



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO PARA EL REEMPLAZO DE 2 TURBINAS  
BULBO DE LA CENTRAL CASTET, FRANCIA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

CRISTÓBAL ANDRÉS VERA TOLEDO

PROFESOR GUÍA:  
RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ  
PABLO CASTILLO CAPPONI

SANTIAGO DE CHILE  
ENERO 2015

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: CRISTÓBAL ANDRÉS VERA TOLEDO  
FECHA: ENERO 2015  
PROF. GUÍA: SR. RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ

## ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO PARA EL REEMPLAZO DE 2 TURBINAS BULBO DE LA CENTRAL CASTET, FRANCIA

Este trabajo de título se enmarca en un proyecto de fin de estudios realizado para la empresa Société hydro  lectrique du Midi (SHEM), ubicada en la ciudad de Toulouse, Francia.

El trabajo de título consiste en realizar un análisis técnico-económico de diferentes soluciones teniendo en cuenta la evolución de nuevas tecnologías ‘‘Ictiófilas’’ (amigables con la fauna acuática) para preparar el reemplazo de 2 turbinas tipo bulbo que est  n actualmente en funcionamiento en la central hidroeléctrica de Castet.

Cada solución propuesta debe asegurar las funciones principales de Castet, respetando las restricciones impuestas por la concesión y cumpliendo con la reglamentación ambiental exigida. Además por cada propuesta debe entregar una solución a nivel de ingeniería conceptual junto con un plano de implementación y un análisis económico. La metodología del presente trabajo consistió en realizar un estudio del funcionamiento de la central, seguido de un estudio hidrológico y levantamiento de datos, una formulación de todas las restricciones involucradas, la formulación de tres escenarios de reemplazo y la realización de los análisis económicos. Cada escenario contó con una visita técnica.

El escenario No. 1 ‘‘Reemplazo de manera idéntica de los grupos Bulbos’’ con una inversión total de 4.237.720[  ] tiene la ventaja de la reutilización de las obras civiles y un alto retorno de experiencia, teniendo como principal desventaja la incertidumbre del costo y factibilidad de un mecanismo que permita la migración de peces. El escenario No. 2 ‘‘Reemplazo con tecnología VLH’’ con una inversión total de 5.454.000[  ] tiene la ventaja de solucionar la problemática de la migración al ser una tecnología ictiófila la cual posee como principal desventaja su complejidad de instalación. El escenario No. 3 ‘‘Reemplazo con tecnología Tornillo Hidrodinámico’’ con una inversión total de 4.803.520[  ] posee también el carácter ictiófilo y tiene como principal desventaja su mal funcionamiento para la regulación del caudal entrante, razón por la cual no se recomienda su implementación.

Resulta indispensable clarificar el estado actual de las compuertas deslizantes a través de un estudio mecánico detallado, rehacer un estudio sobre el estado del muro contra-fuerte y la realización de un estudio del mecanismo de migración del escenario No. 1. Todo esto antes de tomar cualquier decisión de reemplazo. Ninguno de los 3 escenarios propuestos es rentable al poseer una TIR inferior al 5% y un VAN negativo. Sin embargo, se demostró la importancia de solucionar la problemática de la migración y analizar financieramente al conjunto de centrales del Valle d’Ossau dada la pronta renovación de concesiones.



« *Savoir, penser, rêver. Tout est là* »  
**Victor Hugo**

# Agradecimientos

El hombre es inherentemente un ser social, nunca podrá encontrar su plenitud si no es en la entrega sincera de sí mismo a los demás. Debo por tanto agradecer este hito a todas las personas que cruzaron mi camino durante estos 7 años.

Mis padres, que me brindaron la libertad necesaria desde un comienzo para perseguir mis sueños, forjar mis propias ideas y lucharon siempre ante la adversidad por brindar a mí y a mi hermano una buena educación. En particular agradecer la incondicionalidad, la humildad y el amor infinito de mi vieja así como la resiliencia de mi viejo. Agradecer a mi hermano por su sabiduría y sensatez. Agradecer a la familia en general, que a lo largo de mi vida me ha demostrado como apoyarse desde el plano económico hasta el emocional. No quisiera dejar pasar la oportunidad de agradecer a Francisca, a sus padres y a su familia con quienes me sentí un miembro más, brindándome amor e incondicionalidad durante estos últimos 7 años.

Los amigos, el compartir con tus pares es algo que siempre tendré como prioridad, cada uno de los encuentros, cada conversación, abrazo, discusión y momento compartido sembró alguna semilla en mí. Mis amigos del colegio San Ignacio, mis amigos de primer año y los 4real de Mecánica me harán sentir por siempre rico y valorar lo que realmente importa en la vida.

Agradecer a la Universidad de Chile y al DIMEC, a los profesores que me tocó conocer y compartir como a los funcionarios, que siempre tuvieron la disposición a solucionar cualquier problema. En particular al profesor Aquiles Sepúlveda quién me brindó su apoyo desde un comienzo en mi estadía en Francia como también al profesor Ramón Frederick que además de su apoyo, aceptó ser mi profesor guía.

A todas las personas que conocí, siéntanse parte de esta finalización y de todo corazón les digo gracias, luchen por sus sueños e ideales para poder mejorar nuestra sociedad y este hermoso planeta tierra.

# Tabla de contenido

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1. Motivación, objetivos y alcances</b>	<b>2</b>
1.1. Motivación . . . . .	2
1.2. Objetivos . . . . .	3
1.2.1. Objetivo General . . . . .	3
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	3
1.2.3. Alcances y comentarios . . . . .	3
<b>2. Metodología</b>	<b>4</b>
<b>3. Antecedentes</b>	<b>5</b>
3.1. Situación geográfica . . . . .	5
3.2. La central . . . . .	6
3.3. Los grupos electromecánicos . . . . .	7
3.4. Las instalaciones . . . . .	8
3.4.1. La presa . . . . .	8
3.4.2. Ascensor de peces . . . . .	9
3.4.3. Compuertas deslizantes . . . . .	10
3.4.4. Boca de desagüe (dispuesta en la compuerta N°1) . . . . .	11
3.4.5. Muro anti-gravas . . . . .	12
3.4.6. Rejillas en la toma de agua . . . . .	13
<b>4. Análisis hidrológico, de explotación y de las restricciones involucradas</b>	<b>14</b>
4.1. Análisis Hidrológico . . . . .	14
4.2. Análisis de Explotación . . . . .	16
4.2.1. Producción de energía . . . . .	16
4.2.2. Caudales a través de las turbinas . . . . .	17
4.2.3. Flujos entrantes y salientes (función regulación) . . . . .	18
4.2.4. Variación de niveles . . . . .	19
4.3. Análisis de Restricciones . . . . .	23
4.3.1. Restricciones de la Concesión . . . . .	23
4.3.2. Restricciones ligadas a la seguridad . . . . .	24
4.3.3. Restricciones ligadas a los grupos electromecánicos . . . . .	24
4.3.4. Restricciones ligadas a los productores aguas abajo . . . . .	24
4.3.5. Restricciones medioambientales . . . . .	25
4.4. Problemas y Recomendaciones . . . . .	26

4.4.1.	Sistema de gestión de la reserva de agua . . . . .	26
4.4.2.	Estudio de estabilidad de la presa . . . . .	26
4.4.3.	Soluciones para migración aguas abajo . . . . .	30
4.5.	Síntesis restricciones y problemas . . . . .	35
<b>5.</b>	<b>Escenarios de reemplazo</b>	<b>36</b>
5.1.	Reemplazo de manera idéntica de los grupos Bulbos . . . . .	37
5.1.1.	Adaptación a Castet . . . . .	37
5.1.2.	Producción de energía . . . . .	42
5.1.3.	Estimación de costos . . . . .	43
5.1.4.	Síntesis escenario 1 . . . . .	44
5.2.	Reemplazo con tecnología VLH . . . . .	45
5.2.1.	El producto VLH . . . . .	46
5.2.2.	Ventajas . . . . .	52
5.2.3.	Gamma turbina VLH . . . . .	55
5.2.4.	Centrales en operación o en construcción . . . . .	57
5.2.5.	Adaptación a Castet . . . . .	58
5.2.6.	Esquema de Implementación . . . . .	73
5.2.7.	Descripción de la Implementación . . . . .	74
5.2.8.	Estimación de costos . . . . .	75
5.2.9.	Síntesis Escenario No. 2 . . . . .	76
5.3.	Reemplazo con tecnología Tornillo Hidrodinámico . . . . .	78
5.3.1.	Descripción General . . . . .	79
5.3.2.	Variedad de Instalaciones . . . . .	80
5.3.3.	Adaptación a Castet . . . . .	82
5.3.4.	Información Técnica [17] . . . . .	88
5.3.5.	Esquema de Implementación . . . . .	91
5.3.6.	Estimación de costos . . . . .	94
5.3.7.	Síntesis escenario 3 . . . . .	95
<b>6.</b>	<b>Análisis económico</b>	<b>97</b>
6.1.	Escenario 1 . . . . .	98
6.1.1.	Evaluación a 20 años . . . . .	98
6.1.2.	Evaluación a 40 años . . . . .	100
6.2.	Escenario 2 . . . . .	102
6.2.1.	Evaluación a 20 años . . . . .	102
6.2.2.	Evaluación a 40 años . . . . .	104
6.3.	Escenario 3 . . . . .	106
6.3.1.	Evaluación a 20 años . . . . .	106
6.3.2.	Evaluación a 40 años . . . . .	108
	<b>Conclusión</b>	<b>108</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>113</b>
	<b>Anexos</b>	<b>116</b>

# Índice de tablas

3.1. Características generales de los grupos electromecánicos . . . . .	7
3.2. Capacidad actual probable de la presa [4] . . . . .	8
3.3. Características del muro anti-gravas [4] . . . . .	12
3.4. Características de la rejilla en la toma de agua [4] . . . . .	13
4.1. Características de la central Castet [4] . . . . .	14
4.2. Caudales promedios mensuales del Gave d'Ossau (elaboración propia) . . . . .	14
4.3. Curva de caudales clasificados (CCC) (elaboración propia) . . . . .	15
4.4. Producción de energía años 2011 y 2013 (elaboración propia) . . . . .	16
4.5. Caudales turbinados años 2011,2012 et 2013 (elaboración propia) . . . . .	17
4.6. Caudales máximos [11] . . . . .	27
4.7. Capacidad de flujos [11] . . . . .	28
4.8. Fuerza y torque aplicado a la estructura en un caso normal [11] . . . . .	29
4.9. Evaluación de los criterios de estabilidad [11] . . . . .	29
4.10. Estimación cota de peligro [11] . . . . .	29
4.11. Reemplazo de los 2 grupos bulbos en Castet - Múltiples criterios (elaboración propia) . . . . .	35
5.1. Total energía generada en Castet 2003-2013 [12] . . . . .	42
5.2. Estimación de costos para el escenario No. 1: Reemplazo de manera idéntica de los grupos Bulbos (Elaboración propia) . . . . .	43
5.3. Resultados del estudio del INPG [19] . . . . .	53
5.4. tasa de supervivencia para 200 individuos inyectados [24] . . . . .	54
5.5. Mortalidad en la VLH para 3 puntos de abertura [24] . . . . .	54
5.6. Gamma turbina VLH [21] . . . . .	55
5.7. Centrales en operación o en construcción [21] . . . . .	57
5.8. Funcionamiento en regulación automática del caudal [16] . . . . .	59
5.9. Funcionamiento en regulación automática de la velocidad de rotación [16] . . . . .	59
5.10. Comparación de producción de energía actual y la opción No 1 VLH (elaboración propia) . . . . .	64
5.11. Funcionamiento en regulación automática del caudal [16] . . . . .	66
5.12. Funcionamiento en regulación automática de la velocidad de rotación [16] . . . . .	66
5.13. Funcionamiento en regulación automática del caudal [16] . . . . .	66
5.14. Funcionamiento en regulación automática de la velocidad de rotación [16] . . . . .	66
5.15. Comparación de producción de energía actual y la opción No 2-a VLH (elaboración propia) . . . . .	69

5.16. Comparación de producción de energía actual y la opción No 2-b VLH (elaboración propia) . . . . .	72
5.17. Estimación de costos para el escenario No. 2: Reemplazo con tecnología VLH (Elaboración propia) . . . . .	75
5.18. Comparación entre la actual producción y la opción No. 1 Tornillo Hidrodinámico (elaboración propia) . . . . .	86
5.19. Comparación entre la actual producción y la opción No. 2 Tornillo Hidrodinámico (elaboración propia) . . . . .	87
5.20. Estimación de costos para el escenario No. 3: Reemplazo con tecnología tornillo hidrodinámico (Elaboración propia) . . . . .	94

# Índice de figuras

3.1. La Central Castet [7] . . . . .	5
3.2. Visión general de la central desde aguas abajo [4] . . . . .	6
3.3. Vista general desde el cielo [4] . . . . .	6
3.4. Esquema en corte de la Central Castet [4] . . . . .	7
3.5. Vista de la presa [4] . . . . .	8
3.6. Ascensor de peces [4] . . . . .	9
3.7. Compuertas deslizantes [4] . . . . .	10
3.8. Boca de desagüe en la VC1 [4] . . . . .	11
3.9. Muro anti-gravas [4] . . . . .	12
3.10. Rejillas en la toma de agua [4] . . . . .	13
4.1. Caudales promedios mensuales del Gave d’Osseau (elaboración propia) . . . . .	15
4.2. Curva de caudales clasificados de Castet (elaboración propia) . . . . .	15
4.3. Curva cronológica de los caudales - año 2013 (elaboración propia) . . . . .	16
4.4. Potencia instantánea 2011 y 2013 en Castet (elaboración propia) . . . . .	17
4.5. Caudal promedio turbinado en Castet en los años 2011-2012-2013 (elaboración propia) . . . . .	18
4.6. Flujos entrantes y salientes en Castet año 2011 (elaboración propia) . . . . .	19
4.7. Variación nivel de la presa en Castet (elaboración propia) . . . . .	20
4.8. Curva de evolución de caudales y niveles año 2013 en Castet (elaboración propia) . . . . .	21
4.9. Curva de evolución en Castet por estaciones en 2013 (elaboración propia) . . . . .	22
4.10. Caudal mínimo a restituir durante el año [4] . . . . .	23
4.11. Vista en sección de las compuertas deslizantes [10] . . . . .	27
4.12. Vista en corte de las armaduras [10] . . . . .	28
4.13. Periodo de migraciones de salmónidos y anguilas [9] . . . . .	30
4.14. Síntesis contexto reglamentario [9] . . . . .	30
4.15. Esquema del principio del escenario No 1 [9] . . . . .	31
4.16. Esquema del principio de la opción 1 [9] . . . . .	32
4.17. Esquema del principio de la opción No. 2 [9] . . . . .	33
4.18. Esquema del principio del escenario No. 3 [9] . . . . .	34
5.1. Sección transversal de una turbina bulbo [27] . . . . .	37
5.2. Unidad EcoBulb doblemente regulada [28] . . . . .	38
5.3. Potencias de la Ecobulbo para distintas alturas y caudales [28] . . . . .	38
5.4. vista de la sección transversal de la instalación [10] . . . . .	41
5.5. Simplificación del sistema eléctrico que se debe reemplazar (Elaboración propia) . . . . .	41

5.6. Más de 700 visitantes a Millau [21] . . . . .	45
5.7. vista en corte de una VLH DN4000 [21] . . . . .	47
5.8. Esquema del Control [21] . . . . .	48
5.9. vista del estator VLH [21] . . . . .	49
5.10. Mecanismo de control de álabes [21] . . . . .	50
5.11. vista de la turbina VLH [21] . . . . .	50
5.12. vista de la turbina en posición de mantención [21] . . . . .	51
5.13. Ingeniería civil necesaria escalada para la diferentes tecnología para un mismo salto [21] . . . . .	52
5.14. Caudal Máximo Unitario [21] . . . . .	55
5.15. Potencia Eléctrica Máxima unitaria en [kW] [21] . . . . .	56
5.16. Opción No 1: 4 grupos VLH idénticos (elaboración propia) . . . . .	58
5.17. Gráficos de los distintos mecanismos de regulación tecnología VLH (Elaboración propia) . . . . .	59
5.18. Regresión polinomial (elaboración propia) . . . . .	60
5.19. Potencia Eléctrica VLH 3550 vs $\frac{Q}{Q_n}, \frac{H}{H_b}$ (elaboración propia) . . . . .	61
5.20. Potencia Eléctrica VLH 3550 $\frac{Q}{Q_n}$ vs $\frac{H}{H_b}$ (elaboración propia) . . . . .	61
5.21. Comparación producción energía en Castet 2011 - G1 Bulbo vs 2xVLH en cascada (elaboración propia) . . . . .	62
5.22. Comparación producción energía en Castet 2011 - G2 Bulbo vs 2xVLH en cascada (elaboración propia) . . . . .	62
5.23. Comparación producción energía en Castet 2011 - G1 y G2 Bulbos vs 4xVLH en cascada (elaboración propia) . . . . .	63
5.24. Comparación producción energía en Castet 2013 - G1 y G2 Bulbos vs 4xVLH en cascada (elaboración propia) . . . . .	63
5.25. Opción No 2-a: 2 grupos estándar y 2 grupos reforzados para la altura restante (elaboración propia) . . . . .	65
5.26. Potencia Eléctrica VLH 3550 estándar vs $\frac{Q}{Q_n}, \frac{H}{H_b}$ (elaboración propia) . . . . .	67
5.27. Potencia Eléctrica VLH 3550 estándar $\frac{Q}{Q_n}$ vs $\frac{H}{H_b}$ (elaboración propia) . . . . .	67
5.28. Comparación producción energía en Castet 2011 - G1 y G2 Bulbos y 4xVLH en cascada (elaboración propia) . . . . .	68
5.29. Comparación producción energía en Castet 2013 - G1 y G2 Bulbos y 4xVLH en cascada (elaboración propia) . . . . .	68
5.30. Opción No 2-b: 2 grupos reforzados y 2 grupos estándar para la altura restante (elaboración propia) . . . . .	70
5.31. Comparación producción de energía en Castet 2011 - G1 y G2 Bulbos y 4xVLH en cascada (elaboración propia) . . . . .	71
5.32. Comparación producción de energía en Castet 2013 - G1 y G2 Bulbos y 4xVLH en cascada (elaboración propia) . . . . .	71
5.33. Esquema de Implementación escenario No. 2 VLH (Elaboración Propia) . . . . .	73
5.34. Central Cavaletalde (fotos propias) . . . . .	77
5.35. Centrales con tornillos hidrodinámicos, empresa RONCUZZI, Italia [30] . . . . .	78
5.36. Tornillo con carcasa metálica basal [32] . . . . .	80
5.37. Tornillo con estructura autoportante [32] . . . . .	80
5.38. Système compact [32] . . . . .	81
5.39. Tornillo de tube compact [32] . . . . .	81



5.40. Opción No. 1: 6 Tornillos en paralelo (elaboración propia) . . . . .	82
5.41. La curva de potencia del tornillo hidrodinámico [17] . . . . .	83
5.42. Curva de Eficiencia del tornillo hidrodinámico [17] . . . . .	84
5.43. Eficiencia de la caja reductora [17] . . . . .	84
5.44. Eficiencia del generador del tornillo hidrodinámico [17] . . . . .	84
5.45. Comparación producción de energía en Castet, 2011 (elaboración propia) . .	85
5.46. Comparación producción de energía en Castet, 2013 (elaboración propia) . .	86
5.47. Opción No. 2: 4 Tornillos Hidrodinámicos en paralelo (elaboración propia) .	87
5.48. Motor-generador asíncrono y la caja reductora del sistema . . . . .	89
5.49. Esquema de Implementación escenario No. 3 (Elaboración Propia) . . . . .	91
5.50. compuerta especial en la misma estructura metálica de los tornillos (foto propia)	93
5.51. Central Canal Albert, Bélgica (imagenes propias) . . . . .	96
6.1. Gráficos resúmenes del análisis económico escenario No. 1 para 20 años . . .	99
6.2. Gráficos resúmenes del análisis económico escenario No. 1 para 40 años . . .	101
6.3. Gráficos resúmenes del análisis económico escenario No. 2 para 20 años . . .	103
6.4. Gráficos resúmenes del análisis económico escenario No. 2 para 40 años . . .	105
6.5. Gráficos resúmenes del análisis económico escenario No. 3 para 20 años . . .	107
6.6. Gráficos resúmenes del análisis económico escenario No. 3 para 40 años . . .	109

# Introducción

La mini-hidráulica ha ocupado siempre un nicho a la sombra de las grandes instalaciones hidroeléctricas, pero gracias a nuevas políticas que incentivan su desarrollo y el incremento inexorable del costo de los combustibles fósiles se ha convertido en una solución para todos aquellos lugares en donde haya un caudal disponible.

Los constructores de equipos hidroeléctricos han investigado y construido turbinas adaptadas a bajas potencias y la electrónica de potencia ha permitido obtener generadores adaptados a estas máquinas. Tanto particulares como colectivos pueden encontrar hoy en día soluciones económicas y ecológicas respondiendo a sus necesidades energéticas.

Este trabajo se enmarca en la renovación de una antigua y pequeña central en los Pirineos de Francia. La central Castet fue construida en el año 1953 por la SNCF (Société Nationale des Chemins de Fer Français) con el fin de regular los flujos provenientes de centrales de mayor tamaño aguas arriba, afectando a los pequeños productores aguas abajo por la gran variación del caudal a lo largo de la jornada. El objetivo principal de la Central Castet es poder funcionar como tampón y poder atenuar las grandes variaciones del caudal entregando un flujo constante durante la jornada. El presente trabajo pretende incorporar nuevas tecnologías “Ictiófilas” (amigables con la fauna acuática) para cumplir con las exigencias ambientales que hasta el día de hoy no se han cumplido, teniendo en cuenta la pronta renovación de concesiones hidroeléctricas.

La renovación de los equipos en la central Castet, perteneciente a la empresa SHEMA (Société Hydro-Électrique du Midi) cuenta con numerosas restricciones ligadas tanto a problemas técnicos y económicos pero también ligados a la seguridad, al medio-ambiente y al ámbito jurídico. Estas restricciones convierten el problema en un análisis de múltiples variables.

# Capítulo 1

## Motivación, objetivos y alcances

### 1.1. Motivación

Hoy en día Chile tiene el desafío, traducido en la ley 20.257 [1], de inyectar el 20 % de energía renovable no convencional (ERNC) al sistema eléctrico nacional para el año 2025. La inyección acumulada y reconocida por la ley, entre los meses de Enero y Septiembre 2014 [3] alcanzó un total de 3.155 [GWh]. Esto fue representado por un 30,82 % de bioenergía (132 [GWh]), 23,66 % mini-hidráulica (102 [GWh]), 34,94 % eólica (150 [GWh]) y un 10,58 % solar (45 [GWh]), lo que corresponde al 11,23 % bajo los parámetros de exigencia de la ley.

El estudio de la Universidad de Chile en conjunto a la UTSM [2] realizó una estimación del potencial técnicamente factible para la mini-hidráulica en 3003 [MW]. En Noviembre del 2014, la potencia instalada de la mini-hidráulica fue de 343 MW, representando el 18 % de la potencia total instalada de las ERNC en los sistemas eléctricos nacionales. Cabe destacar que para el mismo mes se encuentran 129 [MW] en construcción y otros 322 [MW] con RCA (Resolución de Calificación Ambiental) aprobada. [3]

La motivación de este trabajo es impulsar la investigación y desarrollo de este tipo de energía tanto en el Departamento de Ingeniería Mecánica como en Chile y poder estar a la vanguardia en la utilización de nuevas soluciones y tecnologías que se desarrollan actualmente en el mundo, generando una retroalimentación de la experiencia en el extranjero.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

Estudiar y analizar diferentes soluciones técnicas, considerando las oportunidades ligadas a la evolución de nuevas tecnologías “Ictiófilas”, para preparar el reemplazo de 2 turbinas hidráulicas tipo bulbo que están actualmente en funcionamiento en la Central Castet.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Estudio y análisis de datos de la hidrología de la central Castet
- Estudio y formulación de restricciones involucradas
- Cálculos de producción de energía
- Formulación de escenarios de soluciones respetando parámetros de la concesión y de la reglamentación medioambiental exigida en Castet.
- Realización de esquemas de implementación para cada escenario
- Estimar el costo tanto de la ingeniería civil necesaria como de los equipos electromecánicos por cada solución propuesta.
- Realizar un análisis económico para cada solución propuesta.

### 1.2.3. Alcances y comentarios

- Las soluciones técnicas propuestas tendrán el nivel de ingeniería conceptual.
- Se utilizará la información técnica provista por los siguientes fabricantes:
  - MJ2 Technologies: Turbina VLH
  - GESS-CZ: Turbina Tornillo Hidrodinámico
  - ANDRITZ y MAVEL: Turbinas Bulbo
- Cada escenario propuesto estará respaldado por una visita de terreno para la tecnología escogida y por el juicio del experto contactado:
  - Experto Turbina VLH: Marc Leclerc (Presidente MJ2 Technologies) marc.leclerc@vlh-turbine.com
  - Experto Tornillo Hidrodinámico: Kathleen Moësse (Ingeniera jefe de la instalación en el Canal Albert en Olen, Bélgica) Kathleen.brusselmans@cofely-gdfsuez.com.
  - Experto Turbina Bulbo: Michel Laumond (Ingeniero Mecánico de la SHEM) michel.laumond@shem.fr
- Para cada análisis económico se utilizará el software creado por la CNR “Évaluation Financière des Projets d’Investissement”, especial para proyectos de mini hidráulica.

