_r = h_a + a - 3 a S$$

La profundidad principal (h) es el calado medio del flujo por encima de los ralentizadores dentro de la escala (S , es la pendiente en tanto por uno).

El flujo Q (m^3/s) en la escala es fácilmente calculado por medio del producto del caudal unitario “ q ” obtenido por medio de “ h_a ” multiplicado por la anchura “ L ” de la escala.

7.10. ESCALA ALASKA.

Este tipo de escala fue desarrollada durante la década de 1960 en Alaska para el salmón del Pacífico (Ziemer, 1962) a partir de un prototipo probado en modelo a escala de Mcleod y Nemenyi (1940).

El tipo estándar de la escala Alaska se muestra en la figura 7.14.

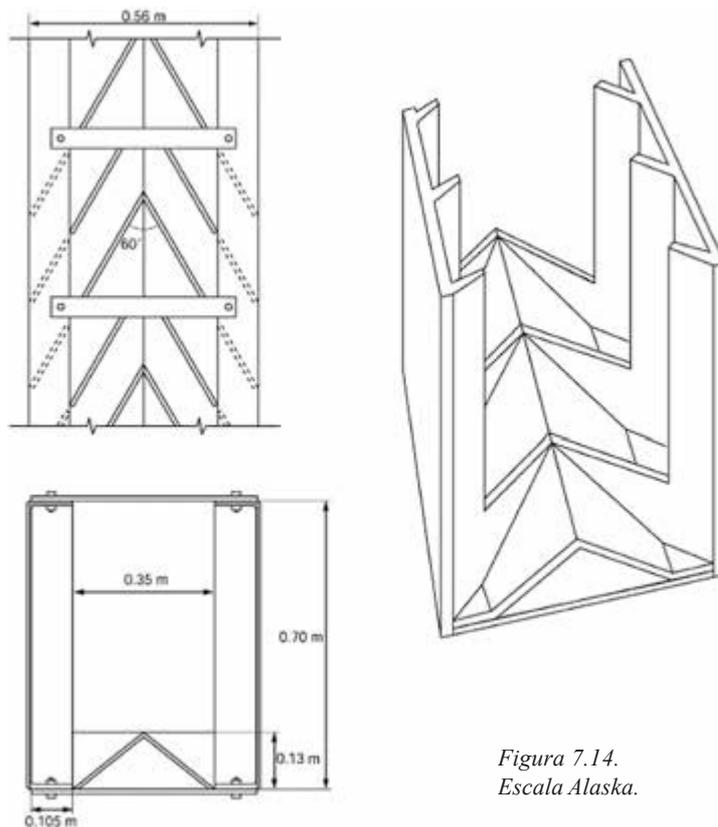


Figura 7.14.
Escala Alaska.

Normalmente la escala Alaska es estrecha (0,56 m ancho y 0,70 m de altura, la anchura interior es 0,35m). Las pendientes en las que se pueden utilizar varían entre el 25 % y el 33 %.

El caudal que atraviesa la escala se estima por medio de la ecuación (Rajaratnam y Katopodis, 1991):

$$Q = 0,36 (sg)^{0,5} h^{1,55}$$

Dónde:

Q, es el caudal (m³/s).

h, es el calado del flujo dentro del canal tomado desde el vértice del ralentizador (m).

s, es la pendiente de la escala.

g, es la aceleración debido a la gravedad (9,81 m/s²).

Esta escala puede ser prefabricada en hojas de aluminio de 6 mm de espesor con módulos de 3 metros de un peso de 240 k y después se transporta y ensambla “in situ”.

La principal desventaja de esta escala es su limitado caudal y su limitada capacidad para soportar las variaciones del nivel del agua en la parte superior. Para conseguir aumentar la atracción se puede inyectar un caudal auxiliar cerca de la entrada de la escala. También, presenta el problema de las frecuentes obstrucciones con ramas u otros cuerpos arrastrados por la corriente.

La ventaja de esta escala con respecto al resto de escalas de ralentizadores expuestas en este capítulo, radica en la posibilidad de aplicarla en pendientes más grandes, lo cual consigue abaratar los costes.

7.11. BIBLIOGRAFIA.

DENIL, G. 1909. Les échelles à poissons et leur application aux barrages de Meuse et d'Ourthe. Bull. Acad. Sci. Belg., 1221-1224.

DENIL, G. 1936-1938. *La mécanique du poisson de rivière* Ann. Trav. Publ. Belge., 395 p.

GARCIA NAJERA J.M. 1949. *Aplicación del frenado hidráulico a las escalas salmoneras*. Ed. IFIE. 54 pp. Madrid.

GUALLART Y ELLIAS E. 1913. *Pasos y escalas salmoneras*. Ed. -imprensa de Ricardo F. de Rojas, MADRID.

LARINIER M. 1978. Etude de fonctionnement d'une passe à poissons à ralentisseurs plans. Bull. Fr. Pisc., 271: 40-54.

LARINIER M., y MIRALLES, A. 1981. *Etude hydraulique des passes à ralentisseurs*. CEMAGREF, Unpublished Rep., 53 p.

LARINIER, M. 2002. Bulletin Français de la Pêche et de la protection des milieux aquatiques.. 364 suppl. Baffle fishways pp.83-101

RAJARATNAM N., KATOPODIS C., 1984. Hydraulics of Denil fishways. J. Hydr. Eng., 110 (9): 1219-1233.

RAJARATNAM N., KATOPODIS C., 1991. Hydraulics of Steeppass Fishways. Can. Soc. Civ. Eng., 18:6

MCLEOD A.M. NEMENYI P. 1940. An investigation of fishways. Bull. Iowa State Univ., Ames, Iowa, 24: 1-72.

RAJARATNAM N., NEMENYI P. 1991. *Hydraulics of Steeppass Fishways*. Can. Soc. Civ. Eng., 18:6.

SCHWALME K., y MACKAY W.C. 1985. M1- type backwater curves in Denil Fishways. Can Soc. Civ. Eng., Annual Conf., 141-156.

WHITE C. M., NEMENYI P., 1942. Report on hydraulic research on fish passes, in "Report of the Committee of fish passes". Inst. Civ. Eng. Rep., 59 p.

ZIEMER G.L., (1962) Steeppass Fishway development. Alaska Dept. of fish and Game, Informational leaflet 12, 9 p.

8 . ESCALAS DE ANGUILAS

8. 1. INTRODUCCIÓN A LAS ESCALAS DE ANGUILAS.

La anguila (*Anguilla sp*), es una de las especies más abundantes en los ríos atlánticos, valga por ejemplo el hecho de que en la Bretaña francesa tan solo esta especie supone la mitad de la biomasa de los ríos. Desgraciadamente también es una de las especies que han sufrido mayor pérdida por la construcción de presas debido que al ser una especie diádrómica, necesita vivir en los ríos y en el mar para completar su ciclo biológico. La existencia de numerosas barreras transversales infranqueables, especialmente las presas, impiden el paso tanto ascendente como descendente, lo cual ha provocado una importante disminución de sus poblaciones.

Como es sabido, la anguila tiene un ciclo biológico muy particular, es una especie migradora del tipo diádromos (necesita el mar y el agua dulce para completar su ciclo vital). En concreto es especie catádroma, es decir que se reproduce en el mar, la hembra asciende a los ríos para completar su desarrollo y alcanzar la fase adulta, el macho se queda en la desembocadura de los ríos. Cuando la anguila del atlántico (*Anguilla anguilla*) está madura (8 o 10 años para la hembra y 4 para los machos), realiza la migración descendente desde las aguas dulces de los ríos continentales hasta el mar de los Sargazos; este mar se encuentra situado en el Océano Atlántico cerca de las Islas Bermudas, y en estas aguas realiza la reproducción. Posteriormente las larvas de las anguilas son arrastradas por las corrientes marinas y regresan a la costa europea para posteriormente remontar por los ríos y poder alcanzar el estado maduro, cerrando así el ciclo biológico.

En España se ha podido comprobar que la anguila es el pez que mayormente ha sufrido el efecto de la falta de transitabilidad provocado por la construcción de presas. Tanto es así que ha llegado a desaparecer en una gran parte de la geografía española como consecuencia de la imposibilidad de migración hacia los cursos altos de los ríos, Principalmente por esta causa la anguila que fue un pez que habitaba prácticamente en todas las provincias de España ha pasado a vivir tan solo en las provincias cercanas a la costa, desapareciendo de gran parte de las provincias del interior.

La anguila (*Anguilla anguilla*) tiene la particularidad de poder remontar el río de manera distinta al resto de los peces. Esto es debido a que la anguila además de nadar es capaz de “reptar”, por esta particularidad consigue remontar obstáculos incluso saliendo prácticamente del agua, siempre y cuando el sustrato se encuentra húmedo, sea muy rugoso y la distancia y el desnivel hasta la lámina superior no sean muy grandes. Por esta razón las escalas de anguilas son muy distintas a las del resto de las escalas de otros peces.

Consecuentemente, el diseño y la construcción de las escalas especiales para anguilas son únicamente válidas para esta especie, y por tanto el resto de los peces no pueden usarlas. Por el contrario, como veremos más adelante, las escalas convencionales sí que pueden ser válidas para las anguilas.

Cuando la anguila coloniza las aguas dulces suele tener un tamaño aproximado de 70 mm, y un peso medio de 0,30 g (anguilas). La migración de la anguila puede dividirse en dos fases (Porcher, 2002):

1. Migración pasiva. Las anguilas usan las corrientes de las mareas para ascender aguas arriba y se entierran en los sedimentos para no ser arrastrados por el reflujo.

2. Migración activa. En las costas europeas, desde el mes de marzo, aproximadamente, las anguilas adquieren la capacidad de nadar y arrastrarse consiguiendo de esta forma remontar algunos obstáculos. Esta fase continua hasta el final del verano, durante la misma los ecosistemas de agua dulce se van colonizando, situación que se mantiene hasta que la anguila alcanza el tamaño comprendido entre 10 y 40 cm.

La actividad migratoria de las anguilas coincide con el periodo de temperaturas cálidas de cada año, es decir entre abril y septiembre, siendo el periodo comprendido entre mayo y julio la época de máxima actividad. Durante este periodo del año se produce la progresiva colonización de la totalidad de la cuenca.

Para conseguir o mejorar la franqueabilidad de los obstáculos, es decir para que la anguila pueda traspasarlos se deben tener en cuenta que:

- Un gran número de individuos deben poder pasar la barrera durante un periodo limitado de tiempo.

- El tamaño medio de los migradores va aumentando paulatinamente desde la desembocadura del río hasta las zonas altas de las cuencas.

8. 2. CAPACIDAD DE NADO DE LAS ANGUILAS.

La capacidad de nado de las anguilas varía en función de su longitud, así es posible determinar que:

- Las anguilas de longitud entre 6,9 cm y 7,5 cm, (cuando la anguila tiene como máximo este tamaño sería un angula) pueden conseguir una velocidad máxima entre 0,6 y 0,9 m/s (Mcleave, 1980). La máxima distancia desarrollada con la velocidad de 0,30 m/s es aproximadamente de 3 m; cuando la velocidad aumenta a 0,50 m/s, la distancia desarrollada disminuye a 0,3 m. Los flujos con mayor velocidad son infranqueables.

- Las anguilas de 0,60 m de longitud en una temperatura comprendida entre 10° C y 15° C desarrollan una velocidad de 1,14 m/s (Blaxter y Dickson, 1959). Dada tan escasa capacidad de nado, se comprende que la anguila nadando no podrá superar los obstáculos que otras especies lo sobrepasan fácilmente.

En concreto:

- Desniveles de tan solo algunos centímetros pueden ser infranqueables para las anguilas.

- Alcantarillas o umbrales pueden impedir el paso por tan solo corrientes de velocidades moderadas cuando se producen ausencia de flujos heterogéneos.

Por consiguiente, la anguila tiene poca capacidad natatoria, aun así puede remontar por escalas convencionales siempre y cuando que los desniveles de altura del agua sean de pequeña cuantía y el lecho de la escala presente superficies muy rugosas por donde la anguila pueda “reptar”.

Se ha observado que la anguila es capaz de remontar las paredes de los muros inclinados de los azudes de los molinos cubiertos de vegetación u otros obstáculos cuando los flujos son débiles y con ciertas condiciones de flujo y con rugosidad (ver el capítulo de migración descendente). En muchos casos la angula puede “reptar” por superficies mojadas en longitudes pequeñas.

Una vez que la anguila alcanza la madurez sexual, debe volver al mar para reproducirse. En el descenso se enfrenta con otros problemas de transitabilidad, lo que requiere que en las barreras existentes se tenga en cuenta la necesidad del paso descendente (ver capítulo de migración descendente).

El descenso hacia el mar comienza con la primera crecida del otoño, las anguilas viajan por la noche siguiendo la corriente de manera más o menos pasiva. Estas circunstancias junto con el gran tamaño de los peces provocan que estos peces sean vulnerables, sufriendo daños e incluso la muerte cuando atraviesan centrales eléctricas. Las turbinas pueden causar un alto porcentaje de mortandad.

En Holanda se han realizado trabajos en tomas de aguas en los que se ha conseguido desviar a las anguilas por medio del efecto repulsivo de la luz que provoca en estos peces. incluso con aguas turbias (Haddingh, *et al.* 1992), aun así la eficacia de estos métodos todavía no ha sido totalmente contrastada.

8. 3. ACTUACIONES PARA FACILITAR EL PASO DE LAS ANGUILAS.

8. 3.1. Actuaciones en las instalaciones de estuarios.

En algunos estuarios de Francia se han realizado construcciones consistentes en compuertas para evitar incursiones salinas o inundaciones. Estos eventos se producen simultáneamente con grandes caudales de río y con mareas altas, para evitar tales situaciones se actúa cerrando las compuertas cuando hay plena mar y abriéndolas cuando disminuye la marea. Lamentablemente con este funcionamiento se impide el paso de las anguilas, y se producen agrupaciones de migradores al pie de la barrera, por lo tanto se impide que las anguilas realicen la migración pasiva arrastradas por las mareas. La solución podría ser la construcción de una escala o paso; si bien esta escala debería realizarse con saltos o pendientes muy pequeñas porque cuando alcanza la anguila estos lugares su tamaño es muy pequeño y con poca capacidad natatoria o de reptación, la cual la adquieren con el tiempo.

Para evitar el total bloqueo de las anguilas, en la medida de lo posible se debe permitir el paso durante los periodos de las mareas altas por medio de estructuras controladas. Si es posible las compuertas deben ser abiertas con las mareas altas nocturnas.

8. 3. 2. Paso a través de las escalas convencionales.

No siempre es posible que las anguilas, especialmente las pequeñas, puedan remontar por una escala convencional. Concretamente las escalas de artesas de hendiduras o de vertederos laterales semisumergidos son las más indicadas (además de las escalas específicamente para anguilas, por supuesto) ya que permiten el paso de los peces sin necesidad de saltar en los casos en que los desniveles no sean muy grandes.

Los estudios llevados a cabo no son determinantes sobre los tamaños de las anguilas que pueden remontar estas escalas.

Las observaciones realizadas con ventanas de cristal, muestran que las anguilas pueden aprovecharse de las velocidades bajas asociadas a las zonas límites, además de las áreas turbulentas y heterogéneas de los flujos en zonas de altas velocidades.

Se puede mejorar el paso de la anguila con una modificación del diseño consistente en la incorporación de cepillos o escobillas de cerdas situadas en el fondo de las escotaduras o vertederos. En Suecia, se han usado estas escobillas en los pasos de las hendiduras verticales para lampreas y se ha conseguido mejorar el tránsito de la escala (Laine *et al.*, 1998), en todos los casos, es necesario confirmar la eficacia de estas actuaciones por medio de la evaluación real de estos dispositivos de las anguilas.

Las escalas específicas de anguilas se realizan para las anguilas pequeñas y las angulas. Naturalmente también son válidas para las anguilas adultas, si bien estas solo utilizaran el paso para descender, pudiendo usar estos pasos o cualquier paso convencional de peces.

La peculiar capacidad que posee la anguila de “trepar” y “gatear” en superficies rugosas y húmedas, permite construir un tipo de escala específico para estos peces, de fácil diseño, económica construcción y versátil ubicación.

En concreto, la escala específica para anguilas consiste básicamente en una rampa con los elementos necesarios, que se describirán más adelante, para que el migrador pueda trepar fácilmente por él. Además de este tipo específico de paso también se ha conseguido realizar otro paso por medio de tuberías (Rigaud *et al.*, 1988).

8. 4. DISEÑO DE LAS ESCALAS PARA ANGUILAS.

Aunque, si bien en el presente trabajo se habla de escalas para anguilas, el objetivo principal son las angulas y pequeñas anguilas porque justamente estos son los ejemplares que deben remontar el río y son para ellas para los que se deben de construir la escala.

Las actuaciones para conseguir el paso de la anguila se diferencian en dos tipos:

8. 4. 1. Rampas o escalas específicas de anguilas.

La rampa, como su propio nombre indica, consiste en una rampa con una ubicación cercana a la barrera, tal y como se puede apreciar en la figura 8.1.

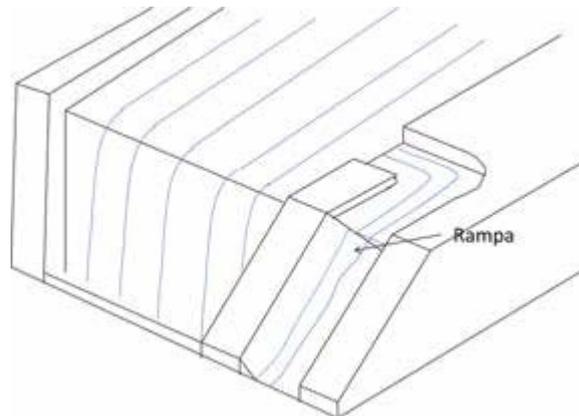


Figura 8.1. Esquema de la ubicación de la rampa de anguilas.

La sección transversal de la rampa es rectangular. La rampa a veces se cubre y otras veces está descubierta.

La característica más peculiar de esta rampa es que en la base se dispone de una pendiente lateral transversal. El objetivo de incorporar esta pendiente lateral es conseguir que siempre existe una zona húmeda con muy baja velocidad del flujo. Esto es así de tanto en cuanto que la velocidad de bajada es función de la profundidad y como en cada punto de la sección esta varía, en la zona donde la profundidad sea escasa o nula, la velocidad es muy pequeña y por

allí puede situarse la anguila y subir por la rampa; por lo tanto para un intervalo relativamente amplio de caudales, siempre habrá una parte con muy poco calado y poca velocidad (ver figura 8. 2. Sección transversal de una escala de anguilas).

Los valores de los parámetros de la escala son (Porcher, 2002):

Anchura de la sección: Entre 0,20 a 1,00 m

Pendiente longitudinal: Entre 5 y 45 %

Pendiente transversal. La pendiente transversal, es decir la pendiente dentro de la rampa puede ser como máximo del 50 %.

Es recomendable que se realicen estanques de descanso cada 2 metros de desnivel de altura (Martínez de Azagra A. 1999).

Con estas indicaciones en principio es posible construir escalas de anguilas en presas con alturas relativamente altas. Concretamente en Francia se han construido escalas de anguilas para presas de altura de hasta 21 m.

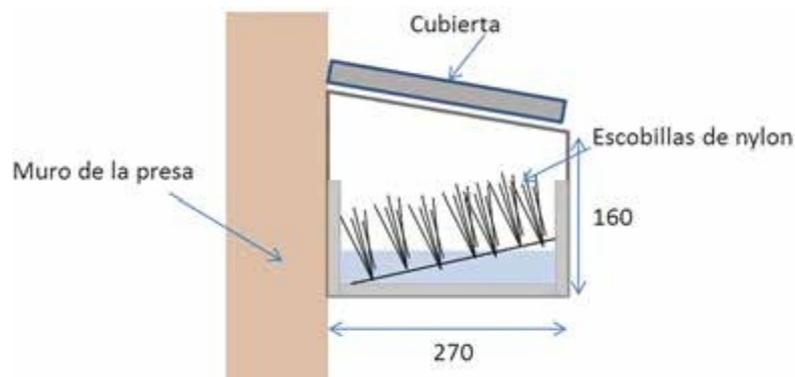


Figura 8. 2. Sección transversal de una escala de anguilas

Sustrato: Es fundamental que el sustrato sea rugoso. Este puede ser natural como por ejemplo: gravillas, ramas de zarzas, paja, o bien artificial: malla, escobillas, etc. Los sustratos naturales necesitan mayor mantenimiento y deben ser reemplazados periódicamente. Cuanto más rugoso sea el sustrato mayor puede ser la pendiente con que se construya la escala, en cualquier caso los sustratos deben mantenerse mojados. El sustrato más utilizado es el de escobillas de nylon.

Espaciamiento de escobillas. Las distancias de espaciamiento de los penachos están en función del tamaño de la anguila (Legault, 1993).

- Para angulas de longitud comprendida entre 6 y 10 cm, la distancia de espaciamiento entre penacho y penacho es 7 mm.

- Para anguilas pequeñas y anguilas amarillas de longitud comprendida entre 10 y 30 cm, la distancia de espaciamento es 14 mm.

- Anguilas adultas mayores de 30 cm, la distancia del espaciamento es 21 mm (Martínez de Azagra, A. 1999).

Las cerdas están adheridas a unas esteras cuyas dimensiones normalmente son de 1.000 mm de longitud por 400 mm de ancho fabricadas en material de polypropeno. En estas esteras se agrupan, las cerdas en penachos. Normalmente, estas cerdas suelen ser de 70 mm de longitud. Cada penacho cuenta con 25 cerdas. Como se ha visto anteriormente el espaciamento de los penachos varía en función del tamaño de las anguilas que utilizarán el paso.

Las experiencias realizadas en Francia (Legault, 1991) muestran que la facilidad de la escala para el paso de las anguilas depende de las dimensiones del sustrato y del grado de la pendiente. Estos factores deben ser elegidos en relación al tamaño de los migradores presentes en cada sitio.

A continuación se exponen datos de varios tipos de sustratos rugosos utilizados en escalas de anguilas (Fuente: NMFS, National Marine Fisheries Service)

Tipo	Construido	Modelo	Material	Dimensión Tachón/cerda de cepillo			Max. Pendi (°)	Tamaño Anguila mm.
				Diámetro del penacho o del tachón mm	Espaciamento del penachoo del tachón mm	Altura mm.		
Geotextil	3M USA	Enkamat7220	poliamida	n/d	n/d	20	60°	50-150
Sustratocerda	FISH-PASSFrancia	Sustratocepillo	polipropileno	4,5	14	70	45°	100-350
Sustratocerda	FISH-PASSFrancia	Sustratocepillo	polipropileno	4,5	21	70	45°	> 300
Sustratocerda	FISH-PASSFrancia	Sustratocepillo	polipropileno	4,5	14 y 21	70	45°	60-135
Tachón	FISH-PASSFrancia	ABS domes	ABS plastic	32	48	30	30°	>135
Tachón	Milieu. Inc.Canada	Eel ladder	ABS plastic	31,2	63,5	38		<150
Tachón	Milieu. Inc.Canada	Eel ladder	ABS plastic	50,8	80	114	55°	150-800
Tachón	American Wick Drain, Inc USA	Akwadrain	Poliestireno	16	31,7	24	45°	150-300

El sustrato “Tachón” es un cilindro con las aristas superiores redondeadas asemejando una semiesfera.

Caudal. El caudal que alimenta a la escala es relativamente pequeño, tan solo de algunos litros por segundo son suficientes. Este caudal se capta de la lámina superior de la barrera para que descienda por la rampa. Además es recomendable, como en todas las escalas de peces, adicionar un caudal de “atracción”, dirigirlo a la entrada del paso y conseguir de esta manera la atención de los peces migradores. En el caso de las escalas de anguilas, el caudal de atracción es notoriamente superior al de la propia escala.

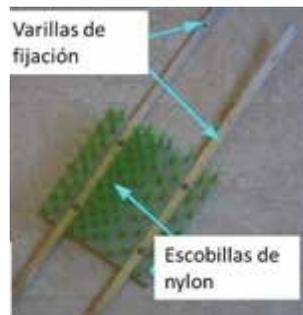
En las escalas situadas cerca del mar, en donde hay mezcla de tamaños de anguilas (anguilas pequeñas y amarillas) es recomendable usar una rampa con mezcla de tiras longitudinales de escobillas, y consiguientemente con diferentes espaciamientos de los penachos de las escobillas.

8. 4. 2. Adaptación de las escalas convencionales para permitir el ascenso de las anguilas.

Como se muestra en las figuras 8.3 y 8.4 es posible adaptar las escalas convencionales de artesas sucesivas para permitir el ascenso de las anguilas.



*Figura 8. 3. Estante con tira de escobillas de nylon para acceso de las anguilas.
(Original de Fish-pass)*



*Figura 8. 4. Detalle de las escobillas de nylon y las varillas donde van fijadas.
(Original de Fish-pass)*

La adaptación más sencilla que se puede realizar, consiste simplemente en añadir una tira del sustrato con cerdas sintéticas sujetas con unas pequeñas varillas de fijación por debajo del orificio sumergido, tal y como se puede apreciar en la figura 8.4. Si la escala carece de este orificio es posible fijar este sustrato rugoso en la parte inferior del vertedero lateral.

Como se puede apreciar en la figura 8.4, este sustrato consiste sencillamente en una tira del sustrato formado por el propio tejido textil al cual van adheridas las cerdas sujetas a la pared por medio de dos varillas metálicas.

También son posibles otras sencillas soluciones, como por ejemplo las que se muestra en la figura 8.3, correspondiente a una escala de artesas sucesivas y en la que aparece en uno de los muros laterales una sencilla escala de anguilas con el sustrato rugoso compuesto de cerdas sintéticas.

En la figura 8.5 se muestra una escala de anguilas junto a una escala convencional de estanques sucesivos.



Figura 8.5. Escala de anguilas con escala convencional (Original de "Fish-pass")

8. 4.3. Condiciones de la entrada de agua de la escala en la zona superior de la barrera.

La sección aguas arriba de la escala de anguilas se diseñará de manera que permita fácilmente el acceso de los migradores a la lámina superior de agua. Es necesario asegurar que en la zona de transición no se produzca alguna obstrucción para los migradores, ya sea a través de una discontinuidad en la alimentación del agua o por una velocidad excesiva del flujo de agua, la cual podría arrastrar al pez hacia aguas abajo.

El principal problema que puede surgir estaría causado por las fluctuaciones del nivel aguas arriba de la barrera. Una disminución importante del nivel de la lámina puede provocar una zona sin agua dentro de la escala; por el contrario si se produce una crecida rápida habrá un exceso de agua dentro de la escala con un aumento de la velocidad del agua.

Las soluciones para este problema han sido tratadas de diferentes formas (Porcher 2002).

- Como la rampa de la escala de anguilas tiene una pendiente lateral (ver figura 8.2.), es posible absorber parte de la variación de los cambios de nivel de la lámina de agua de la barrera. Esta disposición de la pendiente lateral permite mantener una zona de aguas con poca profundidad y consecuentemente una velocidad moderada, permitiendo así el paso de los migradores. Los primeros resultados del estudio realizado en Francia (Voegtle y Larinier, 2002) sugieren que con un gradiente lateral del 50 % (1 vertical por 2 horizontal) es suficiente para permitir el paso de las anguilas, y a la vez permite un cierto rango de variaciones de los niveles de aguas arriba de la barrera.

- Agrupar varias rampas a diferentes niveles para cubrir una gran variación de niveles, aguas arriba de la barrera.

- Pasaje por debajo de una compuerta (Larinier 2002). Tal y como se muestra en la figura 8.6, al poder elevar o descender una compuerta en función del nivel de agua existente permite controlar el nivel de aguas al inicio de la rampa por detrás del pasaje. La velocidad del agua en el pasaje depende de la diferencia de niveles en ambos lados y de la mayor o menor rugosidad en el lecho, esta rugosidad se consigue colocando ramas en el pasaje. Este método no ha sido evaluado, y solo es admisible cuando las variaciones del nivel del agua son pequeñas.

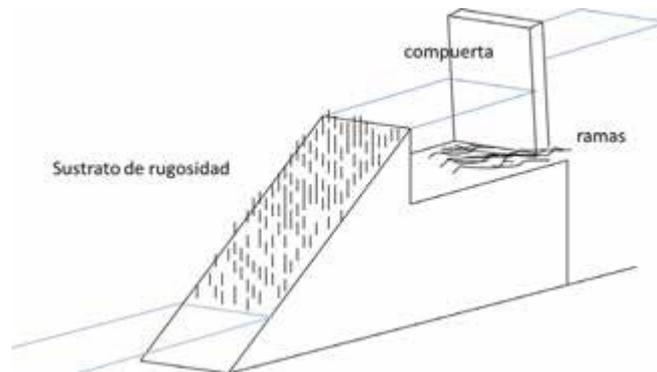


Figura 8.6. Esquema de escala de anguilas con compuerta reguladora.

- En la zona superior de la rampa, se puede instalar un depósito con agua que suministre agua rociando la rampa de tal forma que por medio de una bomba supletoria que alimente al depósito cuando sea necesario (ver figura 8.7). Los migradores alcanzan la cima de la rampa y en este lugar son arrastrados hacia abajo hasta el río o el embalse. Con esta instalación también es posible capturar y transportar a los peces migradores al lugar deseado (Larinier, 2002).

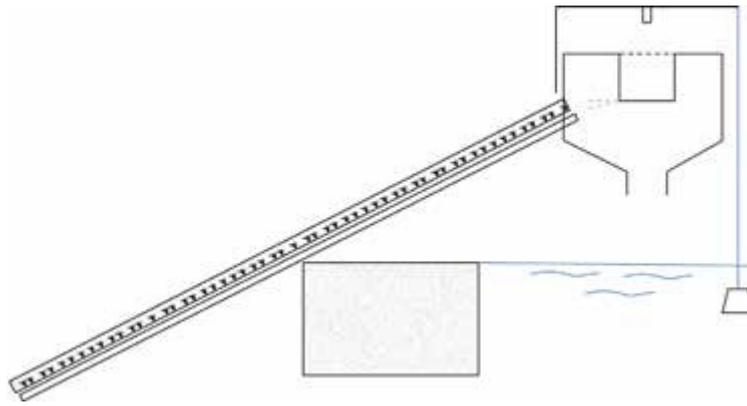


Figura 8.7. Esquema de escala de anguila con depósito superior de agua.

8. 4.4. Ubicación de la escala.

Antes de realizar las instalaciones definitivas, en la medida de lo posible, es necesario realizar comprobaciones con trampas móviles que aseguren que la localización de la entrada de la escala es la apropiada.

Si se observa que las anguilas se acercan frecuentemente a la entrada de la escala convencional para otras especies de peces, en lo posible, se debe aprovechar esta atracción para instalar la escala de anguilas, situándola al lado o incluso dentro de la escala convencional (ver figura 8.8).

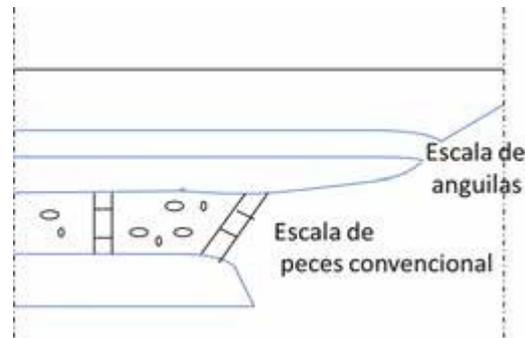


Figura 8.8. ubicación de la entrada de la escala de anguilas

El efecto de “atracción” para el caso de las anguilas es más difícil de definir que para otras especies. Una recomendación válida para las anguilas es situar la entrada a la escala lo más cerca posible de la barrera. También es importante que exista una zona de descanso cercana a la entrada de la escala.

8.5. BIBLIOGRAFÍA DE LAS ESCALAS DE ANGUILAS.

BLAXTER J. H. S., DICKSON W., 1959. Observations on the swimming speeds of fish J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer, 24 (3): 472-9.

HADDERINGH R. H., VAN DER STOEP J.W., HAGRAKEN J. M. 1992. Deflecting eels from water inlets of power stations with light light. Irish Fish. Invest., 36: 37-41.

LAINE, A. KAMULA, R., HOOLI, J., 1998. Fish and lamprey passage in a combined Denil and vertical slot fishway. Fisheries Management & Ecology, 5:31-44.

LARINIER M. 2002. Fishways for eels. *Bull. Fr. Pêche Piscic. 364 suppl. pp147-155.*

LEGAULT, A: 1991. Etude de quelques facteurs de sélectivité de passes à anguilles (Study of some selectivity factors in fishways for eels). Bull. Fr. Pêche Piscic. 325: 86-91.

LEGAULT, A: 1993. *L'anguille. Aménagement des obstacles à la migration* (The eel, Fish passage facilities a obstructions to migration). A.D.A. (Ed.) B.P. 24, 33610 CESTAS, 32 p.

MARTÍNEZ DE AZAGRA, A. 1999. *Escalas para peces*. Ed. Universidad de Valladolid. Palencia 38 p.

McLEAVE J. D. 1980. Swimming performance of European eel (*Anguilla Anguilla*) elvers, J. Fish. Biol., 16: 445-452.

PORCHER, J. P. 2002. Chapter 10: Fishways for eels. Bulletin français de la pêche et de la protection des milieu aquatique. suppl 364 suppl 364s. Ed. FAO, CSP, Cemagref. Pp.147-155.

RIGAUD D, C., FONTENELLE, G., GASCUEL, D., LEGAULT, A; 1988. Le franchissement des ouvrages hydrauliques par les anguilles (*Anguilla Anguilla*). Presentation des dispositifs installés en Europe (Passage at hydraulic plant by eels (*Anguilla Anguilla*). Description of facilities installed in France. Department of Halieutics publication 9, ENSA Rennes, 148 p.

VOEGTLE B., LARINIER M., 2000. Étude sur les capacités de franchissement des civelles et anguillettes. Site hydroélectrique de Tuilières sur la Dordogne (24). Barrage estuarien d'Arzal sur la Vilaine (56). GHAAPPE Rep. RA00.05,69 p.

9. ESCLUSAS Y ASCENSORES DE PECES

9.1. ESCLUSA DE PECES

Una esclusa de peces es una construcción análoga a la esclusa de barcos que posee las siguientes partes: una cámara al nivel de aguas arriba conectada por otro conducto cerrado vertical u oblicuo hasta la cámara inferior aguas abajo. Para la regulación de la entrada y salida del flujo de agua por estas conducciones se instalan unas compuertas automáticas en cada una de las cámaras.

La primera esclusa de peces fue desarrollada en 1949 por el Ingeniero Borland en un modelo a escala. Se construyó este modelo de esclusa en la presa de Leixlip en el río Liffey (Irlanda). Después de la construcción de esta esclusa fueron construidas otras por la North Scoland Hydro-Electric Board, según el modelo realizado con dimensiones estándar.

Las características y dimensiones normalizadas de las esclusas propuestas por North Scotland Hydro-Electric Board siguen el desarrollo de la primera esclusa (Aitken *et al.*, 1966) y tienen las dimensiones y características que se muestran en la figura 9.1:

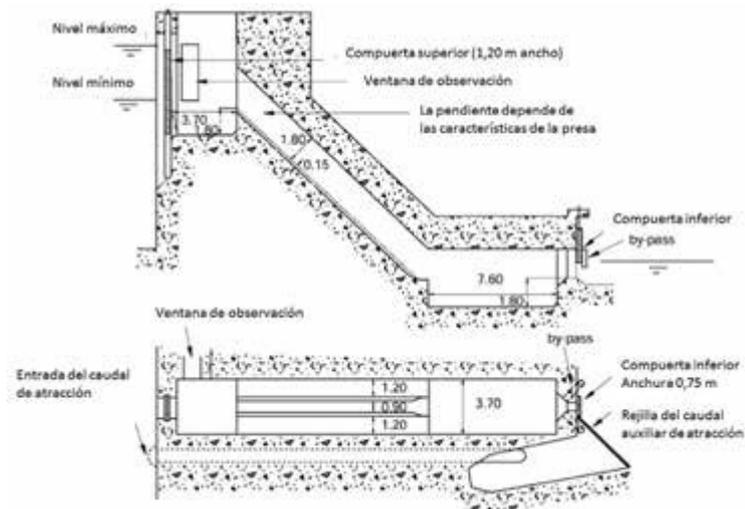


Figura 9.1. Sección transversal de una esclusa de peces (Aitken *et al.*, 1966).

El funcionamiento de una esclusa de peces es muy similar al funcionamiento de las esclusas de navegación de los barcos. Los peces migradores son atraídos hacia la cámara inferior para que entren dentro de la esclusa; pasado un tiempo predeterminado se cierra la compuerta y empieza el ciclo de funcionamiento de la esclusa para ascender al pez.

El ciclo de la operación es de la siguiente manera (figura 9. 2):

Fase de atracción. La compuerta inferior está abierta. Esta compuerta controla el flujo dentro de la escala. El agua fluye en el estanque intermedio formado por la cámara superior, y entonces desciende a la cámara inferior para salir al río. Los peces son animados a entrar a la esclusa por la creación de una corriente descendente dentro de la escala que es transportada por un bypass localizado al final de la bajada (figura 9.1.).

Fases de llenado y salida del pez (Fases 2 y 3). Después de la fase de atracción, que dura un periodo específico de tiempo, la compuerta inferior se cierra y a partir de este momento la esclusa se llena. A partir de este momento el pez, asciende a la superficie del agua en el conducto, subiendo y alcanzando el estanque superior cuando la esclusa se llena.

Fase de vaciado. Después de un periodo determinado de tiempo, la compuerta superior se cierra, la esclusa es gradualmente vaciada por medio del bypass que está abierto todavía. Cuando el vaciado está casi realizado y la compuerta inferior está demasiado baja, esta compuerta es reabierta. El vaciado progresivo de la esclusa por medio del bypass previene de velocidades excesivas que pudieran ocurrir en la entrada de la escala, de otra manera podría repeler a algunos peces que se encuentren cerca de la entrada.

La duración de todo el ciclo generalmente puede estar comprendida entre 1 y 4 horas.

Las esclusas para peces se pueden diseñar con gran flexibilidad y estar adaptadas para diferentes tipos de barreras, normalmente presas y diferentes variaciones de nivel que pueden variar desde unos pocos metros hasta 60 m (Aitken *et al.*, 1966).

Cuando la altura del desnivel entre aguas arriba y aguas abajo del obstáculo es menor a 4 o 5 m, se puede optar por un tipo de esclusa en el que todo el sistema es abierto, incluyendo el estanque de la parte inferior. Tal sistema se muestra en la figura 9.3 (Larinier, 2002):

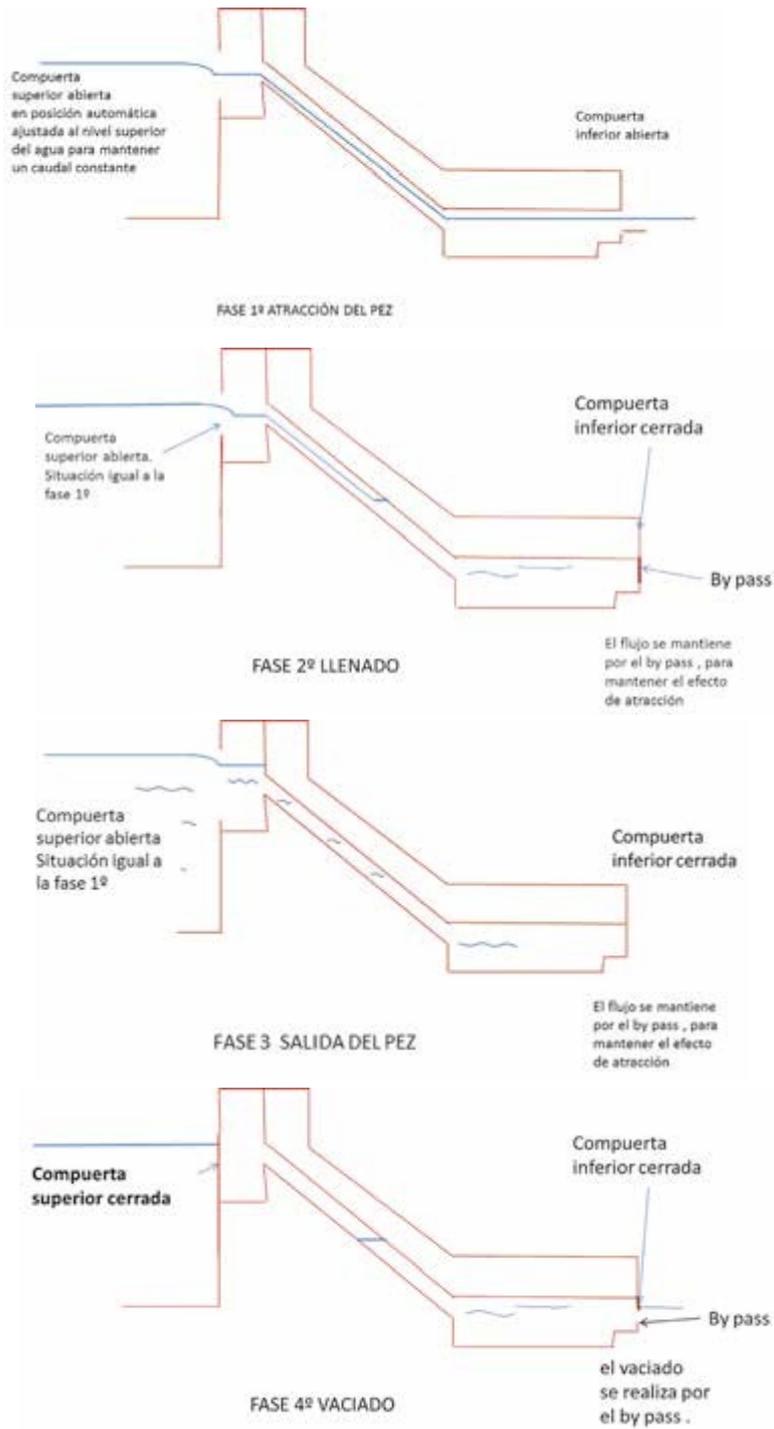


Figura 9.2. Fases del ciclo del funcionamiento de una esclusa.

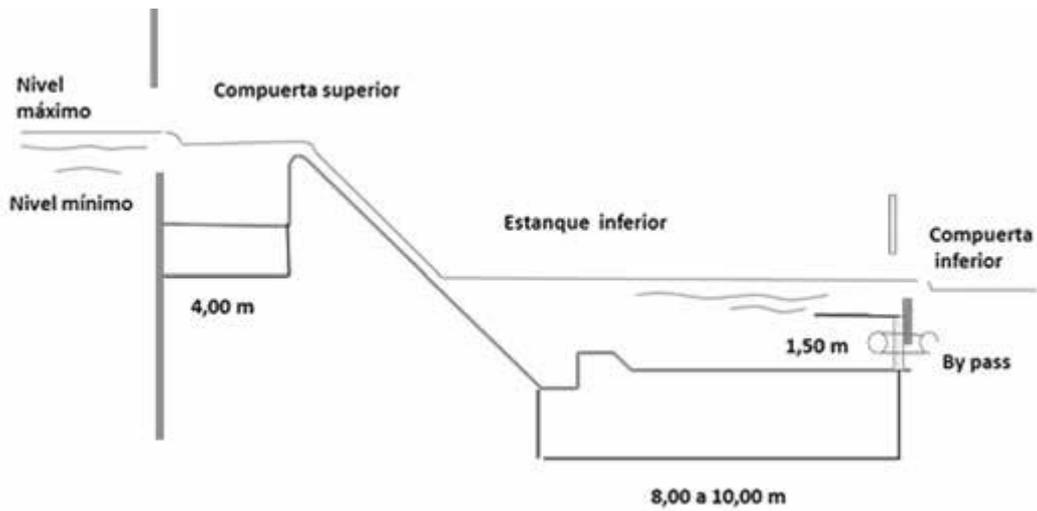


Figura 9.3. Esquema de esclusa abierta para pequeñas alturas.

9.2. EFICACIA DE LAS ESCLUSAS DE PECES.

Como en todos los pasos de peces, un requisito incondicional que debe cumplir la esclusa de peces para que sea eficaz es que sea capaz de atraer al pez. La entrada a la esclusa debe estar bien localizada. Como el caudal que atraviesa la esclusa está limitado a unos pocos cientos de litros por segundo lo más frecuente es que sea necesario proveer un flujo auxiliar de atracción.

Además de la atracción, también se debe tener en cuenta que en el caso de que existan fluctuaciones del nivel aguas abajo de la presa, la compuerta inferior debe ajustarse simultáneamente a esta variación para mantener la suficiente velocidad a la entrada de la esclusa. También, es necesario iluminar el interior de la esclusa para conseguir una transición gradual entre el ambiente exterior iluminado y el interior más oscuro.

La eficacia de cada escala depende mucho del comportamiento del pez. Éste debe permanecer en el estanque inferior durante toda la fase de atracción, siguiendo el aumento del nivel del agua durante el periodo de llenado, y luego salir de la esclusa antes del vaciado.

A este respecto, es necesario asegurar que se mantengan las condiciones de velocidad y turbulencias en el depósito inferior durante la fase de atracción. Por otra parte, la esclusa no debe ser llenada rápidamente para que no se produzca un exceso de turbulencias y arrastres de aire con el fin de conseguir animar al pez a que permanezca en la cámara inferior. Por último, debe existir el tiempo suficiente para que el pez pueda salir y no dar oportunidad a que los peces sean arrastrados a la parte inferior cuando la esclusa es vaciada.

Es muy difícil determinar “*a priori*” las condiciones hidráulicas óptimas para la migración del pez. Las características óptimas de las operaciones durante el ciclo dependen mucho del

comportamiento de cada especie. Por lo tanto, es esencial que la esclusa sea diseñada lo más flexible posible para estas operaciones (en la duración de cada fase del ciclo, el tiempo, el grado de apertura de las compuertas inferior y superior).

A pesar de todas estas precauciones (y especialmente cuando no han sido tomadas) numerosas esclusas o son poco eficientes o bien son totalmente ineficaces. El principal inconveniente de una esclusa es que tiene una capacidad limitada en cuanto al número de peces que puede manejar en comparación con las escalas convencionales. Esto es debido a las discontinuidades naturales de la operación y del volumen restringido de la cámara inferior. El sistema solo “atrampa” peces durante una parte del tiempo; ya que no hay un flujo de atracción significativo disponible que permita al pez detectarlo fácilmente durante la fase de llenado y salida. Algunos peces llegan a la esclusa al mismo tiempo y pueden dejar el área antes de que el ciclo vuelva a la fase de captura. El pez que ha sido atraído al interior de la esclusa puede también dejar la cámara inferior antes de finalizar las capturas.

La mayoría de las esclusas construidas en Francia han sido consideradas ineficaces (algunas de ellas por razones obvias del diseño), algunas de estas esclusas han sido, o serán sustituidas por escalas de estanques sucesivos o ascensores. En Portugal, se han construido cuatro esclusas y todas ellas son muy poco eficaces (Santo, 2005).

Varios autores han realizado modificaciones para reducir algunos de los inconvenientes citados de las esclusas de peces. En Francia Larinier (2002). En USA (Rizzo, 1968 y 1969) en Rusia (Kipper and Mileiko, 1962; Malevanchik y Ryakhovskaya, 1971; Pavlov, 1989) y más recientemente en Australia (Beitz, 1997), algunas de estas mejoras son:

- Los peces migradores son capturados en un gran estanque de espera aguas abajo al final de la esclusa.

- Los peces son empujados dentro de la escala por medio del desplazamiento de la pantalla durante el ciclo de llenado, fijados a un corredor en unos raíles horizontales a lo largo de las paredes del estanque.

- Una pantalla en el suelo se mueve gradualmente hacia arriba simultáneamente al aumento del nivel de agua durante el ciclo de llenado, con ello se fuerza a los peces hacia aguas arriba.

De tanto en cuanto aumenta el grado de sofisticación, parece más recomendable las opciones más sencillas de elegir un ascensor automático o una escala convencional.

9.3. ESCLUSA AUTOMÁTICA DE GARCÍA NÁJERA.

García Nájera (1949, 1953) ideó, a mediados del siglo XX, varios tipos de pasos de peces. Ya ha sido mencionado sucintamente en el capítulo de escalas de ralentizadores la ingeniosa escala denominado “escala de freno hidráulico”.

En este capítulo vamos a describir, también resumidamente, un tipo de esclusa en la que se presenta la ventaja de poder automatizar el funcionamiento por medio de un ingenioso sistema hidráulico basado en un sifón, por medio del cual se abre la compuerta que vacía la esclusa, que posteriormente se llenará simplemente por gravedad.

Este modelo de esclusa no es el primero que el autor desarrolló; previamente en 1943 (García Nájera, 1943) ideó y desarrolló la denominada “Esclusa vertical o de pozo intermitente, que el lector puede consultar en la publicación mencionada.

De las dos esclusas ideadas por García Nájera (1943, 1953) se ha preferido describir el segundo tipo, es decir la esclusa automática. La elección de la segunda esclusa es debido a que además de tener un funcionamiento más sencillo, fue ideada posteriormente a la primera esclusa, por lo tanto éste segundo diseño se realizó con la experiencia del primero.

En la figura 9.4., se muestra la sección de la esclusa.

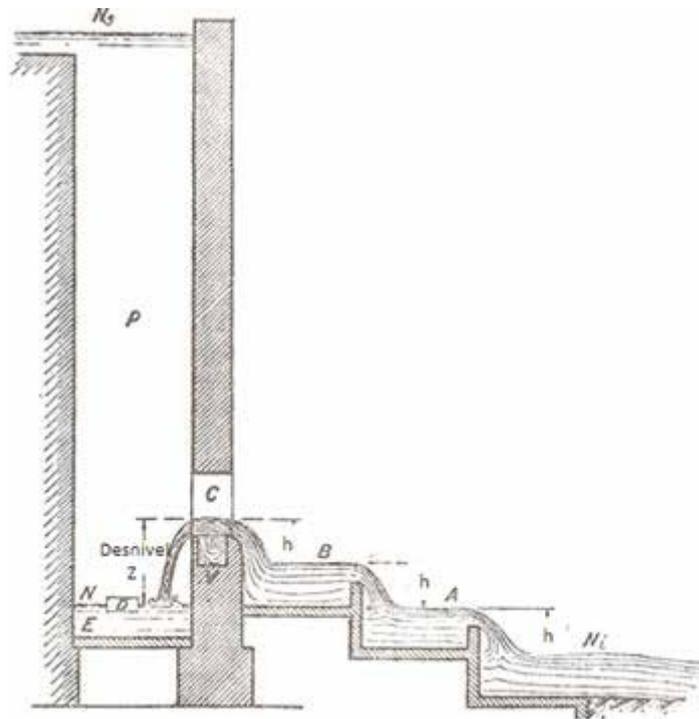


Figura 9.4. Esclusa de García Nájera (1953).

Como se aprecia en la figura 9.4, el agua procedente de la canalización “V”(que previene del embalse) vierte por ambos lados del muro a través de lo que el autor define como “vertedero- trampa”. El agua que vierte a la derecha cae a un conjunto de artesas, similares a las de una escala de artesas, por donde el pez asciende hasta alcanzar el vertedero “C”, a partir de aquí el migrador cae a la esclusa en “E”. El autor pensó que estos pasos estarían destinados

al salmón, y por esta razón propuso una diferencia de cotas entre artesas de 0,5 m, en realidad, la esclusa puede ser válida para cualquier especie. La altura de desnivel entre artesas dependerá de la especie objetivo, por eso se le ha asignado el valor genérico “h”. La profundidad “J”, dentro de la esclusa, es relativamente pequeña para impedir que el pez pueda saltar y regresar a las artesas. El vertedero “D” es un vertedero como se muestra en la figura 9.5.

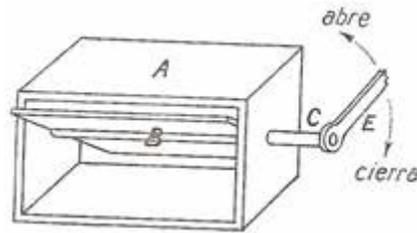


Figura 9.5. Vertedero de compuerta giratoria.

Por este vertedero-aliviadero se evacua el agua que está por debajo del nivel de C y que de no existir, se quedaría dentro del depósito “P”. El funcionamiento se tiene que sincronizar con “la compuerta trampa”, por eso el autor lo conecta con la cadena “C” de la figura 9.9.

El “vertedero trampa” presenta la particularidad de verter el agua para las dos direcciones es decir para las artesas y para la esclusa. En la figura 9.6., se aprecia la sección de este vertedero. Se ha modificado la altura del desnivel hacia la esclusa porque la altura de 0,70 m es pequeña para algunas especies de mayor capacidad de salto (salmónidos), en su lugar se ha dejado con una altura paramétrica en función de cada especie (Desnivel Z).

El agua procedente de la canalización vierte por la pared “G” hacia las artesas. En este caso el perfil “F; G” es parabólico y así facilita el vertido con mayor cantidad de caudal. Por el lado de la esclusa es todo lo contrario, por lo que el pez no puede saltar, de aquí el nombre de “vertedero trampa”.

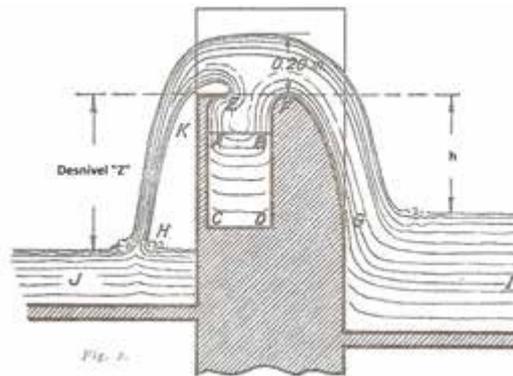


Figura 9.6. Vertedero de alimentación de agua a la esclusa y a la escala.

Como se aprecia en la figura 9.6, el borde “E” presenta un pequeño entrante (entrante de Borda) con objeto de que, al contrario del otro lado, la lámina se despegue completamente, para lo cual tiene que asegurarse que exista ventilación inferior. Según las experiencias que se realizaron en el Laboratorio de Hidráulica Torrencial del Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, el coeficiente de salida es $n = 0,77$. Por lo tanto:

Dónde:

Q , es el caudal (m^3/s).

S , es la superficie del vertedero (m^2).

h_v , es la altura de vertido (m).

B , es la longitud del vertedero (m).

El autor recomienda, entre otros consejos, que el entrante “E” sea de tres centímetros, y el espesor A-K, el menor posible.

Es importante que la lámina vertical E H este perfectamente ventilada, por el contrario en la vertiente F G debe impedirse completamente el acceso del aire.

En la sección “C” se instala una compuerta automática que cerrará la esclusa para que una vez que los peces hayan entrado dentro de la esclusa, la compuerta se cierre y entre el agua dentro de la misma, y así se eleve hasta el nivel superior del río por encima de la barrera y los peces puedan salir al río. Esta compuerta presenta la cualidad de tener dos hojas que giran en sentidos opuestos, es decir que una hoja gira en un sentido y la otra en el contrario.

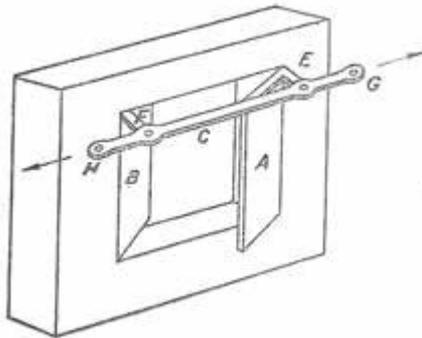


Figura 9.7. Compuerta de la esclusa

La citada compuerta se muestra en la figura 9.7. Las dos hojas están unidas por una biela, por eso el esfuerzo necesario para abrirla disminuye notoriamente. En la figura en perspectiva, la hoja “A” se abre hacia fuera y la hoja “B” hacia dentro, ambas están unidas por las manivelas “E” y “F” y la biela “C”, que les obliga abrirse o cerrarse simultáneamente. El cierre de la compuerta se realiza cuando la esclusa está vacía con lo cual basta un pequeño contrapeso que tire de “H” y venza la fuerza “G”.

La compuerta estará situada sobre el umbral exterior del vertedero trampa (ver figura 9.9).

Por lo tanto, la esclusa tiene una compuerta automática adosada al paramento de la presa, (ver figura 9.4), la sección de la esclusa en el que N_i y N_s representan respetivamente los niveles del agua en el río y en la parte superior de la presa.

Por medio de los estanques los peces pueden alcanzar el “vertedero trampa C”. Al dar el último salto y trasponer el vertedero “V”, los peces caen dentro de la esclusa, en el “pozo P”

adosado a la presa, cuyo nivel superior N_s es el mismo que aguas arriba de aquélla, cuando la compuerta compensada, situada en C y no representada en la figura 9.8, está cerrada y el pozo lleno. Cuando la compuerta está abierta, el nivel dentro de la esclusa es el "N", situado por debajo del nivel de "C" en la altura que hemos definido como "Desnivel Z" (figura 9.6), el nivel se mantiene por el agua que se vierte hacia adentro y por el aliviadero "D" provisto de una rejilla que impide la salida de los peces. Con las condiciones que se han impuesto, el pez no puede salir del pozo "P", hasta que llegue el momento en que por cierre simultáneo de la compuerta automática y del aliviadero "D", toda el agua que sale por el vertedero "V" y que se repartía en las dos láminas exterior e interior, caiga enteramente hacia adentro; el pozo "P" se llenará hasta alcanzar N_s , y entonces los peces podrán ascender al nivel superior de la presa.