# Capítulo 2

## Metodología

Para el desarrollo de este trabajo, se seguirá los siguientes pasos:

- **Estudio del funcionamiento de la central Castet:** Etapa que consiste primeramente en conocer la situación geográfica a través de visitas a la central, revisar instalaciones civiles y el estado de los equipos electromecánicos para comprender el funcionamiento general de la Central.
- **Estudio hidrológico y levantamiento de datos:** Etapa que consiste en estudiar la hidrología de Castet, realizar un levantamiento de datos tanto de producción energética como de la gestión de la presa relativa a la regulación de los caudales.
- **Formulación de restricciones:** Etapa que consiste en clarificar todas las restricciones impuestas para desarrollar las potenciales soluciones de reemplazo. Se incluirán además recomendaciones realizadas por estudios independientes realizados para la central.
- **Formulación de los escenarios:** Etapa que consiste en la formulación de escenarios de reemplazo, donde cada escenario poseerá una determinada tecnología o una combinación de ellas para ofrecer una solución técnicamente posible cumpliendo con las restricciones mínimas encontradas. Cada escenario debe poseer un esquema de implementación y una estimación de costos tanto de la ingeniería civil como de los equipos electromecánicos necesarios.
- **Realización del análisis económico:** Etapa que consiste en la evaluación económica y financiera de cada escenario para una duración de evaluación de 20 y 40 años.
- **Resultados:** Generar cuadro comparativo y conclusiones de los escenarios propuestos

# Capítulo 3

## Antecedentes

### 3.1. Situación geográfica

La central Castet esta situada en la vallée d'Ossau, ubicada en la vallée des Pyrénées situada en el departamento de Pyrénées-Atlantiques al extremo sur-oeste de Francia metropolitana, en la región Aquitaine.

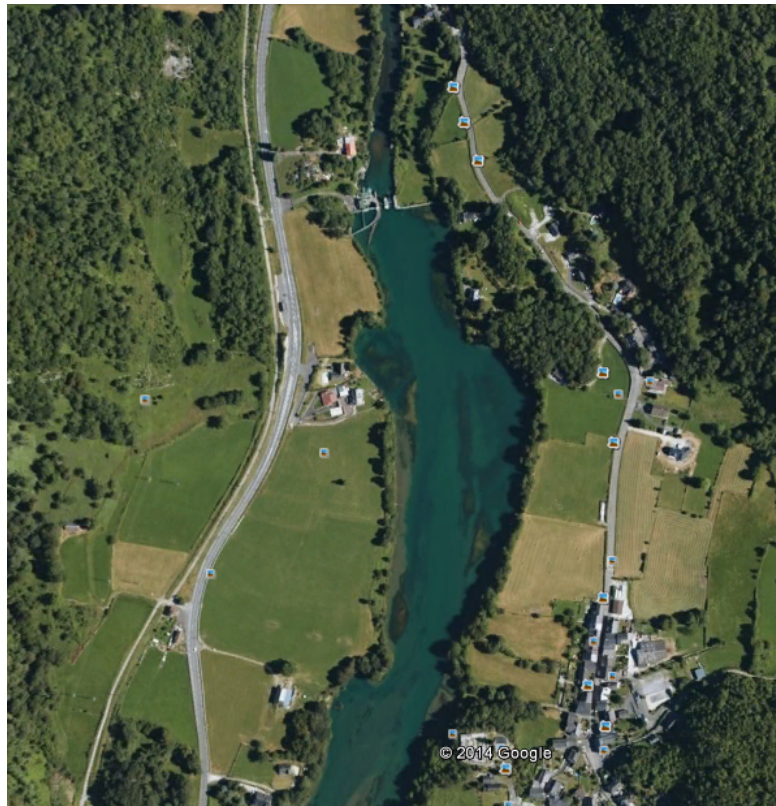


Figura 3.1: La Central Castet [7]

## 3.2. La central

La central esta constituida de un muro contrafuerte inclinado seguido sucesivamente por compuertas o aliviaderos de crecidas y la construcción civil donde se ubican los grupos electromecánicos. Rejillas y muro anti-gravas se encuentran ubicados antes de la toma de agua de los grupos.



Figura 3.2: Visión general de la central desde aguas abajo [4]

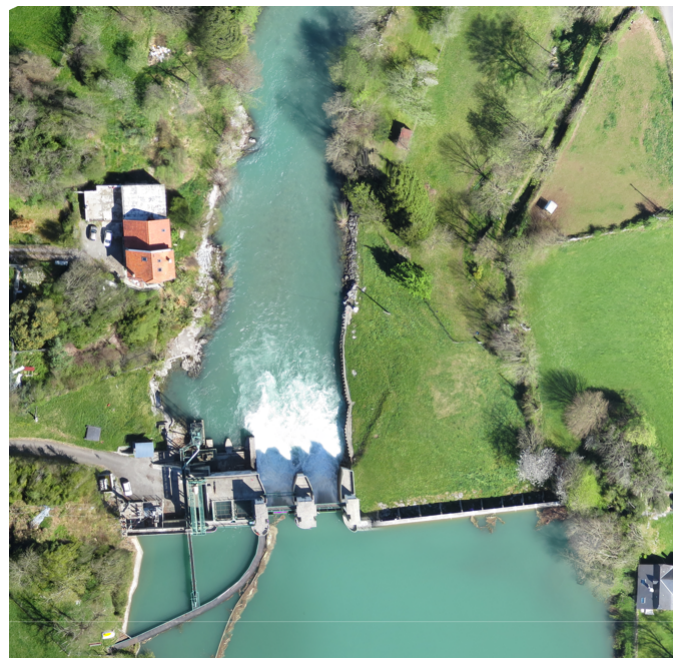


Figura 3.3: Vista general desde el cielo [4]

### 3.3. Los grupos electromecánicos

La central Castet esta constituida por dos grupos electromecánicos de tipo bulbo que tienen como características generales:

Tabla 3.1: Características generales de los grupos electromecánicos

Potencia del generador	1620 kW (810 kW por grupo)
Caudal	$30 \frac{m^3}{s}$ ( $15 \frac{m^3}{s}$ por turbina)
Salto bruto	7.5 m
Diámetro	1680 mm
Velocidad de rotación	$250 \left[ \frac{t}{mn} \right]$

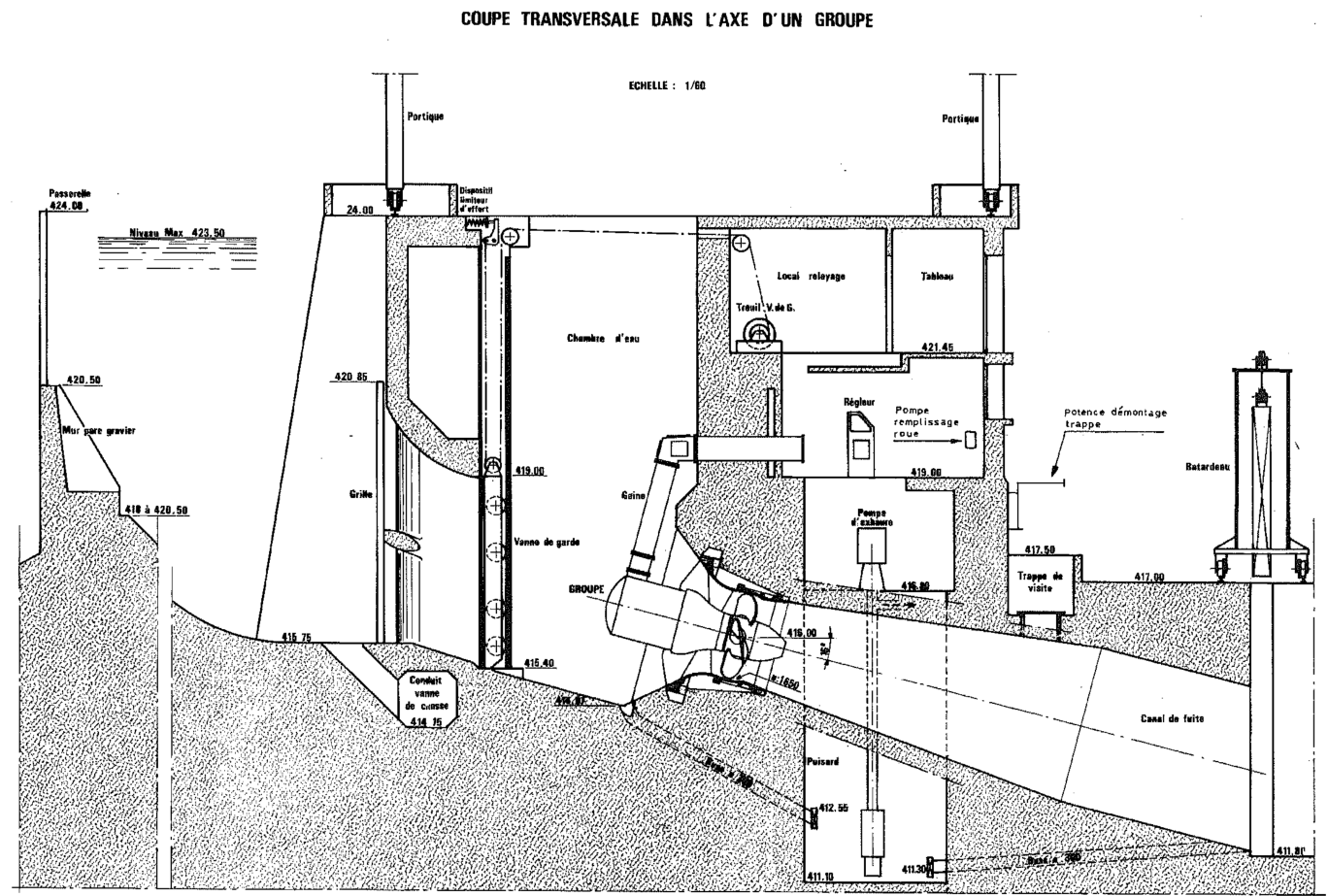


Figura 3.4: Esquema en corte de la Central Castet [4]



## 3.4. Las instalaciones

### 3.4.1. La presa

La presa de Castet esta sometida a un llenado progresivo de aportes de sedimentos transportados por el río “Gave d’Ossau”, en el pasado se han realizado campañas para quitar grandes porciones de sedimentos alojados. Por este hecho, existen aún incertidumbre de la capacidad de la presa. La tabla 3.2 muestra dos estimaciones de la capacidad actual probable.

- Nivel Máximo N.G.F (Nivelamiento General Francés) : 423.5
- Nivel Mínimo N.G.F: 421.5



Figura 3.5: Vista de la presa [4]

Tabla 3.2: Capacidad actual probable de la presa [4]

	Estimación 1	Estimación 2
Volumen total bajo la cota 423,5	342 366 $m^3$	350 000 $m^3$
Volumen contenido entre las cotas 423,5 et 422	199 148 $m^3$	205 000 $m^3$
Volumen contenido entre las cotas 423,5 et 421,5	240 299 $m^3$	245 000 $m^3$
Volumen total bajo la cota 421,5	102 067 $m^3$	105 000 $m^3$
Volumen contenido entre las cotas 423,5 et 420,5	296 522 $m^3$	—
Volumen total bajo la cota 420,5	45 844 $m^3$	—

### 3.4.2. Ascensor de peces

La central está equipada de un ascensor de peces con un flujo de atracción normalmente fijado en  $0.5 \frac{m^3}{s}$ . Este flujo está regulado por una válvula.



Figura 3.6: Ascensor de peces [4]



### 3.4.3. Compuertas deslizantes

Existen 2 compuertas deslizantes para la evacuación de crecidas, ambas incorporadas en un radier a la cota de 417 NGF. El ancho de las compuertas es de 7 metros y la altura de las mismas asciende a los 6.6 metros. Las compuertas están nombradas como VC1 (costado izquierdo del río) y VC2 (costado derecho del río)

- Caudal máximo:  $440 \frac{m^3}{s}$  ( $220 \frac{m^3}{s}$  por compuerta).

Las compuertas son maniobrables por un sistema de elevación por cadenas accionadas por motores eléctricos (2 motores por cada compuerta). Las compuertas pueden ser maniobradas ya sea voluntariamente desde el sitio por control eléctrico local o automático según el plan de agua, como también comandadas a distancia desde la central supervisora HOURAT. Además, estas pueden ser maniobradas de manera manual por medio de manivelas (maniobra que requiere de bastante tiempo y esfuerzo, solo a utilizar en casos excepcionales y debido a que todas las demás opciones fueron desechadas).



Figura 3.7: Compuertas deslizantes [4]

### 3.4.4. Boca de desagüe (dispuesta en la compuerta N°1)

La compuerta deslizante VC1 está equipada de una boca de desagüe de 3.5 metros de largo y 1 metro de altura.

- Caudal máximo:  $7 \frac{m^3}{s}$  en la cota 423.5

Está destinada a evacuar todos los cuerpos solidos flotantes en la superficie (limpieza del plan de agua). La boca de desagüe solo puede ser operada desde el sitio mismo. La obertura se realiza enviando una señal eléctrica, una orden de cierre de la compuerta deslizante VC1 generalmente ya cerrada. Esta orden de cierre tiende en cuenta que ya se encontraba cerrada le entrega una cierta flexibilidad a la cadena y el peso del agua hace pivotear la boca de desagüe con respecto a su eje. El movimiento de apertura de la boca de desagüe se continua hasta la obertura completa. Para cerrar, se necesita de entregar la orden inversa a la compuerta VC1 hasta el cierre completo de la boca de desagüe.



Figura 3.8: Boca de desagüe en la VC1 [4]

### 3.4.5. Muro anti-gravas

El muro anti-gravas esta situado aguas arriba al costado izquierdo de la central, protegiendo la entrada de las turbinas de gravas importantes o de otros objetos de tamaños importantes.

Tabla 3.3: Características del muro anti-gravas [4]

Largo	43 <i>m</i>
Altura	3 <i>m</i>
Superficie	129 <i>m</i> <sup>2</sup>
Inclinación	Vertical
Cota del Radier	de 420.50 à 412.75 NGF
Cota máxima	423.5 NGF
Espesor barra	10 <i>mm</i>
Espacio entre-barra	90 <i>mm</i>



Figura 3.9: Muro anti-gravas [4]



### 3.4.6. Rejillas en la toma de agua

Tabla 3.4: Características de la rejilla en la toma de agua [4]

Largo	8.4 m
Altura	4.5 m
Superficie	37.8 m <sup>2</sup>
Inclinación	74 °
Cota del Radier	416 NGF
Espesor barra	10 mm
Espacio entre-barra	80 mm



Figura 3.10: Rejillas en la toma de agua [4]

# Capítulo 4

## Análisis hidrológico, de explotación y de las restricciones involucradas

### 4.1. Análisis Hidrológico

Para la realización de este capítulo se contó con registros de caudales medidos cada hora para los años 2011, 2012 y 2013. Los caudales medidos se separaban en el caudal entrante, caudal turbinado y caudal a través de las compuertas donde la suma de los últimos dos corresponde al caudal saliente. Además, se contó con los registros de la variación del nivel de altura de agua en la presa medido cada hora para los años 2011, 2012 y 2013.

Se realizó un Hidrograma que es una manera de representar los caudales secuencialmente en el tiempo como se observa en la Figura 4.3, luego se construyó un gráfico de caudales promedios mensuales Figura 4.1 para luego realizar una curva de caudales clasificados que consiste en ordenar los caudales por orden de magnitud, indicando el número de días y por tanto el porcentaje de tiempo en el que se alcanzan o se superan determinados valores de caudal como se puede observar en la Figura 4.2.

Tabla 4.1: Características de la central Castet [4]

Río	Gave d'Osseau
Superficie cuenca hidrológica	410.65 km <sup>2</sup>
Media anual	18.9 $\frac{m^3}{s}$

Tabla 4.2: Caudales promedios mensuales del Gave d'Ossau (elaboración propia)

	En	Feb	Mar	Abril	Mayo	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
$Q \frac{m^3}{s}$	23.3	22.99	25.79	34.39	40.38	26.86	12.56	8.47	10.04	15.74	23.96	25.6

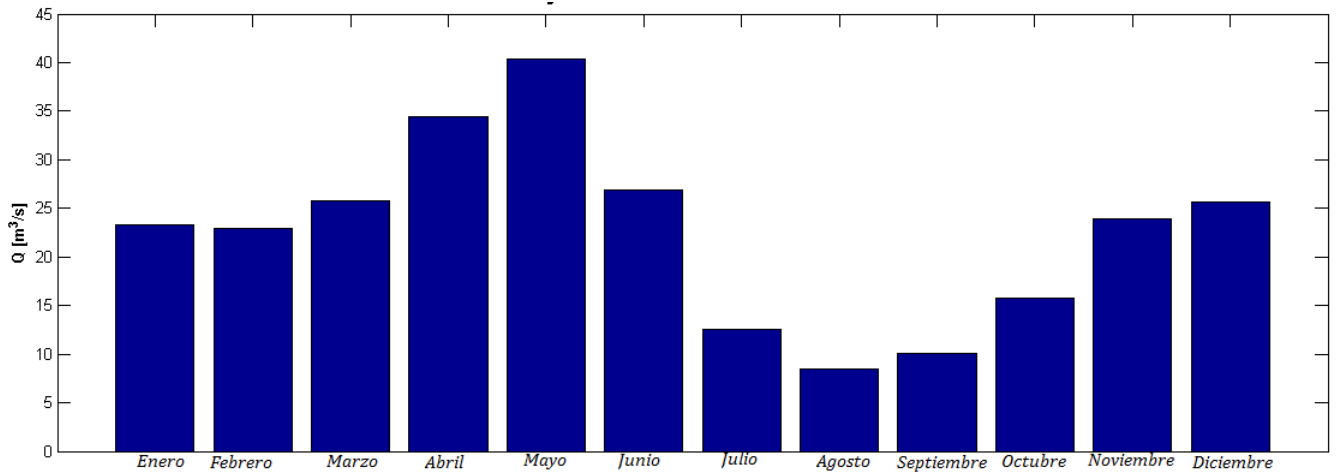


Figura 4.1: Caudales promedios mensuales del Gave d'Osseau (elaboración propia)

Tabla 4.3: Curva de caudales clasificados (CCC) (elaboración propia)

Frecuencia	Q clasificados $\frac{m^3}{s}$	No. de días
1 [%]	91.99	4
5 [%]	57.97	18
10 [%]	45.32	37
30 [%]	26.86	110
50 [%]	17.01	183
70 [%]	10.44	256
90 [%]	5.60	329
95 [%]	4.44	337
99 [%]	0.03	361

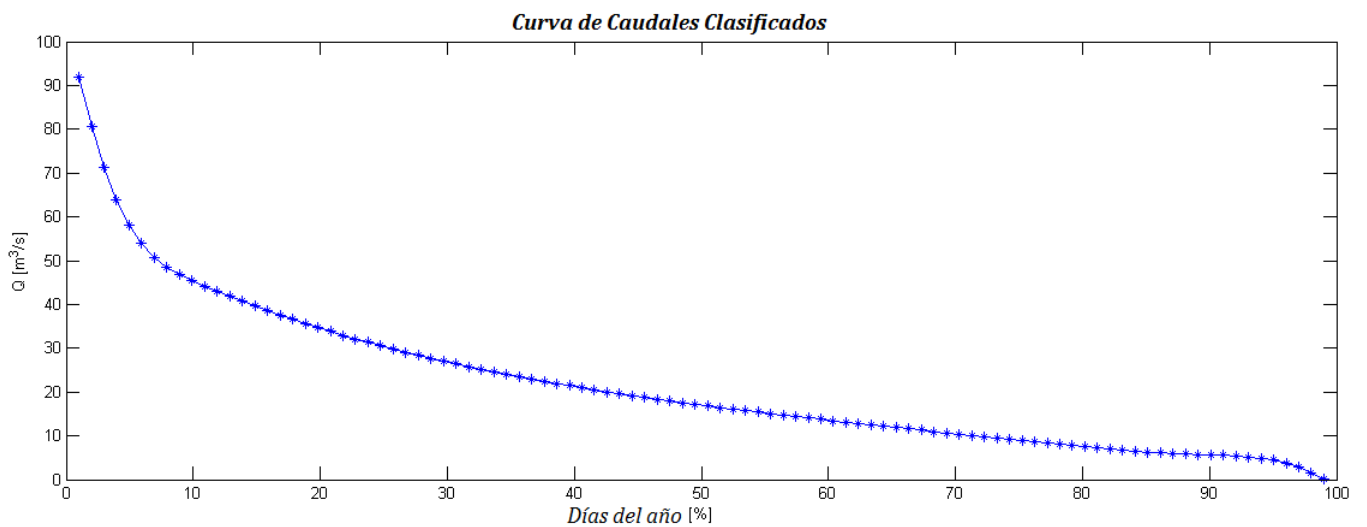


Figura 4.2: Curva de caudales clasificados de Castet (elaboración propia)



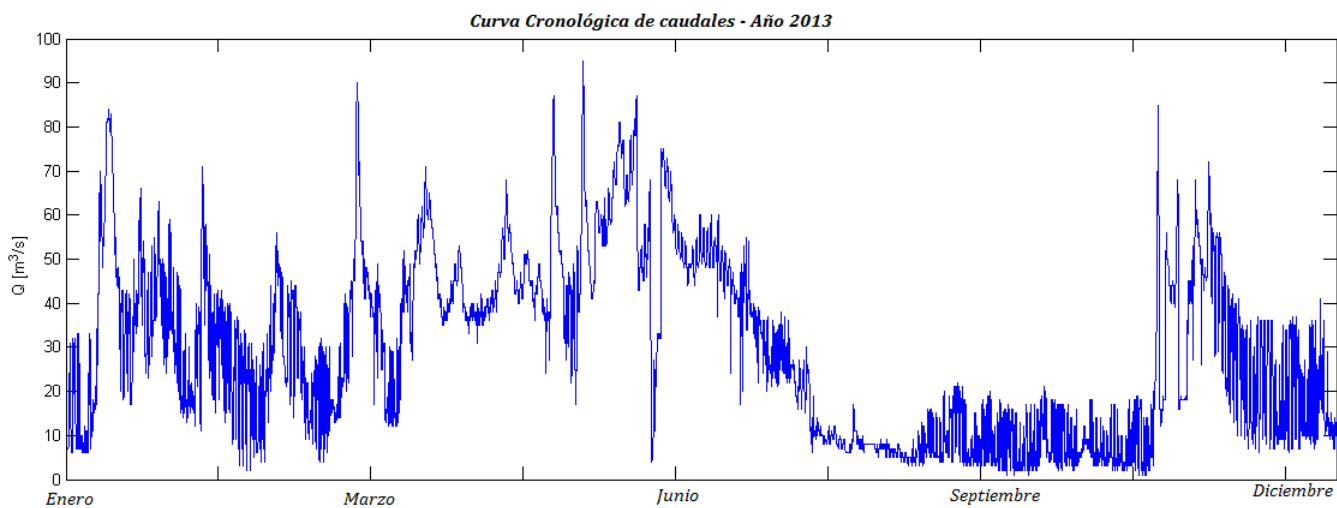


Figura 4.3: Curva cronológica de los caudales - año 2013 (elaboración propia)

## 4.2. Análisis de Explotación

Para el análisis de explotación se utilizaron las bases de datos de producción de energía de los años 2011, 2012 y 2013 separadas por cada grupo bulbo. Se contó con la potencia [MW] medida cada hora medida del generador, los caudales turbinados cada hora por cada grupo bulbo y el nivel de la presa (altura del nivel de agua de la reserva) por cada hora.

### 4.2.1. Producción de energía

En la tabla 4.4 se muestra la producción de energía promedio para los años 2011 y 2013 separadas por cada grupo bulbo y la total.

Tabla 4.4: Producción de energía años 2011 y 2013 (elaboración propia)

	Año 2011	Año 2013
Potencia G1 (Media Aritmética)	468 [kW]	598 [kW]
Potencia G2 (Media Aritmética)	463 [kW]	652 [kW]
Potencia Total (Media Aritmética)	677 [kW]	975 [kW]
Energía Generada G1	3.129.477[kWh]	4.327.800[kWh]
Energía Generada G2	2.047.725[kWh]	3.170.500[kWh]
Energía Generada Total	5.177.202 [kWh]	7.498.300 [kWh]
Factor de planta G1	0.44	0.6
Factor de planta G2	0.28	0.44
Factor de planta total	0.3648	0.5284

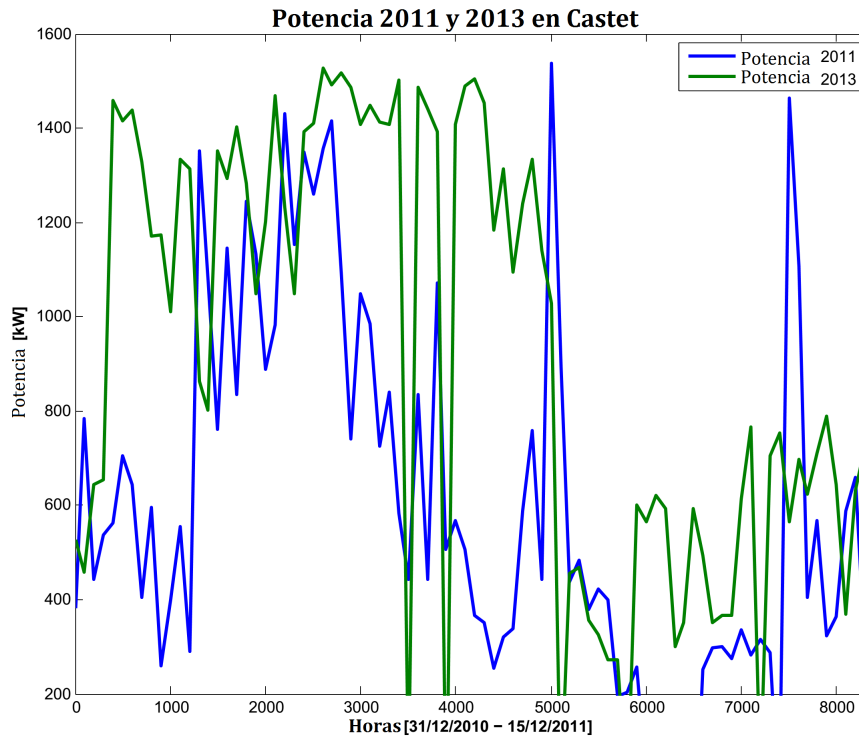


Figura 4.4: Potencia instantánea 2011 y 2013 en Castet (elaboración propia)

#### 4.2.2. Caudales a través de las turbinas

En la tabla 4.5 se encuentra detallados los caudales turbinados durante los años 2011, 2012 y 2013. Para la Figura 4.5 se realizó una interpolación de los caudales para cada tramo de 100 horas de medición durante el año.