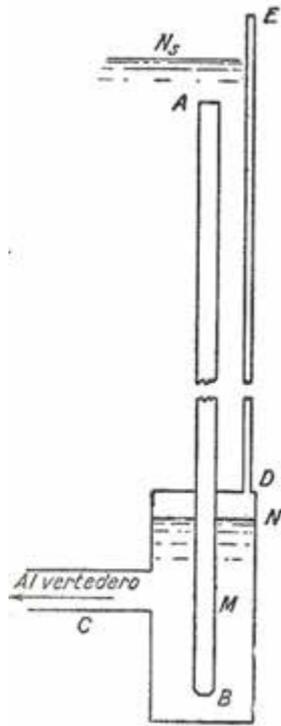


Figura 9.8. Sistema de alimentación del caudal al vertedero.

Para que el pozo "P" pueda llenarse, es necesario tomar el agua de alimentación del vertedero del nivel superior N_s . Esto se consigue, según se aprecia en la figura 9.8, por medio del tubo "A, B" que termina cerca del fondo del depósito "M", del que arranca el tubo "C", que conduce el agua al vertedero y un pequeño tubo "D, E" sirve de conducto de ventilación. La boquilla "B" se dimensionará de tal forma que por ella salga la cantidad de agua precisa para el vertedero, siempre en función de la carga correspondiente al desnivel de cotas (N_s-N). El autor cifra en 150 l/s, el caudal adecuado, si bien esta cifra deberá ser revisada para cada caso en concreto. El tubo "C" también se calcula de tal forma que esta misma cantidad de agua pase por él según el desnivel que haya entre N y el vertedero.

Por lo tanto, mientras la compuerta esté abierta, el nivel en el depósito "M" estará en "N"; pero cuando se produzca el cierre, el pozo "P" podrá llenarse hasta alcanzar "N_s". El tubo "A,-B" debe ser de un diámetro tal que el agua no adquiera velocidades excesivas.

En la figura 9.9., se representa en perspectiva el vertedero trampa "A" y la compuerta. Un flotador, colocado dentro del depósito "F", tira por medio de la cadena "C" de la biela "B", que manda las hojas de la compuerta, produciendo la apertura de ésta y la elevación del contrapeso "D" cuando se llena "F" por medio del grifo "I", pero en cuanto que el depósito se llena, un sifón situado en él se ceba y produce su vaciado, lo que tiene por consecuencia que al bajar el contrapeso "D" cierra la compuerta. Las aletas "G" y "H" tienen como finalidad guiar la lámina exterior del vertedero.

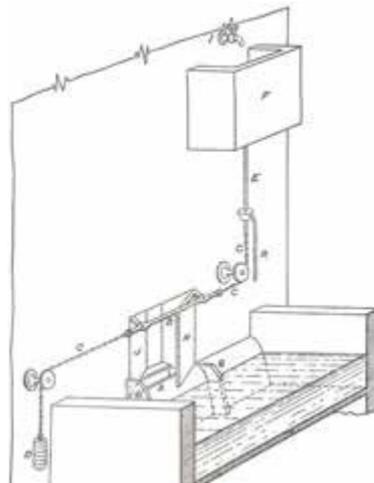


Figura 9.9. Vista en perspectiva del muro exterior de la esclusa.

A continuación se explicará el sistema combinado de sifón y flotador que permite crear el ciclo de llenado y vaciado de la esclusa.

En la figura 9.10 se muestra una sección del depósito "F" de la figura 9.9.

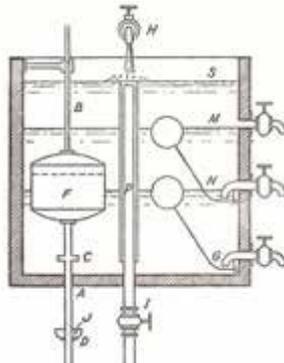


Figura 9.10. Depósito con el flotador y el sifón.

En este depósito además del flotador “F” encargado de tirar de la cadena que abre la compuerta, está el sifón “P” formado por dos tubos coaxiales, que se ceban cuando el nivel del agua alcanza el nivel “S”. Como se aprecia en la figura 9.10, aparecen tres grifos, teniendo los dos grifos inferiores válvulas de flotador.

El recorrido del flotador “F” está limitado por los dos topes que aparecen en la figura con las letras “C” y “D”, de tal manera que los niveles en los que se mueve el flotador son respectivamente “M” y “N”. Cuando el depósito está vacío, el tope “C” estará en contacto con el fondo, por lo tanto la compuerta estará cerrada a causa de la acción del contrapeso “D”; mientras tanto las válvulas de los grifos “N” y “G” estarán abiertas.

Por “H”, tomando del nivel de la presa, está cayendo agua constantemente en cantidad superior a la que puede evacuarse por cada uno de los grifos “M”, “N” y “G”, de manera que el depósito irá llenándose hasta que al alcanzar el nivel “N”, se cierra la válvula “G”. A partir de este momento el flotador “F” comenzará a ascender tirando de la cadena “C” de la figura 9.9, comenzando a abrir la compuerta, que se abrirá completamente cuando el nivel del agua en el depósito esté en “M”, en este momento la válvula del grifo “N” quedará cerrada. El flotador “F” ha llegado a su máxima altura porque queda retenido por el tope “D”, estando la compuerta totalmente abierta, y así continuará hasta que al llegar al nivel a “S”, se ceba el sifón “P”, por el cual puede pasar una cantidad bastante superior a la que da “H”, el depósito se vaciará rápidamente, con lo que el flotador, volviendo otra vez a su punto más bajo, permitirá que, por la acción del contrapeso “D” se cierre nuevamente la compuerta. La situación es entonces la inicial, y así el ciclo vuelve a iniciarse.

El autor expone que la regulación de los tiempos en los que la compuerta está abierta y la duración de las operaciones de apertura y cierre, es muy sencilla. La compuerta está cerrada mientras que el nivel del agua en el depósito alcanza la línea “N”, y el tiempo en ello invertido depende exclusivamente del agua que entra por “H” y de la que sale por “G”, por lo tanto si por “H” entra un caudal constante, bastará abrir o cerrar el grifo “G” para que el tiempo en que la compuerta esté cerrada sea más o menos corto. Teniendo en cuenta que la publicación es del año 1953, hoy en día la apertura de los grifos se realizaría con sistemas automáticos de regulación, como por ejemplo los sensores de nivel y las válvulas de apertura automática.

Con el nivel “N”, la compuerta empieza a abrirse y quedar completamente abierta cuando llega a “M”, pero como el grifo “G” ha quedado cerrado, el tiempo que dura la apertura sólo dependerá de la diferencia entre las cantidades de agua que entra por “H” y sale por “N”. Al llegar el agua al nivel “M”, la compuerta está completamente abierta y las válvulas de los grifos “G” y “N” cerradas. La compuerta estará abierta hasta que el agua llegue al nivel “S”, que como se ha comentado anteriormente a partir de este momento empezará el sifón a funcionar vaciando el depósito, este tiempo también se regulará en función de la apertura de los grifos, finalmente la operación de cierre queda también regulada sin más que abrir o cerrar más o menos la llave “I” del sifón “P”. Hoy en día se podrá regular automáticamente estos mecanismos, si bien el principio del funcionamiento sería el descrito por el autor.

Además de todo lo expuesto, García Nájera añade varios ingenios más. El primero consiste en una “rejilla–flotador” que obliga a los peces ascender y así no se quedan en el fondo del depósito, y el segundo consiste en un diseño de un canal colector para el descenso de los esguines que se podría extender a cualquier especie.

Como se puede comprobar gran parte de los mecanismos que ideó García Nájera (1953) tendrían que ser estudiados con mayor detalle, como por ejemplo el automatismo de apertura y cierre de válvulas que hoy en día se realizaría con los medios tecnológicos existentes, en el caso de que se construyera esta esclusa.

9.4. ASCENSORES PARA PECES.

Los intentos de conseguir que los peces remonten en ascensores o esclusas en España se enumeran a continuación:

En el río Miño se construyó un funicular para elevar peces, lamentablemente este dispositivo no ha llegado a ser eficaz.

En el río Ebro en el municipio de Flix en la provincia de Tarragona se construyó una esclusa para la navegación y se pensó en su momento que podría ser utilizada por los peces para remontar la presa, sin embargo según Elvira *et al* (1989) en el año 1989 la esclusa no funcionaba.

Se ha construido una esclusa para peces en el río Duero en Gormaz (Soria) y un ascensor para peces en el río Bidasoa en Vera de Bidasoa (Navarra) (Sanz Ronda *et al* 2013).

En el azud de Olid del río Teverga en la Comunidad Autónoma de Asturias se ha construido un ascensor que será descrito más adelante.

9.4.1. Funcionamiento del ascensor.

Un ascensor para peces es un sistema mecánico que primeramente capta a los peces en un recipiente, con la forma y tamaño adecuado, ubicado en la base de la barrera, para posteriormente elevarlo y vaciarlo aguas arriba por encima de la barrera.

Como en cualquier tipo de escala se prevé un caudal auxiliar de agua que atraiga a los migradores hacia el estanque trampa; ellos son atrapados en una jaula de malla de alambre con un dispositivo de no retorno y con el fondo en forma de tanque de transporte. Inmediatamente aguas abajo existe un mecanismo de pantalla vertical que es operado como un rastrillo para evitar que otros peces entren a la cámara durante la fase de elevación del tanque. Un cabrestante eléctrico soportado por una estructura de hormigón o metal, es usado para levantar el tanque. Los peces son descargados aguas arriba por el volteo del tanque o por el uso de una tolva que es volcada y suelta al pez que cae al embalse.

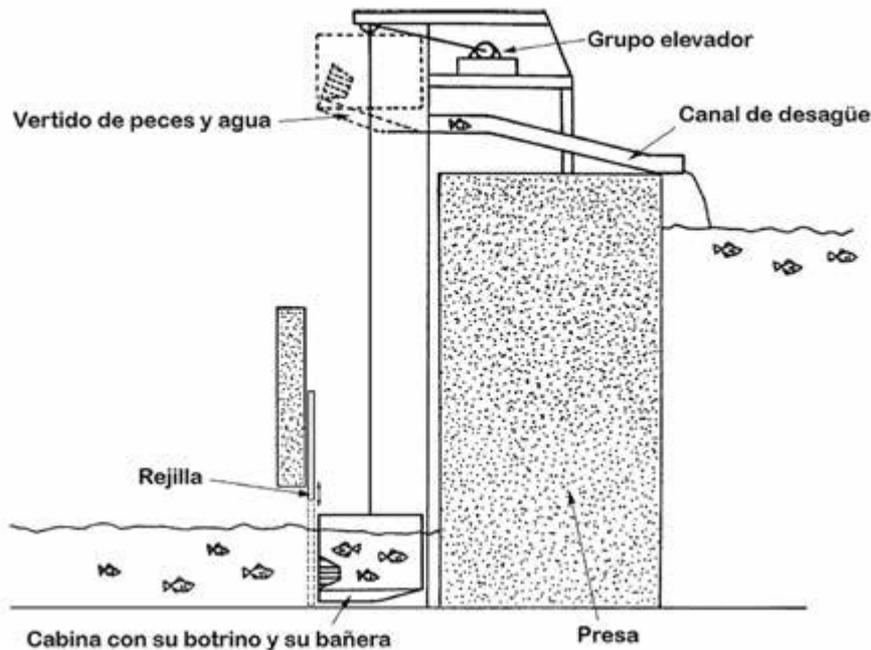


Figura 9.11. Esquema de ascensor para peces (Fuente: Martínez de Azagra, 1999)

La retención de los peces antes de ser izados se puede realizar de dos maneras:

- Tanque trampa tipo butrón, en donde una vez que ha entrado no puede salir.
- Sistema mecánico de compuertas que van agrupando a los peces. Estas compuertas se cierran para aislar los peces en el estanque elevador, una vez que éste ha terminado su ciclo, las compuertas se abren para permitir el paso a nuevos peces.

La elección de uno u otro método depende de la especie y la facilidad de uso. La trampa se utiliza más para poblaciones de peces no muy numerosas ya que en cada izada no se elevan más de varias decenas de ejemplares y con especies que no sean muy delicadas o puedan fácilmente dañarse o estresarse. Este método está indicado para especies de salmónidos (salmón, trucha, reo), pero no es recomendable para el sábalo y saboga. Cuando los peces no tienen estas características entonces este tipo de ascensor no es recomendable y se debe optar por el método de sistema mecánico de compuerta.

Hay dos maneras de descargar los peces. Ya sea directamente desde el tanque hacia una tolva, o, si el ascensor no está incorporado dentro de la parte superior del muro, por medio de un canal conectado hacia el embalse.

Localización del ascensor.

El criterio de elección para la ubicación del ascensor es idéntico a cualquier otro tipo de escala. La localización de la entrada depende de las condiciones del sitio. El flujo de atracción debe ser suficiente en relación al caudal del río para mantener un desnivel desde

la entrada con el río de 0,2 a 0,3 m, válidos para la mayor parte de las especies y para motivar la entrada del pez.

En el caso de elegir el sistema de tanque-trampa se debe usar en la sección inferior del ascensor una pequeña escala de estanques o de ralentizadores. Así se consigue asegurar una profundidad mínima en la trampa.

Caudal suplementario.

Toda o parte del agua puede ser suplementaria hacia el estanque de espera. Cuando el flujo necesita atraer al pez entonces no debe producirse una velocidad alta en la trampa o en el estanque de espera; en este caso el flujo debe ser dirigido hacia el estanque. Si el ascensor tiene el sistema de captura tipo trampa-tanque el agua es inyectada al tanque de captura aguas abajo del dissipador de energía. Si el contrario el ascensor tiene el sistema de compuerta mecánica, el agua debe inyectarse por varios puntos de alimentación, una parte aguas abajo del tanque y otra parte a través de una de las paredes del estanque. Se debe inyectar a través de una rejilla con velocidad inferior a 0,40 m/s

Trampa y estanque de espera (jaula).

El tamaño total de las estructuras depende de varios criterios:

El volumen de agua es aproximadamente de 15 l/kg de pez. En el caso de la trucha corresponde a 5 o 15 l por pez y 80 a 150 l por ejemplar de salmón de atlántico o trucha de mar y alrededor de 30 litros por ejemplar de alosa.

Las dimensiones mínimas de la estructura (longitud, anchura y profundidad) deben ser:

- Salmón: 2,5 m x 1,5 m x 1 m (3,75 m³).
- Trucha: 1,5 m x 1,0 m x 0,8 m (1,2 m³).
- Sábalo 5,0 m x 2,5 m x 1,5 m (19 m³).

Se debe mantener una velocidad mínima de 0,6 a 1,0 m/s a la entrada del orificio para atraer el pez.

La trampa o jaula consta de una jaula-butrón en la entrada, de tal forma que el pez puede entrar pero no puede salir.

La máxima velocidad dentro del estanque de espera debe ser 0,3 a 0,6 m/s, dependiendo de las especies.

El depósito del ascenso es propiamente el tanque que se eleva a la parte superior del muro. El volumen mínimo debe ser tal que permita un volumen de 6 l/kg de pez, por lo tanto 2 a 6 litros por trucha, 30 a 60 l, para el salmón del Atlántico y el reo, y 10 litros por sábalo. Las dimensiones mínimas del depósito deben tener en cuenta el tamaño del pez. La longitud mínima debe estar entre 1,5 m y de 1,0 m y la profundidad mínima entre 0,3 y 0,2 m para el salmón y la trucha respectivamente.

En el caso de la saboga, las dimensiones mínimas del depósito están determinadas por el número máximo de peces que probablemente necesiten ser elevados en los momentos de

máxima emigración. Las dimensiones mínimas basadas en el tamaño del pez son totalmente inapropiadas porque llega un gran número de peces en los momentos picos de la emigración.

Los estanques pequeños (300 - 800 l) en ascensores para salmónidos pueden ser vaciados fácilmente por medio del volteo del estanque. Los depósitos grandes necesitan de una compuerta de vaciado. Se tiene que ser muy cuidadoso en el diseño y acabado del depósito para evitar daños (esquinas redondeadas, superficies no rugosas, etc)

Condiciones que deben cumplir las rejillas de las trampas y compuertas.

El tipo y luz de los huecos de la pantalla, donde se inyecta el caudal de atracción para el confinamiento del pez en la trampa de espera (jaula) o en la compuerta mecánica depende de la especie del pez y de su tamaño. También, se tienen que tener en cuenta las operaciones de limpieza y el manejo de la pantalla. Es preferible que las barras tengan sección circular a sección rectangular.

La luz entre las barras debe ser lo suficientemente pequeña para parar a los peces pequeños. Para los salmónidos el espacio entre las barras debe ser equivalente a la décima parte de la longitud del pez que va a ser retenido.

Los valores máximos de la luz de la rejilla son:

e = 4,0 cm para el salmón atlántico y la trucha.

e = 3,0 cm para el sábalo.

e = 2,0 cm para la trucha común.

e = 2,5 cm para la lamprea marítima.

e = 0,5 cm para las anguilas en su migración ascendente.

La luz de la rejilla o la distancia entre las barras también tiene que ser la adecuada para que la velocidad del flujo auxiliar de inyección sea como máximo de 0,30 o de 0,40 m/s.

La velocidad de desplazamiento de la compuerta mecánica de rejilla es aproximadamente 5-15 m/min.

Caída del pez en las aguas del embalse.

Una vez que el pez ha sido elevado debe de ser reincorporado al río. En este caso será al embalse aguas arriba de la presa. La incorporación se puede hacer de la siguiente manera:

Caída desde la tolva hasta la lámina de agua del embalse como consecuencia del volteo de la tolva.

El lugar donde se voltea la tolva debe de ser en un punto donde no se produzcan turbulencias o velocidades que arrastren a los peces con poca capacidad de nado hacia la entrada de las turbinas o bien simplemente se desorienten.

La altura de caída no debe superar los 5 m para asegurar que el pez no sufra daños en la caída. También, la tolva debe tener forma circular y las superficies serán lisas para que no provoque roces al pez.

Operación de ciclo.

La duración del ciclo de la operación debe ser adaptada según la migración de las diferentes especies. Para peces con migración análoga a la de los salmones en los que la

migración puede ser individual o en pequeños grupos, la fase de trapeo será desde una hasta varias horas. En el caso de los sábalos que migran en bancos bastantes densos, la duración del ciclo en el momento álgido de la migración debe ser tan corto como sea posible (aproximadamente 10 minutos).

El tamaño del estanque de espera y el tanque también estarán en función del número máximo de peces que puedan llegar fácilmente al ciclo más corto.

Cuidados y mantenimiento.

El ascensor de peces está formado por un conjunto de mecanismos y estructuras, una parte de las cuales se encuentran sumergidas, y requieren un mantenimiento con su consecuente coste, normalmente de mayor cuantía que en otros tipos de escalas.

Ventajas y desventajas del ascensor de peces.

Las ventajas de los ascensores respecto de otros tipos de escalas son:

- Coste menor que una escala convencional cuando la altura de la barrera es mayor a 10 o 12 m aproximadamente. El incremento de altura no implica un aumento significativo del coste del ascensor.
- Las dimensiones generalmente son pequeñas, lo cual hace que la construcción y localización de la estructura sea fácilmente abordable.
- Las variaciones del nivel del agua por encima de la presa no provoca problemas en el funcionamiento del ascensor.

Las desventajas del ascensor en comparación con las escalas convencionales son:

- Costes altos para su funcionamiento.
- Mayor tiempo muerto por las averías y el mantenimiento.
- Baja eficacia por su funcionamiento discontinuo. En el caso de peces pequeños y medianos porque las condiciones de operación exigen el uso de pantallas y rejillas de muy pequeña luz.

9.5. ASCENSOR DEL AZUD DE OLID EN EL RIO TEVERGA (ASTURIAS).

A continuación se exponen algunos datos del ascensor de peces construido en el azud de Olid del río Teverga en la provincia de Asturias de propiedad de la empresa EDP España y Proyecto dirigido por Pérez Guerrero y Pertierra de la Uz (2008).

El azud de Olid tiene como objetivo derivar caudal desde el río Teverga al embalse de Valdemurio en el río Quirós. Esta derivación se realiza mediante un túnel por donde el agua circula en canal abierto la longitud de 4.131 m, con pendiente del 0,00115 m/m.

De las posibles alternativas se ha optado por construir un ascensor debido a las siguientes ventajas:

- El espacio preciso para la implantación del ascensor es reducido
- Durante el periodo de reproducción es más viable dirigir el caudal adecuado al ascensor que el que tendría que utilizarse en el caso de que se hubiera elegido una escala de peces.

- El ascensor exige al pez menos esfuerzo que si tuviera que remontar por una escala de peces. Y también, la salida de aguas se puede realizar en una zona más espaciada y alejada de la toma y compuertas para evitar un posible arrastre de los peces hasta la toma.

Para evitar el acceso al túnel de derivación a Valdemurio se ha dispuesto una rejilla entre la presa y la captación. Por último, el descenso de alevines en época de migración se realiza mediante un tobogán instalado en la compuerta más alejada de la toma.

Se ha escogido una escala de ralentizadores, previo al ascensor, porque en estas condiciones tiene más ventajas que la escala de artesas sucesivas.

El dispositivo del sistema del ascensor se ha realizado para un caudal de 0,48 m³/s para un desnivel entre las láminas superior e inferior de 8,50 m.

En el conjunto de las instalaciones se diferencian cuatro partes principales:

- Artesa de recepción comunicada directamente con el río, que recibe el agua a través de una tubería.
- Un paso de ralentizadores planos entre el plano de agua inferior y el ascensor que permite adaptarse a las variaciones del nivel de agua inferior y evitar la incorporación de cuerpos flotantes al ascensor desde aguas abajo.
- Artesa intermedia ralentizador-ascensor.
- El ascensor propiamente dicho con la altura y dimensiones precisas para garantizar el franqueo del desnivel existente.
- Sistema de salida aguas arriba entre el ascensor y el plano de agua del embalse.

9.5.1. Dispositivos previos al ascensor

Artesa de recepción.

La artesa de recepción tiene las siguientes dimensiones: 3,00 x 1,80 m y 4,35 m de altura siendo su cota de solera la 328,50 m.

Se encuentra comunicada con el río por una ventana abierta en el muro existente de 0,80m de anchura y 2,00 m de altura. Dispone de una compuerta de labio superior de vertido regulable en altura desde la cota 330,00 a la cota 332,00 para adaptarla a las variaciones del nivel de agua bajo del azud.

A esta artesa le llega el agua procedente de los pasos de ralentizadores, y el caudal suplementario aportado por una tubería.

Escala de ralentizadores.

El paso de ralentizadores planos tiene un trazado recto.

Los ralentizadores tienen de longitud total de 1,60 m. La pendiente es como máximo del 20 %.

La sección tipo tiene una anchura interior del canal de 1,00 m y está calculada para un caudal de diseño de 0,50 m³/s. y una lámina de agua menor de 1,00 m.

Artesa intermedia ralentizador-ascensor.

Previamente a la artesa de estabulación se proyecta una artesa intermedia de 1,50 m de anchura y 2,00 m de longitud destinada a favorecer el paso de peces entre el ralentizador y el

ascensor. Esta artesa estará separada de la artesa de estabulación mediante un tabique cuya misión es guiar a los peces hacia el butrón de la jaula, y cuyas dimensiones exteriores se adaptan a las de este tabique. Se dispone en ella, de un vidrio de observación, con el fin de observar el comportamiento de los peces y comprobar si entran con facilidad al ascensor.

9.5.2. Descripción del ascensor.

Antes de que el pez sea ascendido por el ascensor debe atravesar por previos estanques cuya finalidad y características exponemos a continuación (ver figura 9.12.).

Artesa de estabulación.

La artesa de estabulación consta de dos compartimentos distintos: uno para la recepción de la cubeta que constituye la artesa de estabulación propiamente dicha y otro por encima de la anterior para disipar la energía del caudal de diseño.

Sistema de alimentación de caudales y disipación de la energía.

La alimentación de los caudales de cálculo o paso y de atracción o de llamada, se realiza mediante orificios practicados en el marco superior de la toma, en concreto mediante tuberías de 500 mm de diámetro, reguladas mediante válvulas situadas en las tuberías inmediatamente después de la toma.

Estanque disipador.

La tubería de alimentación del caudal de paso se incorpora a un estanque “disipador” de dimensiones 2,00 x 1,20 m. con objeto de que la velocidad sea inferior a 0,30 m/s. Se diseña este estanque con un tabique tranquilizador superior de hormigón, alimentando inferiormente a la artesa de estabulación propiamente dicha. La tubería de alimentación del caudal suplementario discurre por debajo del ascensor y el ralentizador, incorporando su caudal a la artesa de recepción donde se junta con caudal circulante por el ascensor, vertiendo el caudal conjunto de ambas al río y creando un caudal de llamada superior, que atraiga e incite a entrar a los peces al ascensor.

Jaula-Capturadero.

La jaula tiene las siguientes dimensiones: 2,50 m de longitud x 1,60 m de anchura y 1,80 m de altura (ver figura 9.13).

Se incorpora un dispositivo de captura constituido por un butrón metálico antirretorno, cuya abertura exterior de dimensiones 1,00 x 0,90 m., está adaptada a las dimensiones del tabique que la separa de la artesa intermedia, estrechándose hacia el interior y acabando en otra ventana más pequeña de 0,20 x 0,60 m., equipada con un sistema de varillas antirretorno que permite a los peces entrar, pero no salir.

En su parte inferior se dispone de una cubeta de 0,30 m. de altura y unos 800 litros de capacidad que permita conservar una cantidad mínima de agua durante el izado de la jaula para que los peces no se queden en seco.

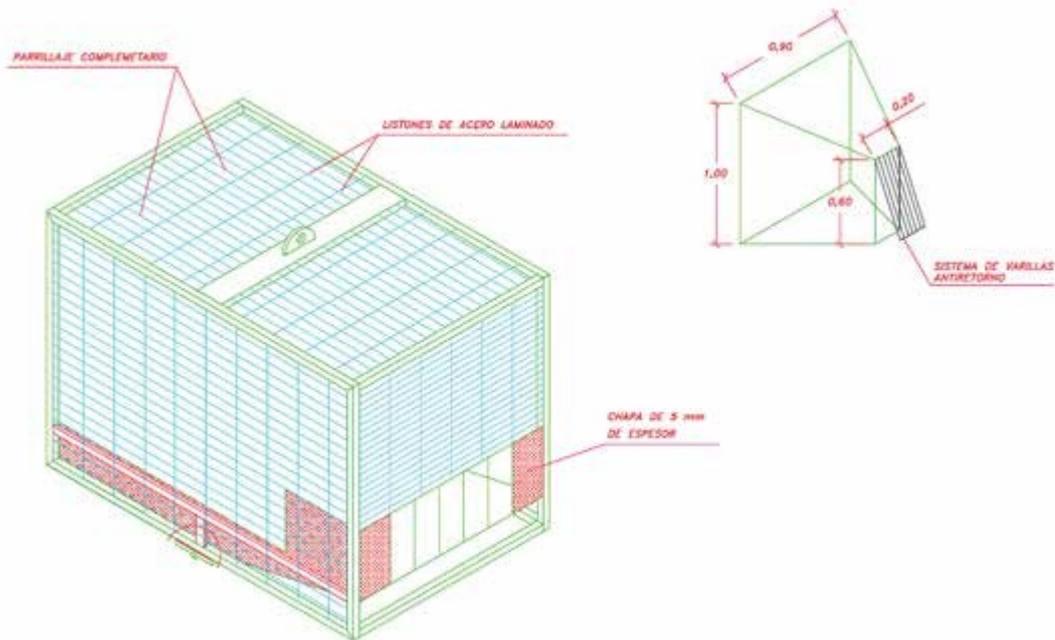


Figura 9.13 Jaula capturadero.

Jaula de elevación.

La jaula de elevación se construye, en su totalidad en acero inoxidable AISI 304, a base de diferentes tipos de perfiles. Como se mencionó en la descripción general de la instalación la jaula elevadora consta de varios elementos diferenciados:

- Bastidor de elevación.
- Cubeta de basculado.
- Eje de vuelco.

El segundo de los elementos que constituyen la jaula de elevación, es una cubeta construida en acero inoxidable AISI 304 de 5 mm de espesor, cuya función es la de recoger agua y peces, para su izado posterior. Tiene en su parte inferior unas piezas similares, a las que equipaba el bastidor, que también servirán para ser atravesadas por el eje de vuelco.

El tercer elemento, es el eje de vuelco que sirve de unión entre jaula y bastidor y que se construye en barra perforada de acero inoxidable AISI 304.

Automatismo del sistema y frecuencia de elevación

El sistema de elevación, cierre y apertura de la reja que impide pasar a los peces cuando se está produciendo el ascenso se realiza automáticamente. Una vez que los peces se encuentran en la parte superior de la presa, los peces alcanzan la lámina del embalse por medio de un canal de descenso. La frecuencia de elevación actual es de 2 veces al día, siendo posible modificar esta frecuencia si se considera necesario.