Tabla 4.5: Caudales turbinados años 2011,2012 et 2013 (elaboración propia)

	Año 2011	Año 2012	Año 2013
Caudal turbinado G1 (Media Aritmética)	8.84 [ $m^3/s$ ]	9.54 [ $m^3/s$ ]	10.61 [ $m^3/s$ ]
Caudal turbinado G2 (Media Aritmética)	8.89 [ $m^3/s$ ]	8.64 [ $m^3/s$ ]	11.98 [ $m^3/s$ ]
Caudal Total Turbinado (Media Aritmética)	12.88 [ $m^3/s$ ]	11.5 [ $m^3/s$ ]	17.5 [ $m^3/s$ ]
Desviación Estándar Total	7.19 [ $m^3/s$ ]	6.9 [ $m^3/s$ ]	8.81 [ $m^3/s$ ]

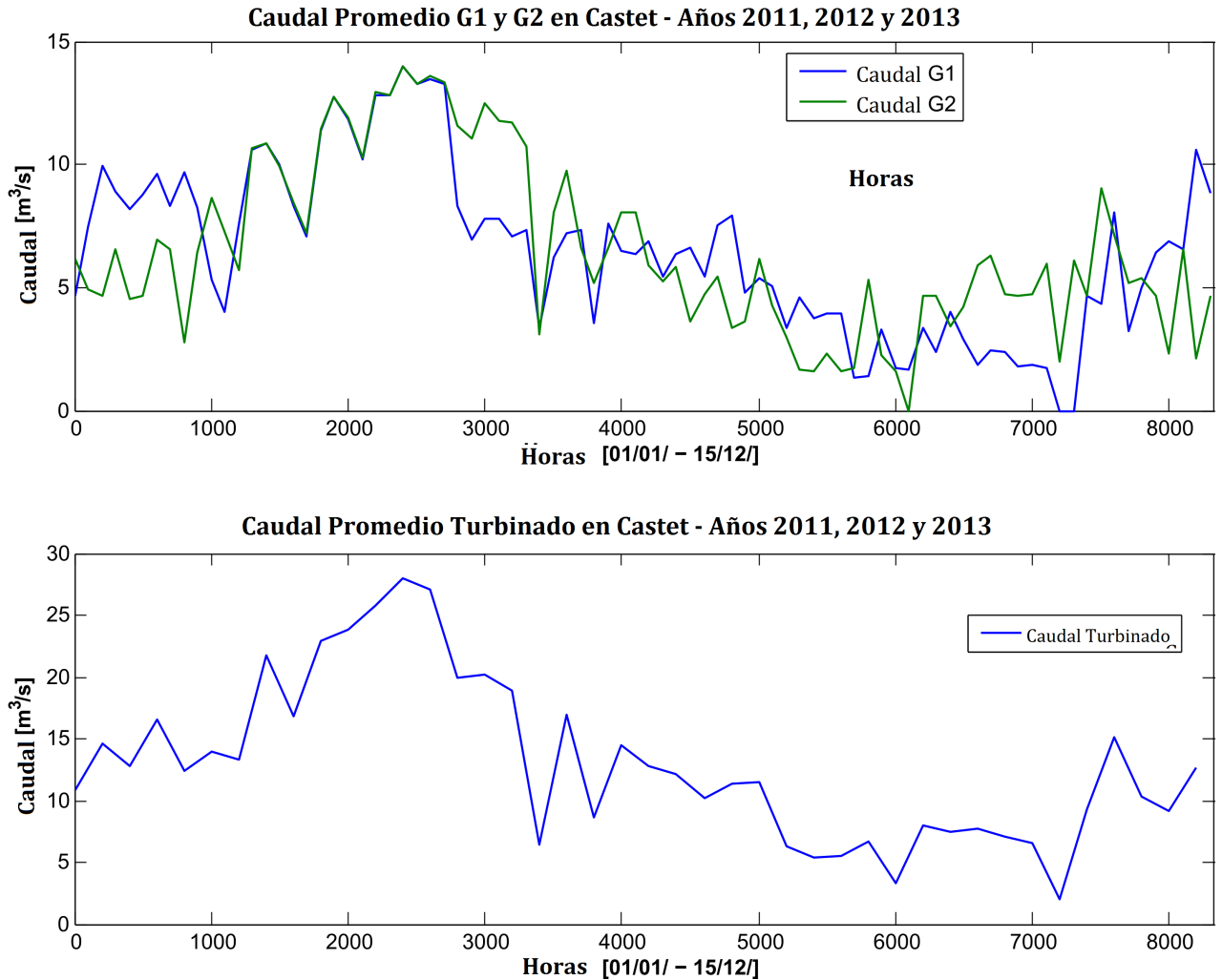


Figura 4.5: Caudal promedio turbinado en Castet en los años 2011-2012-2013 (elaboración propia)

### 4.2.3. Flujos entrantes y salientes (función regulación)

En la figura 4.6 se muestra el caudal entrante en azul y el caudal saliente de la central en verde, de manera de comprender la función de regulación y atenuación del flujo proveniente de aguas arriba. Está realizado para el año 2011 completo y sub-dividido para las estaciones invierno, primavera-verano y otoño.

A través la Figura 4.6 se puede observar la función de regulación de caudal que cumple la Central Castet, es decir, la función de atenuar las grandes variaciones que provienen aguas arriba producto del encendido o apagado de centrales de mayor envergadura para luego alisar la variación utilizando la reserva de la presa y las turbinas con álabes variables. Se cumple además con un mínimo de caudal para la temporada de Otoño, sobretodo para el mes de Agosto en el cual no se puede restituir un caudal inferior a  $4.5 \frac{m^3}{s}$ .

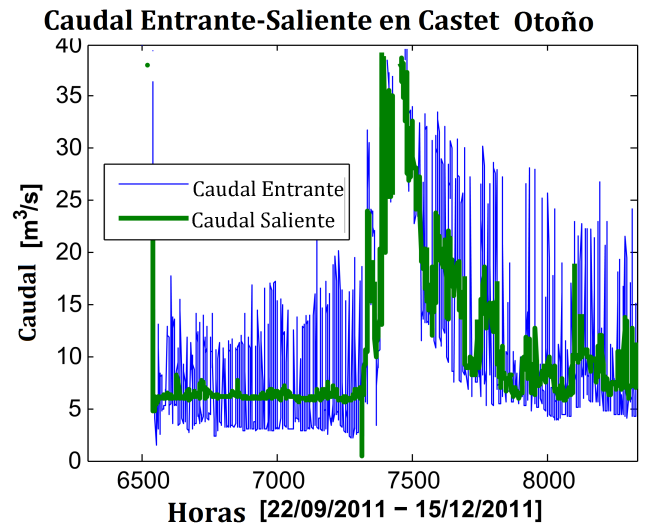
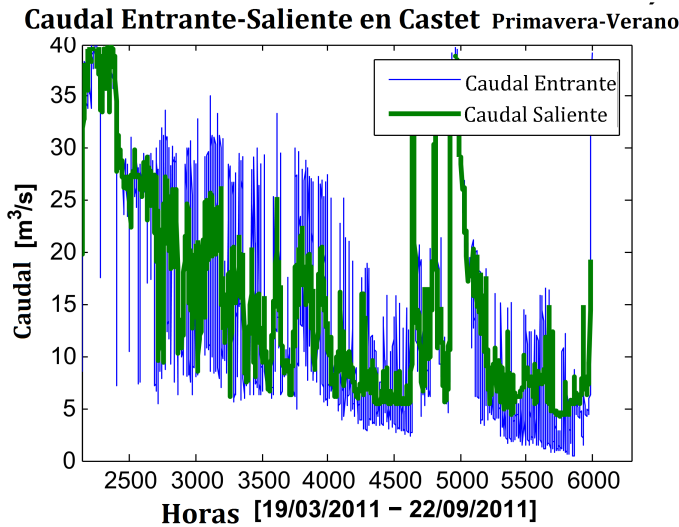
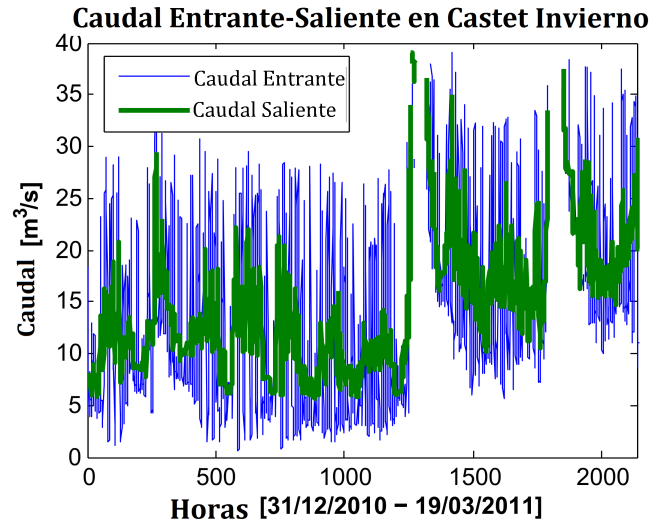
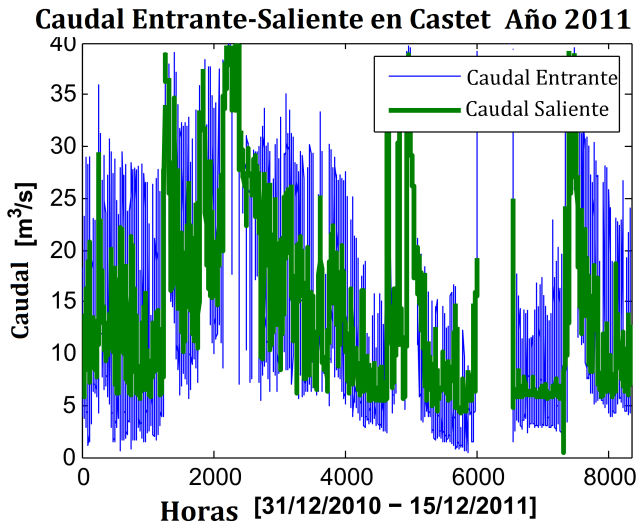


Figura 4.6: Flujos entrantes y salientes en Castet año 2011 (elaboración propia)

#### 4.2.4. Variación de niveles

Para la cumplir con la función de regulación de caudal, la gestión de los niveles de agua de la presa es crucial. La reserva de unos  $350.000 m^3$  no posee un volumen considerable para caudales entrantes que pueden llegar a los  $60 \frac{m^3}{s}$ . En general, la gestión consiste en el llenado y vaciado de la reserva entre los niveles 423,5 y 422 NGF, de acuerdo a las necesidades de la temporada.

En la figura 4.7 se muestra la variación del nivel de la reserva durante un año para los años 2011, 2012 y 2013. Además, para el año 2011 está sub-dividido para un mes, una semana y un día del mes de enero. En la figura 4.8 se muestra en un mismo gráfico el comportamiento a lo largo del año 2013 de los caudales entrantes, salientes y turbinados además junto con la variación del nivel de la reserva.

En la figura 4.9 se muestran caudales y nivel de la reserva para un día particular de cada estación del año.

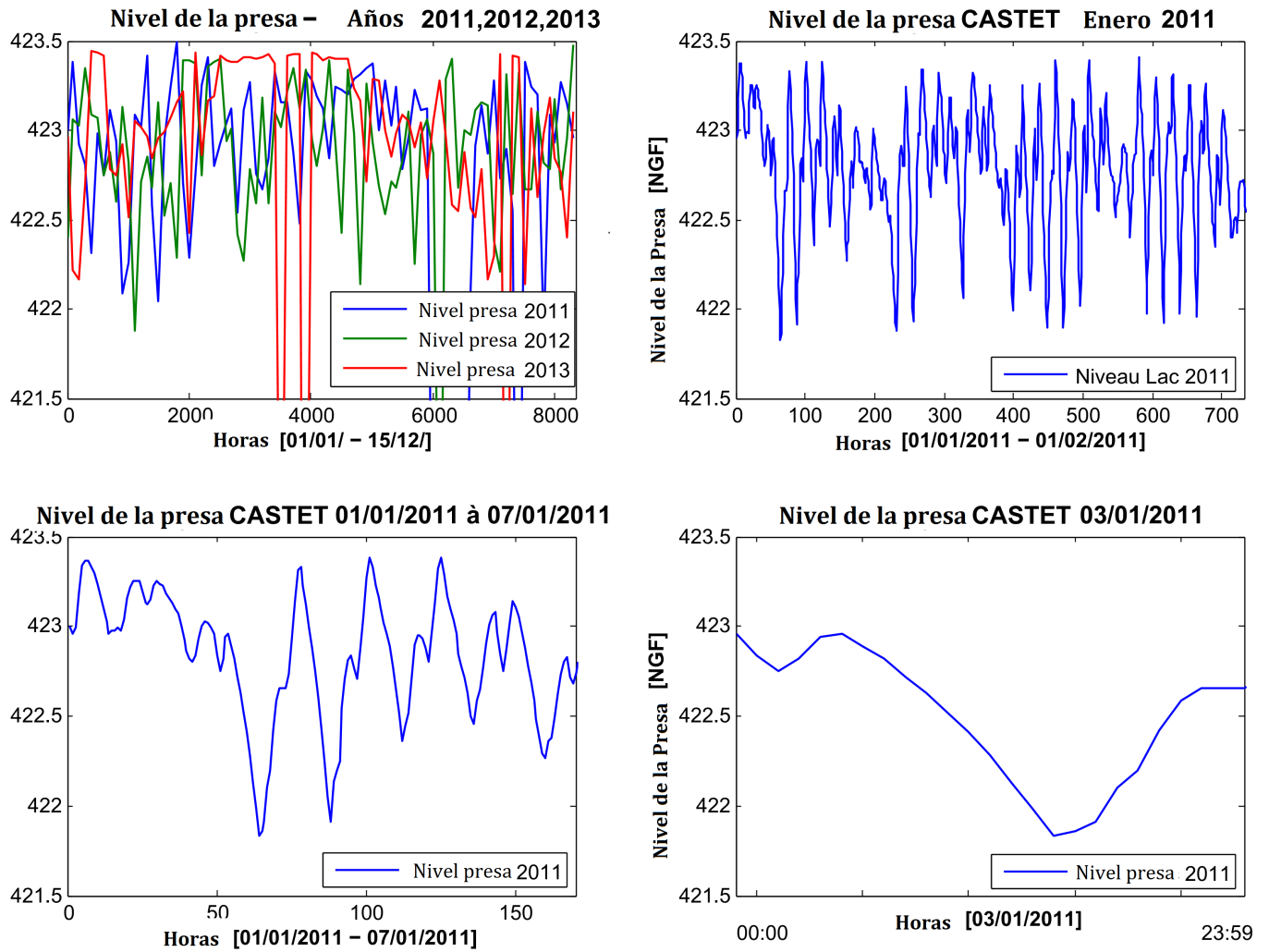


Figura 4.7: Variación nivel de la presa en Castet (elaboración propia)

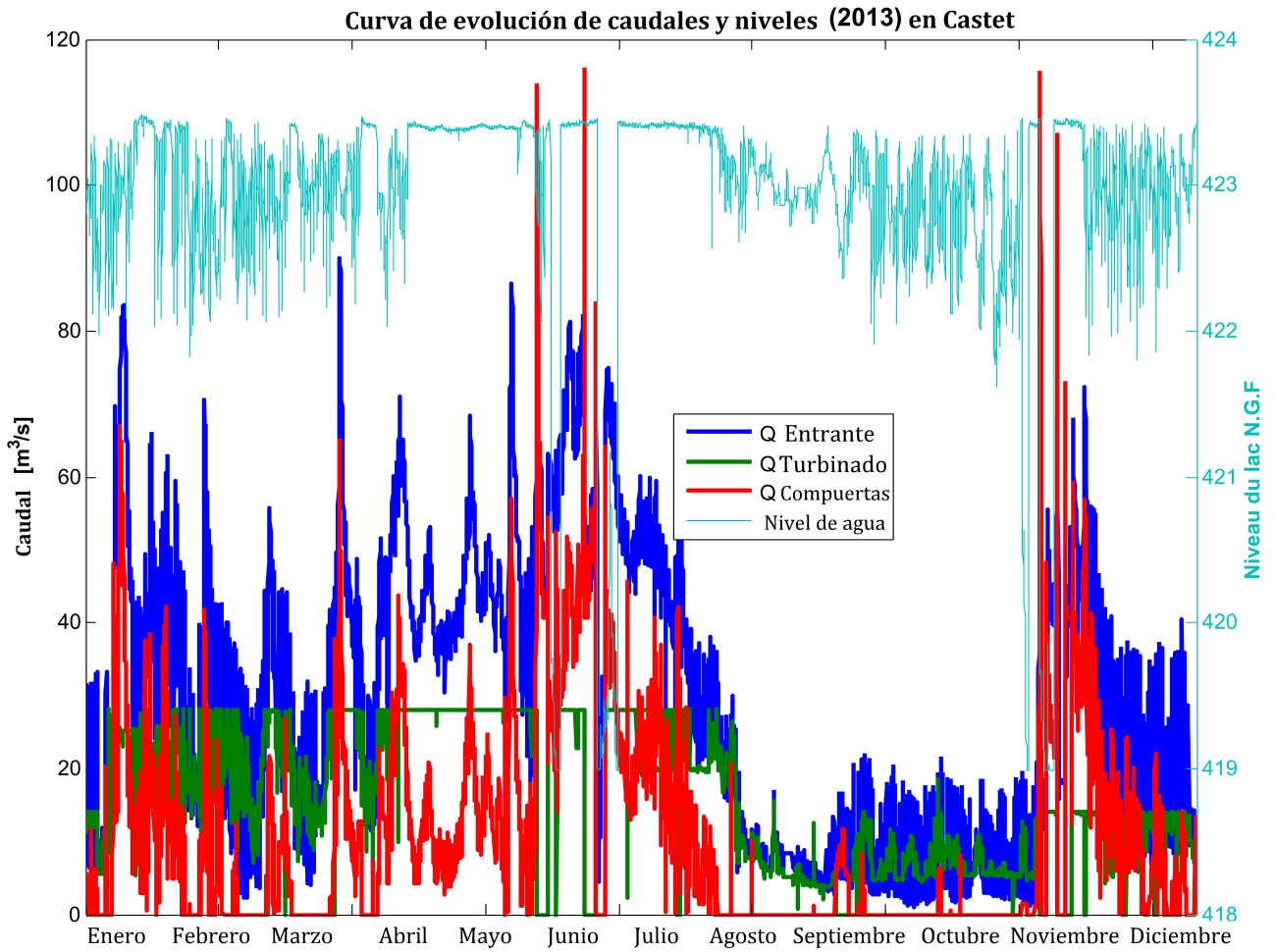


Figura 4.8: Curva de evolución de caudales y niveles año 2013 en Castet (elaboración propia)

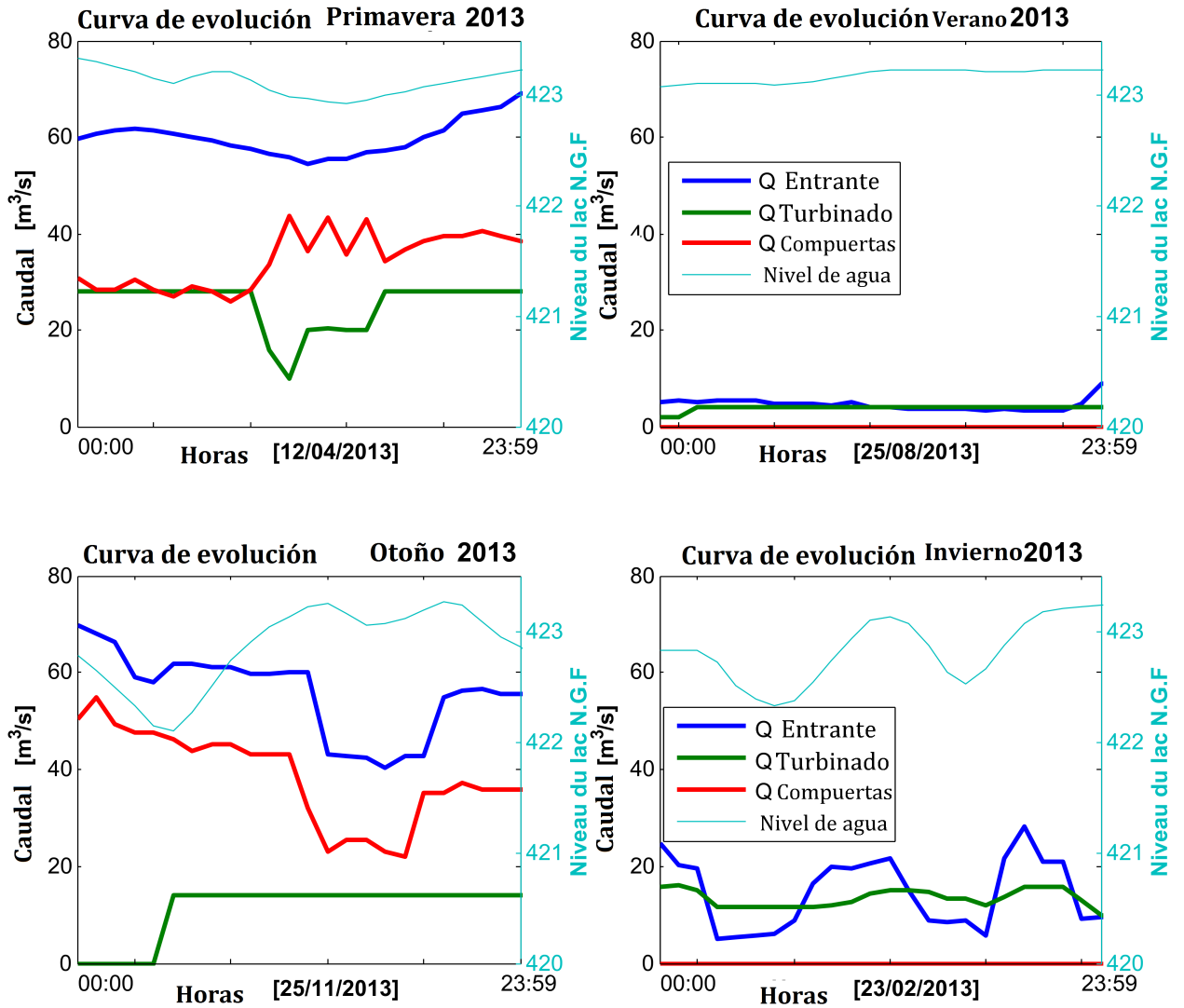


Figura 4.9: Curva de evolución en Castet por estaciones en 2013 (elaboración propia)

## 4.3. Análisis de Restricciones

### 4.3.1. Restricciones de la Concesión

**Puntos principales del decreto de concesión:**

- El objetivo de la instalación es de “regularizar el caudal del Gave d’Ossau, alterado por la explotación de las centrales hidroeléctricas aguas arriba y de manera accesoria, la producción de energía eléctrica”.
- La producción de energía eléctrica no es una prioridad por la instalación.
- La altura bruta máxima es de 7.5 metro, aquella está calculada a partir del nivel normal aguas arriba y del nivel de restitución aguas abajo.
- El “caudal máximo a extraer” es de  $25 \frac{m^3}{s}$ .
- El nivel normal de la reserva es de 423.5 m NGF.
- El nivel de restitución es de 416 m NFG.
- El caudal a restituir de manera constante no debe en ningún caso ser inferior a:
  - $4,5 \frac{m^3}{s}$  en Agosto.
  - $5,5 \frac{m^3}{s}$  en Julio y Septiembre.
  - $6 \frac{m^3}{s}$  durante los otros meses del año.

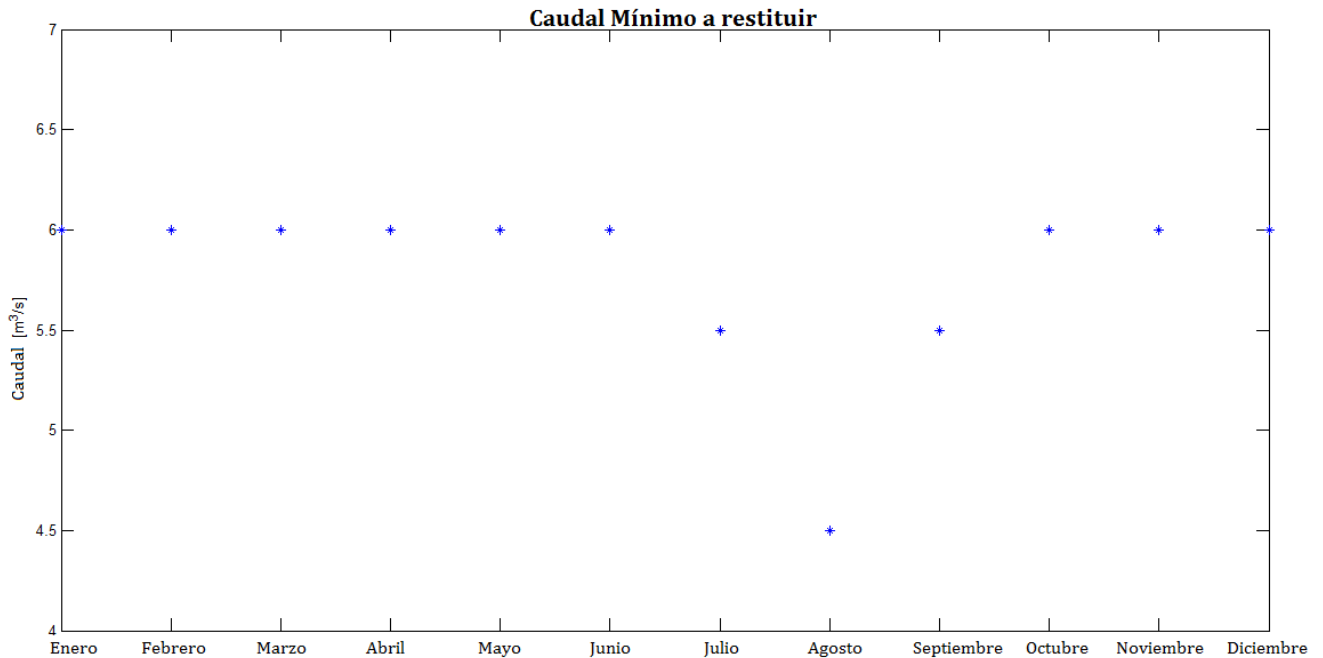


Figura 4.10: Caudal mínimo a restituir durante el año [4]



### 4.3.2. Restricciones ligadas a la seguridad

La parte superior de la presa se encuentra a la cota de 424 NGF y el volumen de la reserva entre las cotas 423,5 y 424 es de  $78000 \text{ m}^3$ , dejando poco tiempo para intervenir en caso de una falla del sistema automático de maniobra de las compuertas de la presa. Por ejemplo, si el caudal entrante en la reserva es de  $60 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ , los grupos bulbos evacúan  $25 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$  de ese caudal, la intervención sobre las compuertas se debe realizar con un retardo máximo de 40 minutos para evitar la inundación.

*La explotación de las centrales del valle d'Ossau deben tomar en cuenta:*

- La frecuentación de pescadores al río.
- Las actividades de turismo fuertemente desarrolladas en los últimos años (camping, canotaje, canyoning, kayaks, ...)

Los riegos inducidos por la explotación de las centrales están ligados a los posibles aumentos bruscos del caudal en el río, a los aumentos del nivel de agua asociados, que podrían sorprender a las personas que frecuentan el río.

Estas limitantes, con el fin de prevenir los riegos aguas abajo de Castet, se traducen en limitar el gradiente de velocidad del caudal restituído.

**Actualmente el valor máximo del gradiente de aumento de velocidad del caudal está fijado en  $2 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$  por  $\frac{1}{2}$  hora**

### 4.3.3. Restricciones ligadas a los grupos electromecánicos

El nivel mínimo de explotación está actualmente fijado a los 422 NGF para el correcto funcionamiento del ascensor de peces. Sin embargo, incluso si se pudiera funcionar con una cota aguas arriba más baja, se evita dado que la reserva, bajo esta cota de 422 NGF, conduciría a turbinar las aguas extremadamente cargadas en sedimentos.

El caudal máximo turbinable según el decreto de concesión es de  $25 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$  y la cota mínima actual de explotación 422 NGF, lo que permite considerar que las características de los grupos no aportan en la limitación de los caudales turbinados en función del nivel del plan de agua.

### 4.3.4. Restricciones ligadas a los productores aguas abajo

Una cierta cantidad de industrias utilizan el agua del Gave d'Ossau aguas abajo de la central Castet, imponiendo que siempre exista una restitución mínima. Sin embargo, la potencia máxima de esas instalaciones corresponden a un caudal de  $18 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ , conviene entonces, con el fin de asegurar tanto sea posible su producción óptima, de programar el plan agua no solo en función del programa de las centrales aguas arriba y de los aportes naturales. Por lo tanto, dado el caudal óptimo dentro del transcurso de una jornada es de  $18 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ , conviene

evitar grandes fluctuaciones y jugando con los niveles de la reserva lograr lanzar entre 15 y 18  $\frac{m^3}{s}$  durante la jornada.

La presencia de productores autónomos, agrupados en la GPAE (Agrupación de productores autónomos de energía hidroeléctrica), aguas abajo de Castet, explica la creación de la central Castet donde el objetivo es de regular el caudal turbinados por las grandes centrales aguas arriba.

Los productores aguas abajo desean evidentemente que el caudal restituído por Castet sea lo más constante posible y cerca de su caudal de equipamiento. Caudales superiores provocan el vertido en sus presas y por lo tanto pérdidas. Caudales reducidos conducen a explotar sus turbinas lejos de su punto óptimo de funcionamiento.

#### 4.3.5. Restricciones medioambientales

El artículo L.432-6 del código del medio-ambiente francés [6], que se aplica en materia de la continuidad ecológica en la espera de la entrada en vigor de la clasificación de los cursos de agua (artículo L.214-17 CE), prevé que en los cursos de agua listados por decreto, toda obra existente debe poseer dentro de los primeros 5 años desde la puesta en marcha, de dispositivos que aseguren la circulación de peces migratorios en que las especies estén precisadas.

Con respecto al Valle d'Ossau, el decreto de clasificación con fecha del 15 de Abril de 1921 y la orden definiendo la lista de especies migratorias publicada el 5 de febrero de 1986 determinaron el salmón atlántico, la trucha de mar, la trucha fario y la anguila.

*La central Castet debe por lo tanto estar equipada con dispositivos que permitan la migración tanto hacia aguas arriba como hacia aguas abajo desde el 4 de Febrero de 1991 [6]*

##### **Migración hacia aguas arriba - Ascensor de peces**

La central Castet está equipada de un ascensor de peces que permite la migración de las especies protegidas desde aguas abajo de la central hacia la reserva de la misma, todo esto en ciclos con una frecuencia que puede variar entre 1 a 2 horas dependiendo de las estaciones.

El ascensor de peces impone por las características de su funcionamiento, una cota mínima de la reserva de 422 NGF. Esta restricción puede sobrepasarse mientras no sea por un largo periodo.

##### **Migración hacia aguas abajo**

La migración hacia aguas abajo aún no está solucionada. La sociedad BIOTOPE realizó un estudio [9] presentando nuevas soluciones en el mes de Enero de 2013.

## 4.4. Problemas y Recomendaciones

En esta sección se expondrán las principales conclusiones de 3 estudios independientes ([4], [9] y [11]) que impactan de manera directa en el análisis del presente trabajo.

### 4.4.1. Sistema de gestión de la reserva de agua

De acuerdo a un estudio realizado sobre la gestión de la central de Castet [4], se debe tomar en cuenta:

1. Es esencial un mejor conocimiento de los flujos entrantes y salientes. Se deben instalar equipos que puedas medir con precisión estos flujos.
2. El conocimiento de los tiempos de transferencia dentro del valle aguas arriba de Castet permitirían una gestión “con anticipación” de la presa.
3. La limitación del gradiente de velocidad para el flujo aguas abajo de Castet podría flexibilizarse o incluso cancelarse en ciertos puntos durante el año provistas por apropiados procedimientos. Restricciones relacionadas al turismo también podrían ser reconsideradas pero en ese caso se debe tomar en cuenta a todos los actores involucrados del valle.
4. Se debe modificar el sistema de gestión automática de la presa dado que se puede mejorar su funcionamiento con las variaciones imprevistas de los flujos entrantes.

### 4.4.2. Estudio de estabilidad de la presa

El comité francés de represas y reservas (CFBR), generó el año 2012 una serie de recomendaciones en el diseño y dimensionamiento para las presas. Esto implica realizar una actualización de los estudios de dimensionamiento para las compuertas deslizantes (Castet está calificado como presa clase C).

El año 2012 la SHEM encomendó a la empresa Coyne et Bellier un estudio de diagnóstico [11] para el paso de crecidas (estudio de laminación) como también el de estabilidad para la presa según las nuevas recomendaciones de las CFBR.

#### Hipótesis importantes

Las recomendaciones de la CFBR [2012], verifican el estado de la presa para 2 situaciones:

1. Situación excepcional de crecida (tiempo de retorno de 300 años para presas de clase C) generando la cota del nivel más alto de agua (PHE).
2. Situación extrema de crecida (tiempo de retorno de  $10^4$  años para presas de clase C) generando la cota de valor de peligro como (CD).

Tabla 4.6: Caudales máximos [11]

Periodo [años]	$Q_p$ [ $\frac{m^3}{s}$ ]
300	493
10 000	924

El estudio de estabilidad de la presa de Castet fue realizado considerando el reforzamiento observable en el plano Fig. 4.12. No existió certeza si tal reforzamiento esquemático correspondía realmente al construido y posee un límite a la fluencia de 240 MPa.

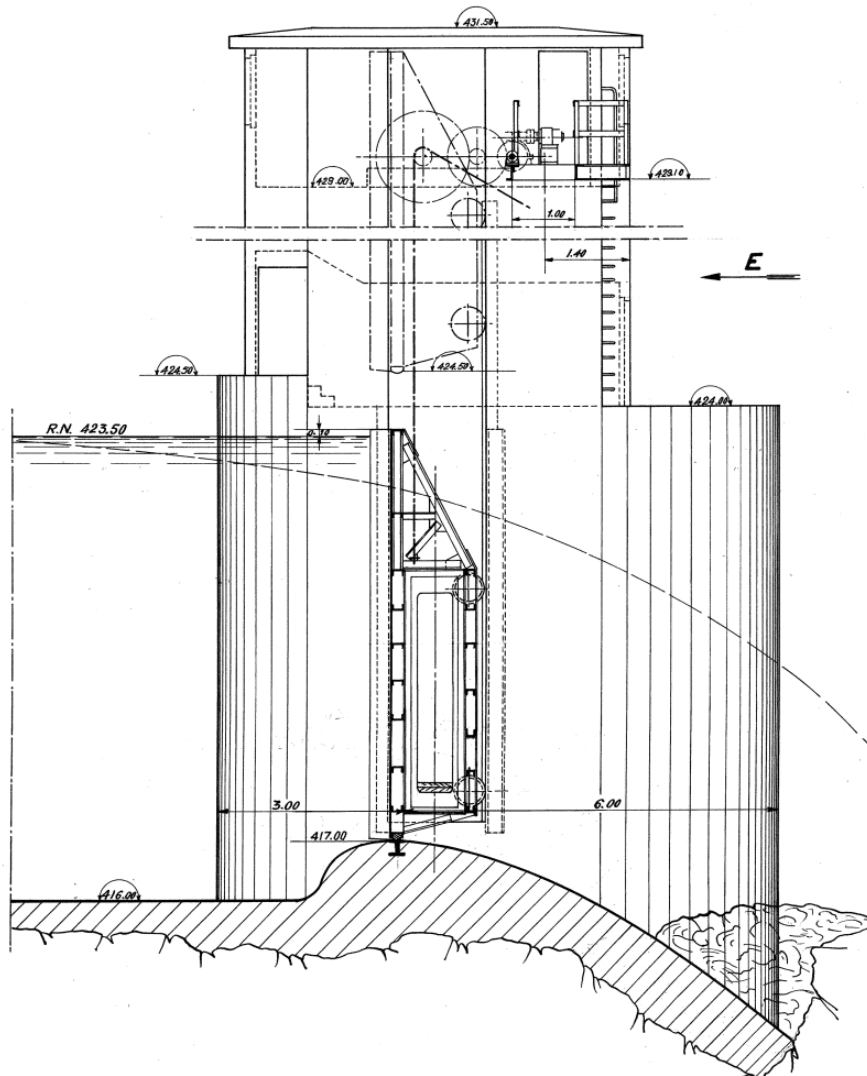


Figura 4.11: Vista en sección de las compuertas deslizates [10]

### ARMATURES DES CONTREFORTS

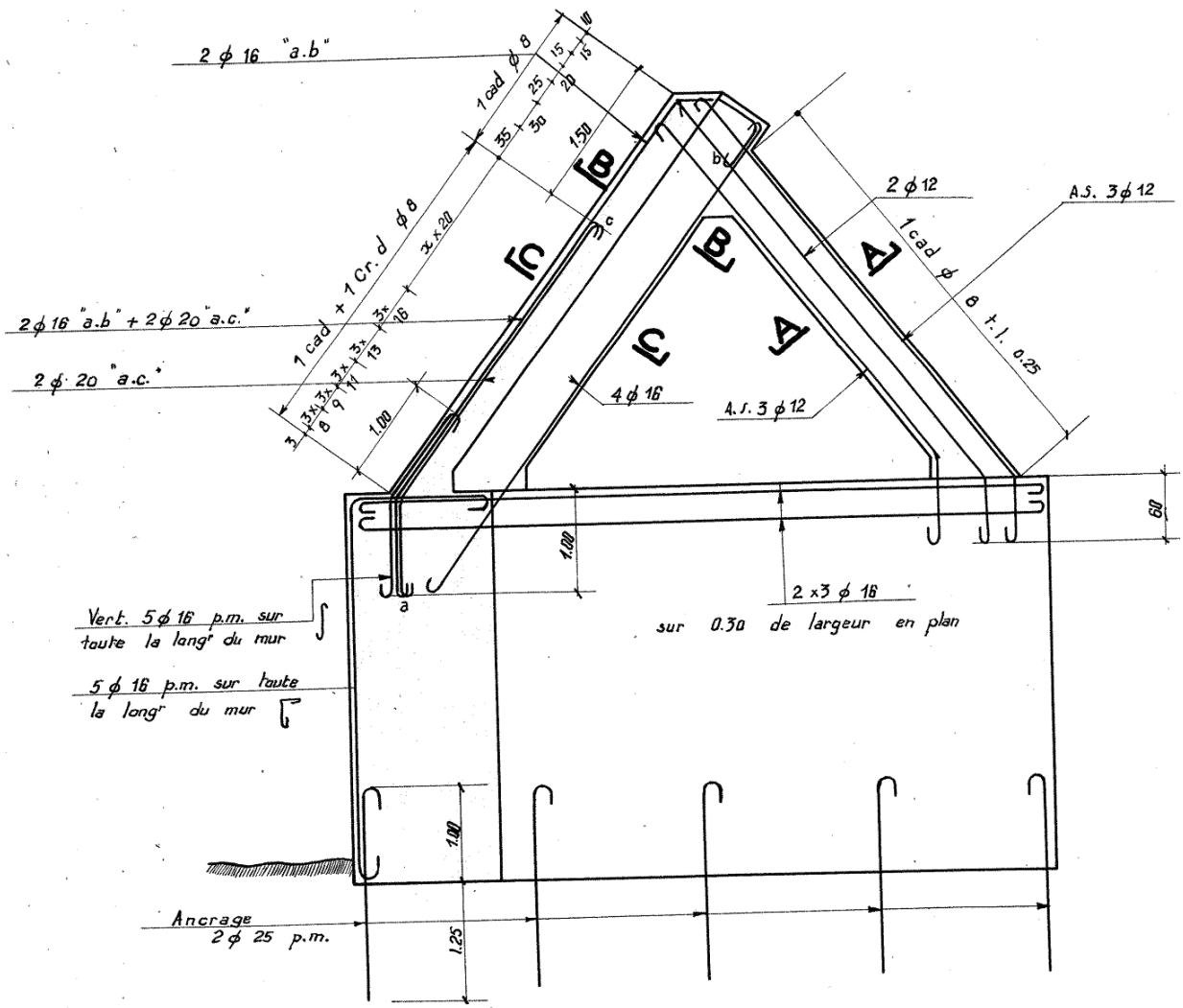


Figura 4.12: Vista en corte de las armaduras [10]

Tabla 4.7: Capacidad de flujos [11]

Nivel de agua [m] NGF	Flujo descargado por ambas compuertas [ $\frac{m^3}{s}$ ]	Flujo descargado por sobrecapacidad [ $\frac{m^3}{s}$ ]	Total flujo Descargado [ $\frac{m^3}{s}$ ]
423.5	415	0	415
424	469	0	469
424.5	522	34	556
425	575	97	672
425.5	608	179	787
426	639	276	915

## *Estabilidad Global*

El estudio realizó un análisis de estabilidad global para el muro de contra fuerte situado al lado derecho del río evaluando su estabilidad para una situación normal, excepcional, extremo y de sismo (SES). Las tablas 4.8 y 4.9 muestran el resumen del estudio.

Tabla 4.8: Fuerza y torque aplicado a la estructura en un caso normal [11]

	Fuerza [kN]	Torque [kNm]
Propio peso de fundaciones debajo del muro contrafuerte	1733	0
Peso del agua	438	-1073
Presión Hidroestática aguas arriba	1600	4267
Presión Hidroestática aguas abajo	-506	-759
Peso propio de fundaciones debajo de la cara aguas arriba	816	-2325
Baja presión debajo de fundaciones de la cara aguas arriba	-625	1781
Baja presión debajo de la fundación de concreto del contrafuerte	-693	0

Tabla 4.9: Evaluación de los criterios de estabilidad [11]

	Estabilidad en Cizalladura (FSS)	Estabilidad global?
Caso usual de regulación de nivel (423.5 m NGF)	>1	Si
Situación excepcional (PHE) (424.1 m NGF)	>1	Si
Situación extrema (CD) (426 m NGF)	>1	Si
Caso extremo SES	>1	Si

## *Cota de peligro*

La cota de peligro es la cota para una situación extrema de crecida calculada para un periodo de 10.000 años que corresponde a un caudal de  $924 \frac{m^3}{s}$

Tabla 4.10: Estimación cota de peligro [11]

Cota de peligro	425.1 m NGF
-----------------	-------------

## **Recomendaciones y conclusiones del estudio [11]**

- El nivel PHE obtenido es de 424.1 NGF el cual no cumple con las actuales recomendaciones de la CFBR
- La evacuación de una crecida en una situación extrema implica un desborde de 2 metros por sobre el nivel de agua que alcanza la presa al nivel de 426 NFG lo que no cumple con las actuales recomendaciones de la CFBR.
- El análisis de estabilidad global de la estructura es aprobado para los casos estudiados. Sin embargo, un cálculo de la estructura interna concluye que aquella estructura no resiste la carga hidroestática por sobre los 425.1 m NGF, que corresponde justamente a la cota de peligro.

- Para cumplir con las actuales recomendaciones de la CFBR, una alternativa puede ser el reemplazo del muro contrafuerte por un vertedero. Esta solución incrementa la capacidad de la central para aliviar los caudales (55 metros de largo de un vertedero) y aseguraría la estabilidad de la estructura.
- Esta alternativa implicaría la destrucción del muro contrafuerte, la construcción en concreto del vertedero y una base de concreto aguas arriba para prevenir erosión a los pies de la estructura y el mejoramiento de las paredes en el lado izquierdo del río para asegurar las instalaciones en situaciones extremas. El monto estimado de esta alternativa tendría como primera aproximación un valor de 2.6 M €.

#### 4.4.3. Soluciones para migración aguas abajo

Los principales aspectos y conclusiones del estudio [9] realizado por la empresa BIOTOPE para la problemática de la migración aguas abajo se resumen a continuación :

##### *Calendario de migración aguas abajo*

Espèce en dévalaison	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Jui.	Jui.	Aoû.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Smolt (SAT et TRM)												
Anguille argentée												

Figura 4.13: Periodo de migraciones de salmónidos y anguilas [9]

##### *Contexto reglamentario*

<i>Classement lié au linéaire</i>	<i>Portée réglementaire directe</i>	<i>Gave d'Ossau à Castet</i>
Classement migrateur article L 432-6	oui	oui
Rivière réservée	oui	non
Classement article L 214-17 liste 1	oui	(Reporté en 2015)
Classement article L 214-17 liste 2	oui	Proposé
Axe prioritaire pour les grands migrateurs (SDAGE)	non	oui
Très bon état écologique (SDAGE)	non	non
Réservoir biologique (SDAGE)	non	non
Très bon état écologique (SDAGE)	non	non
Plan de gestion Anguille (zone active/zone colonisée/néant)	non	Zone colonisée
<i>Classement lié à l'ouvrage</i>	<i>Portée réglementaire directe</i>	<i>Barrage de Castet</i>
Plan de gestion Anguille : ouvrages des Zones d'Action Prioritaires	non	non
Débit réservé (respect des valeurs de 1/10e ou 1/20 <sup>e</sup> pour 2014)	oui	Débit réservé respecté
Ouvrages « Grenelle »	non	?

Figura 4.14: Síntesis contexto reglamentario [9]

## ESCENARIO NO. 1: MEDIDAS DE GESTIÓN DE LAS COMPUERTAS DESLIZANTES

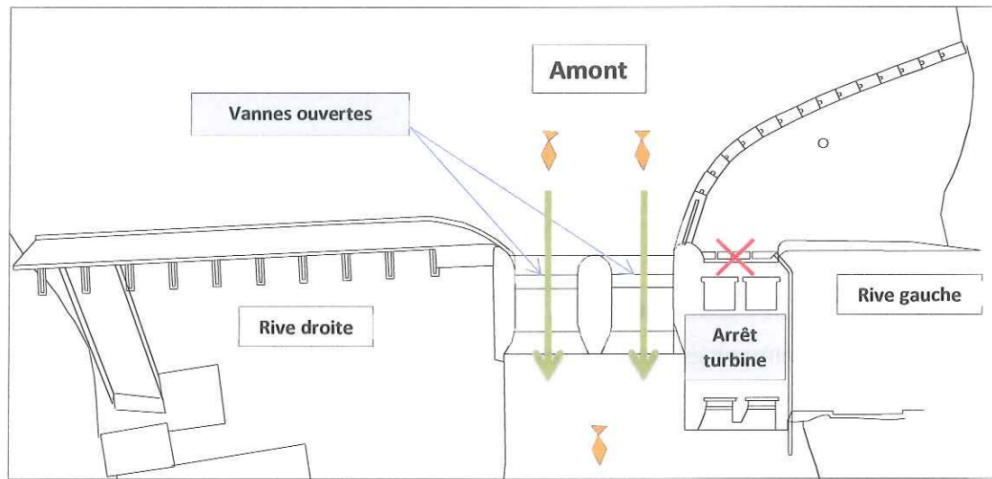


Figura 4.15: Esquema del principio del escenario No 1 [9]

- Las 2 compuertas deslizantes para un flujo de paso inferior. El nivel aguas arriba no tiene incidencia, incluso en periodos de estiaje. Paso preferencial para las anguilas.
- La boca de desagüe móvil para un flujo de paso superior. La cota aguas arriba debe estar mantenida a los 422 m NGF mínimo. Paso preferencial para los smolts (salmón que migra hacia el mar).

Determinar los periodos de migración es crucial para la eficacia de esta gestión. Los periodos pueden ser definidos según diferentes métodos:

- Periodo calendario
- Periodo hidrológico
- Periodo de migración por modelo matemático o biológico
- Periodo de migración artificial provocado

### *Costos estimados*

- Los costos estimados corresponden sobretudo a gastos de funcionamiento y pérdidas de producción. Las compuertas pueden ser automatizadas por ciertos programas específicos. La estimación realizado ronda volares entre 10.000 y 20.000 €.

### *Ventajas:*

- Ningún trabajo suplementario
- Gastos de gestión limitados

### *Inconvenientes*

- Pérdidas de producción importantes
- Una gestión más precisa de los niveles de agua será necesaria



## ESCENARIO NO. 2: OBRAS DE DESVIACIÓN ASOCIADAS A MEDIDAS DE GESTIÓN DE COMPUERTAS

La meta de este escenario es de impedir físicamente el tránsito de los peces migratorios en la zona de turbinaje gracias a rejillas para luego evacuarlos por medio ya sea de la boca de desagüe móvil o través de la apertura de las compuertas deslizantes. Las características de las rejillas son definidas de acuerdo a la normativa vigente (Ademe, 2008).

Dos opciones de equipamiento son posibles:

- Instalación de una rejilla fina en el muro anti-gravas
- Instalación de una rejilla fina en la toma de agua de las turbinas

### Opción 1: Rejilla fina en el muro anti-gravas

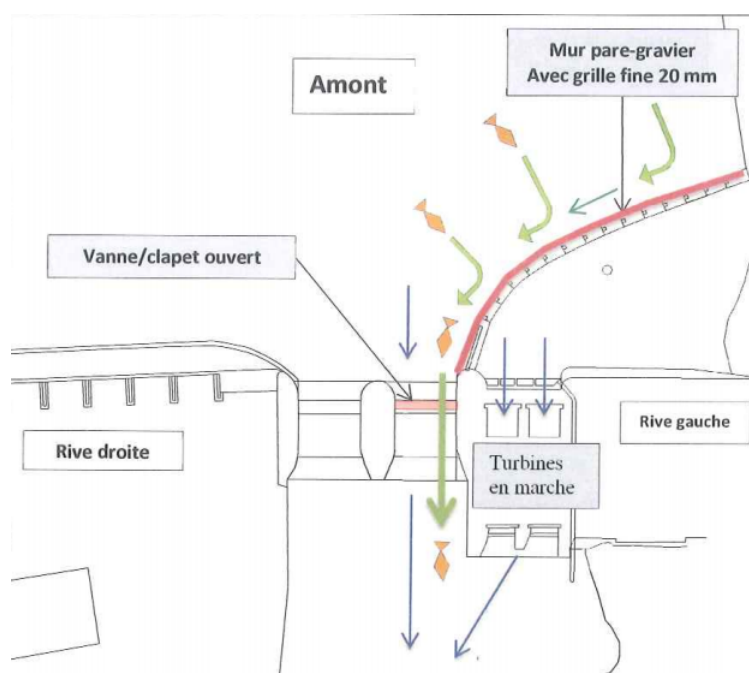


Figura 4.16: Esquema del principio de la opción 1 [9]

*Costos estimados:*

Designación	PU	Precio
Rejilla 20mm (compra, instalación)	3000 $\frac{\text{euros}}{\text{m}^2}$	387 000 €
Sistema de rotación	120 000 €	120 000 €
	TOTAL	507 000 €

*Ventajas:*

- Bajas pérdidas de producción eléctrica
- Protección eficaz de tomas de agua peligrosas

### Inconvenientes

- Costos de inversión elevados
- Costos suplementarios por sistema de limpieza
- Costos de gestión y mantenimiento importantes
- Gestión precisa de los niveles de agua

### Opción 2: rejilla fina en la toma de agua de las turbinas

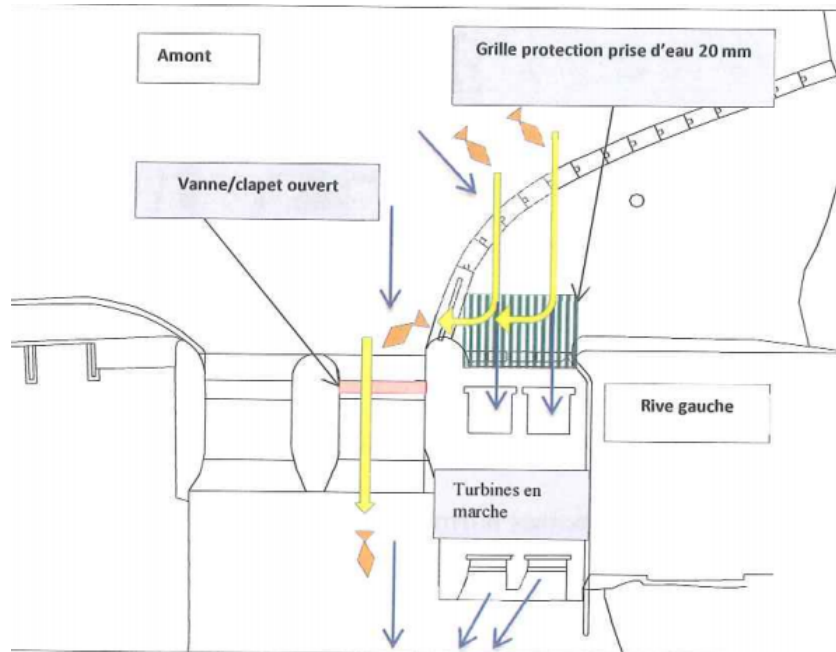


Figura 4.17: Esquema del principio de la opción No. 2 [9]

### Costos estimados

Designación	PU	Precio
Rejilla 20mm (compra, instalación)	2000 $\frac{\text{euros}}{\text{m}^2}$	186 000 €
Rake de limpieza	200 000 €	200 000 €
	TOTAL	386 000 €

### Ventajas:

- Bajas pérdidas de producción eléctricas
- Protección eficaz de tomas de agua peligrosas

### Inconvenientes

- Costos de inversión elevados
- Instalación de un rake de limpieza

SCÉNARIO NO. 3: CREACIÓN DE UN SISTEMA DE MIGRACIÓN ASOCIADO A UNA OBRA DE PROTECCIÓN

El sistema permite el tránsito sin maniobras de compuertas. Consiste en una evacuación por sistema adaptado al comportamiento migratorio de los smolts y de las anguilas.