Tubería tobogán para descarga de peces.

Se ha construido un tobogán para permitir la bajada de los peces. Desde una altura de 6 m, se inicia la descarga a través de una tubería tobogán construida en acero con un embudo en su parte inicial y un tubo de diámetro 400 mm y 28 m de longitud. Esta tubería mantendrá un ángulo de inclinación no superior a 15° sobre la horizontal.

Para soportar esta tubería se prevé unos soportes construidos a base de perfil laminado con una abrazadera circular.

Comentarios sobre el funcionamiento del ascensor de Olid

Por observación directa se ha apreciado que algunos peces son elevados por el ascensor. Se considera que esta observación es insuficiente y se debería realizar un estudio metódico sobre la eficacia del ascensor.

También se debería analizar la posibilidad de incrementar la frecuencia de elevación del ascensor.



Figura 9.14. Ascensor del azud de Olid del río Teverga en la C. A. de Asturias (original de EDP España y Proyecto).

9.6. BIBLIOGRAFIA.

AITKEN P.L., DICKERSON L.H. MENZIES W. J. M., (1966) *Fish passes and screens at water power works*. Proc. Inst. Civ. Eng. , 35: 29-57.

ELVIRA E. NICOLA G.G., ALMODÓVAR A. (1989) Impacto de las obras hidráulicas en la ictiofauna, dispositivos de paso para peces en las presas españolas. Ed. Organismos autónomos Parques Nacionales. Madrid.

BEITZ E., 1997. Development of fishlocks in Queensland. Second National In : Fishway technical report,. BERGUIS A.P., LONG P.E., STUART I.G. (Eds), Rockhampton, Australia, 125-152.

GARCÍA NÁJERA J.M. 1949. *Aplicación del Frenado Hidráulico a las escalas salmoneras*. Ed. I.F.I.E. Madrid. 52 p.

GARCÍA NÁJERA J.M. 1953 *Esclusa salmonera automática*. Ed. I.F.I.E. Madrid.32 p.

KIPPER Z.M., MILEIKO I.V., 1962: *Fishways in hydro-developments of the USSR*. Rubnoe Kjozyaistwo, Moscva, 57 p.

LARINIER M.,2002. Fish locks and fish lifts. Bull Fr. Pêche Piscic (2002) 364 suppl. 102-118 p.

MALEVANCHIK B.S., RYAKHOVSKAYA G.N., 1971. Design of fish ladders at hydrodevelopments. Gidrotech. Stroit., 2: 6-11.

MARTÍNEZ DE AZAGRA A., 1999. *Escala para peces*. Ed. E.T.S.I.A.A Universidad de Valladolid 38 pp. Palencia.

PAVLOV D.S., 1989. Structures assisting the migrations of non-salmonids fish: ed.USSR.FAO Fish. Rome, Tech. Pap. 308, 97 p.

RIZZO B., 1968. Fish passage facilities design parameters for Connecticut river dams. Holyoke dam. Bureau of Sport Fisheries and Wildlife, Boston, Massachusetts, 40 p.

RIZZO B., 1969. Fish passage facilities design parameters. Turners Falls dam. Bureau of Sport Fisheries and Wildlife, Boston, Massachusetts, 33 p.

PÉREZ GUERRERO A., PERTIERRA DE LA UZ J. 2008 Proyecto de construcción de paso de peces en el azud de Olid en el río Teverga perteneciente al salto de Proaza, concejo de Proaza (Asturias).Sin publicar.

SANZ RONDA F.J. *et al.* 2013. Pasos para peces: escalas y otros dispositivos de paso. Ed notas técnicas del CIREF.18 p.

SANTO M. (2005) *Dispositivos de passanges para peixes em Portugal*. ED Direcção-Geral dos Recuros Florestais. 137 pp. Lisboa.

10. CAUSAS DEL MAL FUNCIONAMIENTO DE LAS ESCALAS DE PECES.

10. 1. CAUSAS DEBIDAS A LAS VARIACIONES DE LOS NIVELES DE AGUA.

Como se ha explicado en otros capítulos, para conseguir que la escala sea eficaz, el diseño de una escala de peces necesita mucha dedicación y cuidado. Aun así, puede resultar que la escala falle por distintos motivos. Las fluctuaciones del nivel de las láminas de agua provocan fallos de funcionamiento en las escalas. Parte de la materia perteneciente a este capítulo podría incluirse en el capítulo 2 correspondiente a los estudios previos al proyecto, porque algunas deficiencias se podrían corregir en esta fase. Se ha preferido separarlo porque tiene suficiente entidad e importancia para presentarlo independientemente.

- Estudios de la eficacia de la escala.

Una vez construida la escala o el paso se debe comprobar que es eficaz, es decir comprobar que los peces consiguen remontar la barrera usando la escala para el mayor número de peces y en los periodos que como mínimo sean los imprescindibles, es decir durante el periodo de reproducción.

Como todo trabajo, esta publicación tiene sus limitaciones y no se ha considerado adecuado tratar el estudio de los distintos métodos para el chequeo de la eficacia de las escalas de peces, y no por que no sea importante, que lo es y además cada día serán más necesarios, sino simplemente porque en el planteamiento de este libro se ha preferido centrarse en los pasos y escalas de peces, tema ya de por sí bastante extenso.

Aun así como se ha podido ver en el capítulo 2, correspondiente a los estudios previos para conseguir la franqueabilidad de la barrera se expuso el trabajo realizado por CEDEX en un modelo de escala natural por medio de la utilización de la técnica del "PIT tag". Justamente el uso de esta técnica es uno de los métodos utilizados más comúnmente para comprobar la eficacia de las escalas. De hecho, para poder comprobar la franqueabilidad de varias barreras la Diputación Foral de Navarra en colaboración con la empresa Ekolur ha realizado valiosas e interesantes investigaciones de los movimientos de los peces para atravesar estas escalas

utilizando la técnica consistente en la implantación de los radiotransmisores PIT (log) en los peces, en concreto el modelo F1150 (ATS Inc.; 142.000-142.490 MHz), para realizar el estudio se instalaron en cada escala dos antenas de detección. Los estudios se extendieron a cuatro escalas, obteniéndose un resultado satisfactorio en cuanto al seguimiento de los peces. Los resultados de estos trabajos concluyeron que de las seis barreras estudiadas cinco fueron eficaces.

Este es un simple ejemplo de los estudios que deberían hacerse bien con esta o con otra técnica, como por ejemplo la instalación de jaulas butrones, videos, cámaras infrarrojos, etc., para saber si los peces ascienden por la escala o paso.

10.1.1. Fluctuaciones del nivel entre la escala y el río.

Las fluctuaciones de nivel entre el último estanque y el río, pueden provocar un desnivel tan sumamente grande que el pez es incapaz de superarlo (ver figura 10.1).

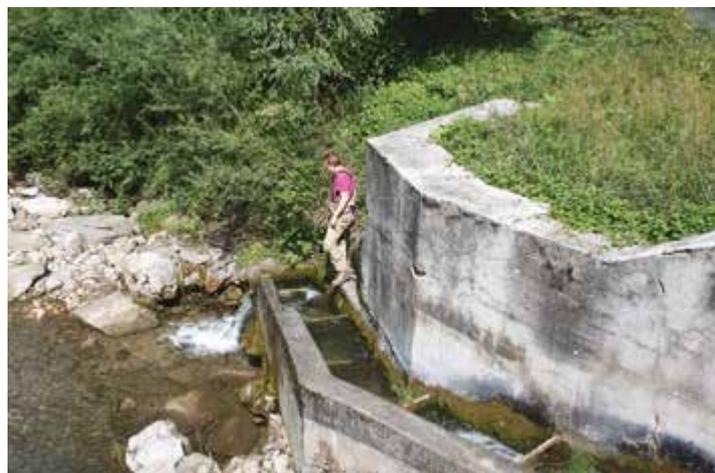


Figura 10.1. El primer estanque está muy alto en relación al río.

Esta deficiencia puede ser debida a una mala apreciación de las variaciones del nivel de la lámina de agua, tanto en la zona de aguas arriba como sobre todo en la parte de aguas abajo de la barrera.

Como se señaló en el capítulo 2 correspondiente a los estudios previos al diseño de la escala, para evitar este inconveniente se debe realizar un estudio hidráulico del nivel que alcanza la lámina aguas abajo del obstáculo, y así determinar cuál será la altura de la lámina aguas abajo para todos los caudales circulantes durante el periodo de funcionamiento (mejor sería extender este periodo a todo el año). A partir de este dato se debe diseñar la escala de la manera adecuada para asegurar la conexión entre la escala y el río y con la altura de desnivel aceptable para los peces.

Es de gran importancia el nivel existente en la lámina de agua por debajo de la barrera (normalmente el nivel por encima de la barrera es más fácil de predecir). Muchas escalas han fracasado porque el último estanque de la escala o bien se encuentra a una altura excesiva para la capacidad del pez o simplemente es imposible que el pez pueda alcanzarla porque está muy alejada del agua.

Estos errores de diseño se han cometido debido a que se desconoce cómo fluctúa la lámina de agua durante los periodos de tiempo necesarios para que la escala sea eficaz. Podría haber ocurrido que se tomó como referencia la cota del agua en el día de la visita y con estas referencias se diseñó y calculó la escala sin tener en cuenta que probablemente el caudal existente el día de la visita era relativamente grande y que producía un nivel de agua por encima de la media. Para conocer las fluctuaciones de la lámina de agua y evitar estos problemas, en muchos casos, se debe de realizar el levantamiento topográfico del río y los posteriores cálculos hidráulicos para los distintos caudales del río.

La fluctuación de esta lámina de agua puede ser de diferentes maneras:

La cota de la lámina inferior varía significativamente como consecuencia de la variación del caudal y de la topografía.

El desnivel entre la escala y el río puede llegar a ser considerable. Esta situación es muy común en ríos sin presas que podrían regular el caudal y con régimen hídrico mediterráneo que además de ser irregular tiene fuertes sequías en verano. Como se ha indicado anteriormente para evitar este error es imprescindible realizar el estudio del modelo hidráulico para conocer la variación de la cota, el modelo se puede realizar con programas hidráulicos tales como: HEC-RAS, IBER, etc.

La solución a este problema es construir, lo que se ha definido en el presente trabajo como un *dique-vertedero regulador de nivel*. Este dique es de una altura mínima, que en cada caso deberá estudiarse, podría tener tan solo 10 cm de altura desde la base, y así conseguir mantener desniveles pequeños entre el primer estanque y el río cuando los caudales son pequeños (ver figuras 10.2, y 10.3) (García Díaz R., y Fernández Orriolabeitia U., 2013).

El diseño y cálculo del dique se realiza con una hoja de cálculo teniendo en cuenta la altura de vertido que se produce en el primer estanque para todos los caudales de cálculo y el caudal que atraviesa el río, debido a que por este dique-vertedero pasará todo el caudal, es decir la suma del caudal que atraviesa la escala más el resto del caudal del río. Con la hoja de cálculo se puede saber la diferencia de cotas entre el vertedero del primer estanque y el río para todos los caudales y que después se conseguirá con la construcción del *dique-vertedero regulador de nivel*.

Como se aprecia en la figura 10.3, en este dique-regulador se han dispuesto un vertedero compuesto de varias alturas de vertido para conseguir que en todo momento y con cualquier caudal no se produzcan grandes desniveles. Por el mismo motivo los desniveles entre los distintos vertederos son muy pequeños para que cuando el flujo caiga desde los mismos, no generen un desnivel excesivo con el río.

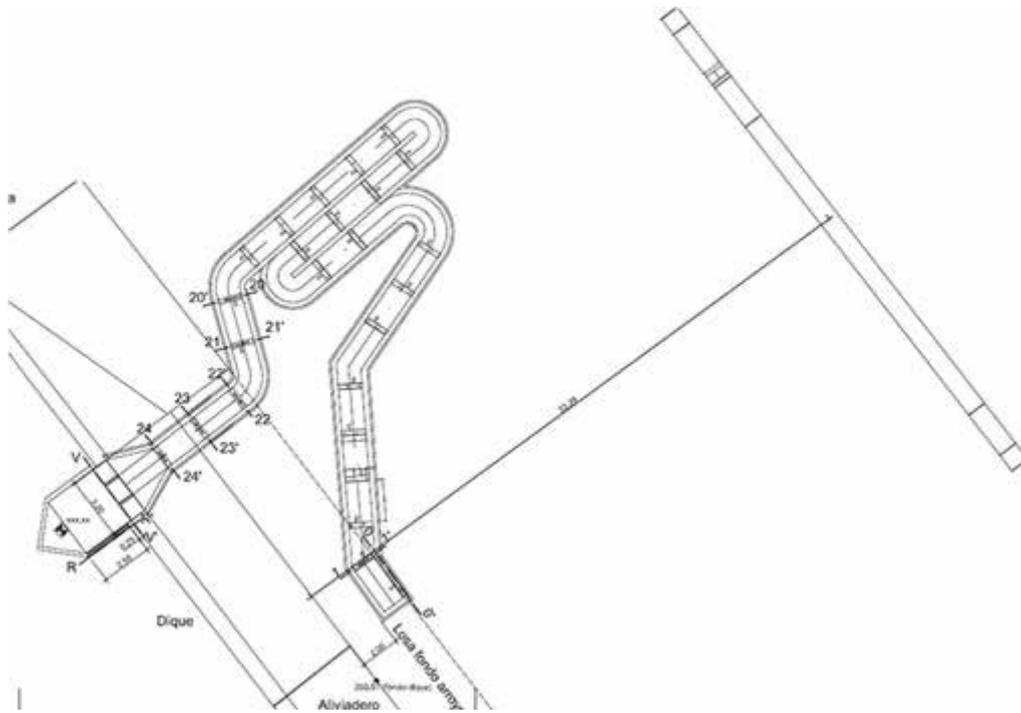


Figura 10.2. Planta general de una escala con el dique-vertedero regulador de nivel

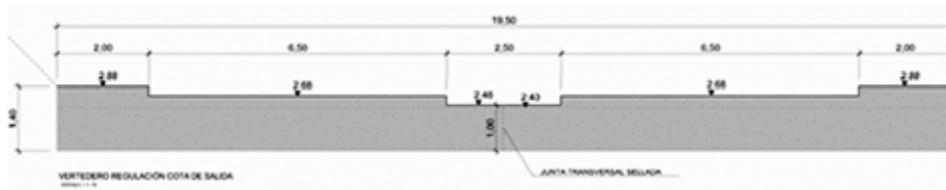


Figura 10.3. Alzado de un dique-vertedero regulador del nivel

Si la escala es de artesas sucesivas, otra solución para evitar grandes desniveles de agua entre el estanque inferior y el río consiste en construir en este estanque, vertederos compuestos de dos o más alturas, para que así la altura de caída del agua se produzca en el vertedero inferior cuando los caudales bajos y también en el superior para los caudales mayores, en ambos casos con la altura de caída adecuada para mantener la atracción del pez (García y Almazán, 2015).

Necesariamente las cotas de estas alturas estarán coordinadas con los niveles del río. Para poder realizar el diseño de manera que se conozcan los desniveles se deben de hacer previamente, de la misma manera que en el caso del dique-nivelador, el estudio hidráulico del río por medio de programas de modelización como el HEC-RAS o el IBER. Con ello se conocen las fluctuaciones del nivel del río para todos los caudales y con estos datos se pueden ajustar los vertederos, por medio de una hoja de cálculo, para que se produzcan los desniveles adecuados. En la figura 10.4, se muestra un ejemplo de estos vertederos.

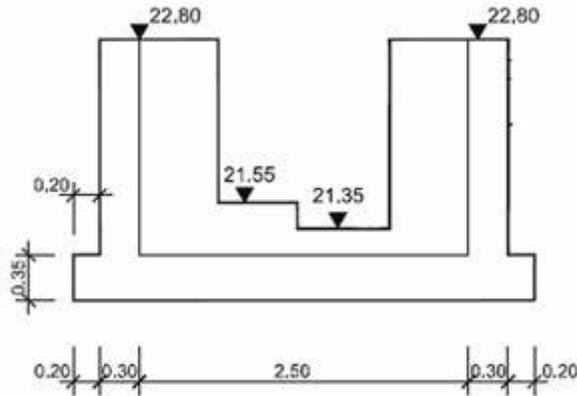


Figura 10.4. Vertedero compuesto del estanque inferior de una escala de artesas.

Como este es el vertedero inferior, en él se tiene que producir “el efecto llamada”. Este efecto se puede conseguir de varias maneras, tal y como se expone más adelante.

Si los caudales mínimos no son muy distintos de los caudales medios, entonces la cota de la lámina de agua disminuirá poco, en este caso solo se tendrá en cuenta una ligera disminución de la cota y en principio no sería necesario realizar el estudio hidráulico.

La lámina inferior corresponde al remanso de una presa o azud situada aguas abajo de la barrera de estudio. En este caso la variación de la cota estará determinada por la variación de la cota del embalse inferior, pudiéndose ser esta variación pequeña o grande. En cualquier caso viene condicionada por la gestión de la barrera inferior, y tampoco en este caso es necesario realizar el estudio del modelo hidráulico.

10.1.2 Fluctuaciones del nivel aguas arriba.

Para conseguir que la entrada de agua a la escala sea en la cantidad y en el nivel adecuado con el mayor número de caudales existentes en el río, se deberá tener en cuenta las variaciones del nivel aguas arriba de la barrera. Dependiendo de estas fluctuaciones se procederá a incorporar un sistema de vertederos adecuados.

Variación grande del nivel aguas arriba (por ejemplo entre 0,5 y 1 m) y caudales mínimos no demasiados pequeños. La solución frecuentemente utilizada es la instalación de un vertedero de sección rectangular con la base relativamente pequeña para que las variaciones

2. *Excesivo desnivel entre estanques.*

En algunos casos se han construido la escala con un desnivel entre estanques excesivo. La opción más segura es elegir el desnivel lo más bajo posible porque así permitirá el paso al mayor número de peces, tanto en especies como en tamaños.

3. *Tránsito sencillo.*

El tránsito debe ser tranquilo, sin estrés, lo cual implica que los estanques tengan unas dimensiones mínimas, que los desniveles entre los estanques no sean excesivos. La salida se realizará sin heridas, para ello, las aristas de los vertederos por donde nadaran los peces serán redondeadas. Tampoco se deben producir agotamientos excesivos, lo cual requiere estanques grandes y desniveles pequeños.

4. *Salida segura.*

Se consigue evitando desorientaciones, arrastres a vertederos o tomas peligrosas.

5. *Funcionalidad durante el mayor número de días.*

La escala debe funcionar imprescindiblemente en el periodo de reproducción. El Conocimiento de los caudales durante este periodo es necesarios para el diseño y dimensionamiento de la escala.

6. *Protectores (rejilla) “antiarrastres” a la entrada del agua en la escala.*

Existen diversos dispositivos para evitar que cuerpos flotantes o arrastres de otro tipo choquen o taponen la escala de peces

Uno de los sistemas más utilizados es la construcción de una rejilla, tal y como muestran las figuras 10.6, y 10.7.

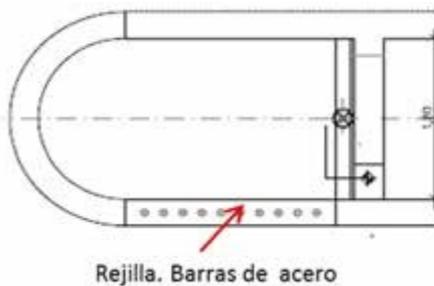


Figura 10.6. Esquema de rejilla de perfil semicircular.

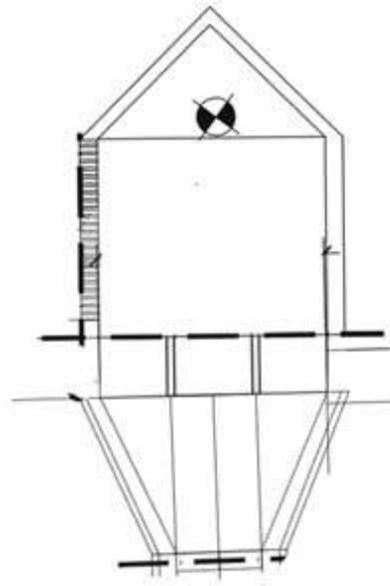


Figura 10.7. Esquema de rejilla de perfil triangular.

Las protecciones constan de una rejilla por la que entra el flujo de agua y por donde sale el pez. Esta rejilla está formada por barras de acero separadas con la distancia adecuada para que pueda salir el pez, en concreto la luz entre barras recomendada es de 25-30 cm.

En la medida de lo posible, los protectores estarán situados en una zona donde la velocidad no sea superior a 0,30 o 0,40 m/s, para prevenir que la entrada del agua en la escala se realice sin que se produzcan obstrucciones con facilidad. Como se muestra en las figuras las rejillas están insertas en un estaque construido para la instalación de la misma. Con ello se consigue independizar la rejilla de la entrada del agua directamente a la escala, orientar la rejilla en la dirección del flujo, evitando una orientación perpendicular que favorecería la obstrucción y ubicar la rejilla en el lateral más adecuado.

La salida de los peces de la escala en su ascenso, que coincide con la entrada del agua a la escala, deberá estar en una zona libre de remolinos y recirculaciones. También es posible instalar un equipo de vídeo para monitorizar, hacer seguimientos y estudios de los ascensos de los peces migradores.

Por otra parte en la zona de salida de los peces de la escala no deben producirse velocidades excesivas porque si bien ocurre que estas velocidades grandes ayudan a limpiar la rejilla existe el peligro de que los peces sean arrastrados aguas abajo.

En el caso de escalas en presas hidroeléctricas es preferible que la ubicación de la salida de la escala esté en un lateral de la cámara de descarga o bien en la orilla del río, en estos casos el acceso a la escala para realizar su mantenimiento será más fácil por su mayor accesibilidad.

Además de esta rejilla es recomendable colocar un “antiflotantes”.

El “antiflotantes” es un flotador colocado transversalmente a la entrada de la escala que impide que lleguen acarreos flotantes a la misma. Con ello se consigue que gran parte de los cuerpos flotantes arrastrados por el río no entren dentro de la escala. Algunos tipos de “antiflotantes” suelen tener un aspecto análogo a los troncos de los árboles para mejor integrarse en el entorno (en algunos casos se pueden usar los mismos troncos de los árboles).

7. Ubicación inadecuada de la escala.

En el capítulo 2, correspondiente a los estudios previos para conseguir la efectividad de la escala, entre otras materias, se trata el tema de la ubicación de la escala, el incumplimiento de las normas expuestas será una de las causas del mal funcionamiento de la escala.

La escala o paso no debe estar situada en zonas donde se produzca sedimentación porque quedaría enterrada.

La mala ubicación de la escala provoca una falta de atracción de los peces. Esta cuestión se tratará detalladamente en el apartado dedicado a la atracción.

8. Caudal de la escala.

Larinier (2002) considera que el caudal de la escala debe cumplir todos los requisitos que se exponen a continuación.

El caudal destinado a la escala o al paso debe ser lo suficientemente grande para competir con el caudal del río durante el periodo de migración. Esta condición es conveniente para conseguir la atracción, pero se debe tener en cuenta la limitación de la máxima potencia hidráulica disipada en los estanques y también la cota de la escala. Es difícil dar un criterio preciso del porcentaje del caudal que debe derivarse a la escala, Larinier (2002) recomienda que generalmente el flujo que atraviesa la escala deba ser aproximadamente entre el 1 y el 5 % (En España este criterio es válido para ríos con mucho caudal).

En los casos en que el paso de peces no está correctamente posicionado, es recomendable que en lo posible se incremente el caudal.

Cuando los ríos sean pequeños, se aumentará el porcentaje del caudal que atraviesa la escala (siendo en algunos casos superior al 50 %) como es el caso de muchos ríos españoles. Si los ríos tienen caudales grandes, entendiéndose por tales aquellos que pueden tener caudales de más de 100 m³/s (muy escasos en España), el caudal de la escala y de atracción (caudal adicional que se suma al de la escala) será el 10 % del caudal mínimo, este valor es usado para el caudal mínimo de cálculo, estos valores varían entre 1 y 5 % de los caudales altos de diseño (normalmente alrededor de dos veces el caudal medio anual).

Se ha comprobado que con un aumento de caudal aumenta la eficacia, si bien es muy difícil cuantificar el beneficio en cada lugar en concreto. Otra opción que mejora notablemente la eficacia, y que en algunos casos es indispensable, es el aumento del número de entradas a la escala. Por tanto el aumento de la eficacia depende tanto del número de entradas como del flujo disponible.

10.3. CAUSAS DEBIDA A LA FALTA DE ATRACCIÓN.

Según los estudios realizados en Francia, la falta de atracción y un inadecuado mantenimiento son las causas más frecuentes de la ineficacia de las escalas (Larinier, 2002). La falta de atracción puede ser debido a distintas razones. En páginas anteriores se han expuesto consejos y condiciones en el diseño de la escala para que el pez se sienta atraído a la escala, el incumplimiento de estas normas pueden originar la ineficacia, pero además de los puntos expuestos anteriormente en la fase de diseño, existen algunas causas más difíciles de distinguir y que expondremos en este capítulo con sus potenciales soluciones.

10.3.1. Caudal de atracción.

Larinier (2002) expone las siguientes consideraciones para el caudal de atracción.

a) Caudal de atracción conducido por tubería.

Cuando un río tiene un caudal de varios metros cúbicos por segundo, solo una fracción de este puede ser encauzada hacia la escala o paso porque si el caudal de la escala fuera muy grande el coste de la misma se incrementaría notablemente y además podría ser contraproducente debido a que el aumento del caudal conlleva un aumento de las turbulencias, lo que perjudica a los ejemplares más pequeños al no poder descansar en los estanques.

En estos casos, es necesario introducir un caudal auxiliar por medio de tuberías a baja velocidad y con un mínimo de aireación, o también con canales a cielo abierto adicionales a la escala. Las pantallas o rejillas son esenciales para que los peces no queden atrapados en el caudal auxiliar. La luz entre las barras de la rejilla deben ser lo suficientemente pequeñas para que el pez no pase a través de ellas, lo cual depende del tamaño y de la especie del pez.

El caudal de atracción es normalmente alimentado por gravedad, después de haber perdido energía en un estanque o en una caída. En grandes instalaciones puede ser viable bombear el caudal de atracción desde aguas abajo.

Si el caudal adicional de atracción se vierte al primer estanque de la escala (el estanque inferior por donde entran los peces), el caudal incrementado debe perder energía, por ello es necesario un estanque para que la energía que posee el flujo quede reducida a los valores comprendidos entre 100 y 150 w/m³. Este estanque puede estar equipado con dispositivos de disipación de la energía cinética tales como vigas verticales, barras de acero o deflectores de hormigón. Para asegurar un buen funcionamiento se debe conseguir el aireado del flujo antes de alcanzar la pantalla.

La velocidad del agua a través de la pantalla instalada a la salida de estos difusores debe ser lo suficientemente baja (< 0,30 o 0,40 m/s) en relación a la velocidad en el paso, y así no afectar al comportamiento del pez migrador. Siempre que sea posible estas pantallas deben también actuar como guías hacia la entrada a los pasos. La rejilla formada por barras de acero tendrá una luz en función del tamaño de los peces (30 mm para los salmones y sábalos y menor para los peces más pequeños).

b) Caudal de atracción conducido en canal abierto.

También se puede generar un caudal de atracción por medio de una canalización a cielo abierto. En principio cuanto mayor caudal de atracción exista mayor será la misma.

Si el caudal de atracción fluye por una conducción a cielo abierto se debe tener la precaución de evitar que el pez intente ascender por este canal y no por la escala, esto es debido a que el pez se puede sentir atraído por el canal de atracción. Para evitar este problema se debe situar la base del canal por donde desemboca el agua a una altura considerablemente grande, más adelante se aportaran datos a esta cuestión.

10.3.2. Velocidad del agua adecuada en el estanque donde entra el pez para conseguir la atracción.

Es esencial mantener una velocidad suficientemente alta en la entrada de la escala. Esta velocidad debe ser compatible con las características de cada especie. Normalmente se toma el valor de 1 m/s como el umbral del valor mínimo para la entrada de la escala para el mayor número de especies. La velocidad media para los salmónidos es de 2 m/s a 2,4 m/s, lo cual corresponde a un salto de 0,2 a 0,3 m desde el estanque de entrada del pez en la escala hasta el río.

Aunque la velocidad debe permanecer alta, se debe prevenir la posibilidad de formación de un resalto hidráulico. Con el fin de asegurar la existencia de una aceleración en la entrada, a veces se modifica la sección transversal para que el flujo adquiera esta aceleración, por este motivo se debe asegurar que la profundidad del agua sea la adecuada en la entrada aguas abajo de la barrera. Además, se debe proveer una balsa suficientemente profunda para que el pez pueda descansar antes de afrontar el ascenso.