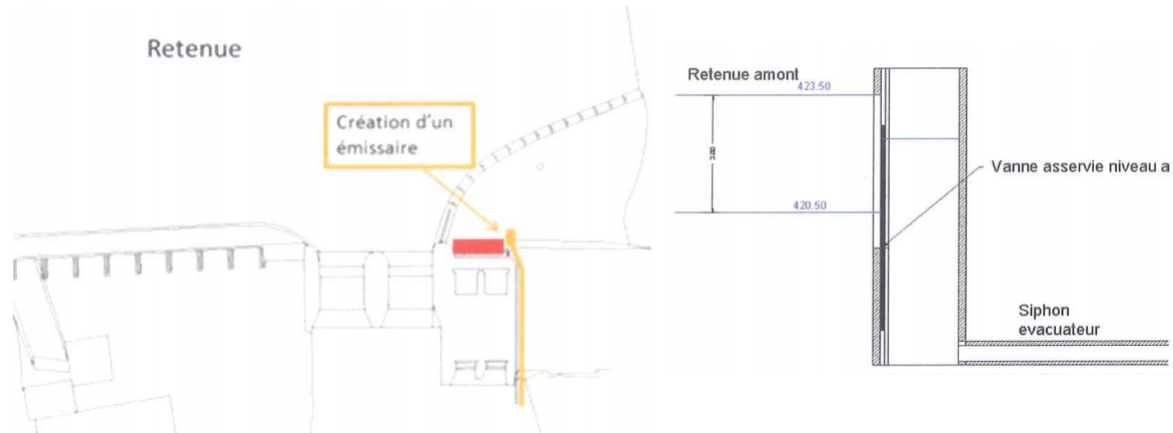


Figura 4.18: Esquema del principio del escenario No. 3 [9]

Una obra de evacuación se construye al costado de las rejillas actuales:

- El costado aguas arriba tendrá una pequeña compuerta que permite una evacuación por superficie a un flujo regulado.
- La compuerta está conectada a través de una canalización. La fauna migratoria entra por el by-pass y llega aguas abajo a través de la canalización.
- La pequeña compuerta permite mantener una evacuación de superficie a pesar de las fluctuaciones del nivel aguas arriba. La compuerta se controla de manera automática.

*Costos estimados:*

Designación	PU	Precio
Rejilla 20mm (compra, instalación)	2000 $\frac{\text{euros}}{\text{m}^2}$	186 000 €
Rake de limpieza	200 000 €	200 000 €
By-pass	180 000 €	180 000 €
	TOTAL	566 000 €

*Ventajas:*

- Bajas pérdidas de producción eléctricas
- Protección eficaz de tomas de agua peligrosas
- No hay necesidad de gestión en la obertura de las compuertas deslizantes

*Inconvenientes:*

- Costos de inversión elevados
- Instalación de un rake de limpieza

## 4.5. Síntesis restricciones y problemas

Luego de comprender y estudiar el funcionamiento de la Central Castet se realizó una síntesis y criterios a considerar para eventuales propuestas y escenarios de reemplazo. En la tabla 4.11 se muestran de manera resumida los criterios a considerar. Se destaca a priori una mayor importancia a otorgar una migración aguas abajo debido al decreto impuesto en Castet y no cumplido hasta la fecha como también cumplir con la función de regulación exigida por la concesión.

En la tabla 4.11 se encuentra la síntesis de todas las restricciones y criterios a considerar para eventuales propuestas de reemplazo en la central Castet.

Tabla 4.11: Reemplazo de los 2 grupos bulbos en Castet - Múltiples criterios (elaboración propia)

<b>Criterios</b>	
<b>Equipos en fin de vida</b>	Reemplazar grupos bulbos
<b>Reducción desgaste prematuro</b>	Menor utilización de compuertas deslizantes
<b>Indisponibilidad de la Central</b>	Periodo de indisponibilidad durante los trabajos Duración de trabajos
<b>Decreto de concesión</b>	Función regulación de caudales Nuevo decreto de concesión
<b>Impacto ambiental</b>	Migración aguas abajo Migración aguas arriba
<b>Bien común</b>	Turismo (Kayak, canotaje, . . .)
<b>Seguridad</b>	Reforzamiento de la presa
<b>Relación con otros productores</b>	Producción óptima para los productores aguas abajo
<b>Aspecto Económico</b>	Costos de Inversión Producción de Energía (Facturación) Acceso a la tarifa H07 Rentabilidad
<b>Complejidad</b>	Instalación Manutención Explotación

# Capítulo 5

## Escenarios de reemplazo

En este capítulo se desarrollan soluciones técnicamente factibles de reemplazo tratando de cumplir con las restricciones establecidas en el capítulo 4 a través de tres escenarios de reemplazo. Cada escenario está asociado a una tecnología diferente de turbina y por lo tanto difiere en la manera de abordar las diferentes problemáticas.

Se pretende desarrollar soluciones a nivel de ingeniería conceptual junto con esquemas de implementación para poder estimar los costos tanto de los equipos electromecánicos y como los costos de la ingeniería civil necesaria para su realización.

Para cada escenario se realizó una visita de terreno con el fin de observar y obtener una idea general de la instalación en un contexto real para visualizar una factibilidad preliminar, pudiendo imaginar su implementación en Castet así como también extraer ideas de los productores.

Las visitas de terreno para cada tecnología fueron:

- Central Capdenac (SHEM), Francia: Turbinas Bulbo (instalación de 3 turbinas bulbos en una central con características muy similares a Castet  $H_n=8\text{m}$  y  $Q=36\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ ).
- Central La Cavaletalde (CNR-SHEM), Francia: Turbinas VLH (instalación de 2 turbinas VLH3500 en paralelo).
- MJ2 Technologies, Millau, Francia: Taller de fabricación de turbinas VLH.
- Central Canal Albert (Cofely), Bélgica: Turbinas Tornillo hidrodinámico (3 turbinas ya en funcionamiento  $H_n=10\text{m}$   $Q=15\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$  )

Dada la restricción de la migración aguas abajo de la fauna acuática en Castet se propondrán nuevas tecnologías de turbinas hidráulicas que permiten el paso de los peces a través de la máquina. Se establecieron 3 escenarios de reemplazo:

1. Escenario No 1: Reemplazo de manera idéntica de los grupos Bulbos
2. Escenario No 2: Reemplazo con tecnología VLH
3. Escenario No 2: Reemplazo con tecnología Tornillo de Arquímedes

## 5.1. Reemplazo de manera idéntica de los grupos Bulbos

El objetivo y la ventaja de este escenario es la reutilización de la infraestructura existente en la central, reduciendo los trabajos de ingeniería civil, instalando una tecnología madura y utilizando la experiencia que se tiene con ella, sobretodo la que se tiene debido a un reemplazo similar en la central Capdenac.

El gran inconveniente del reemplazo tiene que ver con la migración aguas abajo de la fauna acuática obligando a desarrollar una solución externa que no es fácil ni económico.

Desde el punto de vista técnico, la característica más importante de la turbina es permitir la función de regulación de caudal, esta puede ser cumplida a través de un sistema de álabes variables o por un distribuidor que también puede regular la entrada del caudal en la turbina.

Esta tecnología es bastante conocida en la industria y existe mucha bibliografía al respecto por lo que en este trabajo no se ahondará en demasía.

Adicionalmente, para este escenario ya se contaba con suficiente información por parte de la SHEM por lo que este escenario consistió más en una recopilación de información y análisis de los puntos críticos en su implementación.

### 5.1.1. Adaptación a Castet

La turbina bulbo es una turbina de reacción de flujo axial, es decir, el agua pasa axialmente a través de alabes directrices fijos y tanto el generador como el multiplicador (si existe) están contenidos en una carcasa estanca, con forma de bulbo, sumergida en el agua. La figura 6.13 muestra una turbina, en la que todo el equipo está alojado en una bulbo refrigerado por ventilación forzada con intercambiador aire-agua. Del bulbo salen solamente los cables eléctricos debidamente protegidos.

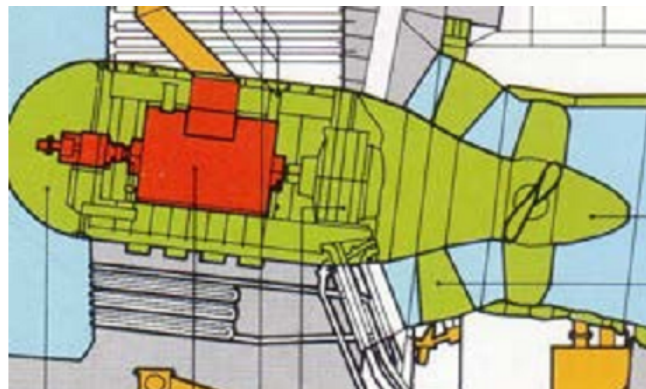


Figura 5.1: Sección transversal de una turbina bulbo [27]

En Europa existen 50 fabricantes de turbinas hidráulicas, cuatro de las cuales son empresas multinacionales y hoy en día con partes financieras compartidas las que son Alstom Power Hydro, VA Tech/Andritz, Voith Siemens y GE Energy.

Una interesante innovación relativa a las turbinas bulbos la generó VA Tech en el año 2003 al desarrollar una nueva versión de turbina bulbo llamada ECObulb, con capacidades entre los 0.5 y 5 [MW]. Es una variante en la que el generador se acopla directamente a la turbina, con lo que se elimina la mayor fuente de ruidos y de averías. En el interior del bulbo, que es perfectamente accesible para mantenimiento, hay una ligera sobre-presión para evitar cualquier entrada eventual de agua y no hay presencia de aceite, lo que incrementa el carácter ecológico de esta turbina. Es una turbina que puede ser simple o doblemente regulada conectada a un generador sincrónico de imanes permanentes, por lo que la eliminación de la caja reductora simplifica las partes mecánicas, reduciendo el tamaño, los costos de mantenimiento, los costos de obras civiles y alargando la vida del equipo de generación. En la figura 5.2 se muestra una esquema de una Ecobulbo doblemente regulada y en la figura 5.3 se muestra el gráfico de potencia en función de altura y caudal.

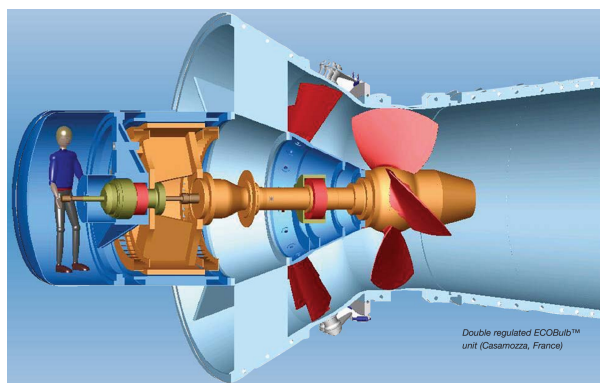


Figura 5.2: Unidad EcoBulbo doblemente regulada [28]

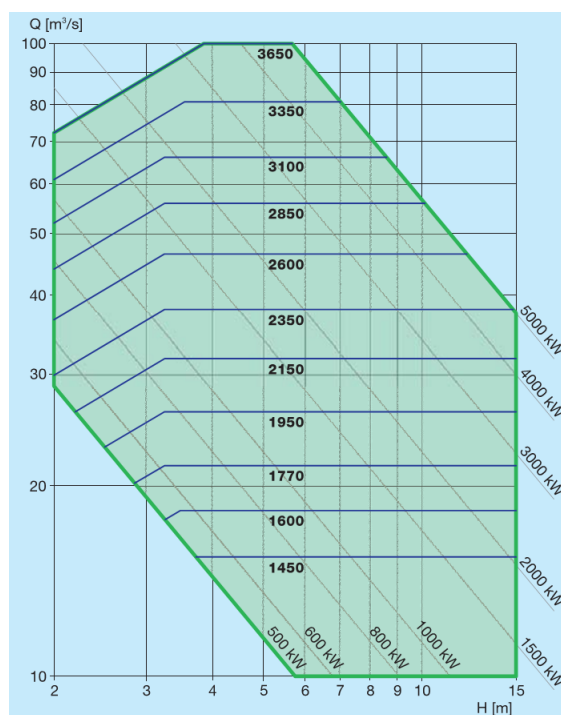


Figura 5.3: Potencias de la Ecobulbo para distintas alturas y caudales [28]

El reemplazo de las turbinas bulbos en términos de trabajos de ingeniería civil es el más simple de los escenarios. Se cuenta con más de 50 años de experiencia en la mantención de las turbinas, las que se han removido del lugar de operación. En general, para muchos proyectos de renovación de proyectos hidráulicos es más común encontrar que el reemplazo de la instalación fue realizado con la misma tecnología que encontrar casos en los que se realizan nuevas obras civiles para otra tecnología.

Las principales restricciones de este escenario es la cantidad de tiempo sin funcionar, es decir, su indisponibilidad durante los trabajos implicando un gran riesgo en el cumplimiento de la función de regulación además de no solucionar por si misma la problemática de la migración aguas abajo de la fauna acuática debido a los altas rotaciones de la turbina (250 [RPM]) aniquilaría cualquier pez que quisiera pasar.

Para la primera restricción, se puede reducir el impacto de una mala regulación de los caudales si todos los trabajos se desarrollan en verano, preferentemente durante los meses Julio, Agosto y Septiembre (ver figura 4.3) porque durante estos meses el caudal de la Gave d'Ossau es mínimo, incluso durante este periodo podría ser necesario solo una turbina para cumplir con la función de regulación. Por lo tanto, una posible logística de reemplazo es la instalación de un grupo sin detener la regulación que puede realizar el segundo grupo de forma simultánea.

Por otro lado, a través de esta logística es necesario estar alerta al uso de las compuertas dado que existe una problemática en su uso al no encontrarse controladas de forma automatizadas para trabajar en tiempo real en la regulación con las turbinas, por ende esta restricción obligaría eventualmente a operar las compuertas de forma manual. Las principales actividades civiles son:

- Trabajos de instalación en el sitio: 1 semana
- Acceso a la turbina para los trabajadores (Estructuras metálicas desmontables): 1 día
- Remoción de la turbina: Grúa de 80 toneladas de capacidad para levantar turbina y dejarla en el sitio: 2 días
- Trabajos de demolición: 2 semanas
- Montar pieza de sellado obra civil-turbina: 2 semanas
- Instalación de la nueva turbina Bulbo: 1 día

Será crucial para este escenario verificar el estado del aspirador dado que una eventual reparación podría ser muy costosa y complicada haciendo imposible este reemplazo. Por el momento se debe cambiar una pequeña compuerta deslizante y bomba del sumidero utilizada para drenar toda el agua para un proceso de mantención, se debe solucionar además unos problemas de filtración de agua por las actuales compuertas aguas arriba de las turbinas.

Básicamente, el reemplazo de un grupo puede ser realizado teóricamente en 1 mes y medio. De todas formas la conexión a la red y la sincronización de los comandos de control al control general deberían hacer detener por completo la central durante un mínimo de 2 semanas. En la figura 5.4 se puede observar el esquema de implementación de los actuales grupos, que en este escenario sería idéntico.



Sin importar la solución de reemplazo en Castet, es necesario el reemplazo de los componentes eléctricos más importantes debido a que se encuentran en su periodo de vejez. En la figura 5.5 se muestra un esquema de los componentes en su periodo de fin de servicio que son:

- Transformador 5kV/63kV
- Sistema Auxiliar (SA)
- Transformador para los servicios auxiliar (TSA)

En lo relativo a los aspectos mecánicos, las turbinas bulbos son máquinas sumergidas de álabes variables. éstas permiten un funcionamiento de la regulación de caudales de manera perfecta, siendo capaces de admitir entre un 40 % y 100 % del caudal nominal (i.e entre los 6 y 15  $\frac{m^3}{s}$ ) con elevados valores de eficiencia. Ciertamente, incluso para las nuevas versiones más compactas de la tecnología bulbo, el hecho de poseer prácticamente todos los equipos electromecánicos sumergidos puede conllevar que existan problemas de sellado, elevando su probabilidad de falla.

Es urgente solucionar el problema de la migración aguas abajo, por lo tanto para desarrollar una propuesta técnico-económica adecuada a Castet debe ser una prioridad.

Todas las soluciones estudiadas y revisadas del estudio [9] en el Capítulo 5 no son suficientes para la SHEM. La solución propuesta en el escenario 3 posee un interesante enfoque pero no cubre todas las restricciones involucradas, por ejemplo la variación de 2 metros del nivel de la presa.

Durante el presente trabajo, otro equipo de la empresa SHEM estaba desarrollando un nuevo concepto para la solución de la migración aguas abajo, en la misma línea sería un bypass a través de la construcción y casa de máquinas. La gran incertidumbre es el costo de la ingeniería civil necesaria por lo que sería estrictamente necesario realizar un estudio que permita encontrar la mejor forma y camino a través de la construcción. El tiempo total estimado para una posible implementación sería del orden de 6 semanas en donde la central se vería obligada a detener todas sus funciones de generación y regulación de caudales. En la última reunión con el equipo a cargo de la solución estimó un costo de 700.000 € detallados en la tabla 5.2.

COUPE TRANSVERSALE DANS L'AXE D'UN GROUPE

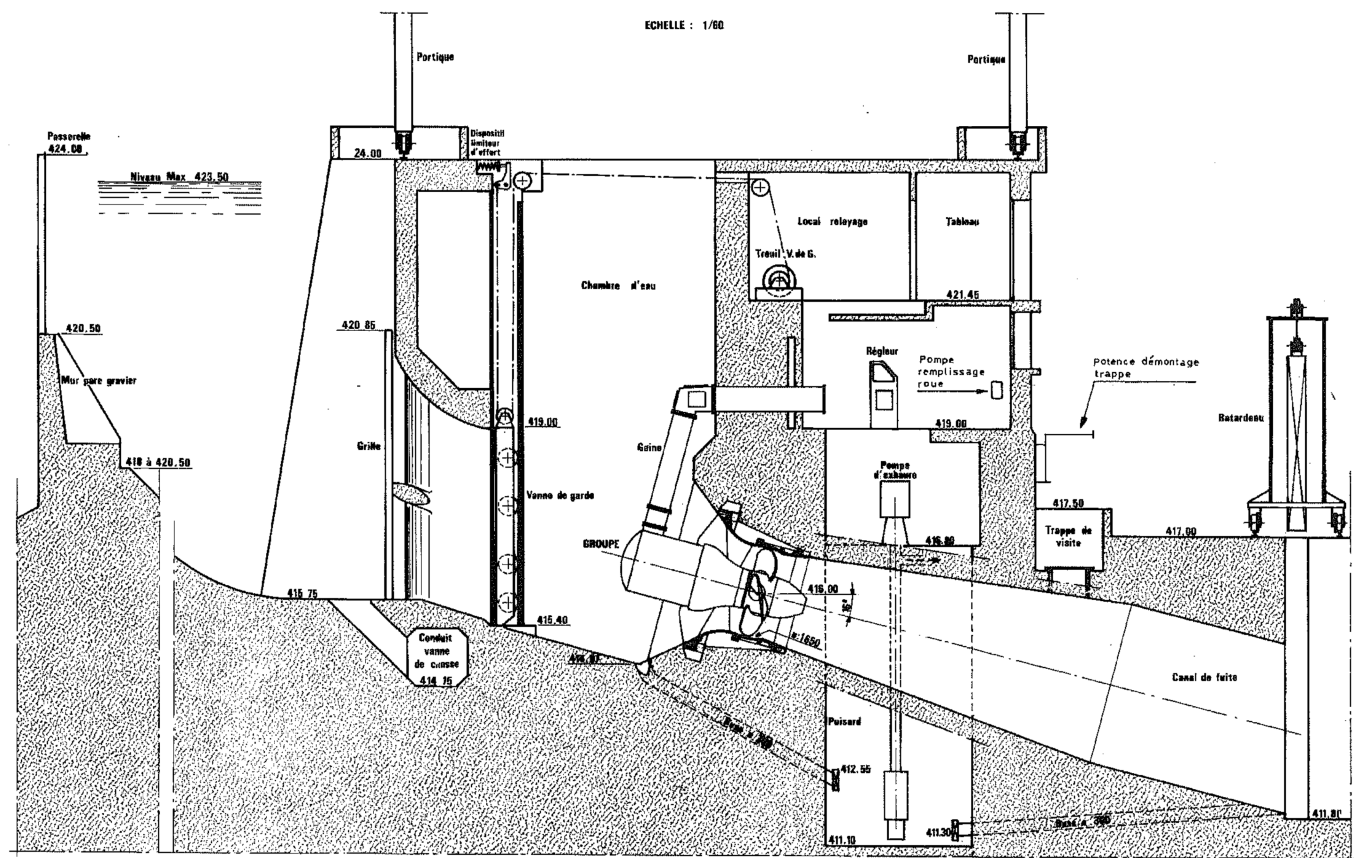


Figura 5.4: vista de la sección transversal de la instalación [10]

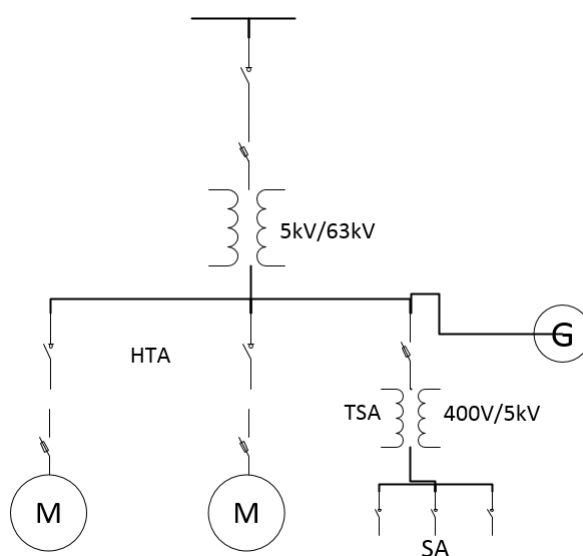


Figura 5.5: Simplificación del sistema eléctrico que se debe reemplazar (Elaboración propia)

### 5.1.2. Producción de energía

En la tabla 5.1 se muestran las cifras de generación de electricidad entregadas por la Central Castet al sistema para los años 2003 al 2013 con una generación promedio de 5.785.934 [kWh].

Tabla 5.1: Total energía generada en Castet 2003-2013 [12]

Año	Generación [kWh]
2003	4.457.200
2004	5.938.120
2005	6.311.745
2006	6.115.272
2007	6.182.657
2008	6.488.053
2009	4.099.392
2010	4.586.194
2011	5.419.118
2012	5.132.686
2013	7.586.102
<b>promedio</b>	<b>5.785.934</b>

#### Garantía de la eficiencia de los equipos

De acuerdo a los datos técnicos entregados en una cotización realizada a B.P Études [13] se aseguran las siguientes cifras de eficiencia como garantía ante una eventual instalación:

- Eficiencia Turbina para valores nominales: 89.0 % (Incluyendo aspirador)
- Eficiencia Generador para valores nominales: 96.0 %
- Eficiencia Global para valores nominales: 85.4 %

De acuerdo al experto Michel Laumond y de estudios realizados en reemplazos utilizando Ecobulbos [18] es posible mejorar entre un 5 y 10 % la producción total debido al aumento de eficiencia otorgado por la incorporación de imanes permanentes en el generador como un mejor funcionamiento general al ser una máquina nueva.

Para este escenario, en vez de realizar un cálculo global a través de curvas de potencia, datos de caudales y de altura, se escogió elegir una mejora del 5% de la producción promedio de 10 años en Castet para los futuros cálculos de producción y estimación económica durante 20 o 40 años.

Por lo tanto, la generación total estimada promedio para un año en Castet a través de un reemplazo de 2 nuevas turbinas bulbos sería: **6.075.230 [kWh]**

### 5.1.3. Estimación de costos

La estimación de costos para este escenario fue basada en una reunión con Sebastien Longares (ingeniero civil jefe de las centrales en la Valle d'Ossau) quién maneja muy bien los costos de instalación de obras civiles, demolición, montaje, etc. Se utilizó la cotización de turbinas bulbos de B.P Études [13], además del feedback extraído de la visita a la central Capdenac y sus presupuestos realizados con las empresas Andritz y Mavel. [14] [15].