La velocidad del flujo en la entrada tiene que ser suficientemente alta con todos los niveles de agua existentes en el río aguas abajo de la barrera, especialmente durante el periodo de migración y con caudales altos.

Cuando aumenta el nivel del agua, por debajo de la barrera, disminuye el desnivel de caída del agua desde la escala, esto provoca una disminución de la velocidad y por lo tanto una disminución de la atracción.

Normalmente, la velocidad del flujo puede ser mantenida manipulando las condiciones de la entrada de la escala, como por ejemplo modificando la sección transversal de la entrada o variando el caudal, dependiendo del nivel del agua en el río aguas abajo de la barrera.

Una solución consiste en la regulación de la velocidad en la entrada ajustando el desnivel de altura de las láminas de agua entre la escala y el río. Para tal fin se construyen dos medidores de profundidad, uno en la compuerta de la escala y el otro se ubica aguas abajo cerca de la entrada al paso. Cuando las variaciones de nivel son significativas, entonces es aconsejable una puerta telescópica con varias secciones.

En los casos en que las fluctuaciones de nivel sean menos frecuentes, la regulación de la velocidad puede ser efectiva con compuertas manuales o incluso con hendiduras en la entrada (ver figura 10.8.).

Estos dispositivos tienen como objetivo el mantenimiento del efecto de atracción en los momentos en que la caída del agua desde el último estanque hasta el río, que disminuye por el aumento de la cota de la lámina del agua en el río, y consecuentemente disminuye la velocidad de caída del agua. Para evitar esta disminución de la velocidad, se instalan estas compuertas de elevación bien automatizadas o manuales, y así mantener la altura de caída del agua el valor suficiente.

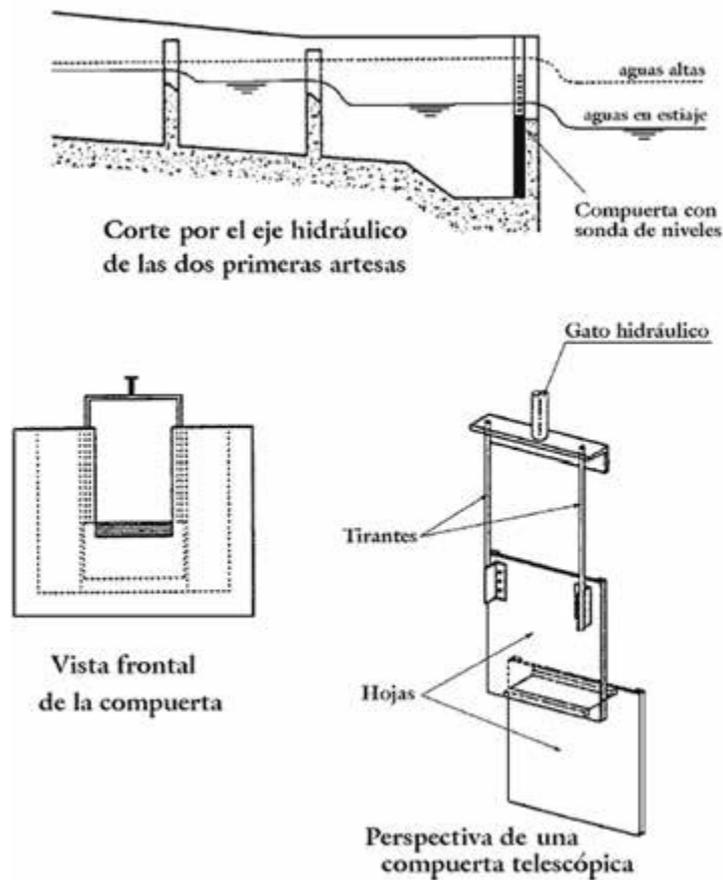


Figura 10.8. Compuerta telescópica para distintos niveles (Original de Larinier 2002)

También se puede conseguir el mismo efecto, construyendo el estanque inferior de la escala con un vertedero compuesto de varias alturas, como el descrito anteriormente y representado en la figura 10.4. Con este método se consigue que cuando los caudales sean bajos, el agua vierta por los vertederos inferiores y cuando sean altos caiga desde el vertedero superior, manteniendo en ambos casos la altura adecuada para conseguir la atracción.

Todo lo comentado hasta el momento resalta la importancia de las condiciones hidráulicas en la entrada de la escala, demostrando la absoluta necesidad de ser consciente del rango de los niveles de agua durante el periodo de migración, tanto aguas arriba como aguas abajo de la barrera.

10.3.3. Falta de atracción por las condiciones del flujo a la entrada a la escala.

Según Larinier (2002) se deben tener en cuenta todas las siguientes indicaciones:

El flujo que sale de la escala o del paso debe ser detectado por el pez desde cierta distancia. La atracción depende de la dirección y del momentum o cantidad de movimiento es decir del caudal por velocidad, de la entrada del chorro.

Es importante que el chorro de agua que sale del paso no sea enmascarado por otras corrientes, recuérdese que cuando el río tiene grandes caudales, el caudal que sale de la escala será relativamente pequeño con respecto del total. El objetivo es que el chorro del caudal procedente de la escala permanezca distinto aguas abajo del obstáculo.

En las barreras producidas por centrales hidroeléctricas relativamente grandes equipadas con varias turbinas, debe ser posible colectar los peces a través de toda la anchura de la central por medio de una galería colectora con algunas entradas localizadas aguas debajo de la barrera por encima del canal de aspiración. Las entradas, normalmente, estarán reguladas por compuertas automatizadas. Las puertas se ajustan para mantener una diferencia determinada de desnivel entre el nivel del agua de la galería y de la lámina de agua del río, por consiguiente la velocidad de caída suele ser más o menos constante. La entrada principal debe ser posicionada aguas abajo de la central y también disponer de entradas secundarias situadas entre las turbinas, donde el nivel de las turbulencias suele ser bajo. Sin embargo no debe haber excesivas entradas, porque la experiencia ha demostrado que en estos casos cuando el pez entra por una, nadará para salir por otra entrada.

También se debe de estudiar la posibilidad de realizar dos escalas, cada una de ellas situadas en cada orilla del río.

Cuando la central hidroeléctrica está situada en un canal de desviación o si es difícil decidir dónde colocar la escala, es preferible instalar la escala en la presa o en la central, se debe realizar un cuidadoso estudio del régimen de los flujos para cada localización y de las operaciones de la central durante el periodo de migración de los peces. El pez puede estar atraído por un flujo continuo procedente de la central hidroeléctrica, se ha comprobado que en estos casos la solución puede ser la construcción de dos escalas, cada una colocada en cada orilla del río.

El uso de *pantallas eléctricas* ha sido empleado en Francia en algunas centrales hidroeléctricas con el fin de que los peces no se introduzcan en sitios inadecuados. Los resultados de estas instalaciones no son definitivos (Larinier, 2002); en cualquier caso estas instalaciones no excluyen la necesidad de los dispositivos para los caudales de atracción.

Cuando se da la circunstancia de que la central hidroeléctrica esté situada a grandes distancias de la presa de donde se toma el agua para su aprovechamiento energético, y por lo tanto los caudales son conducidos por tuberías o por canales, en estos casos no es posible construir la escala a la salida del agua de la central, al menos que la distancia hasta la presa no sea excesiva. Si la única opción es la construcción del paso o escala, es decir no existe la posibilidad de ascensor u esclusa, en estos casos, el funcionamiento eficaz depende totalmente del caudal ecológico que tenga la presa y que pueda alimentar al paso de peces.

Para conseguir la eficacia del paso, además de la ubicación de la entrada de la escala también es necesario situar la salida de la escala, por donde sale el pez aguas arriba del obstáculo, en un lugar en el que no existan zonas con flujos rápidos ni cerca del aliviadero ni de la presa, ni de compuertas porque en estos sitios el pez puede ser arrastrado aguas abajo. Tampoco debe situarse en lugares con aguas quietas o en zonas con recirculaciones. Preferentemente debe situarse al lado de una orilla con pequeñas corrientes.

La entrada del paso o escala debe situarse cerca de la orilla, no solo porque los peces suelen moverse por estos sitios (en ríos con caudal relativamente considerable) sino también porque el mantenimiento, la inspección y la posible monitorización del paso es más fácil dada la mejor accesibilidad al mismo.

Al pie de las turbinas o del aliviadero, el chorro saliente de la escala no debe ser perpendicular al eje del canal, porque el chorro no debe romperse rápidamente. Por lo tanto el chorro de agua debe ser paralelo al curso de agua o formando un pequeño ángulo.

Con el fin de conseguir la atracción de los peces a la escala, siempre que sea posible, es importante regular la salida de los caudales por el aliviadero para que sea de la manera más beneficiosa posible.

Según Larinier (2002) y tal y como se muestra en la figura 10.9, en periodos de alta descarga, siempre que no sea necesario la apertura total de las compuertas, la apertura de éstas deben realizarse reduciéndose el caudal desde el centro hacia los bordes (figura 10.9., A). De esta manera se crea una barrera de turbulencias que impiden el paso de los peces y les obligan a dirigirse hacia la entrada de la escala.

En los periodos de flujos bajos entonces el desagüe debe concentrarse en los lados cercanos a las escalas (figura 10.9. B).

En la medida de lo posible, la barrera hidráulica debe ser la salida del agua de las turbinas, porque en este punto los flujos son turbulentos y forman remolinos. Por otra parte la energía residual que dejan las turbinas son considerables, esta circunstancia también favorece la creación de una barrera natural para los peces. También, se debe evitar que el flujo en forma de chorro saliente de la escala de peces no llegue a la zona de turbulencias donde descargan las turbinas.

En los casos en que las zonas bloqueadas por las turbulencias de los flujos no se mantengan constantes debido a que el funcionamiento de la central necesite cambios, Estas zonas no se deben de utilizar como “zonas de bloqueo” de cara a dirigir el pez migrador hacia la entrada de la escala. Se tiene que evitar situaciones en las que el caudal liberado se hace inadecuadamente y provoquen zonas donde se crean turbulencias, como por ejemplo la mostrada en la figura 10.9 (C), o bien dejar algún vertedero intermedio sin desaguar y por lo tanto no se forma la barrera hidráulica provocando que los peces se dirijan a este vertedero y no a la escala (figura 10.9, (D)).

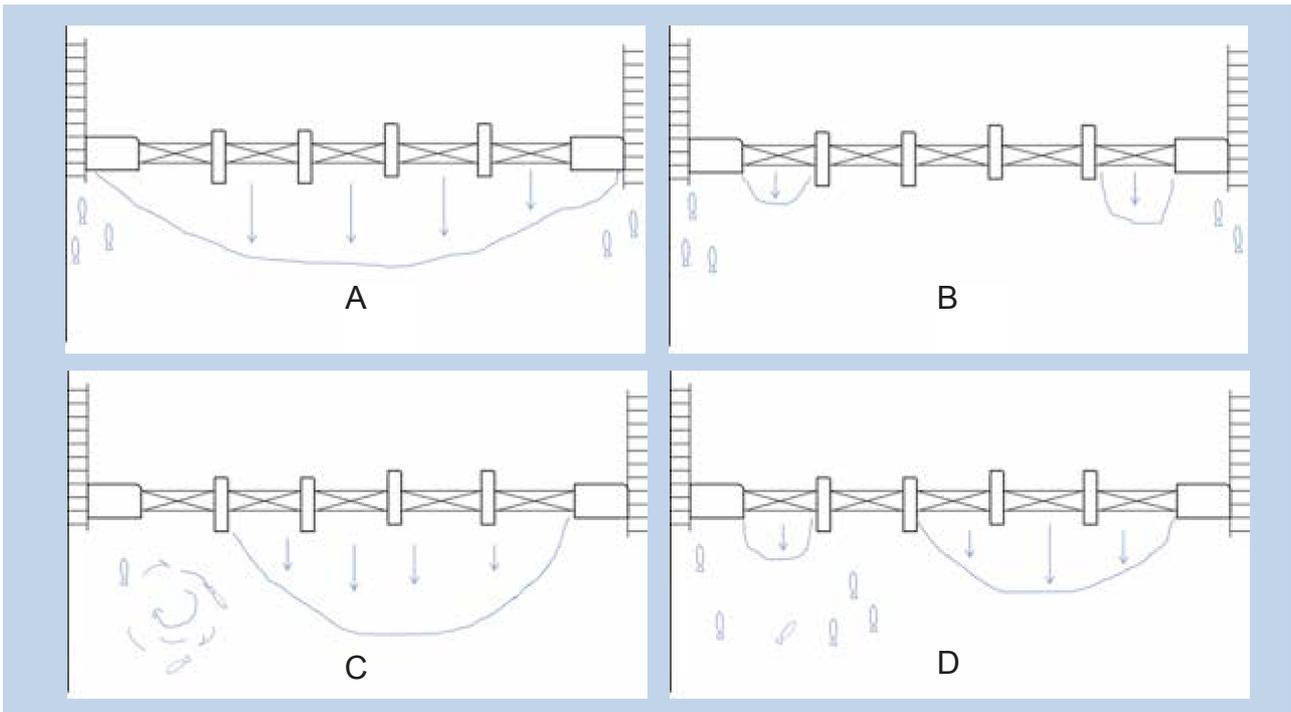


Figura 10.9. Distintas disposiciones de los flujos de una estación hidroeléctrica.
(Válidas "A" y "B", no válidas "C" y "D").

10.3.4. Caudal de atracción adicional al caudal de la escala en el primer estanque

El dispositivo de la compuerta telescópica de funcionamiento manual o automática es costoso y complicado, por estos motivos esta compuerta puede ser sustituida por otros métodos. El efecto de "atracción" también, se puede conseguir a través del sistema expuesto en la figura 10.10.

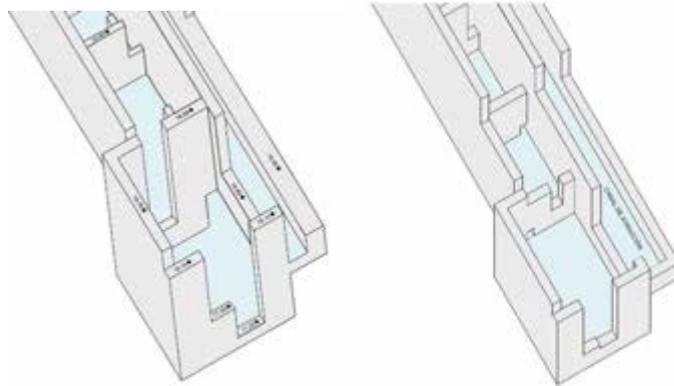


Figura 10.10. Escalas con el primer estanque ampliado por la incorporación del caudal de atracción.

En concreto, se puede realizar un efecto llamada por medio de un caudal adicional (caudal de atracción) que desagüe en el primer estanque (o en sus proximidades), de tal forma que aunque el nivel de la lámina de agua en el río, aguas abajo de la barrera, se eleve y haga disminuir el desnivel entre el estanque y el río, y por lo tanto la velocidad de caída y el efecto llamada (ver figura 10.10), éste se seguirá produciendo debido a la caída del agua desde el canal de atracción; incluso cuando la altura del río aguas abajo del obstáculo llegué a cubrir todo el estanque y el pez entrará en la escala por el segundo estanque, la atracción seguirá existiendo porque el caudal de atracción proveniente del canal de atracción sigue cayendo desde una considerable altura.

Como se ha comentado anteriormente, en el diseño del canal de atracción es necesario situar el vertedero por donde cae el agua, proveniente del canal de atracción a una gran altura respecto de la cota del agua en el estanque. De no ser así podría darse el caso de que los peces podrían ascender por el canal de atracción y no por la escala. Por lo tanto, la altura de caída del agua tiene que ser suficientemente grande para que, en ningún momento, con ningún nivel de agua, especialmente cuando se producen los máximos caudales y por lo tanto el agua está muy alta en los estanques, el pez pueda ascender por el canal de atracción. Para ello, siempre que sea posible, se recomiendan alturas de 1,25 m para ciprínidos y 1,75 para la trucha, el salmón deberá tener la mayor altura posible.

Cuando se opta por esta solución es necesario realizar variaciones y cálculos del modelo convencional.

1. Se debe mantener el valor máximo de la energía disipada en el estanque donde llega el caudal de atracción. El caudal total que desagua en este estanque es el proveniente de la escala y del canal de atracción. Debe tenerse en cuenta que la energía que transmite el caudal de atracción será notoriamente superior porque cae a una gran altura. Por todo ello, este estanque será notoriamente más grande que el resto de los estanques de la escala.

2. El vertedero de este estanque necesariamente tiene que ser mayor al resto de los estanques. La mejor opción es un vertedero compuesto, es decir que tengan varias alturas y con distintas secciones de vertido porque así se controlan mejor los desniveles tanto con el estanque superior como con el río. Dentro de esta variedad de vertederos también mejora la atracción del pez el que los vertederos sean lo más largo posible porque además de nivelar mejor las láminas de agua permite mayor visibilidad del siguiente estanque, al cual se dirigirá en el caso de que el estanque inferior quede anegado, y también podrá visualizar la caída del caudal de atracción.

10.4. CAUSAS POR FALTA DE MANTENIMIENTO.

- Obstrucciones y atascos frecuentes.

Las obstrucciones son una de las causas más importantes de los fallos de las escalas. A veces ocurre que simplemente no se realizan correctamente las tareas de mantenimiento, o que para favorecer el paso de los peces los protectores contra arrastres instalados son inadecuados. Para evitar tal problema se debe estudiar distintos tipos de rejillas y elegir la más adecuada, de no hacerlo, se provocarán frecuentes atascos. Las obstrucciones producidas por

cuerpos flotantes pueden reducir el caudal que entre en la escala y que éste sea insuficiente. Las escalas Denil y las escalas de orificios sumergidos y los vertederos laterales con una anchura pequeña son muy vulnerables a estas obstrucciones. Incluso una obstrucción parcial puede imposibilitar el paso del pez.

Si en una artesa se produce la obstrucción del orificio de fondo y parte del vertedero lateral, y por el contrario la artesa inferior se encuentra limpia de obstrucciones, se puede producir un desnivel excesivo entre las dos artesas e imposibilitar el paso de los migradores, tal y como se muestra en la figura 10.11.



Figura 10.11. Desnivel excesivo porque el vertedero del estanque superior y el orificio sumergido están parcialmente obstruidos.

Si el problema de las obstrucciones por distintos tipos de acarreo es difícil de evitar, siempre que sea posible, se puede optar por pasos naturalizados que son más difíciles de obstruir.

- Deficiente funcionamiento de los dispositivos que regulan el caudal.

Si alguno de los dispositivos que regulan el caudal de la escala o el salto entre estanques (compuertas automáticas, etc.) o mecanismos que regulan el funcionamiento de las esclusas y ascensores funcionan mal o deficientemente, se producirá una ineficacia del paso de agua. Evidentemente cuantos más dispositivos de control incorpore la escala mayor será las labores de mantenimiento, por consiguiente la falta de estas labores generará más problemas al funcionamiento de la escala.

- Mantenimiento y conservación.

Los materiales serán los adecuados y se proporcionarán los accesos necesarios: pasarelas, rejillas “tramet”, pantallas anti-obstrucciones.

- Pesca furtiva.

Uno de los inconvenientes de las escalas y pasos de peces es que crean zonas donde se concentran los peces y pueden permanecer bastante tiempo, si además existe fácil accesibilidad, como así debe ser, se consigue puntos críticos dentro del río donde es muy fácil realizar furtivismo. Para evitar en parte este problema, a las escalas de artesas se les incorpora las pantallas “tramet”. En otras escalas o pasos no es tan fácil dificultar o eliminar el furtivismo, en cualquiera de los casos es necesario llevar a cabo la vigilancia de estos pasos.

10.5. ESTUDIO DE LA EFICACIA DE LAS ESCALAS DE PECES EN PORTUGAL.

El interesante estudio realizado por la Direcção-Geral dos Recursos Florestais de Portugal coordinado por Santo M. (2005), ha consistido en la evaluación de gran parte de las escalas de peces existentes en Portugal. Dada la cercanía geográfica y cultural con España, se ha considerado oportuno exponer un resumen de los resultados de este trabajo.

El método de trabajo realizado en este detallado trabajo se ha hecho en base a unos parámetros característicos seleccionados de la escala que ponderan su eficacia. Después del estudio de cada escala se realiza la valoración de la misma por medio de la puntuación de cada uno de los parámetros referentes a esta escala, la puntuación varía entre los valores de 1 a 5. Siendo 1 el valor más negativo y 5 el más positivo.

Los parámetros elegidos y los valores obtenidos son:

1º) Acceso.

La facilidad o dificultad o incluso su inaccesibilidad condicionan el mantenimiento y/o reparación de la escala. La ausencia o dificultad puede inhibir o impedir el mantenimiento. La valoración de las escalas según este parámetro se muestra en la figura 10.12:

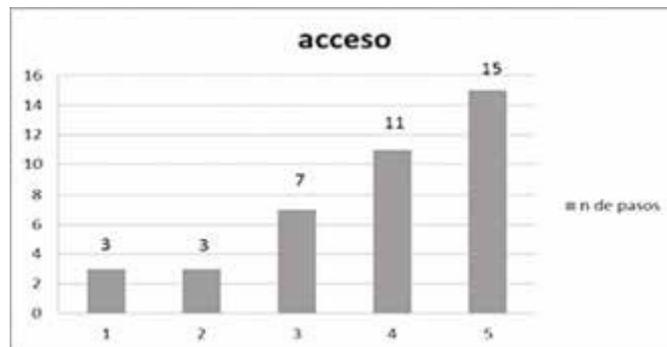


Figura 10.12. Valoración de las escalas según su accesibilidad.

2) Atracción.

La existencia de atracción hace posible que el pez se introduzca en el paso, la falta del mismo producirá la ineficacia de la escala. Se considera como la atracción la cualidad fundamental para la eficacia de la escala (si bien algunos de los otros parámetros pueden ser limitativos).

Los resultados de la valoración muestran que un número importante de los pasos no tienen atracción (ver figura 10.13)

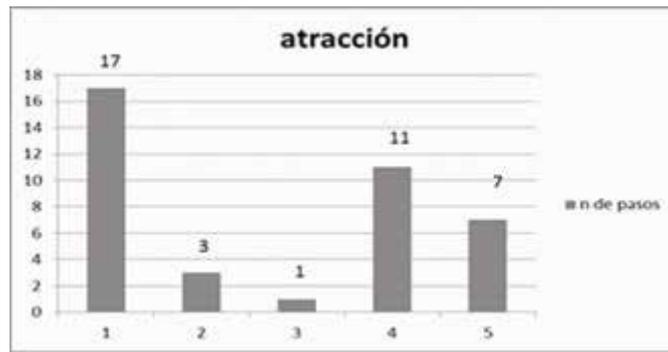


Figura 10.13. Valoración de las escalas según la "atracción".

3) Limpieza.

La limpieza de la escala está directamente relacionado con su eficacia, evidentemente la falta de limpieza puede impedir que el pez pueda ascender. Los resultados de la evaluación muestran que en general los pasos estaban limpios (ver figura 10.14):

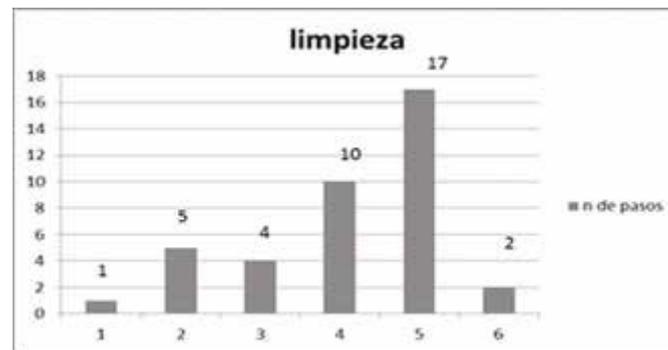


Figura 10.14. Valoración de las escalas según el estado de limpieza.

(la última columna con el punto 6 corresponde a escalas que no se han podido valorar).

4) Conservación (mantenimiento).

La conservación mantendrá la escala en su estado original, si la escala funcionaba después de su construcción el mantenimiento garantizará su continuidad, la ausencia del mismo provocará su ineficacia. Una falta de mantenimiento continuado genera una degradación de la obra que a lo largo del tiempo puede provocar la inutilidad de la misma (ver figura 10.14). Como se puede apreciar en la figura 10.15, la conservación en las escalas estudiadas fue muy eficiente.

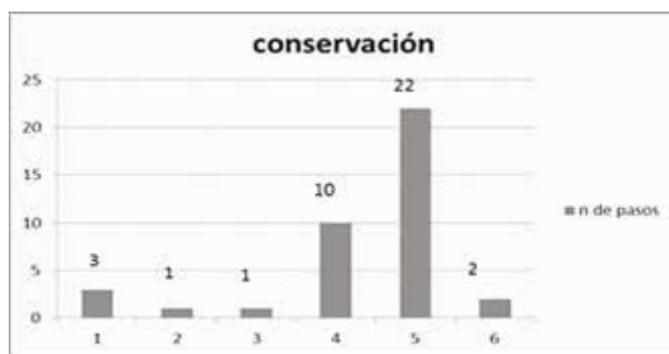


Figura 10.15. Valoración de las escalas según su estado de conservación.

(la última columna con el punto 6 corresponde a escalas que no se han podido valorar).

5) Concordancia con el proyecto.

La construcción de la escala se debe hacer acorde al proyecto y si este está bien realizado, el funcionamiento de la misma será acorde al deseado y por lo tanto eficaz. Si la construcción no sigue las directrices del proyecto aumentan notoriamente las probabilidades de que sea ineficaz. Cualquier pequeña modificación que se realice durante la ejecución del proyecto original de una escala de peces puede acarrear unas consecuencias negativas grandes, por ello es muy importante mantener el estado original del proyecto (ver figura 10.16). Si es totalmente imprescindible realizar modificaciones, entonces se tiene que consultar al técnico proyectista u otro con experiencia en escalas de peces.



Figura 10.16. Valoración de las escalas según su concordancia con el proyecto.

Con la evaluación de estos parámetros y considerando que algunas puntuaciones deficientes son limitantes llegando a invalidar la eficacia de la escala, se concluye con la evaluación global determinando la *potencialidad de utilización por los peces*, es decir la eficacia de la escala.

El 38,5 % de las escalas no pueden ser utilizadas por los peces en ninguna circunstancia. En concreto 15 pasos de un total de 39 pasos estudiados. A partir de aquí la valoración del

resto de las escalas va en aumento. La valoración media de todas las escalas es de 2,5 (ver figura 10.17)

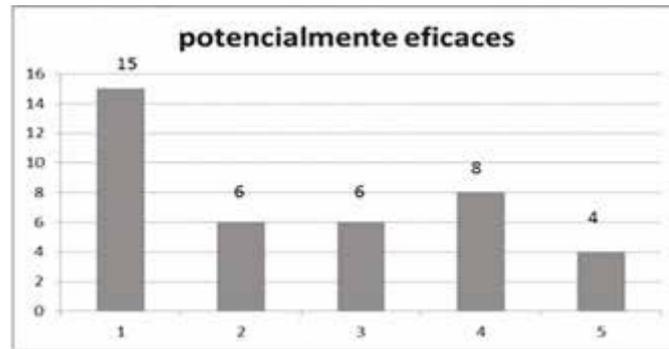


Figura 10.17. Valoración de las escalas según potencial eficacia.

10.6. BIBLIOGRAFIA.

GARCÍA R., ALMAZÓN E.A. 2015. Dos escalas de peces acondicionadas para ríos con fuerte sequía estival en la cuenca del río Guadalquivir. III Reunión del grupo de Hidrología de la SECF. Valencia.

GARCÍA DÍAZ R., FERNÁNDEZ ORRIOLABEITIA UNAI. 2013 Escala de peces aplicada a las barreras producidas en un puente de río con grandes fluctuaciones de caudales. 6º Congreso Forestal. Vitoria.

LARINIER M. 2002. *Fishways: biological basis, design criteria and monitoring*. Bull. Fr. Pêche Piscic 364 suppl. 207 pp.

SANTO M. 2005. Dispositivos de passanges para peixes em Portugal. ED Direcção-Geral dos Recursos Florestais. 137 pp. Lisboa.

11. PASOS PARA LAS BARRERAS DE LAS INFRAESTRUCTURAS VIARIAS.

11. 1. INTRODUCCIÓN.

Los pasos y drenajes construidos en las vías de comunicación frecuentemente originan un tipo de barreras que por su escasa altura, no se suelen tener en consideración. Aun así, en muchas ocasiones son lo suficientemente altos para impedir el paso de los peces.