El propósito de esta estimación de costos es cubrir todas las principales inversiones y cubrir trabajos pequeños no contemplados a través de un 15% del costo total.

Se utilizó finalmente el costo real de una turbina bulbo y el alternador del proyecto en Capdenac debido a que dicho precio incluía costos de transporte y de bodega, además que incluía la pieza de sellado que se instala en la obra civil. De todos modos, todos los presupuestos se encuentran en el mismo orden de magnitud.

Tabla 5.2: Estimación de costos para el escenario No. 1: Reemplazo de manera idéntica de los grupos Bulbos (Elaboración propia)

	<b>Trabajos</b>	<b>Designación</b>	<b>Costo</b>
Obras civiles	Estudios Preliminares	-	15.000 €
	Instalación en sitio	-	60.000 €
	Grúa (telescópica)	Instalación/alquiler/desmontaje	35.000 €
	Acceso (Escaleras desmontables)	3 veces (ensamblado-desmontaje) por grupo	18.000 €
	Desmontaje / Montaje Grupos	80t grúa [1 día / grupo]	6.000 €
	Demolición	2 semanas / 4 personas/50 <sup>e</sup> <sub>hr</sub>	16.000 €
	Demolición	insumos	30.000 €
	Montaje pieza de conexión	2 semanas	40.000 €
	-	<b>sub-total</b>	204.000 €
Electromecánicos	<b>Equipos y sistemas</b>	<b>Designación</b>	<b>Costo</b>
	Turbina MAVEL	2 Bulbos	1.445.350 €
	Alternador Bernard et Bonnefond	2 Alternadores	928.624 €
	Transformador	63 kV / 5 kV	80.000 €
	HVAC	disyuntores / seccionadores	47.000 €
	TSA	-	10.000 €
	Control de comando	2 Controles de comando	164.000 €
	Servicio Auxiliar alternativo	-	50.000 €
	Servicio general	-	50.000 €
-	<b>sub-total</b>	2.774.974 €	
Sistema Migración	<b>Equipos y obras</b>	<b>Designación</b>	<b>Costo</b>
	Rejillas	90 m <sup>2</sup>	130.000 €
	Rake de limpieza	-	150.000 €
	Obras civiles	trabajos en hormigón armado	120.000 €
	Bypass	-	300.000 €
	-	<b>sub-total</b>	700.000 €
Trabajo no incluido			15 %
<b>TOTAL</b>			<b>4.237.720 €</b>

### 5.1.4. Síntesis escenario 1

La solución más lógica a Castet es el reemplazo de las viejas turbinas bulbos que operan desde el año 1953 por unas nuevas, incrementando la eficiencia, generando mayor energía, aprovechando las instalaciones civiles existentes y utilizando la experiencia que se tiene con este tipo de tecnología por más de 50 años. En el sector hidráulico es más común en el reemplazo de los equipos por máquinas idénticas que realizando nuevas obras civiles importantes para una nueva tecnología.

La función de regulación de caudales de la central estaría asegurada por las turbinas bulbos cumpliendo de manera excelente dicha función a través de su diseño para una amplia gamma de caudales y su adaptabilidad a través de sus álabes variables. Adicionalmente, instalando nuevas turbinas se incrementaría la producción de energía entre un 5 % a 10 % para un mismo caudal y altura neta.

Por el contrario, existe una gran incertidumbre en relación a la solución para la migración aguas abajo de la fauna acuática. La prioridad de la SHEM debe ser poseer ya un proyecto detallado solucionando dicho problema, antes que se genere la renovación de la concesión. Un mecanismo para la migración aguas abajo es una obligación impuesta por el Estado Francés a Castet a partir del año 1991 y que aún no ha sido solucionada. La última opción estudiada en la SHEM es un sistema de bypass estimado en 700.000 € con un tiempo de implementación de 6 semanas, tiempo en que la central Castet se encontraría detenida. Es muy importante realizar un estudio de ingeniería civil que pueda encontrar la mejor opción de Bypass a través de la infraestructura de la central para una correcta estimación de las obras necesarias.

La complejidad de este escenario de reemplazo es la gestión del tiempo. Todo el proceso de reemplazo debe realizarse maximizando el tiempo en Verano en donde se tienen bajos caudales y utilizando una logística en la que se reemplace un grupo mientras el otro realice la función regulación, así mismo se reemplace el segundo grupo mientras el primero realiza la función de regulación. Todo el reemplazo podría realizarse en 3 meses con un intervalo de 2 meses a nivel teórico aunque con la experiencia que se tiene en la Central Capdenac, dicho tiempo se ha triplicado. Sin embargo, en caso de que el caudal entrante supere el caudal nominal de  $15 \frac{m^3}{s}$  será necesario usar las compuertas deslizantes, de forma manual. Por lo tanto, antes de iniciar los trabajos de reemplazo y reducir un posible riesgo, se debería automatizar el actual mecanismo de las compuertas con un costo aproximado de 10.000 €[5]. La verificación de un buen estado del aspirador será crucial antes de continuar este escenario de implementación.

Durante los trabajos será necesario detener el funcionamiento completa de la central y por ende la función de regulación de caudales. Por ejemplo, durante la conexión al sistema y las pruebas que duran aproximadamente 2 semanas, la sincronización del control de comando de cada grupo turbina-generador al control general de la central. Finalmente existen pequeñas inversiones a realizar previamente para una correcta implementación asociadas al reemplazo de pequeñas compuertas deslizantes y a la bomba del sistema de drenado de agua que permiten un ambiente seco y aislado en la zona de la turbina.

**El costo mínimo estimado para este escenario de reemplazo es de 4.332.720 €**

## 5.2. Reemplazo con tecnología VLH

La tecnología VLH (Very low head) es un nuevo concepto de turbina hidroeléctrica creada para la explotación de bajos saltos de agua (alturas comprendidas entre 1.5 y 3.4 metros, hasta 4.5 en la versión reforzada), concepto nacido de la intuición de profesionales de la mini-hidráulica en Francia.

Hasta hoy en día, ningún equipamiento permite la construcción de sitios hidroeléctricos rentables para saltos menores a 2 metros. Técnicamente hablando, varias tecnologías están disponibles, pero su construcción implica obras de ingeniería civil tales que los costos se vuelven inabordables.

En abril 2004, MJ2 Technologies fue fundada con el propósito de desarrollar este concepto, de encontrar financiamiento y de generar el proyecto cubriendo aspectos científicos, R& D e industriales para crear el primer prototipo.

El 19 de Marzo del 2007, la primera turbina VLH entregó su primer kW al sistema público francés en el sitio de Troussy en Millau. MJ2 Technologies entregó 42 turbinas el año 2013. En este momento se encuentran en una fase de producción industrial junto con nuevos desafíos.



Figura 5.6: Más de 700 visitantes a Millau [21]

### 5.2.1. El producto VLH

Grupo compacto, sumergible, integrando todos los elementos necesarios para la producción de energía renovable. La VLH incorpora las siguientes funciones:

- Turbina Kaplan estándar de 8 alabes regulables en función del nivel de agua y del caudal.
- Estructura auto-portante permitiendo un ensamblaje completo en el taller y un montaje con puesta en marcha muy rápida.
- Alternador de ataque directo, imanes permanentes y velocidad variable.
- Dispositivo de detención y de corte del caudal por cierre de los alabes sobre ellos mismos sin utilizar energía del sistema. Las instalaciones de las VLH no necesitan compuertas aguas arriba para asegurar la detención del funcionamiento.
- Distribuidor que incluye sistema de rejillas.
- Limpiador de rejillas rotativo.
- Convertidor de frecuencia que permite la velocidad variable.
- Equipos de control y comando electrónico integrados asegurando una gestión del generador y los equipos eléctricos de potencia.
- Dispositivo de brazos hidráulicos que permite colocar la turbina en posición de mantenimiento o para una situación de crecida.

La VLH a sido creada y fabricada según un programa de investigación y desarrollo científico internacional de más de 3 años.

1. Optimización del perfil hidráulico por CFD en l'INPG de Grenoble, 2004.
2. Ensayo en modelo reducido CEI60193 en el laboratorio LAMH Université Laval de Québec, 2005 - 2006.
3. Concepción mecánica en CAD 3D optimización de las estructuras por cálculo de elementos finitos realizados por MJ2 Technologies, 2006 - 2007.
4. Test para el paso de pases por la máquina en el 2008 (salmones y anguilas plateadas) en octubre 2010 y en mayo 2013 (truchas y tencas)

# VLH DN 4000

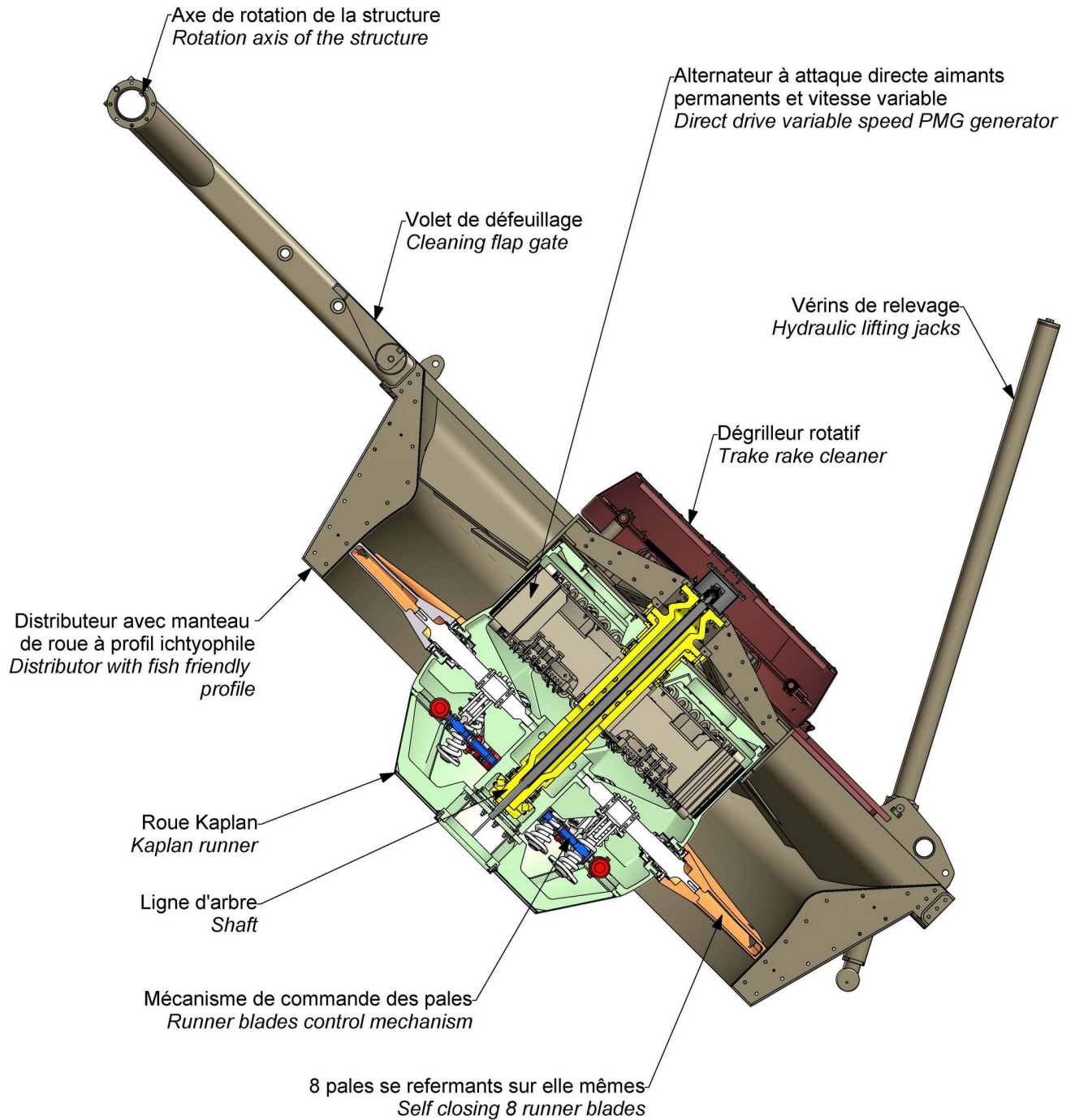


Figura 5.7: vista en corte de una VLH DN4000 [21]



## Aspecto Eléctrico

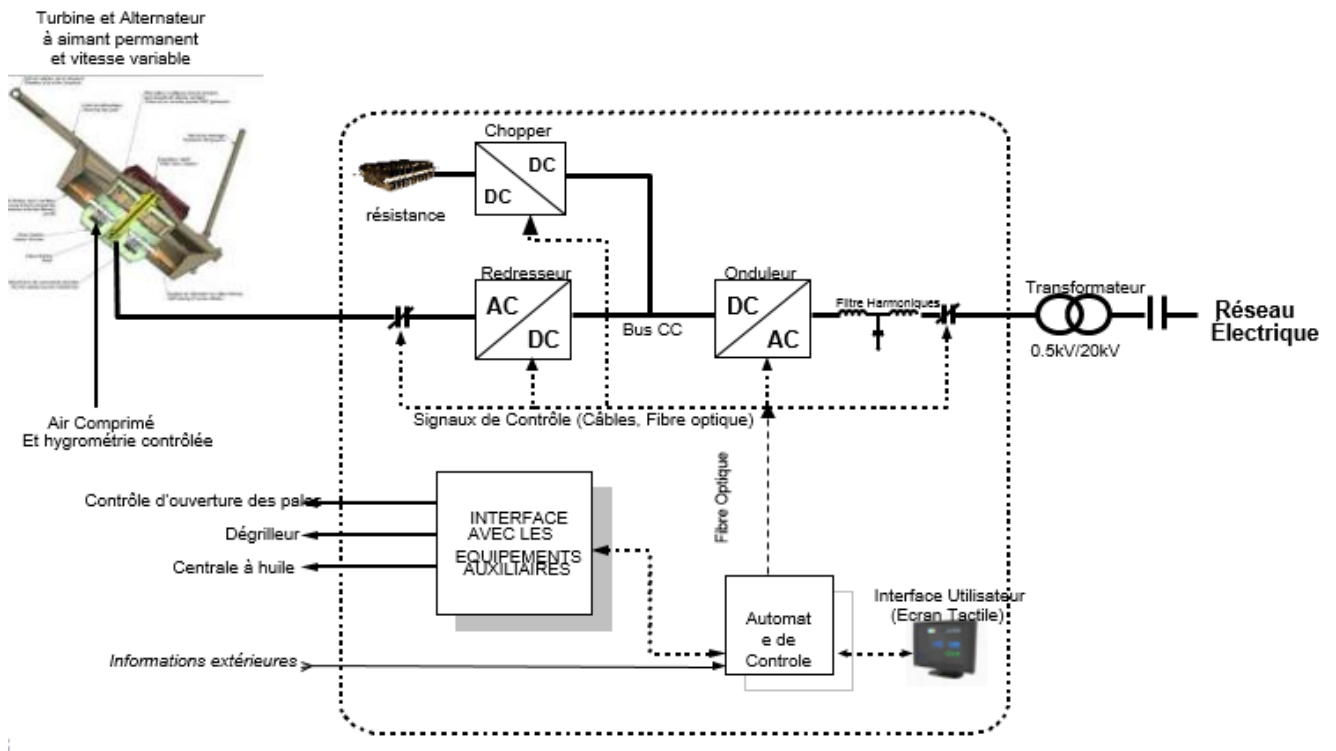


Figura 5.8: Esquema del Control [21]

El equipamiento de control comando y electrónico integrados asegura la gestión del grupo generador y de los equipos de electrónica de potencia.

El control comando de la VLH es totalmente parametrizable in situ o a la distancia. Posee una interfaz hombre-máquina muy simple, expuesta en una pantalla táctil industrial y con puertos de comunicación a la red ADSL o por conexión local con un computador a través de un puerto USB.

Es colocada generalmente en frente del armario de la electrónica de potencia que recibe de la misma manera los equipamientos electrónicos y los circuitos de distribución de baja tensión.

Los equipamientos eléctricos de baja tensión y electrónicos asociados al grupo turbo-generador VLH son por lo tanto muy compactos. Ambos son equipados en un mismo compartimentos de 2 puertas.

### *Detalles:*

- El generador de imanes permanentes esta compuesto de un estator central y de un rotor periférico. Los imanes del generador tienen aproximadamente 1 cm de espesor. Ellos están constituidos de tierras raras (N42 SH) que vienen de China.
- El número de polos del generador está en función del diámetro de la rueda que condiciona la turbina (por ejemplo: 80 polos para el diámetro de 3550mm, 100 polos para el

diámetro de 4500mm). En todo caso, la frecuencia es inferior a los 50[Hz] por lo tanto es necesario un convertidor de frecuencia.

- La tensión es directamente proporcional a la velocidad. El objetivo es de 500 [V] (para quedar menor a 1000 [V] del descontrol).
- El estator dividido en diversos sectores (el número en función del diámetro), compuesto cada uno de 10 bobinas. Esos sectores son independientes.
- El convertidor de frecuencia, fabricado por ABB, entrega la instrucción de velocidad al rotor a partir de un algoritmo que calcula la velocidad óptima en función de la altura neta, conservado un buen rendimiento.
- El convertidor de frecuencia asegura la protección de la máquina (controla la corriente, la tensión y la frecuencia de la máquina como del sistema).
- 3 modos de regulación son utilizados e incluidos en el sistema: *La regulación el nivel* hasta  $Q_{nom}$  luego la *regulación de velocidad* y la *regulación de potencia* (esto debido a que ERDF impone de no pasar la potencia máxima concebida en el contrato de conexión).
- El convertidor de frecuencia regula el  $\cos\phi$ . La máquina puede producir un poco de energía reactiva con los condensadores incluidos en el convertidor.

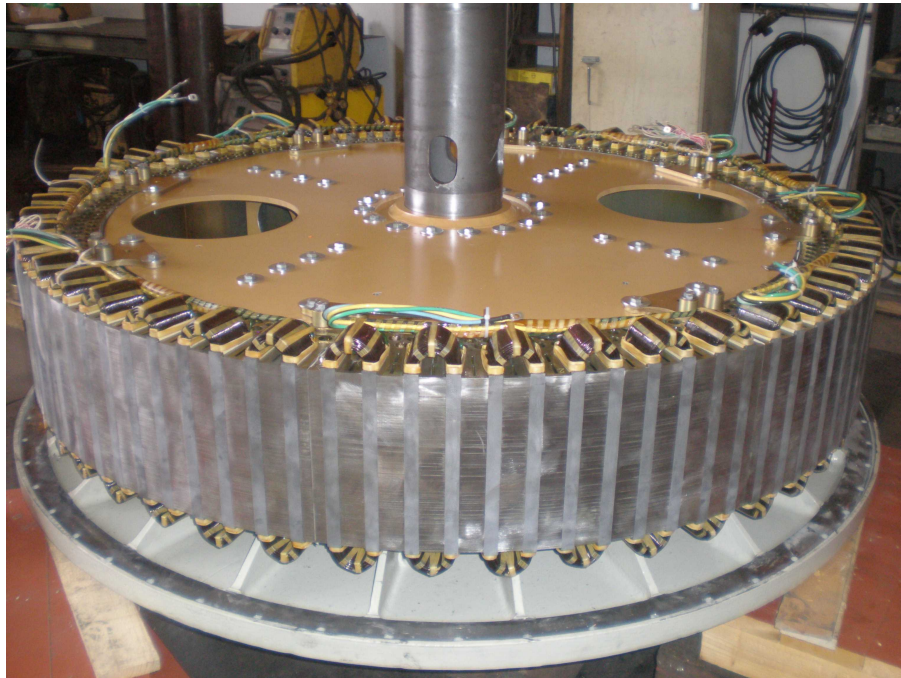


Figura 5.9: vista del estator VLH [21]

## Aspecto Mecánico

La turbina es de tipo Kaplan estandarizada con 8 álabes regulables. La abertura de los álabes es a través de un mecanismo hidráulico en función del caudal disponible y de la altura neta instantánea.

La velocidad de rotación del rotor es aproximadamente unas 40 [RPM] en velocidad nominal y menos de 100 [RPM] antes del punto fuera de control.

El sistema de refrigeración es asegurado por la circulación de agua alrededor de la carcasa. El hecho que sea una carcasa en sobrepresión permite evitar la condensación. Los productos utilizados para la lubricación son biodegradables. En la figura 5.10 se observa el mecanismo de control de álabes y en la figura 5.11 se tiene una vista de la turbina.

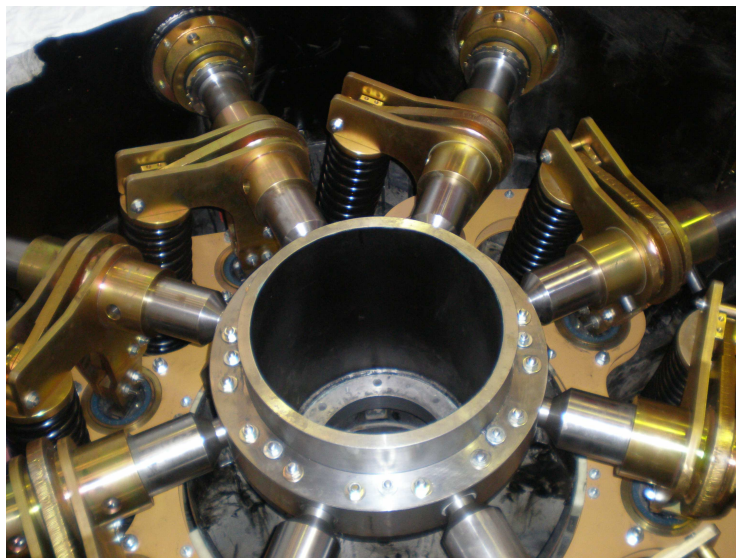


Figura 5.10: Mecanismo de control de álabes [21]



Figura 5.11: vista de la turbina VLH [21]

## Mantenimiento de los equipos electromecánicos

Según MJ2 Technologies (manufacturador), la baja velocidad de rotación y el hecho que se utilicen componentes robustos, confieren a la VLH una buena fiabilidad mecánica.

Los constructores calculan los generadores de imanes permanentes para una duración de vida idéntica a un generador sincrónico convencional (unos 30 años). Sin embargo, el retorno de experiencia que disponen estas máquinas no permiten certificar que estos cálculos sean correctos. Es por esto que una inspección al equipo es recomendada al termino de 100.000 horas de funcionamiento (en torno a los 10 años).

Los rodamientos del eje están dotados de reservas de grasa dimensionadas para permitir una separación máxima entre las intervenciones de mantención.

Un sistema de levantamiento (cilindro laterales) permiten elevar la estructura fuera del agua para mantención o en caso de una crecida, si es necesario liberar la sección útil como se observa en la figura 5.12.

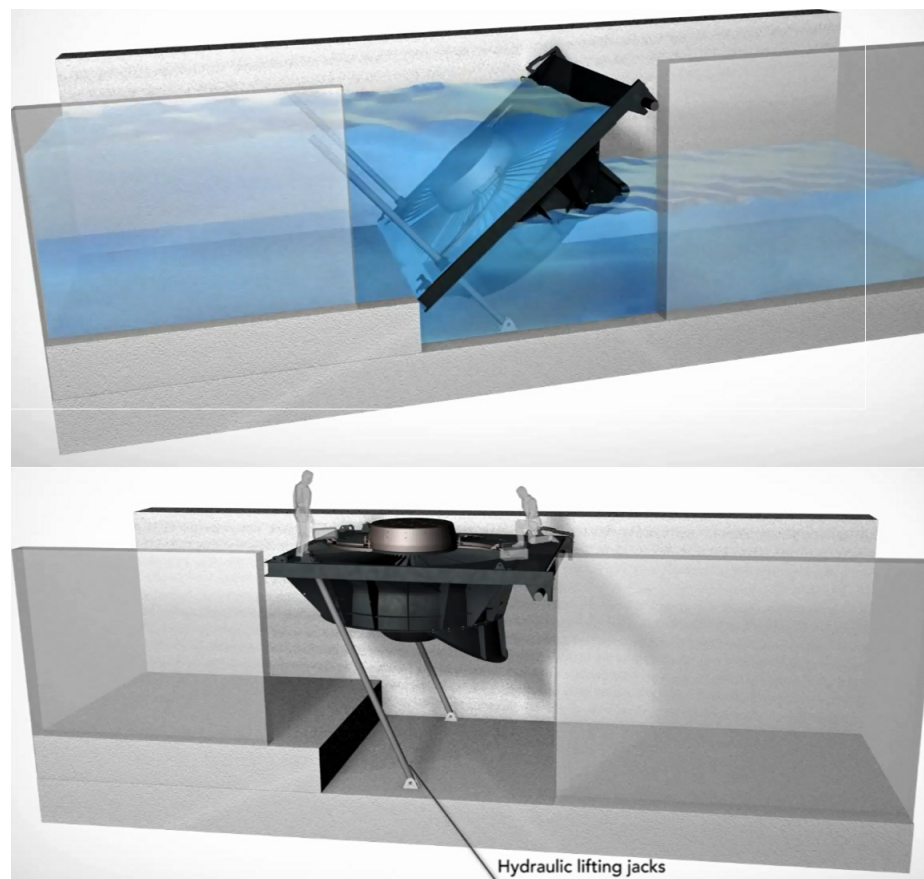


Figura 5.12: vista de la turbina en posición de mantención [21]

## 5.2.2. Ventajas

### Reducción de la ingeniería civil

La utilización de las turbinas VLH permiten una reducción considerable de los costos de las obras civiles. La cantidad de hormigón requerido es muy reducida y no se necesita de alguna construcción para la casa de máquinas sobre las turbinas.

Para saltos menores a los 3 metros, el impacto del volumen de hormigón (i.e los costos de los trabajos civiles) aumentan considerablemente. Es evidente que las VLH's requieren una infraestructura de pequeñas dimensiones, con formas simples y necesitando un poco de excavación.