El tipo de barrera generado depende del tipo de infraestructura existente y de cómo se haya realizado la obra. En el caso concreto de los puentes, la cimentación puede producir barreras cuando atraviesa un tramo de río en el que no se produce remansos; si por el contrario estos existen, entonces no habrá ningún impedimento para el paso de los peces. Ahora bien, si en el puente se han construido soleras y/o diques para evitar la erosión, entonces se pueden producir una primera barrera por la existencia de un desnivel desde la superficie del río hasta la solera y una segunda barrera producida por la alta velocidad del agua existente en la solera de la cimentación que une las pilastras del puente. Los pontones caños y tubos presentan otra problemática.

Se pueden agrupar las obras de infraestructuras en función del tipo de barrera en las siguientes clases:

- Cimentaciones de puentes.
- Pontones caños y tubos y badenes.

Los tipos de barreras creadas para estos dos tipos de infraestructuras no son excluyentes.

También en el análisis de las barreras producidas por las obras de infraestructuras es necesario realizar el estudio de los caudales del río. En este tipo de barreras la variación de caudales puede ser determinante, dado que en bastantes casos, la barrera puede desaparecer cuando se producen caudales relativamente grandes.

11.2. BARRERAS PRODUCIDAS POR LAS CIMENTACIONES DE PUENTES.

En la fotografía de la figura 11.1, se aprecian barreras generadas por las obras de cimentación de puentes. Concretamente, la fotografía de la derecha corresponde a un pequeño río (Río Guadiamar).



Figura 11.1, Barreras originadas por el salto de agua producido por la solera de un puente.

Además de esta barrera, en la solera de la cimentación también se genera un flujo con excesiva velocidad y/o con poca profundidad, de tal forma que dificultan, o incluso imposibilitan, el paso de los peces.

Actuaciones para franquear las barreras.

En la tabla 11.1., se enumeran las posibles causas de este tipo de barreras y la solución para que los peces puedan remontarla

Tabla 1. Soluciones para cada tipo de barrera

Causa y tipo barrera.	Solución
Salto de agua al final de la cimentación	Rampas. Pequeñas escalas. Cambio de tubo de drenaje para que produzca un tramo de remanso.
Calado pequeño en solera de la cimentación	Concentración del caudal. Deflectores.
Velocidad excesiva en distintos tipos de infraestructura.	Deflectores. Modificación de pendiente en solera

11.3. BARRERAS PRODUCIDAS POR PONTONES, CAÑOS, TUBOS Y DRENAJES.

Las posibles barreras producidas por pontones, caños y tubos se muestran en la figura 11.2, (las barreras se indican con flechas rojas)

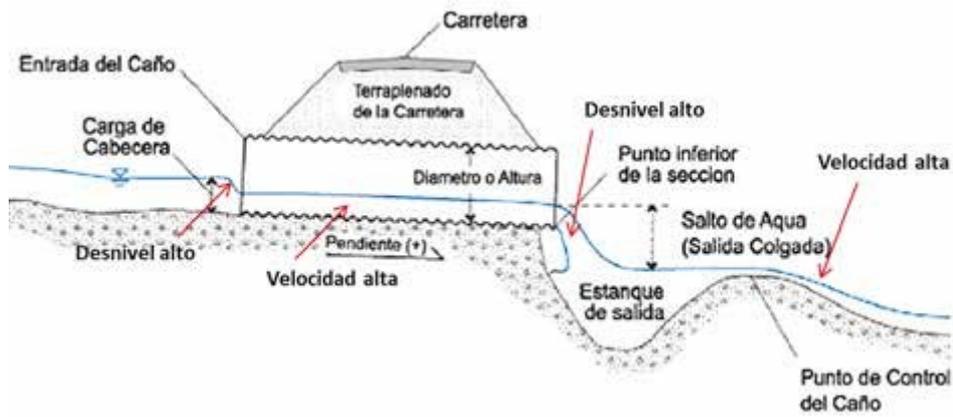


Figura 11.2, Esquema de un drenaje con todas las posibles barreras (Original de García Molinos et al 2005).



Figura 11.3. Drenaje con barrera de salto de agua.

Salto de agua en la salida del tubo. Normalmente existe un salto al final del tubo (salida colgada) hasta el curso de agua. En los casos en que no se haya protegido adecuadamente la caída del agua desde el drenaje, la altura del agua del salto puede aumentar por el efecto de la socavación producida por el flujo al verter contra el suelo.

Velocidad excesiva dentro de la canalización. Cuando la rasante del tubo se ha construido con excesiva pendiente y/o una profundidad grande, se puede producir una velocidad excesiva que impida remontar a peces con limitada capacidad de nado.

Carga de cabecera. Si la pendiente del río es menor a la pendiente del tubo, entonces se puede producir un salto de agua en cabecera, tal y como se aprecia en la figura 11.2.

Punto de control. Después de que el flujo ha atravesado el tubo y ha caída al “estanque de salida” al reincorporarse al curso de agua se puede haber producido una fuerte pendiente donde se originarían velocidades excesivas.

La falta de luz dentro de los tubos también puede inhibir el paso de los peces. El comportamiento de los peces ante la falta de luminosidad está poco estudiado, en cualquiera de los casos la mejora situación será la que aumente la cantidad de luz, lo cual evidentemente se producirá con tubos de grandes diámetros y escasa longitud.

La solución óptima a toda la problemática en los drenajes es la “imitación fluvial”. Ésta consiste en reproducir, dentro de la alcantarilla o drenaje, las mismas condiciones de pendiente, lecho del material, sección y perímetro mojado original del curso de agua, arroyo, torrente o río. Sin embargo esta solución requiere de drenajes muy grandes y además debido a la incorporación del propio lecho del río, éste estará sujeto a los procesos geodinámicos propios de el mismo, por consiguiente este lecho artificial será difícil de mantener.

Una manera sencilla de solventar las anteriores barreras producidas por los tubos consiste en utilizar tubo de mayores dimensiones y asentado con menor pendiente a la que tenían anteriormente y a la pendiente existente en el río, se debe conseguir que la profundidad dentro del drenaje sea suficiente para que el pez pueda remontarlo fácilmente. De esta manera la velocidad que adquiere el flujo dentro del tubo es menor que la velocidad que se producía anteriormente y también menor que la tenía el flujo procedente de la parte superior del río, con todo ello se consigue que dentro del tubo se produzca una zona de remanso. Con ello se consigue dos efectos: eliminar el salto de carga de entrada y la velocidad excesiva dentro del tubo, evidentemente, cuando se disminuye la pendiente dentro del tubo también se disminuye la velocidad dentro del drenaje.

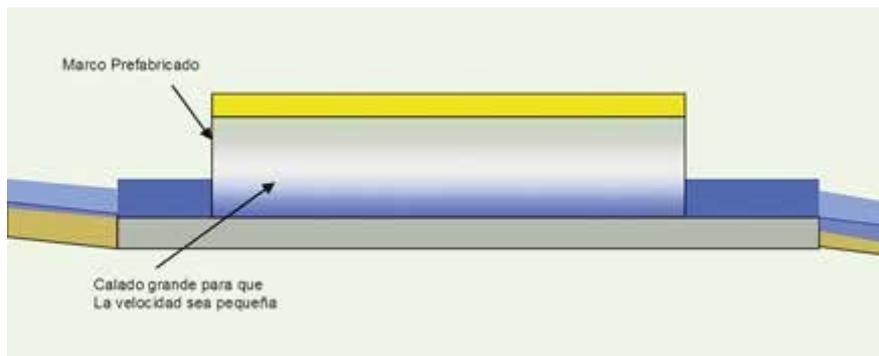


Figura 11.4, Esquema del drenaje válido para permitir el paso de los peces.

Puede haber un problema adicional, como la pendiente ha disminuido también disminuye la capacidad de arrastre (la tensión de arrastre) por lo tanto podría producirse una deposición de acarreos, circunstancia que tiene que tenerse en cuenta.

También es posible conseguir eliminar, o por lo menos disminuir, el salto de agua producido al final del tubo y las potenciales zonas con velocidades grandes por medio de pequeñas obras con la finalidad de dejar pendientes de pequeña cuantía con una velocidad admisible por los peces.

Una vez que el flujo ha alcanzado el punto de control, el agua puede descender por una pendiente elevada, en este caso una posible solución para conseguir disminuir la velocidad del flujo consistiría en la construcción de pequeñas rampas de piedras insertadas en el lecho del río.

Para el diseño y cálculo de la rampa se puede consultar lo expuesto en el capítulo de los pasos naturalizados. En este caso el tamaño de la rampa es bastante menor que las habitualmente construidas en los ríos, lo que facilita tanto su diseño como su construcción.

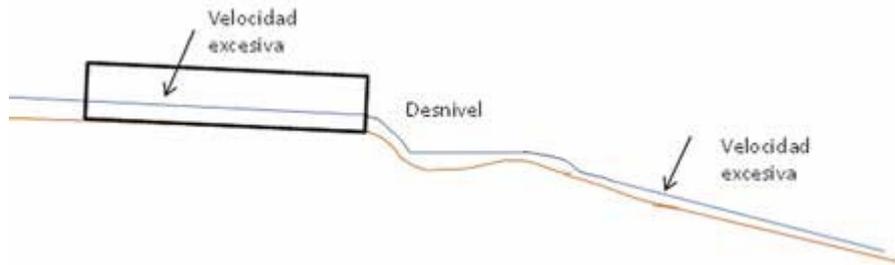


Figura 11.5, Esquema de un drenaje con las barreras producidas por el salto de agua y velocidad excesiva por debajo del drenaje.

En la figura 11.5, se muestra tres de las cuatro barreras que pueden afectar a un drenaje convencional. Estas barreras se pueden solucionar construyendo un badén y una rampa tal y como se muestra en la siguiente figura 11.6.



Figura 11.6, Solera y rampa de piedras construidas debajo del drenaje.

Evidentemente ésta actuación disminuye la capacidad de desagüe porque al disminuir la velocidad del agua dentro del tubo disminuirá el caudal que pueda evacuar. La mayor o menor disminución de la velocidad dependerá de la pendiente del nuevo perfil hidráulico que se produzca en el tubo, el cual a su vez dependerá de la cota de la nueva solera, por lo tanto en función de la posibilidad de disminuir el caudal de desagüe se podrá elevar más o menos la solera.

La construcción de la rampa es independiente del caudal de desagüe, por lo tanto en cualquiera de los casos se podrá construir.

11.4. BARRERAS PRODUCIDAS POR BADENES.

El problema de los badenes es similar al generado en algunas cimentaciones de puentes. En estos sitios con caudales grandes se pueden producir velocidades altas y con caudales pequeños se producen calados pequeños que dificultan el nado de los peces. Al final del badén, o de la solera de un puente, se suelen producir un salto de agua.



Figura 11.7. Baden que produce un gran salto de agua.

En la fotografía de la figura 11.7, se observa un badén en el que se producen los dos problemas anteriormente expuestos; por una parte se produce un gran salto de agua impracticable para la mayor parte de los caudales y también se aprecia que el flujo se extiende en una gran superficie del camino produciendo calados pequeños.

En este tipo de barreras es posible proponer las siguientes soluciones.

Tabla 2. Soluciones para los tipos de barreras de un badén.

Barrera	Solución.
Salto de altura desde el badén hasta el río.	Escala o rampa Rebaje de la cota del badén.
Calado pequeño en el propio badén	Concentración del caudal en canalización con deflectores.
Velocidad excesiva del agua	Canalización en canal inferior al badén con rejilla que permita el paso de coches con pequeños deflectores.

11.4.1. Deflectores.

Los deflectores son paralelepípedos con longitud notoriamente superior a la anchura y altura. Estos elementos se colocan en la dirección oblicua o perpendicular a la dirección del curso de agua con la finalidad de frenar y/o concentrar el flujo vertiente.

Los deflectores comenzaron a utilizarse en alcantarillas y tubos, si bien su aplicación se puede ampliar a todas aquellas situaciones que necesitan frenar o concentrar el flujo, esta última necesidad de concentra el flujo acaece en ríos en que en algún periodo de tiempo más o menos largo se producen caudales pequeños de tal forma que al atravesar estos flujos las soleras de cimentación de puentes o en otros tipos de barreras de similares características, entonces se extiende por una amplia superficie, ya sea de la cimentación o en otra circunstancia, originando un calado tan pequeño que el pez no puede sobrepasarlo. Se tiene que tener en cuenta que el calado mínimo para que el pez migrador pueda nadar sin dificultad debe ser superior a 1,5 veces la altura del pez.

El siguiente modelo de deflectores ha sido desarrollado por Engel 1974.

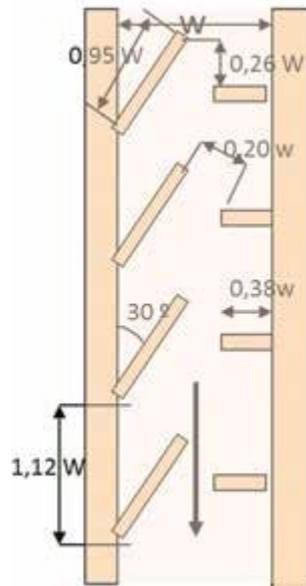


Figura 11.8 Esquema de deflector (Engel, 1974)

Para garantizar la efectividad de los deflectores se debe cumplir las siguientes normas (Larinier, 2002):

- Para longitudes menores a 24 m la velocidad media debe de ser inferior a 2 m/s.
- Si la longitud es mayor a 24 m la velocidad media debe de ser inferior a 0,9 m/s.
- El calado no puede ser inferior a 0,23 m en ningún punto del paso.
- No se debe producir una bajada brusca del nivel mayor de 0,31 m

- El caudal de cálculo para la estabilidad tendrá un tiempo de retorno que como máximo será de 100 años.
- La pendiente del paso de agua con los deflectores nunca debe de sobrepasar el 5 %.
- La altura de los tabiques debe de ser superior a 0,3 m.

Los investigadores Rajaratnam y Katapodis (1989, 1990) han realizados investigaciones obteniendo resultados empíricos consistentes en ecuaciones de los parámetros hidráulicos. Con estos resultados se puede determinar el caudal que atraviesa el sistema de deflectores en función del calado y la velocidad que alcanza el flujo.

En las figuras siguientes se muestran los tipos de deflectores más comúnmente usados.

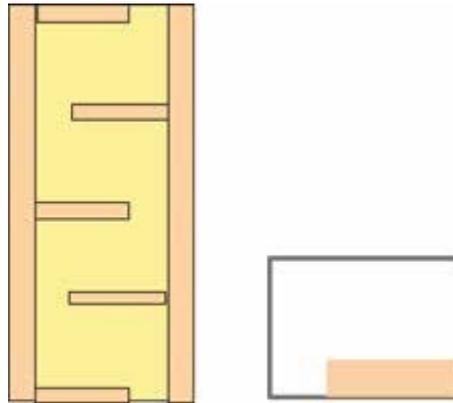


Figura 11.9. Deflector transversal y de perfil rectangular.

El tipo de deflector que se muestra en la figura 11.9., presenta la posibilidad de poderse autolimpiar.

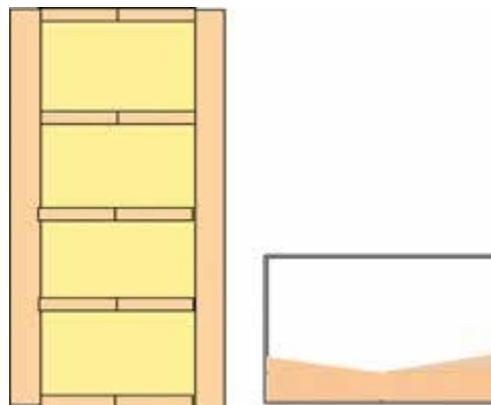


Figura 11.10., Deflector con perfil triangular.

En la figura 11.10, se muestra el deflector de perfil triangular, en este caso el flujo se concentrará en el vértice del triángulo.

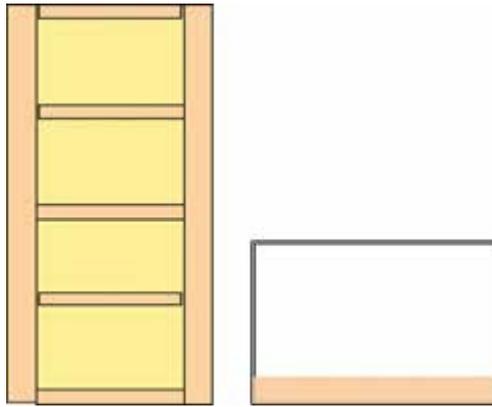


Figura 11.11. Deflector de sección rectangular a lo largo de todo la anchura de la alcantarilla.

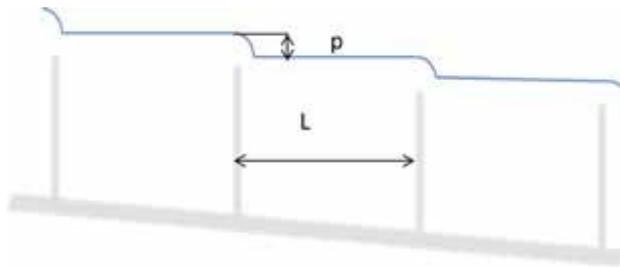


Figura 11.12. Flujo vertiendo por los deflectores de la figura 11.12.

El deflector de la figura 11.11, presenta analogías con respecto a la tradicional escala de estanques con vertederos en caída libre, el agua descendería de manera análoga a como se muestra en la figura 11.12, de manera similar a como se realiza en los estanques de los vertederos de caída libre.

En todos los casos se deben tener en cuenta las siguientes precauciones:

La altura de las paredes debe ser fijada atendiendo a la profundidad mínima del agua en función de la especie (0,15 m para la trucha y 0,30 para el salmón), especialmente en la parte de aguas más superficiales, normalmente situada inmediatamente debajo del vertedero.

La profundidad del agua en el fondo del salto debe ser 2-2,5 veces la desnivel entre los estanques y suficiente para que el pez pueda pasar.

La distancia entre los vertederos debe ser suficiente para asegurar que la energía sea disipada. Y evitar el flujo transmitido (streaming) o un flujo cuasi liso el cual se produce cuando existen velocidades muy altas (Knight y Macdonald, 1979).

Estas condiciones limitan la altura “p” entre dos deflectores (que funcionan como vertederos), a valores comprendidos entre 0,15 y 0,20 m (ver figura 11.12), el espaciamientos entre vertederos (L) será el que resulte de aplicar la ecuación $(S \times L/p)$ donde S es la pendiente de la estructura. Los valores resultantes de la ecuación de la fórmula anterior están entre 0,20 y 0,30. (Larinier y Chorda, 1995).

11.4.2. Ejemplo de paso con deflectores en solera de puente.

A continuación se expone una posible solución a las barreras producidas por la solera de un puente en una carretera, en la que se originan dos tipos de barreras para la migración de los peces, cuando se producen bajos y altos caudales (García *et al* 2013).

Calados muy pequeños. Cuando existen pequeños caudales, y el flujo atraviesa la solera se extiende por toda la superficie de la misma se originan un calado muy pequeño que dificulta o incluso llega a impedir el paso del pez.

Caudales grandes. Los caudales grandes originan velocidades altas superiores a las que puedan desarrollar los peces.

Muchos ríos de las cuencas hidrográficas españolas con clima mediterráneo tienen un régimen hidrológico con una fuerte sequía estival. Esto provoca que durante numerosos días el caudal circulante sea muy pequeño o incluso nulo, esta circunstancia provoca que las escalas de peces, o cualquier otro dispositivo para conseguir que la ictiofauna pueda remontar la barrera, deban estar adaptados a estos caudales tan pequeños.

Para el problema de los pequeños calados en la solera del puente la solución consistirá en la construcción de un sistema de deflectores en la propia solera. Cuando existen caudales muy altos estos deflectores provocarán una disminución de la velocidad.

Si bien el tipo de deflectores anteriormente expuesto es utilizado frecuentemente en alcantarillas, también es recomendable utilizar la distribución de sección rectangular con deflectores del tipo de hendidura o abertura.

El estudio del flujo al atravesar las hendiduras entre los deflectores se ha realizado de la siguiente manera:

Se ha supuesto las mismas condiciones de vertido para todos los deflectores menos para el último, dado que justamente éste vierte a la escala ubicada a un nivel inferior a la solera del puente, por lo tanto es casi un vertido libre (no llega a ser totalmente libre porque cuando los caudales son medios o altos se produce cierto grado de sumergencia, aunque esta anomalía no se ha tenido en cuenta).

Se ha considerado dos condiciones de vertido.

Se ha computado el caudal máximo que entra en la canalización de los deflectores.

El nivel que adquiere el agua en el último deflector, que como se ha comentado se produce en forma de vertido libre, con él se definen los niveles que alcanza el agua en la hendidura de los deflectores.

En colaboración con la empresa INCISA, se ha llevado a cabo una simulación del vertido con el programa HEC-RAS para un sistema de deflectores con las dimensiones que se

especifican a continuación. Este estudio también se podría haber realizado con el programa IBER o con otro programa hidraulico de flujos bidimensionales, si bien el programa HEC-RAS al ser unidireccional es menos preciso que los programas bidimensionales, los resultados, para este tipo de estudio se consideran suficientemente válidos:

Se ha considerado una anchura de la hendidura de 1 metro. Justamente, según sean los resultados obtenidos, se estudiará la posibilidad de variar el valor de la anchura para obtener unos niveles de agua dentro de la escotadura más adecuados para mejorar el paso de los peces.

Los datos de las dimensiones de los deflectores son (figura 11.14):

- a) Altura de deflector 0,25 m.
- b) Anchura de deflector 0,30 m.
- c) Longitud de deflector 2,00 m.
- d) Anchura de la hendidura de separación entre dos deflectores 1 m (si bien esta dimensión se podrá modificar posteriormente). Separación entre dos secciones de deflectores 3,00 m.
- e) La pendiente del canal es la misma que la solera del puente, es decir 0,73 %.

El cálculo se ha realizado según las dos hipótesis siguientes:

Hipótesis I. Se produce una zona de flujo ineficaz, es decir que después de que el flujo ha atravesado la sección de los deflectores existe una zona a los lado de la sección en la cual no circula el agua.

Hipótesis II. No se produce una zona de flujo ineficaz después de que el agua ha atravesado la sección estrecha de los deflectores.

Para los cálculos definitivos se han elegido los valores resultantes de la segunda hipótesis, es decir sin zona de flujo ineficaz, debido a que estos resultados son más verosímiles.

Los valores de los caudales estudiados fueron los comprendidos entre 0,05 y 1,00 m³/s. En la figura 11.13, se muestra los resultados obtenidos con el programa HEC-RAS aplicados a la canalización con los caudales citados.

En el eje de las abscisas se indican las distancia en la canalización desde el último deflector por donde sale el agua. Se puede observar como el nivel del agua que alcanza el flujo en cada hendidura de los vertederos es superior al nivel del último deflector, esto es debido a que éste último deflector vierte libremente.

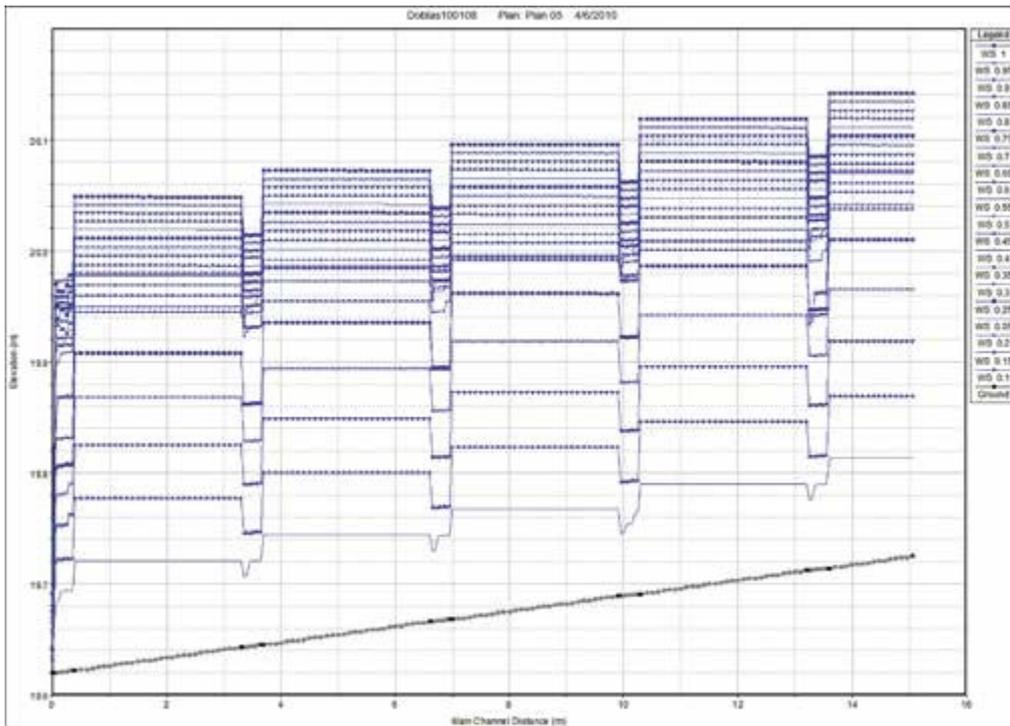


Figura 11.13. Gráfico con la altura que alcanzan los calados para los caudales comprendidos entre 0,05 y 1 m³/s.

Como se ha comentado anteriormente, los estudios de simulación con el programa HEC-RAS se realizaron para una sección de hendidura de 1 m, valor que en principio se ha considerado apropiado. Sin embargo una vez obtenidos los resultados se ha decidido proyectar la hendidura de los deflectores con el valor de 0,7 m (también se podría haber extrapolado a cualquier valor cercano). Aunque se podría volver a realizar todos los cálculos con la nueva dimensión de la hendidura en el programa HEC-RAS, se ha considerado válido realizar una estimación de los caudales que son atravesados por el canal con esta nueva sección de la hendidura de los deflectores, de la manera que se expone a continuación. (en la figura 11.14, se muestra las dimensiones de los deflectores).

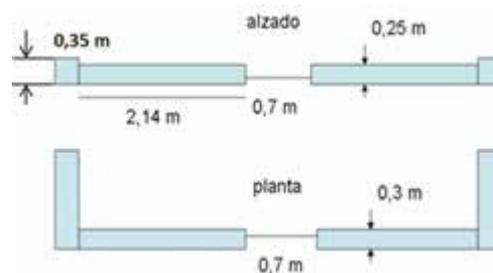


Figura 11.14., Deflector rectangular utilizado en solera de puente Alzado y planta de los deflectores.

El caudal que alcanza el límite de la hendidura sin sobrepasar la altura del deflector, es decir a 0,25 m, y no verter por encima del mismo es, 0,35 m³/s.

Sin embargo, se considera que el máximo caudal que entrará por el canal donde se encuentra los deflectores será el correspondiente a la altura máxima de las paredes del canal, que es de 0,35 m, porque si la altura del agua es mayor a esta cantidad entonces el agua verterá por las paredes cayendo al resto de la sección del río (o de la solera del puente en el caso de que la canalización sea dentro de un puente), y no aumentará el caudal dentro de la canalización. Evidentemente con caudales altos o muy altos seguirá aumentando la altura de vertido porque se llenará toda la sección del río donde está la canalización, pero en este estudio, estos excesos no se tienen en cuenta

Por lo tanto, el caudal máximo que puede atravesar la sección de la hendidura será el correspondiente a una altura de calado de 0,35 m, como en este caso no se requiere una excesiva exactitud, se ha considerado válido considerar que todo el caudal que atraviesa la hendidura estará en proporción lineal a la altura total.

$$Q_{0,35} = \frac{0,35}{0,25} \cdot 0,35 = 0,49 \frac{m^3}{s}$$

Por lo tanto el caudal resultante es: 0,49 m³/s.

Como la anchura de la hendidura que se va a construir es de 0,7 m, y como los cálculos se han realizado para una anchura de la hendidura de 1 m, se ha considerado que el caudal que atravesará la hendidura será el proporcional en función de la anchura, es decir:

$$Q_{0,35-0,7} = 0,49 \cdot \frac{0,7}{1} = 0,34 \frac{m^3}{s}$$

También se debe de corregir el valor del caudal que vierten por encima de los deflectores. A partir de los cálculos realizados con el programa HEC-RAS se estima que la parte de caudal que vierte por encima de los deflectores será el total del caudal menos el caudal que atraviesa por la hendidura, como este último, según los cálculos anteriormente realizados, toma el valor de 0,49 m³/s, y el caudal total que atraviesa toda la canalización, obtenido para una altura de vertido de 0,35 m es 0,85 m³/s el caudal restante será el que fluye por encima de los deflectores:

$$Q_{deflec} = Q_{total} - Q_{hendi} = 0,85 - 0,49 = 0,36 m^3 / s$$

El caudal que vierte por encima de los deflectores por metro lineal será.

$$Q_{\frac{defle}{metro}} = \frac{Q_{defle}}{4} = \frac{0,36}{4} = 0,09 \frac{m^3}{s \cdot m}$$

El caudal que vierte por encima de los deflectores en toda la anchura (5-0,7 m) cuando la hendidura tiene la longitud de 0,7 m, será:

$$Q_{defle-4,3} = 0,09 \cdot (5 - 0,7) = 0,09 \cdot 4,3 = 0,387 \frac{m^3}{s \cdot m}$$

Por lo tanto el caudal total será la suma del caudal que atraviesa la hendidura y el caudal que vierte por encima de los deflectores:

$$Q_{total} = Q_{deflectores} + Q_{hendi} = 0,343 + 0,387 = 0,73 \text{ m}^3$$

El caudal anteriormente calculado es el caudal máximo que solo entrará por el canal, porque como se ha comentado anteriormente el exceso de caudal se vierte en el río o en la solera del puente. Para que esto ocurra en la sección del río o en la del puente se deberá construir un muro a la altura de 0,35 m, con el fin de que se produzca esta situación. Cuando el caudal sea mayor a este valor, entonces el agua empezará a fluir por toda la sección, como esta es muy grande, para que aumente la altura de vertido tendrá que producirse grandes caudales, solo en estas circunstancias se producirá un aumento de cierta entidad del caudal que entré por el canal de los deflectores.

Además de la estimación del cálculo anterior, los resultados de la aplicación del programa HEC-RAS se han utilizado para conocer los niveles que alcanza la lámina de agua en el último deflector, es importante conocer este dato dado que a partir del mismo se podrá conocer el valor del desnivel del agua con respecto a la lámina de agua existente en el primer estanque de la escala que se situará al final de la solera del puente porque en esta sección existe un salto de agua que se solventará con la construcción de una escala. Estos datos se han tenido en cuenta en el diseño de la escala, especialmente la cota elegida para su ubicación. En la figura 11.15, se muestran los valores que alcanza el flujo para los distintos caudales en el último deflector.

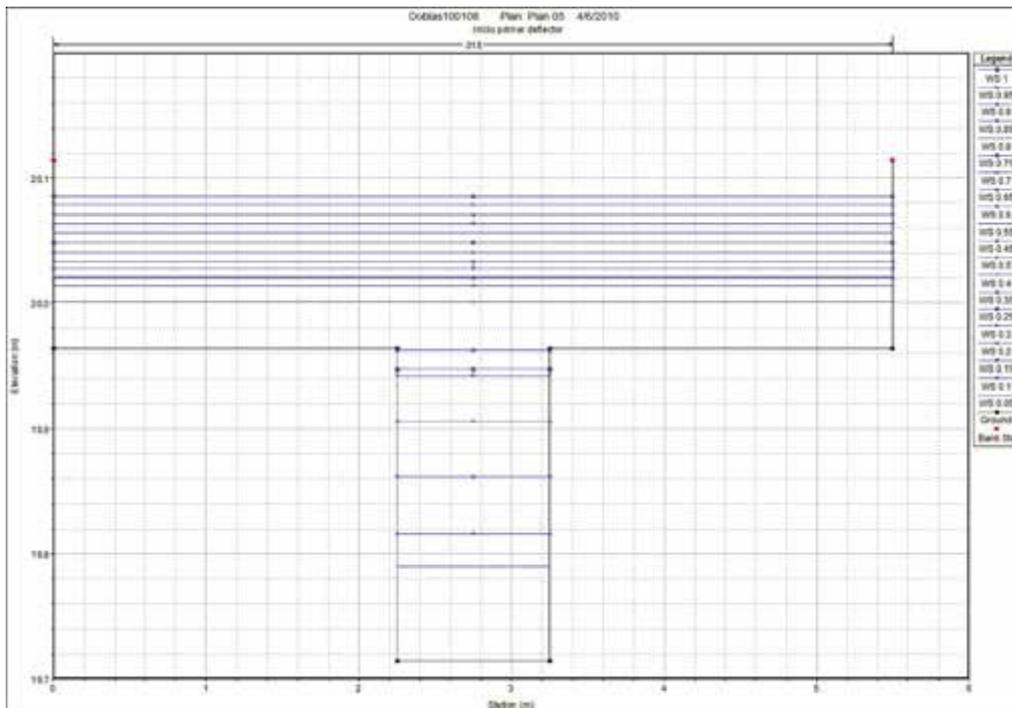


Figura 11.15. Gráfica con los niveles del agua en el último deflector.

11.5. BIBLIOGRAFÍA.

ENGEL P., 1974. Fish facilities for culverts of the McKenzie highway. Nat. Wat. Res. Inst., Burlington, Ontario, 33 p.

GARCÍA MOLINOS, J.; LLANOS, A. & MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES, A. (2005): Diseño de obras de paso compatibles con la migración de peces; Ingeniería Civil, nº 139; p. 132 – 139

GARCÍA R., FERNÁNDEZ U., TORREN F., 2013. Escala de peces aplicada a la barreras producidas en un puente de río con grandes fluctuaciones de caudales. 6º Congreso Forestal Español. Vitoria.

LARINIER M., 2002. Fish passage through culverts, Rock Weirs and estuarine obstructions. *Bull. Fr. Pêche Piscic. 364 suppl.* pp 119-134.

LARINIER M., CHORDA J., 1995. Prise en compte de la migration du poisson lors de la conception des ouvrages de rétablissement des écoulements naturels dans les aménagements routiers ou autoroutiers (Fish passage design at road and motorways crossings). GHAAPPE Rep. 95.01, 11 p.

RAJARATNAM N., KATOPODIS C., 1989. Hydraulics of culvert fishways II: slotted-weir culvert fishways. *Can. J. Civ. Eng.*, 16 (3): 375-383.

RAJARATNAM N., KATOPODIS C., 1990. Hydraulics of culvert fishways III: weir baffle culvert fishways. *Can. J. Civ. Eng.*, 17 (4): 558-568.

KNIGHT D.W. MCDONALD J. A. 1979. Hydraulic resistance of artificial strip roughness. *J. Hydr.Div.*, 105 (HY6): 675-690.

12. MIGRACIÓN DESCENDENTE DE LOS PECES

12.1 PRINCIPALES ESPECIES DE PECES QUE REALIZAN MIGRACIÓN DESCENDENTE.

El conocimiento actual de la migración descendente de los peces está mucho menos avanzado que el referente a la migración ascendente. Esto se debe simplemente al hecho de que para que las barreras fueran franqueables para los peces se construyeron escalas de peces. Para llevar a cabo estas construcciones era necesario conocer la migración ascendente de los peces. Este menor conocimiento y disponibilidad de datos también ha sido debido a la complejidad y dificultad de la migración descendente de los migradores. Solo recientemente han empezado a interesar los problemas de la migración descendente, y por lo tanto se ha empezado a estudiar este comportamiento de los peces.

Como ya se ha comentado anteriormente, todos los peces, en mayor o menor medida realizan migraciones a lo largo de su ciclo vital. La principal causa es la reproducción, aunque también se realizan migraciones para alimentarse más eficazmente, en busca de refugio o como huida de focos de contaminación, depredadores, etc. Por lo tanto, si los peces emigran hacia aguas arriba, en algún momento tendrán que descender.

La migración descendente del río tiene como objetivo alcanzar el mar o un lago o una zona más óptima del río para que el pez pueda completar su ciclo vital o mejorar su situación. Las especies de peces diádromos y la mayor parte de los peces potamódromos migran hacia aguas abajo.

En Francia están legalmente reconocidas y protegidas las siguientes especies como migradoras descendentes, así en la legislación sobre este tema en el año 2002, consideraba las siguientes especies migradoras descendentes:

- Salmón (*Salmo salar*). Cuando son jóvenes y todavía no han llegado al mar.
- Reo o trucha de mar (*trutta trutta*). en sus fases juveniles, cuando migran al mar.
- Alosa (*Alosa alosa*). Principalmente juveniles (la mayor parte de los adultos mueren después del desove).

- Sáboga (*Alosa fallax*). Juveniles y adultos.
- Ánguila (*Anguilla anguilla*). Solo adultos, durante la migración desde sus frezaderos marinos en el mar de los Sargazos.
- Lamprea marina (*Petromyzon Marinus*), y lamprea de río (*Petromyzon fluviatilis*). En los dos casos juveniles y en el caso de la lamprea de río también en adultos.
- Trucha común (*Salmon truta*).
- Tímalo (inexistente en España) (*Thymallus thymallus*). Migradores juveniles hacia aguas abajo para las zonas de alimentación y los adultos después del desove.
- Lucio (*Exos lucius*). Ambos adultos y juveniles.

Además de estas especies se deben tener en cuenta a muchas especies de ribera (ciprínidos y otros grupos) que se mueven a grandes distancias aguas arriba y aguas abajo durante su ciclo de vida.

12.2 PROBLEMAS DE LA MIGRACIÓN DESCENDENTE.

La instalación de una presa u otro tipo de barrera en el curso de un río puede causar muchos problemas para la migración descendente, entre otros se pueden producir los siguientes daños (Larinier y Travade, 2002):

- El retraso o incluso la imposibilidad de la migración descendente a la parte inferior del embalse.
- Daños o la propia muerte del pez cuando pasan sobre el aliviadero o a través de las turbinas.
- Mortalidades por la depredación por pájaros y peces en el embalse o a la salida de las turbinas.
- Mortalidad debida al cambio en la calidad del agua (déficit de oxígeno en el agua del embalse), sobresaturación de gases atmosféricos aguas abajo de las turbinas y de los aliviaderos.

En general, todos estos problemas han sido estudiados para las especies anádromas y especialmente para los salmónidos. Sin embargo, existe poca información disponible para otras especies en comparación con las anteriores. La siguiente información es aplicable a los migradores de salmónidos juveniles, al menos que se especifique lo contrario.

12.2.1. Paso a través del aliviadero.

Si la barrera tiene escala de peces, entonces los peces pueden descender por la propia escala, en bastantes casos. Otra posibilidad es que el pez descienda por el aliviadero, el paso a través del aliviadero puede ser la causa directa de heridas o indirectamente la causa resultante del aturdimiento o desorientación del pez, lo que facilita la posibilidad de que los predadores puedan capturarlo.

Estudios realizados en Canadá, USA y otros países, han demostrado que el porcentaje de mortalidad directa varía enormemente de unos lugares a otros. Así, por ejemplo, se producen unas mortalidades relativamente bajas, entre 0 % y 4 %, en las presas de Bonneville, McNary y John Day en el río Columbia con una altura aproximada en el aliviadero de 30 m. En contraste con la presa Glines del río Elwha, donde la altura del aliviadero es de 60 m y la presa de Lower Elwha con altura del aliviadero de 30 m, el ratio de mortalidad varía entre el 8 % y 37 % respectivamente (Bell y Delacy, 1972, Ruggles y Murray, 1983).

La mortalidad puede ser debida a algunas de las siguientes causas:

- efectos de cizalla.
- abrasión contra las superficies del aliviadero.
- turbulencias en el cuenco amortiguador de la base de la presa.
- repentinas variaciones en la velocidad y en la presión.
- choques físicos y daños producidos por la colisión con diferentes partes de la instalación.

Además de todas estas causas, existe una relación de la mortandad con respecto a la forma en que la energía es disipada en el aliviadero.

Cuando el pez pasa sobre el aliviadero y a continuación entra en el estanque, puede caer de dos maneras: una en caída libre o dentro de la columna de agua descendente.

Cuando un pez cae en caída-libre las condiciones para alcanzar la velocidad máxima dependen de su longitud es decir de su tamaño, así para peces entre 10 y 13 cm de longitud, después de 25-30 m de caída, la velocidad máxima que alcanza es de 12 m/s, cuando el tamaño del mismo es de 15-18 cm de longitud alcanza la velocidad de 15-16 m/s después de 30-40 m de caída, y para peces de 60 cm, la velocidad es de más de 58 m/s después de caídas de más de 200 m.

Los experimentos han demostrado que cualquiera que sea el tamaño del pez cuando la velocidad del impacto contra el agua excede el valor de 15-16 m/s, los daños que se producen son significativos, concretamente: heridas en las branquias, ojos y órganos internos (Bell y Delacy, 1972). Esta velocidad crítica es alcanzada después de una caída libre aproximada de 30-40 m para peces de 15-16 cm de longitud, pero tan solo de 13 m para peces de 60 cm de longitud.

Para los peces con longitud inferior a 10-13 cm, cuando caen en caída-libre y la velocidad es inferior a la velocidad crítica, los peces no sufren ningún daño para cualquier altura de caída. Si la velocidad de caída no es superior a la velocidad crítica de 15-16 m/s los peces grandes no sufren daños. Este valor de la velocidad corresponde a caídas que varían entre 12 m para los peces de longitud superior a 60 cm y 30 m para peces con 18 cm de longitud.

Tabla 1. Valores de la longitud del pez, velocidad y la altura en caída libre.

Longitud del pez (cm)	Velocidad crítica (m/s)	Altura de caída (m)
10-13	12	25-30
15-18	15-16	30-40
60	15-16	12

Las expectativas de supervivencias de un pez pasando sobre el aliviadero y entrando al estanque dentro de la columna de agua, también dependen del valor de la velocidad de caída, como es en el caso de caída libre, (Bell y Delacy, 1972). Cuando el chorro cae en el agua, se prevé que se produzca una desaceleración del chorro siempre que no exista un desvío inadecuado. La columna de agua alcanza la velocidad crítica del pez (16 m/s) después de una caída de 13 m (caída libre sin pérdidas). Para alturas superiores a 13 m, existe riesgo de heridas importantes y mortandad, incrementándose este riesgo proporcionalmente a la caída (100 % de mortalidad para una caída de 50-60 m).

En definitiva, el paso a través del aliviadero en condiciones de caída libre es siempre menos peligroso para peces pequeños (menores a 15-18 cm de longitud) porque casi nunca alcanzan una velocidad máxima mayor que la velocidad crítica. Para peces grandes, los peligros son idénticos si ellos caen bajo las condiciones de caída libre o si ellos están dentro de la columna de agua.

Es importante que se produzca una pérdida de turbulencia en la base de la presa, y el menor golpe físico (lo cual está relacionado con un volumen suficiente de agua y la ausencia de estructuras peligrosas como pueden ser algunos disipadores de energía), si se produce esta pérdida de energía, entonces aumenta las posibilidades de supervivencia de los peces.

Para conseguir el máximo porcentaje de supervivencia, el mejor sistema del aliviadero es el sistema de “aliviadero salto de esquí” con caída libre al estanque profundo. Este sistema elimina la abrasión en la superficie del aliviadero, especialmente si se permite caer a los peces libremente fuera de la columna de agua.

En Francia, los aliviaderos raramente suponen un problema para los peces, particularmente en presas de moderada altura (menores de 10 m). Normalmente caen sin daños a la zona de aguas abajo, con suficiente profundidad y la base de la presa no presenta deflectores agresivos (Larinier y Travade 2002).

12.2.2 Paso a través de turbinas hidráulicas.

El paso de los peces a través de las turbinas genera varias formas de estrés, incluso frecuentemente, llega a provocar la muerte. Los daños pueden ser de varios tipos: golpes por el movimiento de las partes estacionarias de la turbina (deflectores guías, aspas del rodete), aceleraciones o desaceleraciones súbitas (desde 3-5 m/s en la entrada a 10 o 30 m/s dentro del rodete), cizallamiento, cambios muy rápidos de presión, y cavitación.

Se han realizado numerosos experimentos en varios países (USA; Canadá, Suiza, Suecia, Alemania y Francia) para determinar el porcentaje de mortandad, cuando los peces pasan a través de los principales tipos de turbinas. Las especies estudiadas principalmente son salmones jóvenes, aunque también especies de la familia de los clupeidos (alosas y sardinas) y en anguilas.

La mortandad en las turbinas Pelton es del 100 %. Afortunadamente estas turbinas son usadas solamente para grandes saltos y no son instaladas en los ríos con especies diadromas.

El porcentaje de mortandad de salmónidos (salmones juveniles y truchas) en las turbinas Francis y Kaplan es muy variable. La variabilidad depende de las características del rodete (diámetro, velocidad de rotación etc.), el método de operar, el salto, y el tamaño del pez. En las turbinas Francis, el porcentaje varía entre valores inferiores del 5 % hasta el 90 %. En las turbinas Kaplan el porcentaje de mortandad es menor, varía entre el 5 % y el 20 %. La diferencia de los porcentajes de mortalidad entre estos dos tipos de turbinas se debe simplemente al hecho de que las turbinas Francis son generalmente instaladas en saltos relativamente altos. Cuando ambos tipos de turbinas están instaladas a la misma altura de salto y el mismo caudal entonces los daños causados son similares. Porcentajes de baja mortandad (alrededor del 5 %) se han registrado en grandes turbinas de gran tamaño con saltos pequeños, como por ejemplo en la central hidroeléctrica de Mauzac en el río Dordogne, Francia (Larinier y Dartiguelongue, 1989).

La mortalidad varía entre las especies. Concretamente, en los peces fisóstomos (salmónidos, clupeidos y ciprínidos) la presión en la vejiga natatoria puede ser regulada de manera relativamente rápida a través del canal de aire de la boca, y por ello estas especies pueden resistir cambios bruscos de presión. Por el contrario, en los peces como la perca y lucioperca la presión es regulada mucho más lentamente, en este caso la regulación se realiza por el intercambio de gases a través de los vasos sanguíneos de la pared de la vejiga natatoria. El riesgo de ruptura de la vejiga natatoria por una caída repentina de presión es mucho más grande, por lo tanto estas especies son, por este motivo, más susceptibles al cambio de presión.

En el caso de las anguilas adultas el porcentaje de mortandad es generalmente más alto debido a su mayor longitud. Los valores normales están comprendidos entre 15 % y 30 % para turbinas Kaplan de tamaño grande y saltos pequeños, eventualmente del 50 % al 100 % en turbinas pequeñas usadas en la mayor parte de las pequeñas centrales hidroeléctricas (Monten, 1985, Larinier y Dartiguelongue, 1989, Desrochers, 1984, Haddingh y Bakker, 1998). Los valores mínimos, aproximadamente del 6 %, han sido computados en pequeños saltos con turbinas Kaplan de tres palas (Haddingh y Bakker, 1998).

En cuanto a las alosas juveniles se pensaba, hasta hace poco tiempo, que eran más susceptibles a las turbinas que los salmónidos y por lo tanto sufrían mayor mortalidad. Se consideraba que los porcentajes estaban entre 65 % y 80 % en turbinas donde la mortalidad de los salmones era del 10 % al 15 %. Sin embargo estudios más recientes han demostrado que la mortandad es similar a las observadas en los salmones.

Se han desarrollado varias fórmulas para predecir la mortalidad producida por las turbinas. Los estudios realizados en Francia han sido realizados por Larinier y Dartiguelongue (1989). Las fórmulas para predecir el porcentaje de mortalidad de los salmones juveniles y de las anguilas en las turbinas Francis y Kaplan se desarrollaron en base a la altura del salto del agua, de las propiedades de la turbina (diámetro del rotor, velocidad angular de la turbina) y lógicamente del tamaño del pez.

12.2.3 Predacción.

La instalación de una central hidroeléctrica tiende a incrementar el porcentaje de mortalidad de las especies emigrantes por hacerlas más vulnerables a los pájaros y peces piscívoros existentes en las proximidades de la central hidroeléctrica.

El embalse puede producir un hábitat que probablemente hará proliferar a las especies piscívoras, debido a que éstas podrán aprovecharse de la acumulación de los peces aguas abajo de la presa. Por otra parte, después de atravesar el embalse el pez puede estar dañado, estresado, extenuado, desorientado, atrapado en turbulencias o remolinos en la base de la presa; todas estas situaciones incrementan la vulnerabilidad de los peces migradores ante los depredadores. Aunque hay pocos datos al respecto, se puede considerar que la mortandad en salmones jóvenes, liberados inmediatamente aguas abajo después de atravesar el aliviadero de la presa puede significar hasta el 32 % de los esguines, cómo se ha detectado en el río Snake (Ruggles y Murray, 1983). En Dinamarca se registran mortandades comprendidas entre 81-85 %, alcanzando el 99 % para el salmón y el reo en arroyos con poca profundidad (Rasmussen *et al.*, 1996).

12.3. MEJORAS PARA FACILITAR LA MIGRACIÓN DESCENDENTE.

Los dispositivos que se instalan en las centrales hidroeléctricas para que el pez pueda realizar su migración descendente tienen como objetivo impedir que el pez entre en las turbinas, para ello se intenta conducir al pez hacia una derivación (bypass) que le transportará con seguridad aguas abajo de la presa y cerca de la misma.

Los dispositivos diseñados deben tener en cuenta el comportamiento del pez dentro de los pasos. El objetivo es conseguir que el pez sea guiado hacia el bypass para que el flujo hidráulico conduzca al pez a la entrada del bypass y no necesite nadar para encontrarla.

No todos los sistemas tienen la misma efectividad para el fin propuesto. Una de las maneras más eficaces de garantizar que los peces no entren en las turbinas consiste en la instalación de barreras físicas. También, como veremos más adelante, se pueden capturar y transportar a los peces migradores aguas abajo de la barrera.

12.3.1. Barreras físicas. Pantallas.

Un tipo de barrera física que se puede instalar para evitar el paso de los peces a las turbinas consiste en una pantalla. El área de la superficie de la pantalla depende de las

características de nado de las especies. El flujo enfrente de la pantalla debe ser lo suficientemente lento para permitir que el pez tenga el tiempo suficiente para encontrar el bypass.

Velocidad del agua hacia la pantalla.

La velocidad del agua hacia la pantalla (o la componente perpendicular a la pantalla medida sobre 10 cm por encima de la misma) debe ajustarse para que se pueda adaptar a las habilidades de natación del pez en cada una de las etapas de su ciclo de vida. Esta velocidad debe ser inferior al límite superior de la velocidad de crucero cuyo valor aproximado es (Videler, 1993):

$$V = 0,15 + 2,4 L$$

Dónde:

V es la velocidad en m/s.

“L” es la longitud del pez en m.

Para pequeños salmones (15-20 cm de longitud) la velocidad del flujo puede ser 50 cm/s. En Escocia para salmones de 12 a 15 cm de longitud, se han utilizado velocidades de 30 cm/s (Aitken *et al.* 1966). En la costa oeste de USA, donde los salmones juveniles son también pequeños, se utilizan velocidades de 25 cm/s para longitudes de 6 cm, en el caso de alevines de salmones inferiores a 6 cm la velocidad se reduce a 15 cm/s (Clay, 1995, ASCE, 1995)

Orientación de la pantalla.

Para guiar a los peces hacia el “by-pass” se instalan pantallas ubicadas en la entrada de las turbinas. Con estas pantallas además de impedir que los peces entren en las turbinas se consigue guiarlos hacia el bypass. La orientación más eficaz es situar la pantalla diagonalmente al flujo, con esta ubicación el pez localizará la entrada del bypass en la parte más alejada de la pantalla.

Hay dos maneras de guiar al pez (Larinier, 2002):

1.) La pantalla se coloca vertical o casi verticalmente con un ligero ángulo en la dirección del flujo y con la entrada al bypass en el punto situado más alejado.

2) La pantalla puede estar inclinada respecto de la vertical para evitar que el pez descienda a la parte más profunda y así conseguir desviar al pez hacia arriba en la columna de agua dirigiéndole hacia alguna de las entradas.

El ángulo de la superficie de la pantalla en la dirección del flujo, en todos los casos es menor a 45 °, puede llegar a ser menor de 20 ° (ver figura 12.1). Dependiendo del ángulo de la superficie de la pantalla, se genera una componente de la velocidad paralela a la superficie de la misma (velocidad tangencial), esta velocidad puede alcanzar entre una o tres veces la velocidad normal del flujo a la pantalla.

Tipos de pantallas.

Las pantallas físicas pueden ser de varios tipos, algunos de estos tipos son: placas perforadas, barras de metal, redes de alambre y mallas de plástico o metal.

El espaciamiento libre (también llamado luz) entre barras, en el caso de pantallas de barras, o alambre, está condicionado a que el pez no pueda atravesar estas pantallas, lo que depende de la anchura de los peces más pequeños. En el caso de las pantallas de barras, el espaciamiento entre barras debe ser menor a 1/10 de la longitud del pez (L). Sin embargo para evitar que el pez sufra daños es mejor que el distanciamiento disminuya a la valores de L/12 y L/15.

La eficacia de la pantalla física está muy relacionada con la capacidad de guiar al pez hacia el bypass, y de la configuración del bypass. No solo el flujo de velocidades tiene que ser acorde a la capacidad de nado de las especies, también la velocidad de aproximación a la barrera necesariamente debe ser uniforme. No deben existir zonas donde las velocidades sean demasiadas altas o demasiadas bajas porque de ser así podrían desorientar al pez en su camino hacia el paso alternativo.

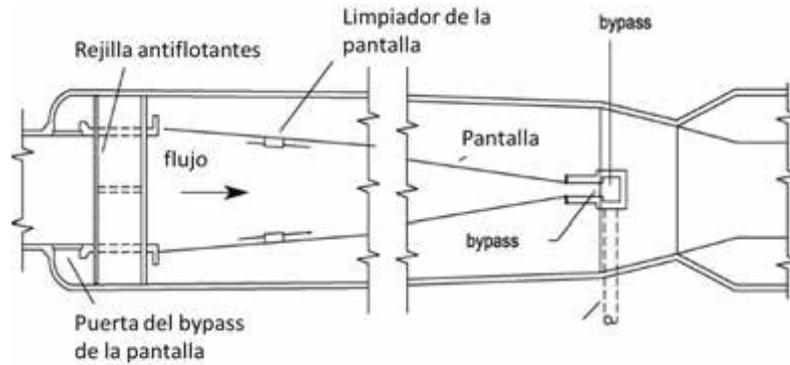
Protección y mantenimiento de las pantallas.

Las pantallas deben estar protegidas de daños físicos producidos por cuerpos flotantes arrastrados por la corriente. También, se debe evitar que se produzcan obstrucciones por la acumulación de estos arrastres. Normalmente, se usa una rejilla para proteger la pantalla de malla fina y limitar los acarreo acumulados en la entrada del bypass. El espaciamiento entre las barras de la rejilla deberá tener en cuenta el tamaño y el comportamiento del pez, para que éste no pueda atravesarla fácilmente.

Se han utilizado varios tipos de pantallas.

- *Pantallas de malla fina* (con una separación de alambre de 2,5 x 2,5 cm para el salmón atlántico), Estas pantallas forman una rejilla que impide que el pez entre en la cámara de turbinas, se instalan temporalmente durante el periodo de la migración: La velocidad debe ser menor de 0,30 m/s y se debe mantener limpia, para ello es necesario realizar labores de mantenimiento para que no se tapone la entrada de agua a las turbinas.

- *Pantalla de barras verticales y delgadas.* Estas pantallas son colocadas en ángulo con respecto a la dirección del flujo. Estas pantallas son muy utilizadas en USA (ASCE, 1995). Dependiendo de la anchura del canal, la pantalla debe estar situada con un ángulo pequeño en línea recta a través del canal o también en "V" para reducir la longitud del sistema. El ángulo de la pantalla, debe ser tan pequeño como sea posible (15° a 45°), de esta manera el pez puede ser guiado fácilmente hacia el bypass situado al final de la conducción. Además, con este sistema, en la medida de lo posible, se asegura la autolimpieza.



Pantalla de ángulo (Epri, 1994)

Figura 12.1 Pantalla de ángulo.

Se han desarrollado otros sistemas, como por ejemplo pantallas rotativas autolimpiables con forma de tambor, estas pantallas han sido utilizadas en USA (Nietzel *et al.*, 1990). También se han instalado pantallas corredizas sumergidas para centrales hidroeléctricas de la costa Oeste de USA (Williams, 1990, Turner *et al.* 1993)

Las pantallas Eicher (1985), según se muestra en la figura 12.2., son pantallas instaladas en la entrada de la turbina. La pantalla se coloca con un pequeño ángulo con respecto a la dirección de la entrada del flujo a la turbina, con el fin de desviar al pez hacia el bypass. La pantalla se compone de barras de alambres de 2 mm de sección triangular espaciados a una distancia determinada. Las velocidades normales a través de la pantalla y hacia la entrada del bypass son de 0,45 m/s y 1,5 m/s respectivamente. La pantalla está diseñada para poder girar un ángulo, y así permitir que la malla pueda ser invertida hacia el lado del flujo, con ello se consigue lavarla de los posibles arrastres. La principal ventaja de este tipo de pantallas es que pueden operar con altas velocidades de aproximación; los alambres de acero inoxidable presentan suaves superficies, con esta condición se reduce el riesgo de que los peces se hieran. El porcentaje de supervivencia es bastante grande, se han observado hasta el 90 % para algunas especies de salmones del pacifico con velocidades de aproximación de 2 m/s. Estas pantallas aunque se autolimpian, requieren ser protegidas de los cuerpos arrastrados por la corriente para evitar que no entren dentro del sistema.



Figura 12.2. Pantalla de Eicher (1985).

12.3.2. Barreras basadas en el comportamiento de los peces ante estímulos fisiológicos.

Los peces pueden ser estimulados para que naden en una dirección determinada como respuesta a un estímulo, ya sea de atracción o de repulsión. Estas barreras también requieren de protección contra entrapamientos.