Las infraestructuras de las obras civiles necesarias para la instalación de una VLH son también reducidas a su mínima expresión, limitándose a dos paredes laterales verticales paralelas y un radier horizontal. Los volúmenes de excavación son igualmente optimizados gracias a la inclinación de la VLH. En la figura 5.13 se observa una comparación de la ingeniería civil para distintas tecnologías utilizando el mismo salto de agua.

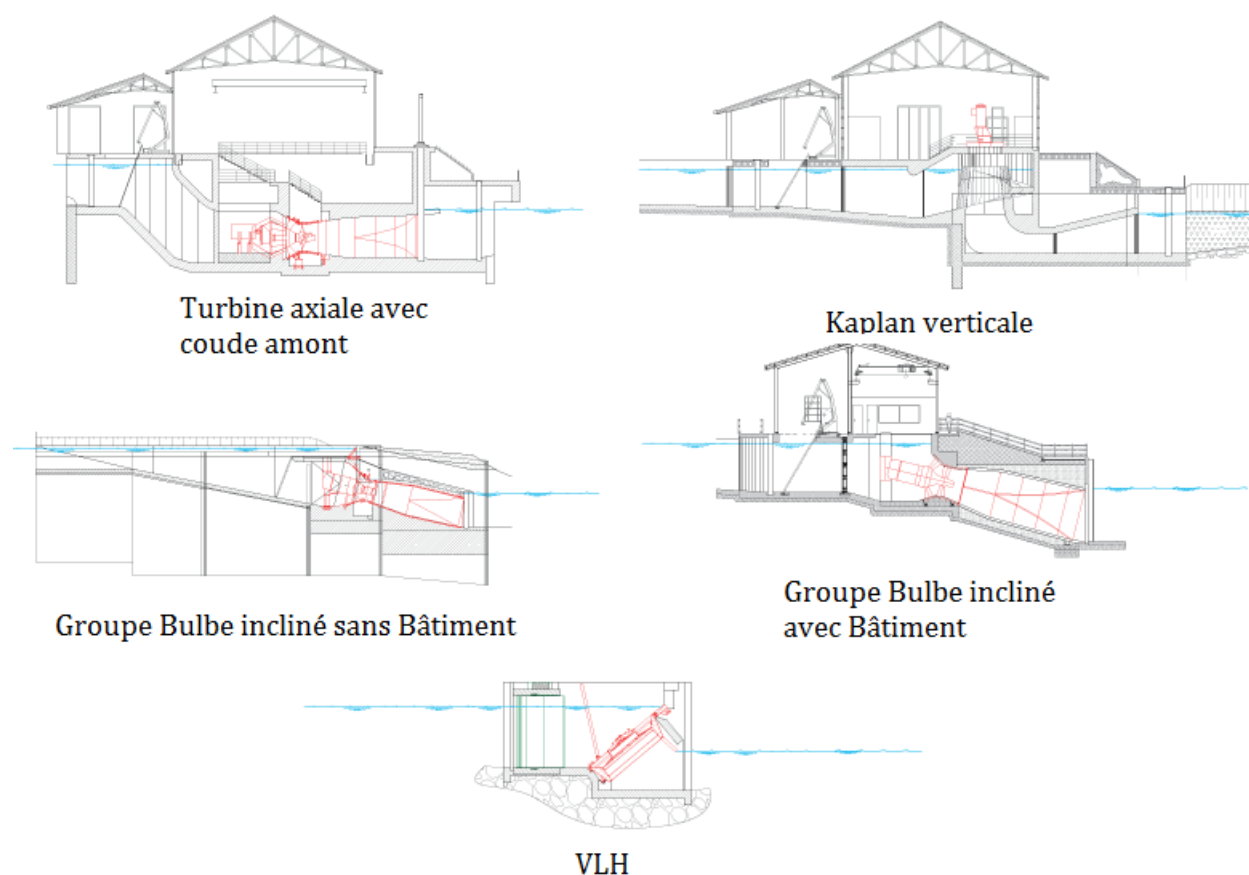


Figura 5.13: Ingeniería civil necesaria escalada para la diferentes tecnología para un mismo salto [21]

## Migración Peces - Carácter Ictiófilo

Las características específicas de la turbina VLH le confieren en principio un particular respeto a la fauna acuática. Estando conscientes de esa ventaja, los constructores se centraron en la concepción mecánica e hidráulica de la VLH en base a una optimización de sus características intrínsecas.

Así también, los criterios “Ictiófilos” (del griego, amigo de los peces) fueron optimizados e introducidos de manera de entregarle un grado de prioridad con respecto al comportamiento energético puro.

### *Criterio Ictiófilo*

Los criterios ictiófilos de la turbina VLH fueron establecidos teóricamente a partir del referente sugerido por la U.S Army Corps of Engineers en el año 1995 [20].

- **Daños ligados a causas mecánicas:** Abrasión, trituración, riesgo de choques. La mortalidad es mínima para velocidades inferiores a  $12.2 \left[\frac{m}{s}\right]$  en el juego entre la pieza móvil y la fija (entre los álabes y el manto de la carcasa de la turbina, por ejemplo). La recomendación es de  $6.1 \left[\frac{m}{s}\right]$ .
- **Daños ligados al gradiente de presión:** Los efectos ligados a la velocidad de adaptación de la presión en la vejiga natatoria. Los umbrales definidos son: 69 [kPa] de presión mínima y  $550 \left[\frac{kPa}{s}\right]$  para el gradiente de presión.
- **Turbulencia:** La turbulencia está caracterizada por los gradientes de velocidad. Un umbral del orden de los  $180 \left[\frac{m}{m}\right]$  es recomendado.

Una evaluación fue efectuada en el año 2005 por la INPG (Institut national polytechnique de Grenoble) sobre un modelo numérico de la turbina (estudios CFD). En efecto, la evaluación de los daños sufridos por los peces en las turbinas es generalmente medido preferentemente en base a predicciones de modelos más que en base a medidas reales ya que es difícil de instalar los instrumentos de medición in situ o aquellos mecanismos son susceptibles a crear o aumentar más los daños.

Tabla 5.3: Resultados del estudio del INPG [19]

Criterio	Aceptabilidad	Valor VLH
1.Velocidad en el borde de los álabes	$6.1 \text{ (à } 12.2) \frac{m}{s}$	$4.5 \text{ à } 8 \frac{m}{s}$
2.Presión mínima encontrada	69 kPa	94 kPa
3.Máximo gradiente de presión	$550 \frac{kPa}{s}$	$80 \frac{kPa}{s}$
4.Máximo gradiente de velocidad	$180 \frac{m}{m}$	$10 \frac{m}{m}$
5.juego entre álabes-manto	< 2 mm	<b>4.5 mm</b>

El estudio concluye que la turbina VLH se posiciona, bajo un punto de vista cualitativo, notoriamente bajo valores máximos considerados como aceptables (salvo por el criterio del juego entre álabes-manto). Luego el modelo fue presentado comercialmente como “100 % Ictiófilo<sup>®</sup>” el año 2007.

## Campaña de pruebas y mediciones

Se realizaron 6 campañas de medición y pruebas sobre peces vivos para demostrar el carácter ictiófilo de la VLH y su bajo impacto en la mortalidad de peces que atraviesan el grupo en funcionamiento mientras realizan su migración aguas abajo. En Abril 2007 (smolts), Diciembre 2007 y Enero 2008 (anguilas), Febrero 2008 (smolts), octubre 2010 (anguilas), Mayo 2013 (pequeñas y grandes truchas) y Junio 2013 (pequeñas y grandes carpas).

### Octubre 2010: Segunda prueba con anguilas vivas

Un comité científico fue constituido, integrado por los mejores especialistas del franqueamiento o paso a través de turbinas hidroeléctricas francés, provenientes de la ONEMA (Office national de l'eau et des milieux aquatiques), así también por científicos alemanes y belgas. Aún más, un equipo de especialistas polacos y miembros de la comisión internacional para la protección del Mosela y el Sarre (CIPMS) fueron igualmente invitados a las pruebas. Se realizaron 4 puntos de inyección (mediana 1 y 2, interior y exterior):

Tabla 5.4: tasa de supervivencia para 200 individuos inyectados [24]

Interior	Mediana 1	Mediana 2	exterior
100 %	100 %	100 %	100 %

4 individuos presentaron rasguños superficiales pero no comprometiendo su supervivencia.

### Mayo y Junio 2013: Pruebas para el paso de salmónidos y ciprinidos

Con el fin de simular la migración aguas abajo de salmónidos (salmones, truchas de mar, truchas arco iris) en su estado juvenil o adulto, fue utilizada una muestra de 700 truchas con tallas que variaron entre los 20cm y más de 75cm para las más grandes. La prueba fue realizada para la última VLH puesta en servicio en Millau.

Tabla 5.5: Mortalidad en la VLH para 3 puntos de abertura [24]

% Abertura	Grandes TAEC	Pequeñas TAEC	Granes carpas	Pequeñas carpas
100	1.1 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
75	1.1 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
50	4.4 %	0.0 %	0.0 %	1.1 %

**Sobre la base de estos resultados únicos y excepcionales, la VLH será la primera turbina hidroeléctrica calificada como ictiófila por la administración Franciasa. [24]**



### 5.2.3. Gamma turbina VLH

Tabla 5.6: Gamma turbina VLH [21]

Gamma VLH	3150[mm], 3550[mm], 4000[mm], 4500[mm], 5000[mm]
Gamma de salto bruto	1.5 hasta 3.4 [m] (Hasta los 4.5[m] en version reforzada)
Gamma de caudal	10 hasta 27 $\frac{m^3}{s}$ por grupo
Gamma de Potencia	100 hasta 500 kW

Maximum discharge per unit in  $m^3/s$   
Débit maximum par groupe en  $m^3/s$

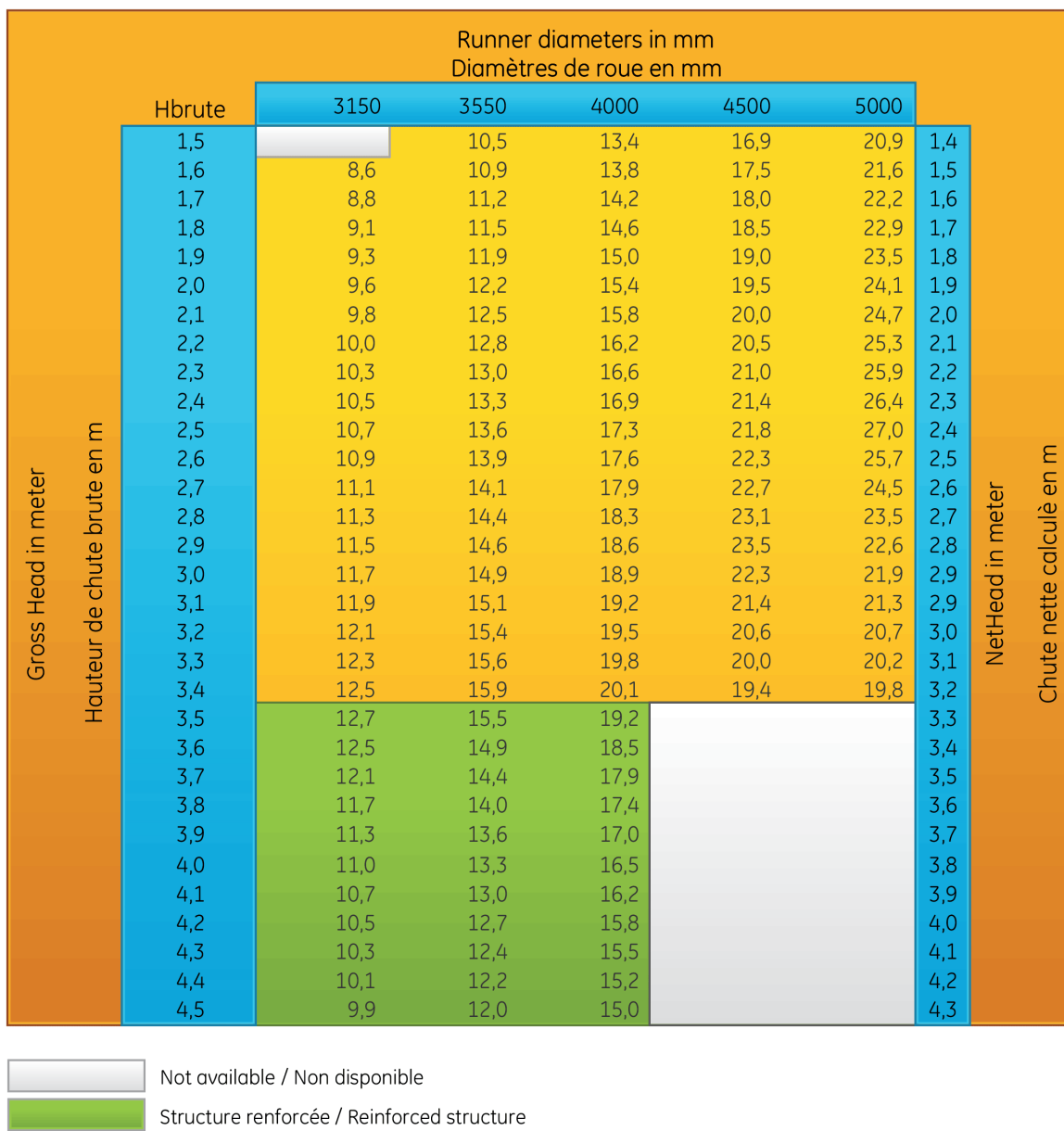


Figura 5.14: Caudal Máximo Unitario [21]



Maximum electrical output per unit in kW (\*)  
 Puissance électrique maximum par groupe en kW (\*\*)

		Runner diameters in mm Diamètres de roue en mm					
Hbrute		3150	3550	4000	4500	5000	
Gross Head in meter Hauteur de chute brute en m	1,5		115	147	186	231	1,4
	1,6	100	127	162	205	254	1,5
	1,7	109	139	177	225	279	1,6
	1,8	119	151	193	245	304	1,7
	1,9	129	164	209	266	329	1,8
	2,0	139	177	226	287	356	1,9
	2,1	150	191	243	309	383	2,0
	2,2	160	205	261	331	410	2,1
	2,3	172	219	279	354	439	2,2
	2,4	183	233	297	377	467	2,3
	2,5	194	248	316	401	497	2,4
	2,6	206	263	335	426	500	2,5
	2,7	218	278	355	450	500	2,6
	2,8	230	294	374	476	500	2,7
	2,9	243	310	395	500	500	2,8
	3,0	255	326	415	500	500	2,9
	3,1	268	342	436	500	500	2,9
	3,2	281	359	457	500	500	3,0
	3,3	295	376	479	500	500	3,1
	3,4	308	393	500	500	500	3,2
NetHead in meter Chute nette calculé en m	3,5	322	400	500			3,3
	3,6	330	400	500			3,4
	3,7	330	400	500			3,5
	3,8	330	400	500			3,6
	3,9	330	400	500			3,7
	4,0	330	400	500			3,8
	4,1	330	400	500			3,9
	4,2	330	400	500			4,0
	4,3	330	400	500			4,1
	4,4	330	400	500			4,2
	4,5	330	400	500			4,3

\* Electrical output delivered at frequency converter terminal box

\*\* Puissance électrique à la sortie du convertisseur

Figura 5.15: Potencia Eléctrica Máxima unitaria en [kW] [21]

## 5.2.4. Centrales en operación o en construcción

En la tabla 5.7 se observa una recopilación de todas las centrales con tecnología VLH que se encuentran en construcción o en operación, con el salto bruto respectivo y su caudal de diseño.

Tabla 5.7: Centrales en operación o en construcción [21]

Sitio	Año	Cliente	$H_n$	Caudal	Características
Mayenne Francia	2014	SHEMA(EDF)	1.4[m]	10.5[ $\frac{m^3}{s}$ ]	10x200 kW DN3550
Mayenne Francia	2014	SHEMA(EDF)	2.7[m]	13[ $\frac{m^3}{s}$ ]	4x260 kW DN3550
Martigny Bourge Suiza	2014	Alpiq	1.9[m]	9.6[ $\frac{m^3}{s}$ ]	1x136 kW DN3150
Roman Rumania	2014	C.H S.A.	2.7[m]	14.4[ $\frac{m^3}{s}$ ]	2x343 kW DN4500
Larche Francia	2014	E.Hydraulique de Larche	2.1[m]	20[ $\frac{m^3}{s}$ ]	1x400 kW DN4000
Hauterive Francia	2014	Genergue S.a.s	3.13[m]	16[ $\frac{m^3}{s}$ ]	1x400 kW DN4000
Randeaun Francia	2014	EDF	4.08[m]	17[ $\frac{m^3}{s}$ ]	4x500 kW DN4000
Capdenac Francia	2014	SHEM	2.8[m]	14.3[ $\frac{m^3}{s}$ ]	2x293 kW DN3550
Bagnolo S.Vito Italia	2014	I.Vacchelli	4.5[m]	15[ $\frac{m^3}{s}$ ]	1x500 kW DN4000
Ala(TN) Italia*	2013	Enel	4.2[m]	12.8[ $\frac{m^3}{s}$ ]	2x400 kW DN3550
La Glacière Francia*	2013	La Guienguette	1.8[m]	23[ $\frac{m^3}{s}$ ]	1x324 kW DN5000
La Prétière Francia	2013	EDF	2.4[m]	13.3[ $\frac{m^3}{s}$ ]	1x233 kW DN3550
Saint Gery Francia*	2012	SHEMA	2.6[m]	13[ $\frac{m^3}{s}$ ]	1x261 kW DN3550
Isola Dovarese Italia*	2012	STE Energy	2.51[m]	23.6[ $\frac{m^3}{s}$ ]	2x464 kW DN5000
Barcelone de Gers *	2012	Ondulia	3.14[m]	19.8[ $\frac{m^3}{s}$ ]	1x450 kW DN4000
Lipki Polonia	2012	INECO Sp.	1.95[m]	24[ $\frac{m^3}{s}$ ]	4x360 kW DN5000
La Cavaletade Francia	2012	R.Municipale Toulouse	3.33[m]	15[ $\frac{m^3}{s}$ ]	2x400 kW DN3550
Fontgombault Francia	2012	Petrus A Stella	1.81[m]	9.3[ $\frac{m^3}{s}$ ]	1x129 kW DN3150
Wasdel Fall Canada	2012	Ontario Canada	4.1[m]	15.8[ $\frac{m^3}{s}$ ]	3x500 kW DN4000
Yenne Francia*	2011	CNR (GDF Suez)	2.6[m]	24.5[ $\frac{m^3}{s}$ ]	1x500 kW DN5000
Aubas Francia*	2011	ECODOR	2.85[m]	18.9[ $\frac{m^3}{s}$ ]	1x200 kW DN4000
Fraisans Francia*	2011	SOPEF	1.77[m]	14.9[ $\frac{m^3}{s}$ ]	2x200 kW DN4000
Marcinelle Bélgica*	2011	Merytherm	2.85[m]	15[ $\frac{m^3}{s}$ ]	2x323 kW DN3550
L'Ame Francia*	2010	SHEMA(EDF)	1.73[m]	10.8[ $\frac{m^3}{s}$ ]	1x145 kW DN3550
Villa d'Alme Italia*	2010	STE Energy	3[m]	15.4[ $\frac{m^3}{s}$ ]	1x357 kW DN3550
Montodine Italia*	2010	STE Energy	2.79[m]	23.5[ $\frac{m^3}{s}$ ]	1x500 kW DN4500
Terrasson Francia*	2010	E.Verde de Terrasson	2.57[m]	18[ $\frac{m^3}{s}$ ]	2x448 kW DN4000
St Jean de Rives Francia*	2010	S.H.M.R	2.74[m]	23.5[ $\frac{m^3}{s}$ ]	1x500 kW DN5000
Clairvaux Francia*	2009	CHBC S.A.R.L	2.57[m]	14.1[ $\frac{m^3}{s}$ ]	1x278 kW DN3550
Canal Huningue Francia*	2009	F.M. de Huningue	1.98[m]	13[ $\frac{m^3}{s}$ ]	1x198 kW DN3550
Canal Huningue Francia*	2009	F.M. de Huningue	1.42[m]	13[ $\frac{m^3}{s}$ ]	1x142 kW DN3550
Les Barrets Francia*	2009	SNC APAS	3[m]	15.3[ $\frac{m^3}{s}$ ]	1x386 kW DN3550
Moncey Francia*	2009	Nature Hydro Energie	2.11[m]	12.8[ $\frac{m^3}{s}$ ]	2x207 kW DN3550
Frouard Francia*	2009	SHF	2.61[m]	22[ $\frac{m^3}{s}$ ]	1x400 kW DN4500
La Roche Francia*	2008	SHEMA(EDF)	1.62[m]	11.3[ $\frac{m^3}{s}$ ]	1x140 kW DN3550
Millau Francia*	2007	F.Motrices de Farebout	2.38[m]	22[ $\frac{m^3}{s}$ ]	1x410 kW DN4500

\* Centrales en operación

## 5.2.5. Adaptación a Castet

En base al estudio realizado de la tecnología y a través de una reunión con el presidente de MJ2 Technologies, Marc Leclerc, se llegó a la conclusión de aprovechar el costado derecho de la central debido a la existencia de terreno disponible, la facilidad de realizar los trabajos sin interrumpir la producción de energía en el costado izquierdo. Para poder aprovechar el salto bruto de Castet (7.5 m) y fijar el caudal en  $30 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  se debe realizar un diseño de 2 grupos VLH en paralelo (turbinar  $15 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  cada uno) en configuración cascada con otros 2 grupos VLH en paralelo (aprovechar todo el salto bruto). Se debe tener en cuenta que la compañía jamás a construido un proyecto de este tipo pero, se encuentran en fase de estudios.

### Opción No 1: 4 grupos VLH idénticos

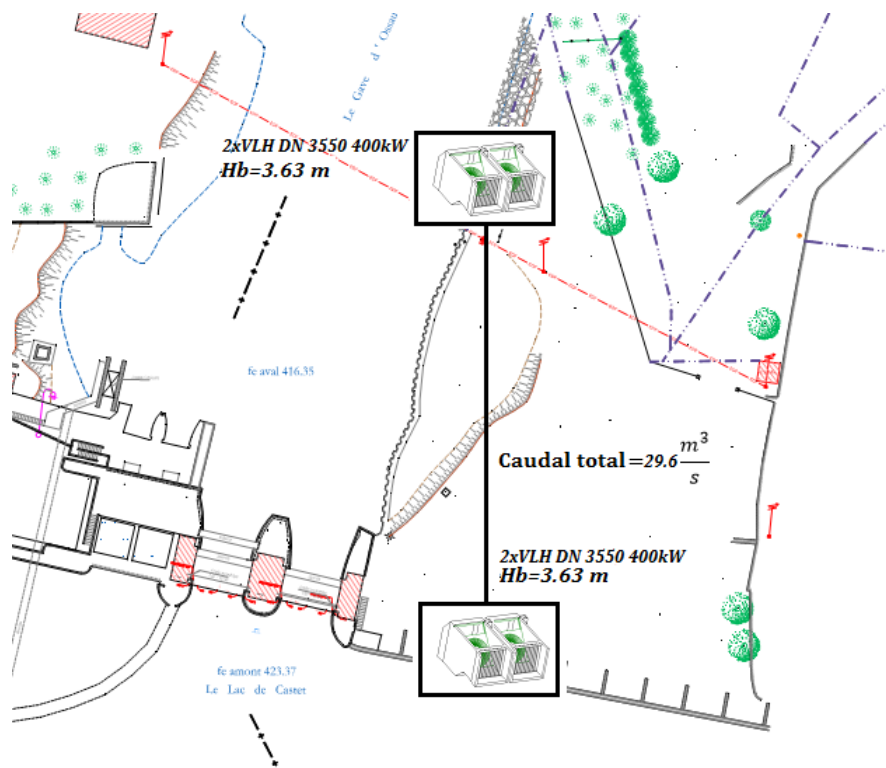


Figura 5.16: Opción No 1: 4 grupos VLH idénticos (elaboración propia)

#### Hipótesis:

- Altura bruta total: 7.25 m
- Caudal total:  $29.6 \frac{m^3}{s}$
- Altura bruta total dividida en dos. Cada salto de 3.63 metros.
- 2xVLH DN 3550 de 400kW aguas arriba y 2xVLH DN 3550 de 400kW aguas abajo con estructura reforzada para soportar la altura por sobre los 3.4 metros.
- Inclinación de las turbinas: 45 grados

## Análisis Energético

Tabla 5.8: Funcionamiento en regulación automática del caudal [16]

Parte del caudal	100 %	90 %	80 %	70 %	60 %	50 %	40 %	30 %	20 %
Altura bruta [m]	3.63	3.63	3.63	3.63	3.63	3.63	3.63	3.63	3.63
Altura neta [m]	3.48	3.51	3.53	3.55	3.57	3.59	3.60	3.61	3.62
Flujo por la turbina [ $\frac{m^3}{s}$ ]]	14.8	13.3	11.8	10.4	8.9	7.4	5.9	4.4	3.0
Potencia Turbina [kW]	445	405	359	308	252	195	139	87	43
Potencia Eléctrica [kW]	400	364	322	276	227	175	125	78	39

Tabla 5.9: Funcionamiento en regulación automática de la velocidad de rotación [16]

Parte de la altura bruta	100 %	90 %	80 %	70 %	60 %	50 %	40 %
Altura bruta [m]	3.63	3.26	2.90	2.54	2.18	1.81	1.45
Altura neta [m]	3.48	3.11	2.76	2.42	2.07	1.73	1.38
Caudal por la turbina [ $\frac{m^3}{s}$ ]]	14.8	15.5	14.6	13.6	12.6	11.5	10.3
Potencia Eléctrica [kW]	400	369	310	253	201	153	109

\* Estas especificaciones fueron provistas por MJ2 Technologies SARL de manera indicativa sin ningún tipo de compromiso. [16]