Se han realizado diversas experiencias de barreras utilizando estímulos visuales, auditivos, hidrodinámicos y eléctricos. Los tipos de barreras pueden ser de lo más variado: de burbujas, de sonidos, eléctricas e hidrodinámicas de persiana. Aunque de estos experimentos ya se han obtenido resultados positivos, es necesario aumentar las investigaciones llevadas a cabo en las propias barreras.

Se debe tener cuidado sobre los posibles resultados demasiados optimistas obtenidos por algunos tipos de barreras fabricadas por marcas comerciales, puesto que en ciertos casos la eficacia de las mismas están sobreestimadas con el fin de obtener beneficios más lucrativos.

Iluminación.

Se han realizado investigaciones con luz estroboscópica en los que se ha conseguido producir repulsión en los peces (la luz estroboscópica es la iluminación mediante destellos). Estas experiencias han sido llevadas a cabo en USA y Canadá con lámparas sumergidas de luz estroboscópica, con el objetivo de desviar a los peces de las cámaras de las turbinas cuando realizan su descenso migratorio. Los valores de la eficacia de este sistema son muy variados; exceptuando los casos en que el lugar fue particularmente adecuado a la técnica, no es posible asegurar que sea un sistema seguro.

Los ensayos realizados con barreras de luz sumergidas y con fuentes continuas de luz como repelente para desviar anguilas adultas cuando realizan su viaje de descenso han obtenido resultados prometedores (Haddingh *et al.* 1992). En el caso de los salmones, se ha observado que son atraídos hacia una fuente de luz constante cuando realizan sus migraciones nocturnas descendentes. Los primeros resultados fueron obtenidos usando luz de baja potencia con lámparas de vapor de mercurio. Esta luz atrajo al pez hacia las zonas cercanas al bypass. El pez tiende a entrar al bypass cuando las lámparas se apagan (Larinier y Travade, 1996 y Gosset y Travade, 1999). Los resultados de algunas observaciones realizadas en Francia (central hidroeléctrica en el río Ariège y en la presa Poutès en el río Allier) muestran que cuando se usa una fuente de luz constante se incrementa significativamente la eficacia del bypass. Ensayos realizados en USA con lámparas de vapor de mercurio han obtenido resultados variables en función de las especies, unas son atraídas y otras son repelidas (Epri, 1994).

Pantallas de electricidad

Las pantallas eléctricas se han utilizado en varios países. Todavía no se ha podido comprobar su eficacia (Epri, 1994). En los ensayos realizados con el salmón joven del atlántico en el río Nive en Francia los resultados no han sido esperanzadores puesto que tan solo se ha conseguido el 15 % de eficacia (Gosset y Travade, 1999).

Pantallas de Sonido.

Las barreras acústicas son particularmente interesantes en las operaciones que se realizan en las centrales hidroeléctricas ya que al tener un número mínimo de componentes físicas consiguen disminuir o incluso eliminar el problema de las obstrucciones.

Se han llevado a cabo experimentos utilizando sonidos repelentes generados por transductores. Concretamente en USA se han desarrollado y patentado dos sistemas. Uno de baja frecuencia (<3 kHz) patentado por la compañía EESCO (Energy Engineering Services Company) y el otro es un sistema de ultrasonidos perteneciente a la entidad Sonalysts (Fish Starle). El sistema de baja frecuencia intenta ser capaz de desviar a un gran número de especies, mientras que el sistema de ultrasonidos es principalmente efectivo a los peces de la familia Clupeidos (Epri, 1994).

El sistema FGS (Fish Guidance systems Ltd) es otro sistema de Baja frecuencia desarrollado en el Reino Unido, Conocido como SPA (Sound Project Array; proyector de sonidos variados) es usado en los primeros transductores electromagnéticos específicamente para disuadir a los peces. La segunda patente es el dispositivo conocido como el BAFF (Bio-Acoustic Fish Fence, valla bioacústica para peces). Este dispositivo es usado en combinación con los transductores acústicos y con cortinas de burbujas de aire, el sonido es atrapado en la cortina de aire, permitiendo la generación de un muro acústico que puede ser usado para desviar al pez hacia el bypass.

Los resultados de los ensayos realizados con ambos métodos (SPA y BAFF) para desviar a los alevines de salmón del Atlántico han dado distintos resultados. En el Reino Unido, los resultados de los tests realizados durante la noche han sido relativamente buenos, cerca del 70 % de eficacia. Sin embargo, tan solo se ha obtenido el 30 % durante el día, en ríos pequeños y con poco caudal para bypass con un caudal relativamente grande (Whelton *et al.* 1997). En Francia, los intentos para guiar a alevines con una compuerta superficial a un bypass pequeño en una pequeña central hidroeléctrica fueron prácticamente nulos.

Algunos de estos resultados, se pueden explicar por el hecho de que los salmones no son muy sensibles a frecuencias mayores de 50 Hz. El máximo de sensibilidad ha sido observado entre 10 y 30 Hz.

12.3.3. Barreras hidrodinámicas o del tipo “persianas”.

Las pantallas hidrodinámicas o del tipo “persiana” consisten en una serie de listones colocados en ángulo recto a la dirección del flujo (ASCE, 1995). Este tipo de pantallas han sido usados en la Costa Oeste de USA, en canales de riego con grandes caudales (mayores a 140 m³/s). También, se han experimentado en las entradas de pequeñas centrales hidroeléctricas de las provincias marítimas de Canadá. Sin embargo, las pantallas de persianas de la Costa Oeste de USA han sido reemplazadas por pantallas de tambores rotatorios, la razón de su sustitución fue que el porcentaje de eficacia obtenido comprendido entre los valores del 60 al 90 % se consideró insuficiente para los salmones jóvenes, dado que las pantallas físicas son más eficaces.

El ángulo de la pantalla con respecto a la dirección del flujo toma los valores comprendidos entre 10° y 15° . El espaciamiento entre los listones está comprendido entre 2,5 y 15 cm dependiendo, lógicamente, del tamaño del pez que debe desviarse (ver figura 12.3.). El flujo de velocidades hacia la pantalla debe permanecer constante y uniforme, la velocidad depende del tamaño y capacidad natatoria de las especies (desde 0,6 a 1 m/s para los salmones en su etapa de esguín). El flujo de velocidades en el propio bypass debe ser 1,5 o 2 veces la velocidad de aproximación a la pantalla (Ruggles, 1980, ASCE, 1995)

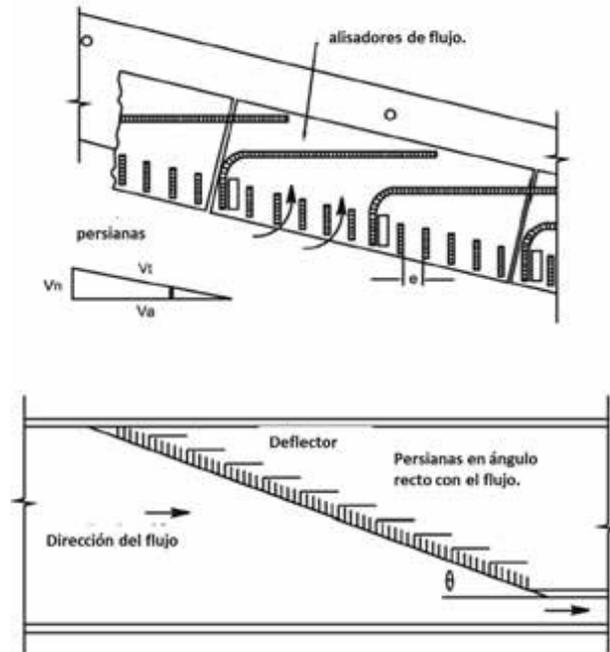


Figura 12.3. Pantallas de persianas.

Las primeras pantallas de persianas fueron instaladas en toda la profundidad del canal o del río. Sin embargo, posteriormente se han desarrollado varios sistemas a “profundidad parcial”. Esta nueva instalación se ha aplicado en USA. Este criterio de que la pantalla se desarrolle a una profundidad parcial, se ha aplicado con presas con los siguientes peces: alevines y esguines (salmones jóvenes que todavía no han salido al mar) y a los peces jóvenes de la familia cupleide (alosas, sardinas, arenques, etc.).

Este sistema de pantallas de persianas instaladas a cierta profundidad parcial ha sido aplicado en canales con 6 metros de profundidad (con caudales máximos de $140 \text{ m}^3/\text{s}$) como es el caso de la central hidroeléctrica de Holyoke en el río Connecticut, esta instalación es de grandes dimensiones, de hecho la pantalla tiene 120 m del tipo de persianas de polietileno, con una profundidad de 2,5 m y con una caudal en el bypass de $4 \text{ m}^3/\text{s}$. El sistema es eficaz para el 86 % de los clupeidos juveniles y el 97 % de los esguines del Atlántico (Odeh y Orvis, 1998).

El tipo de barrera de persianas está indicada para sitios donde el río mantenga un caudal y una velocidad permanente durante los periodos de la migración descendente. Su eficacia depende mucho del caudal tipo y del canal de entrada. La instalación de esta barrera requiere de una rejilla para proteger a la estructura de los cuerpos arrastrados por el río.

12.3.4. Condiciones de aplicación del Bypass y rejillas convencionales para la migración descendente.

En Francia, se han realizado estudios para evaluar la eficacia de los bypass asociados con rejillas convencionales para determinar su localización, dimensiones y limitaciones de su uso (Larinier y Travade, 1996, 1999, Travade *et al* 1999).

Estas experiencias demuestran que la eficacia de estos dispositivos depende de:

- El efecto repulsivo que la rejilla ejerce sobre el pez.
- La velocidad en el canal de entrada debe permitir al pez permanecer un tiempo suficientemente largo en frente de la rejilla para que pueda guiarse hacia la entrada del bypass. Para ello debe existir una velocidad bien establecida paralela a la rejilla.

El efecto repulsivo que ejerce la rejilla hacia los peces está en función de la relación entre las barras y el tamaño del pez y la componente tangencial del flujo de agua, así se produce, el efecto descrito como “persiana”.

Para que los salmones juveniles no puedan atravesar físicamente la rejilla de barras, el espacio entre las barras debe ser equivalente a la décima parte de la longitud del pez (1,5 a 2 cm para ejemplares que mide de 15 a 20 cm de longitud). Si bien en experimentos realizados con salmones y reos se ha encontrado un comportamiento “repelente” de las rejillas con espaciamentos desde 2,5 a 4 cm (sería 1/8 a 1/4 de la longitud). Con grandes espaciamentos el efecto de repulsión disminuye rápidamente y con espaciamentos aproximados de 6 o 7 cm, los salmones juveniles pasarían fácilmente a través de ellas, al menos que hubiera una fuerte componente de la velocidad tangencial en la rejilla.

Puede ser suficientemente valido que las velocidades sean de intensidad moderada, perpendiculares a la pantalla y con un flujo tangencial fácilmente perceptible y un espaciamento entre barras de 1/8 a 1/4 de la longitud del pez,.

Una componente de la velocidad tangencial a la rejilla se consigue cuando ésta se instala con un ángulo respecto de la entrada de las turbinas.

La velocidad máxima de la corriente para que los alevines de salmón atlántico puedan mantenerse frente a las pantallas durante el suficiente tiempo para conseguir llega al bypass, es aproximadamente de 0,50-0,60 m/s. En el caso de que las condiciones hidráulicas en frente de la pantalla sean favorables, las velocidades aceptables pueden ser notoriamente

superiores, como por ejemplo, con una corriente transversal muy marcada que guíe al pez hacia el bypass.

La entrada al bypass debe emplazarse lo más cercana a la rejilla y en el lado donde el pez tiende a congregarse. En estos sitios suele ocurrir que se forman zonas de recirculación a lo largo de una de las orillas, en este caso el bypass debe situarse en este sitio.

Además, de las condiciones anteriormente expuestas, la eficacia de la entrada al bypass depende del caudal y de las condiciones hidráulicas cerca de la entrada al bypass. La zona de influencia del bypass es la región aguas arriba del mismo donde el pez puede detectar el flujo hacia este bypass. Esta zona de influencia puede ser reducida a una pequeña parte en el caso de que existan surgencias no uniformes que se aproximan a la entrada del canal. Este efecto puede disminuir la componente de la velocidad horizontal en la dirección del bypass y de esta manera enmascarar la entrada al canal. En algunos casos es posible reducir el efecto negativo producido por las surgencias instalando rejillas horizontales y sumergidas justamente antes de la entrada del agua al bypass. Con la instalación de esta rejilla horizontal se consigue mejorar las condiciones de flujo en la entrada del bypass del orden desde 15-35 % al 60 -75 %.

Estudios recientes realizados en Francia muestran que el sitio de ubicación de la rejilla en el bypass consigue que la eficacia varíe entre el 55 y el 85 % cuando las condiciones hidráulicas son favorables y del 10 al 20 % con condiciones desfavorables (Larinier y Travade 1999). Ejemplos de estos últimos casos son los bypass colocados en la orilla opuesta a las áreas donde el pez tiende a congregarse o con condiciones de flujo inadecuadas en la entrada del bypass o cuando el efecto de repulsión de la rejilla no es suficiente.

Características del bypass.

Para conseguir un buen funcionamiento del bypass es necesario evitar la entrada de arrastres. También, se debe desviar a los peces alrededor del obstáculo y conducirlos a su ambiente de forma segura. Los bypass deben instalarse o bien conjuntamente con barreras o solos en los casos en que se tenga la seguridad de que el pez se guíe de forma natural hacia el bypass, este último caso puede ser para los salmones jóvenes cuando la entrada del agua a las turbinas esté profundamente sumergida.

La eficacia del bypass depende mucho de la respuesta del pez a las condiciones hidráulicas (profundidad del flujo, velocidad, aceleración, etc.), determinadas por sus características estructurales (localización, dimensiones, tamaño, etc.).

Como se ha comentado anteriormente, la entrada del bypass debe situarse en el sitio donde llegan y se concentran los peces, ubicación que además debe estar al final de la pantalla. Normalmente el bypass para salmones jóvenes consiste en una apertura rectangular localizada en la superficie, con las dimensiones relacionadas con el caudal. Las dimensiones mínimas del bypass (anchura y profundidad del agua en la entrada) están basadas en el comportamiento de los peces, los cuales son reacios al paso del dispositivo con demasiada escotadura o poca profundidad. Para salmones jóvenes se recomienda como mínimo longitudes entre 0,40 y 0,50 m para ambas dimensiones.

La efectividad del bypass depende mucho de las condiciones hidráulicas en la entrada. Se ha observado que en un flujo con aceleraciones grandes, los peces son reacios a entrar al bypass, puesto que el pez es muy sensible a los cambios bruscos de velocidad. La aceleración dentro del paso debe ser lenta y progresiva. Se deberá construir un estanque intermedio para controlar esta aceleración en la entrada del bypass, en el caso de que no se pueda construir este estanque, se deberá regular el flujo con un vertedero ancho o con una compuerta giratoria.

El caudal que atraviesa el bypass estará relacionado con el caudal que atraviesa las turbinas. En las investigaciones realizadas en Francia, los caudales eficaces de los bypass varían desde el 2 al 10 % del caudal de la turbina. En la costa oeste de USA el caudal del bypass está comprendido entre el 5 % y el 10 % del caudal de las turbinas.

La ubicación de la entrada del bypass con respecto a las turbinas tiene mucha importancia. Si el ángulo de la pantalla es muy agudo, el bypass deberá instalarse al final del punto más bajo. Si el flujo no es simétrico, el bypass debe instalarse en las áreas de recirculación donde los peces se concentran, y si el flujo es inestable es mejor construir dos o más bypass (ver figura 12.4).

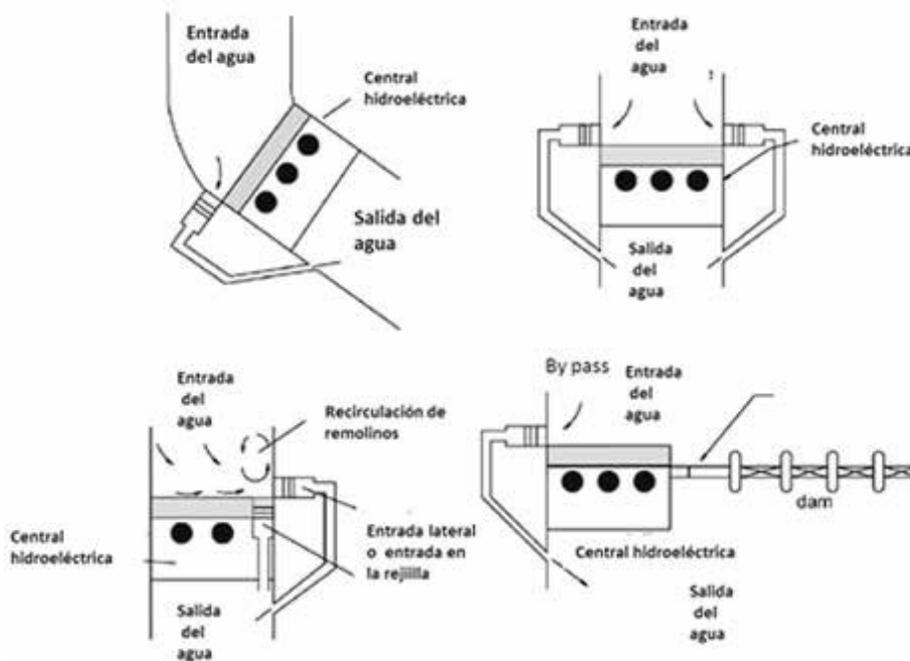


Figura 12.4. Localizaciones del bypass en las estaciones hidroeléctricas (original de Larinier, 2002).

Un problema importante que puede afectar a los bypass es el bloqueo producido por los arrastres. Justamente las zonas donde se pueden producir los bloqueos suelen ser donde los peces tienden a concentrarse, y por lo tanto donde debe ubicarse el bypass. Este problema se resuelve instalando dispositivos para que los arrastres flotantes puedan ser trasladados aguas abajo de la presa.

Incorporación de los peces al río.

Después de que el pez ha atravesado el bypass debe incorporarse al río. La incorporación se debe hacer de tal forma que todo o parte del caudal del bypass se fusione con el flujo procedente de la cola de la central hidroeléctrica. En el punto de impacto donde se une el flujo del bypass con el procedente de la cola de la central no debe existir velocidad superior a 10 m/s, incluso se recomienda no exceder de 7-8 m/s. Para evitar los efectos de corte o de cizalla y también para evitar que el chorro de penetración sea demasiado profundo, es preferible que el flujo sea extendido. Por el contrario si en la zona se concentran los depredadores, el pez no debe ser transferido en el agua de forma excesivamente lenta.

Cuando el flujo en el bypass se hace demasiado grande (varios m³/s), el pez debe ser guiado por medio de una pantalla inclinada. La pantalla debe estar inclinada lateral u horizontalmente; esto permite que las dimensiones del canal necesarios para transportar al pez puedan reducirse. La luz de la malla depende de las especies, así para el esguín del salmón del Atlántico las barras deben ser de 1 cm de anchura con 1 cm de luz. En cualquier caso, la luz debe ser menor que la anchura del pez.

Captura a la salida del bypass y transporte aguas abajo.

En algunos casos no es posible devolver el pez al río inmediatamente. En estas condiciones se deben capturar a los peces y transportarlos aguas abajo en camiones o incluso en barcos. La operación implica capturar al pez y mantenerlo en el estanque, en el que tanto el volumen de agua como el caudal deben estar ajustados a la frecuencia del transporte (normalmente una o dos veces al día).

El volumen en el tanque se calcula acorde a la máxima cantidad de peces que estarán en la trampa y el tiempo de estancia. El cálculo se hace en base a 30 litros por kg (35 kg de peces por metro cúbico de agua). Es imprescindible que el volumen total del agua en el estanque se renueve una o dos veces por hora (Larinier, 2002).

El volumen del tanque de transporte se calcula a partir de 15 litros por kg de pez, aproximadamente 70 kg de pescado por metro cúbico de agua (Bell, 1986; ASCE 1995).

La mayor parte de las investigaciones realizadas de la migración descendente se han realizado sobre salmónidos, del resto de especies se tiene un menor conocimiento.

Los sábalos juveniles tienen un comportamiento migratorio análogo al de los salmónidos (migración de descenso en las zonas superficiales), por lo tanto, puede ser razonable que los dispositivos diseñados para estos últimos sean eficaces para el sábalo. Aun así, se debe tener en cuenta las dimensiones de los sábalos para adaptar los dispositivos a la capacidad de nado de esta especie. Se ha observado que la mortandad de esta especie al atravesar las turbinas es menor que la de los salmónidos.

En el caso de las anguilas (*Anguilla, anguilla*) se considera que tan solo las barreras físicas son eficaces, pero su instalación puede requerir redimensionarlas y reducir la "luz" de la malla o de la distancia entre barras de la barrera.

Para la trucha común es posible asimilar las soluciones usadas para el salmón del atlántico. Si bien tanto el espaciamiento de las barras de la barreras como la velocidad aguas arriba de la pantalla necesitan adaptarse a los tamaños y condiciones de los individuos de esta especie.

En cuanto a otras especies como ciprínidos, lucio etc., las posibles soluciones no están claramente definidas. Se sabe que cuando estos peces son pequeños emigran en gran número para redistribuirse en el río. Si el salto de agua es pequeño, y teniendo en cuenta que algunas especies de este grupo solo migran distancias limitadas (no es el caso del barbo ni de la boga), se debe de evaluar la posibilidad de no realizar ninguna actuación, dado el relativo bajo porcentaje de mortalidad en las turbinas, situación distinta a los salmónidos.

12.3.5. Conclusiones sobre los dispositivos de descenso para los peces.

Según Larinier y Travade (2002) las barreras físicas son las más eficientes. El rango de aplicación de la derivación (bypass) de superficie combinada con las rejillas convencionales del tipo “persiana” está limitado. El resto de barreras expuestas solo se pueden considerar como soluciones experimentales, dado su bajo ratio de eficacia.

Hay que tener muy en cuenta, los parámetros hidráulicos que influyen en la migración descendente en la entrada de las turbinas (velocidad, superficie, orientación espaciamiento, pantallas etc.).

Es necesario incrementar las investigaciones relacionadas, tanto del comportamiento del pez como la reacción de ellos ante los estímulos medioambientales, en particular las condiciones hidrodinámicas en las entradas de los canales.

Se debe reducir el daño producido a los peces cuando atraviesan las turbinas. No hay razones para que las turbinas maten a los peces, especialmente en instalaciones de saltos de pequeña altura. En USA, se han diseñado turbinas donde se tienen en cuenta la migración de los peces (Ota, 1995; Cada *et al.*, 1997).

12.4. BIBLIOGRAFIA

AITKEN P.L. DICKERSON L.H., MENZIES W.J.M., 1966. Fish passes and screens at water power works, Proc. Inst. Civ. Eng., 35: 29-57.

ASCE, 1995. Fish passage and protection. *In: Guidelines for design of intakes for hydroelectric plants*, American Society of Civil Engineers, New York, N.Y., 469-499.

BELL M.C., DELACY A.C., 1972. *A Compendium on the survival of fish passing through spillways and conduits*. Fish. Eng. Res. Prog., U.S. Army Corps of Eng., North Pacific Div., Portland, Oregon, 121 p.

BELL, 1986. Fisheries handbook of engineering requirements and biological criteria. U.S. Army Corps of Eng., North Pacific Div., Portland, Oregon, 290 p.

CADA G., COUTANT C., WHITNEY R., 1997. Development of biological criteria for the design of advanced hydropower turbines, U. S. Department of Energy, Idaho Operation Office, Idaho Falls ID, USA, 85 p.

CLAY C.H., 1995. Design of fishway and other fish facilities. Lewis Publisher, Boca Raton Ann Harbor, London, Tokyo, 248 p.

DESROCHERS D., 1984. *Suivi de la migration de l'anguille d'Amerique au complexe présidence Environnement*. Hydro Québec Rep., 107 p.

EICHER G. J., 1985. Fish passage: protection of downstream migrants. Hydro Review, 4, 95-100.

EPRI, 1994. Research update on fish protection technologies for water intakes, Stone and Webster Eng. Corp., Boston. Massachussetts, 225 p.

GOSSET C., TRAVADE F., 1999. *Etude de dispositifs d'aide à la migration de dévalaison des salmonidae: barrières comportementales*. Cybium 1999, 23 (1) suppl.: 45-66.

HADDERINGH R.H., VAN DER SOEP J.W., HAGRAKEN J.M. 1992. Deflecting eels from water inlets of power stations with light. Irish Fish. Invest., 36: 37-41.

HADDERINGH R.H. BAKKER H. D., 1998. Fish mortality due to passage through hydroelectric power stations on the Meuse and Vecht rivers. *In*: JUNGWIRTH M., SCHMUTZ S., WEISS S. (Eds), Fish Migration and Fish Bypasses, Fishing News Books, 315-328.

LARINIER M., DARTIGUELONGUE J, 1989. *La circulation de poissons migrateurs: le transit à travers les turbines des installations hydroélectrique*. Bull. Fr. Pisc., 312-313. 1-90,

LARINIER 2002. *Fishways: biological, basis, design criteria and monitoring*. Bull. Fr. Pisc., 181-207p

LARINIER M., TRAVADE F., 1996. Smolt behavior and downstream fish bypass efficiency at small hydroelectric plants in France. Association Internationale de Recherches Hydrauliques, 2° Symposium international sur l'hydraulique et les habitats, Ecohydraulique 2000, Québec, vol B, 891-902.

LARINIER M., TRAVADE F., 1999. The development and evaluation of downstream bypasses for juveniles salmonids at small l'hydroelectric plants in France *In*: ODEH m. (ed), Innovations in Fish Passage Technology, American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, 25-42.

LARINIER M., TRAVADE F.2002. Downstream migration: problems and facilities. Bull Fr. Pêche Piscic 364 suppl. pp181-207.

MONTEN E., 1985. Fish and turbines. Fish injuries during passage through power station turbines. Vattenfall, Stockholm, 111 p.

NIETZEL D.A. CLUNET T. J. ABERNETHY C.S. 1990. Evaluation of rotary drum screens used to project juveniles salmonids in the Yakima river basin, Washington,, USA. Proc. Int. Symp. On fishways, Gifu, Japan, 523-529.

ODEH M., ORVIS C., 1998. Downstream fish passage design considerations and developments at hydroelectric projects in the North-east USA. *In*: JUNGWIRTH M., SCHMUTZ S., WEISS S. (Eds), Fish Migration

OTA (Office of Technology Assessment), U.S. Congress, 1995. Fish passage technologies: protection at hydroelectric facilities, OTA-ENV-641, Washington, DC; U.S. Government Printing Office, 167 p.

RUGGLES C.P., 1980. *A review of the downstream migration of Atlantic Salmon. Freshwater and Anadromous Div.*, Resource Branch Dept. of Fisheries and Oceans, Halifax, Nova Scotia, Can Tech. Rep. of Fisheries and Aquatic Sci. 982, 39 p.

RASMUSSEN G., AARESTRUP K., JEPSEN N, 1996. Mortality of Sea Trout and Atlantic Salmon smolts during seaward migration through rivers and lakes in Denmark. ICES C.M., AnaCat Fish Committee. Theme session on anadromous and catadromous fish restoration programmes: A time for Evaluation, 14 p.

RUGGLES C.P., MURRAY D.G., 1983. *A review of fish response to spillways.* Freshwater and Anadromous Div., Branch Dept. of Fisheries and Oceans, Halifax Nova Scotia, Can. Tech. Rep. of Fishereis and Aquatic Sci. 1172, 30 p.

TURNER A.R. FERGUSON J.W. BARILA T.Y. LINDGREN M.F., 1993. Development and refinement of turbine intake screen technology on the Columbia River. Proc. Symp. American Fisheries Society, Fish passage policy and technology, Portland Oregon, USA, 123-128.

TRAVADE F., GOUYOU C., DE FAVERI N., 1999. *Efficacité d'un exutoire de dévalaison et d'une barrière acoustique pour les smolts de saumon atlantique (salmo salar L.) à l'aménagement hydroélectrique de St. Cricp sur le Gave d'Ossau.* Bull. Fr. Pêche Piscic. 353/354: 157-180.

VIDELER J., 1993. Fish swimming. Chapman & Hall, Fish and fisheries seires 10, 260 p.

WHELTON J.S., BEAUMONT W.R.C., LADLE M. MASTERS J.E.G., 1997. Smolt Trapping Using Acoustic Techniques. Environment Agency, R&D Technical Report W66, 79 p.

WILLIAMS, J.G. 1990. Water velocity in relation to fish behavior in the design of screens for diversion of juvenile salmonids from turbines at hydroelectric dams on the Columbia river, USA. Proc. Int. Symp. on fishways, Gifu, Japan, 137-142.



MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

ORGANISMO
AUTÓNOMO
PARQUES
NACIONALES