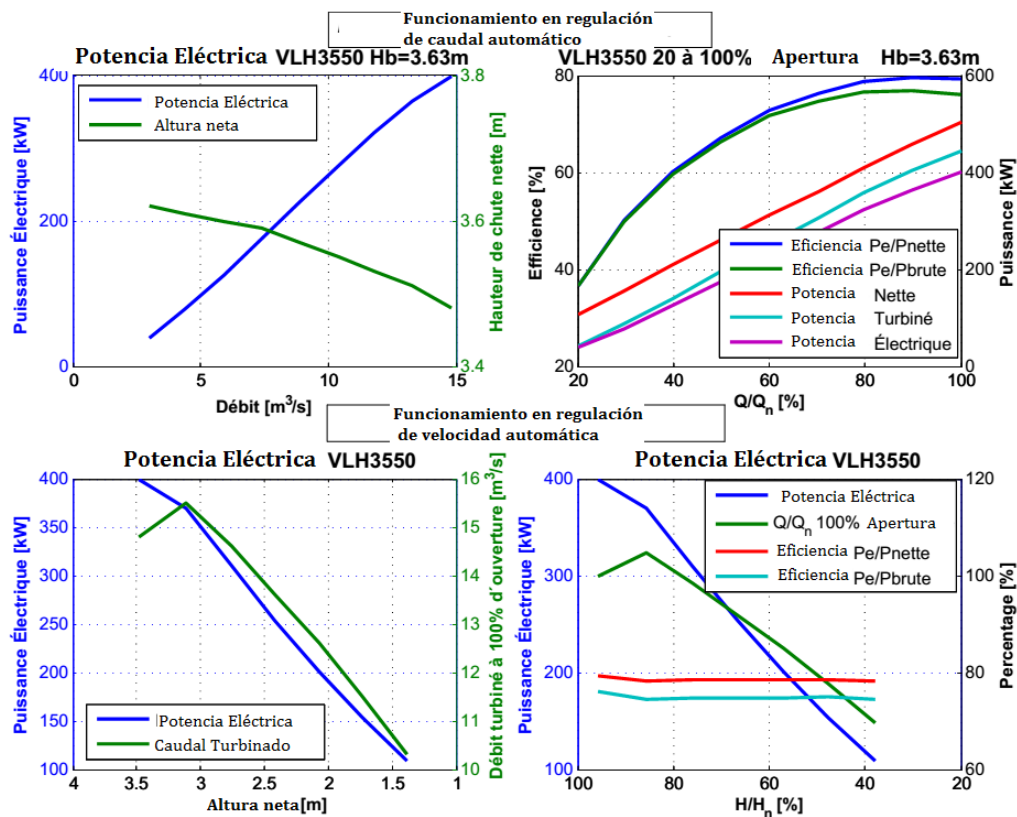


Figura 5.17: Gráficos de los distintos mecanismos de regulación tecnología VLH (Elaboración propia)

## Estimación de la energía generada en Castet

Hipótesis:

- Funcionamiento en regulación del caudal y de la velocidad de rotación en todo momento.
- Funcionamiento siempre para el rendimiento máximo para distintas alturas.
- Caudal laminar para los grupos aguas abajo.
- Pérdidas de carga despreciadas entre los grupos aguas arriba y aguas abajo.
- Datos provistos por MJ2 Technologies S.A.R.L
- Datos SHEM: Caudales reales turbinados por hora (Q), Nivel aguas arriba y aguas abajo de la presa (altura bruta total H) por hora.

```
function [P] = puissanceVLH(H,Q)

puissance1=[400 364 322 276 227 175 125 78 39];
courbepuissance=puissance1./400;
debit1=[14.8 13.3 11.8 10.4 8.9 7.4 5.9 4.4 3.0];
Q1=debit1.*(100/14.8);
chuteb2=[3.63 3.26 2.9 2.54 2.18 1.81 1.45];
porchuteb=chuteb2./3.63*(100);
puissance2=[400 369 310 253 201 153 109];
Pol1=polyfit(Q1,courbepuissance,3);
Y=polyval(Pol1,Q);
Pol2=polyfit(porchuteb,puissance2,3);
Y2=polyval(Pol2,H);
if H<40 P=0; elseif Q<20 P=0; else P=Y2.*Y; end
```

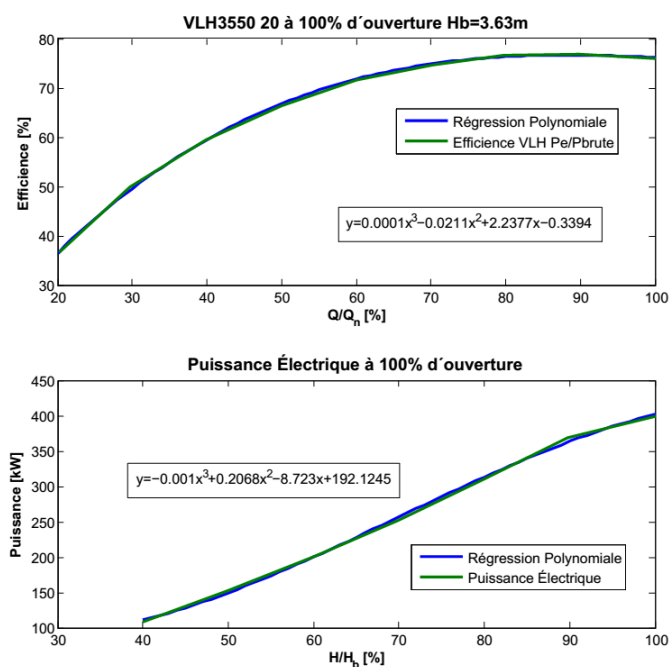


Figura 5.18: Regresión polinomial (elaboración propia)

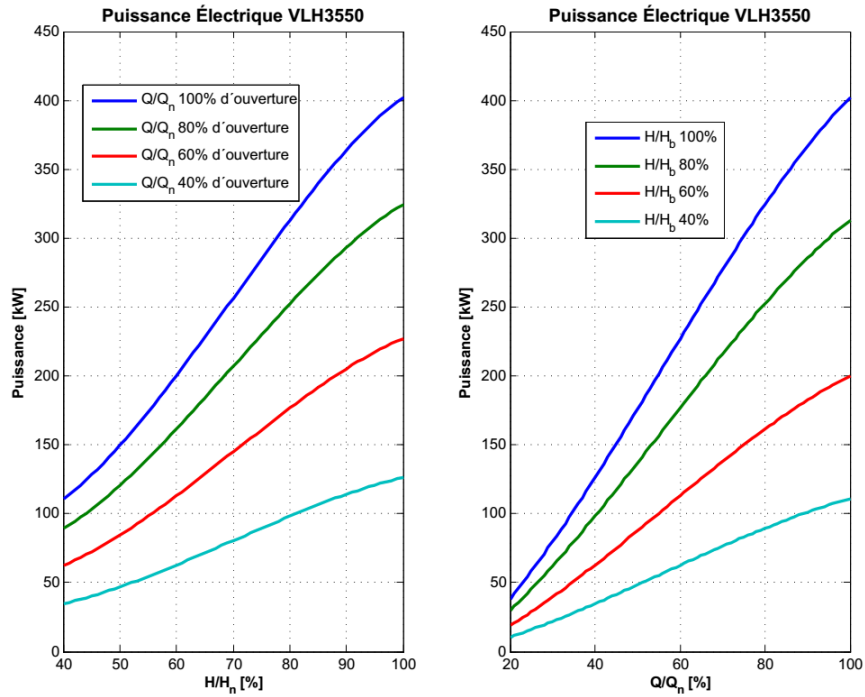


Figura 5.19: Potencia Eléctrica VLH 3550 vs  $\frac{Q}{Q_n}$ ,  $\frac{H}{H_b}$  (elaboración propia)

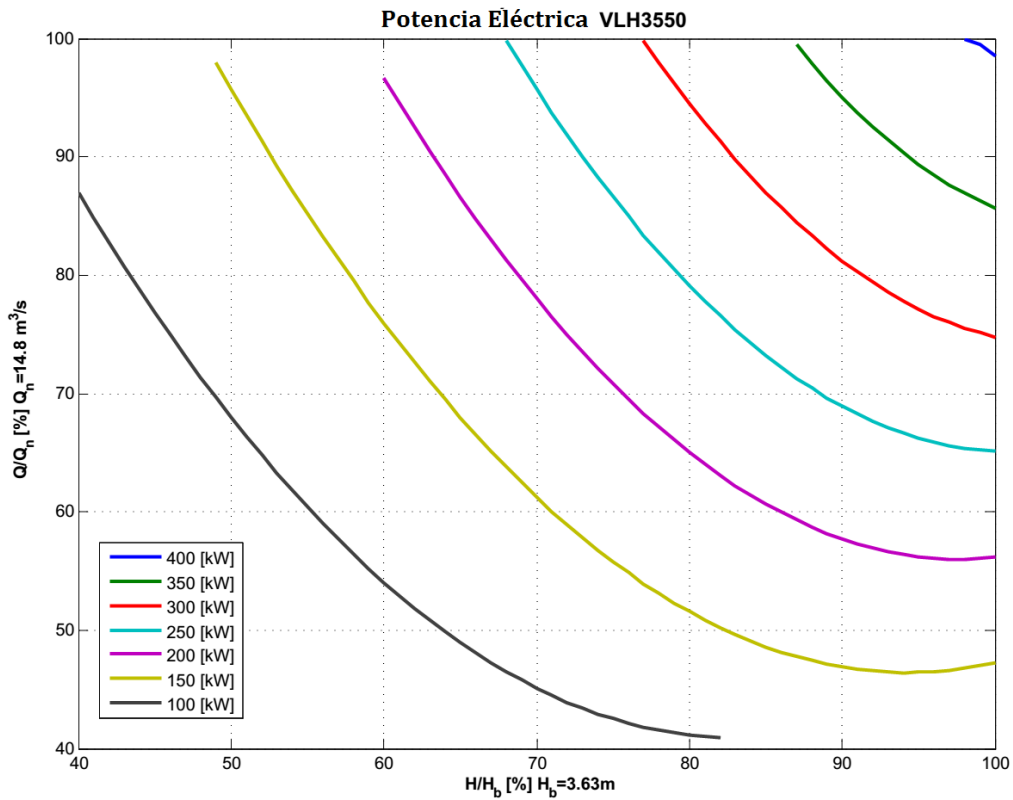


Figura 5.20: Potencia Eléctrica VLH 3550  $\frac{Q}{Q_n}$  vs  $\frac{H}{H_b}$  (elaboración propia)

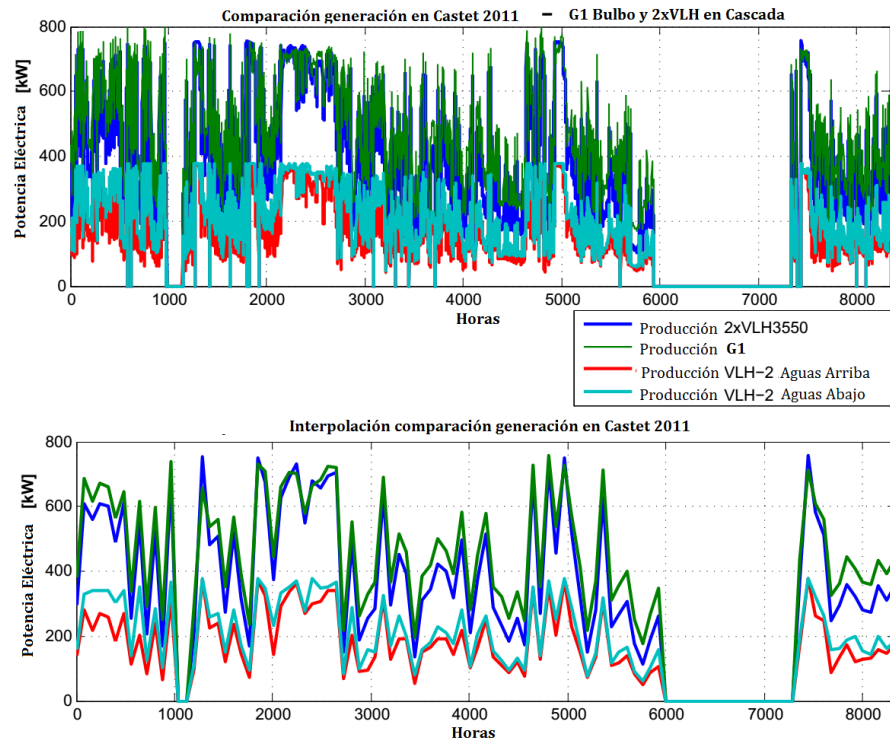


Figura 5.21: Comparación producción energía en Castet 2011 - G1 Bulbo vs 2xVLH en cascada (elaboración propia)

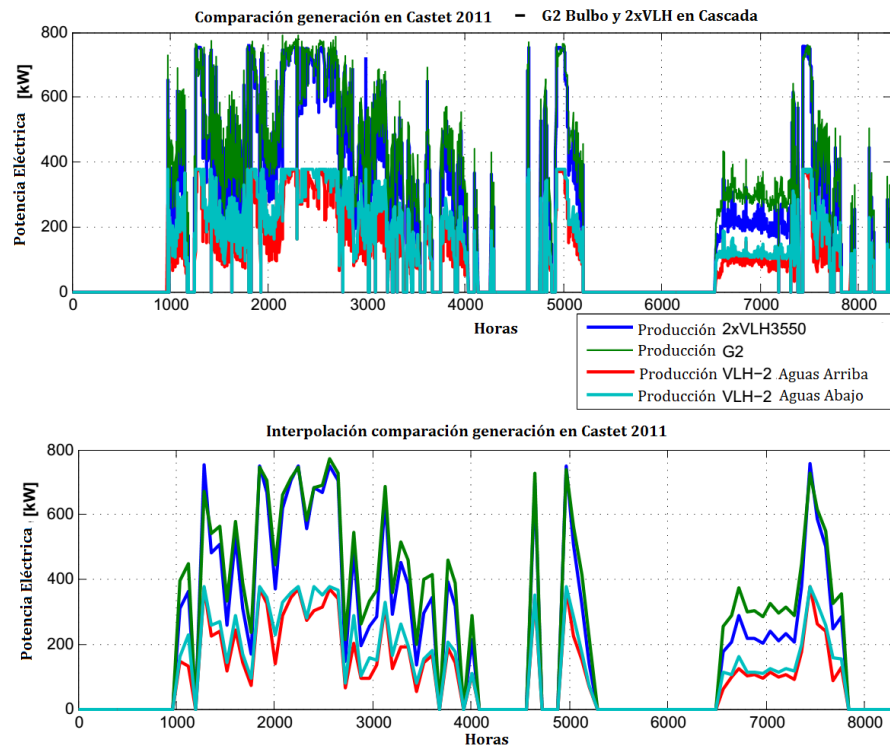


Figura 5.22: Comparación producción energía en Castet 2011 - G2 Bulbo vs 2xVLH en cascada (elaboración propia)

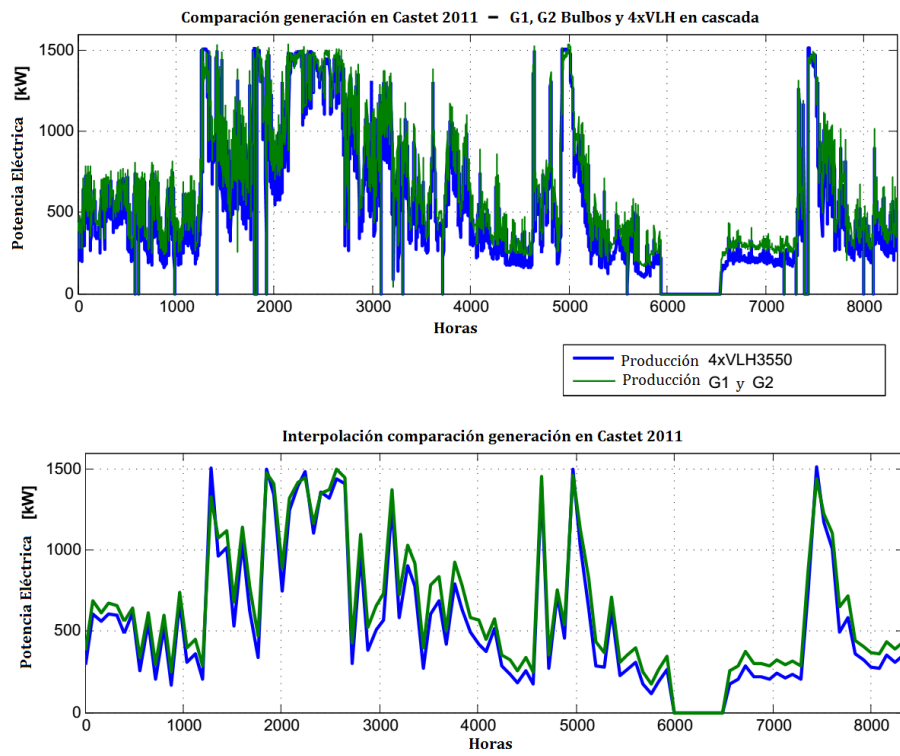


Figura 5.23: Comparación producción energía en Castet 2011 - G1 y G2 Bulbos vs 4xVLH en cascada (elaboración propia)

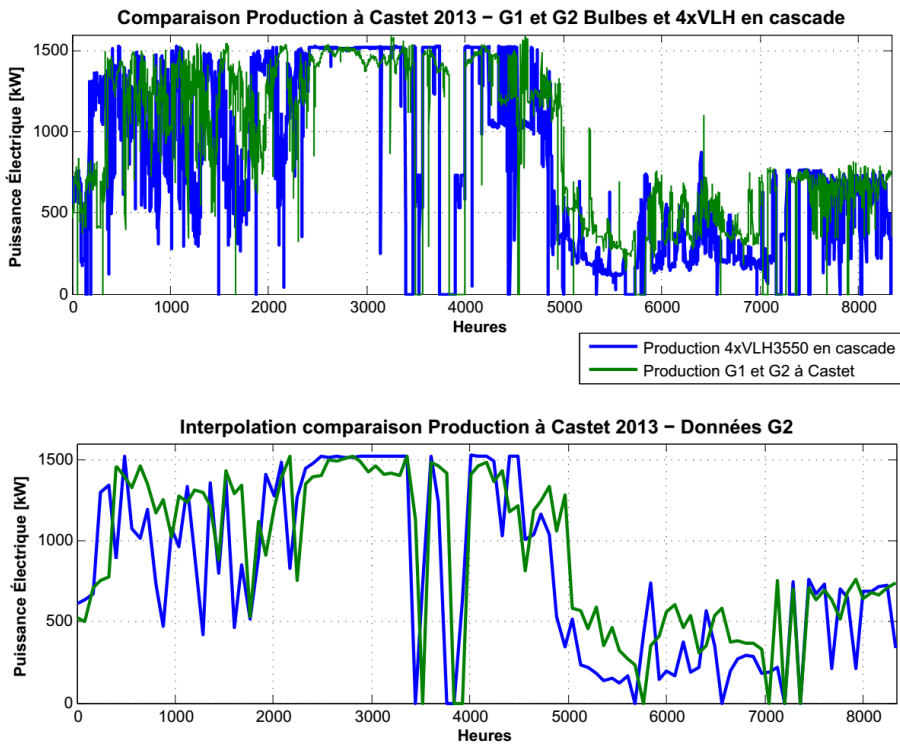


Figura 5.24: Comparación producción energía en Castet 2013 - G1 y G2 Bulbos vs 4xVLH en cascada (elaboración propia)



## Resultados

Tabla 5.10: Comparación de producción de energía actual y la opción No 1 VLH (elaboración propia)

	<b>Año 2011</b>	<b>Año 2013</b>
	31/12/2010 a 15/12/2011	07/01/2013 a 24/12/2013
Producción G1 Bulbo	3129477 [kWh]	4392700 [kWh]
Producción VLH-1 aguas arriba	1242500 [kWh]	1804600 [kWh]
Producción VLH-1 aguas abajo	1471100 [kWh]	2033900 [kWh]
Producción VLH-1 total	2713600 [kWh]	3838500 [kWh]
Producción G2 Bulbo	2047725 [kWh]	3170500 [kWh]
Producción VLH-2 aguas arriba	824580 [kWh]	1351400 [kWh]
Producción VLH-2 aguas abajo	975590 [kWh]	1492600 [kWh]
Producción VLH-2 total	1800170 [kWh]	2844000 [kWh]
<b>TOTAL 2xBulbos</b>	<b>5.177.202 [kWh]</b>	<b>7.563.200 [kWh]</b>
<b>TOTAL 4xVLH 3550</b>	<b>4.513.770 [kWh]</b>	<b>6.682.500 [kWh]</b>
<b>% Diferencia</b>	12.8 %	11.6 %

## Opción No 2-a: 2 grupos estándar y 2 grupos reforzados para la altura restante

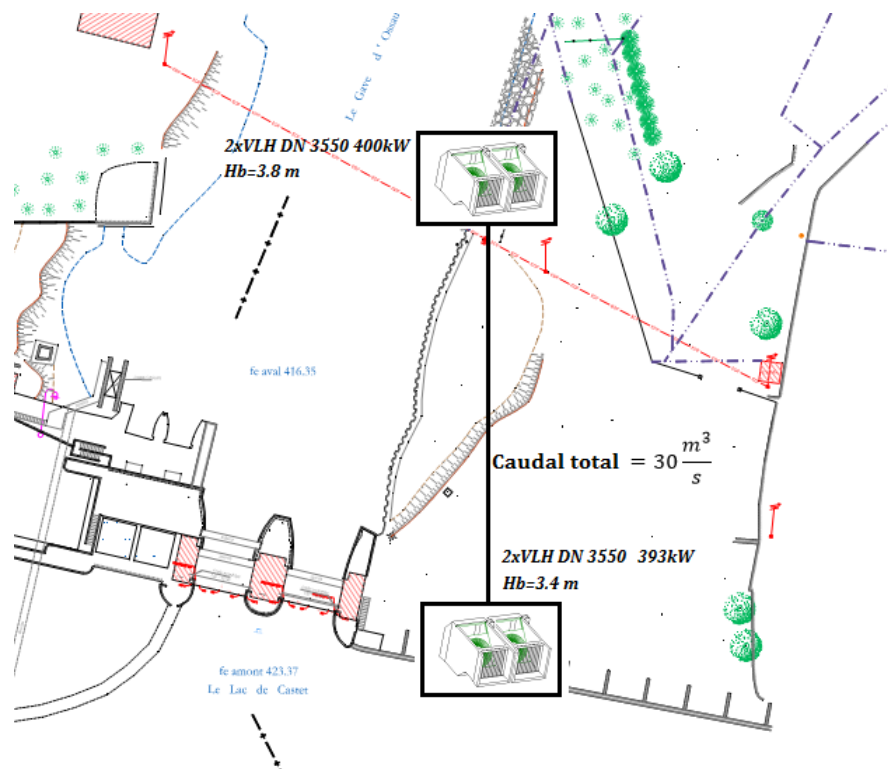


Figura 5.25: Opción No 2-a: 2 grupos estándar y 2 grupos reforzados para la altura restante (elaboración propia)

### Hipótesis:

- Altura bruta total: 7.25 m
- Caudal total:  $30 \frac{m^3}{s}$
- 2 grupos estándar 3550 para 3.4 m (altura bruta) de 393 [kW] y 2 grupos 3550 reforzados para el resto de la altura bruta de 3.85 m (altura bruta) limitado a 400 [kW].
- Inclinación de los grupo: 45 grados

## Análisis Energético

### VLH 3550 Estándar

Tabla 5.11: Funcionamiento en regulación automática del caudal [16]

Parte del caudal	100 %	90 %	80 %	70 %	60 %	50 %	40 %	30 %	20 %
Altura bruta [m]	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40
Altura neta [m]	3.23	3.26	3.29	3.32	3.34	3.36	3.37	3.38	3.39
Caudal por la turbina [ $\frac{m^3}{s}$ ]	15.9	14.3	12.7	11.1	9.5	7.9	6.1	4.8	3.2
Potencia Turbina [kW]	438	403	362	314	261	205	148	93	47
Potencia Eléctrica [kW]	393	362	325	282	235	184	133	84	42

Tabla 5.12: Funcionamiento en regulación automática de la velocidad de rotación [16]

Portion of Altura bruta	100 %	90 %	80 %	70 %	60 %	50 %	40 %
Altura bruta [m]	3.40	3.06	2.72	2.38	2.04	1.70	1.36
Altura neta [m]	3.23	3.91	2.59	2.26	1.94	1.62	1.29
Flujo por la turbina [ $\frac{m^3}{s}$ ]	15.9	15.0	14.2	13.3	12.3	11.2	10.0
Potencia Eléctrica [kW]	393	336	281	230	183	139	99

### VLH 3550 Reforzada

Tabla 5.13: Funcionamiento en regulación automática del caudal [16]

Parte del Caudal	100 %	90 %	80 %	70 %	60 %	50 %	40 %	30 %	20 %
Altura bruta [m]	3.85	3.85	3.85	3.85	3.85	3.85	3.85	3.85	3.85
Altura neta [m]	3.72	3.75	3.77	3.79	3.80	3.82	3.83	3.84	3.84
Flujo por la turbina [ $\frac{m^3}{s}$ ]	13.8	12.4	11.0	9.7	8.3	6.9	5.4	4.1	2.8
Potencia turbina [kW]	445	400	350	297	241	184	130	80	39
Potencia Eléctrica [kW]	400	360	315	266	216	165	116	72	35

Tabla 5.14: Funcionamiento en regulación automática de la velocidad de rotación [16]

parte de la altura bruta	100 %	90 %	80 %	70 %	60 %	50 %	40 %
Altura bruta [m]	3.85	3.47	3.08	2.70	2.31	1.93	1.54
Altura neta [m]	3.72	3.30	2.93	2.57	2.20	1.83	1.47
Flujo por la turbina [ $\frac{m^3}{s}$ ]	13.8	15.7	15.0	14.1	13.0	11.9	10.6
Potencia Eléctrica [kW]	400	400	339	277	220	167	120

\* Estas especificaciones fueron provistas por MJ2 Technologies SARL de manera indicativa sin ningún tipo de compromiso. [16]

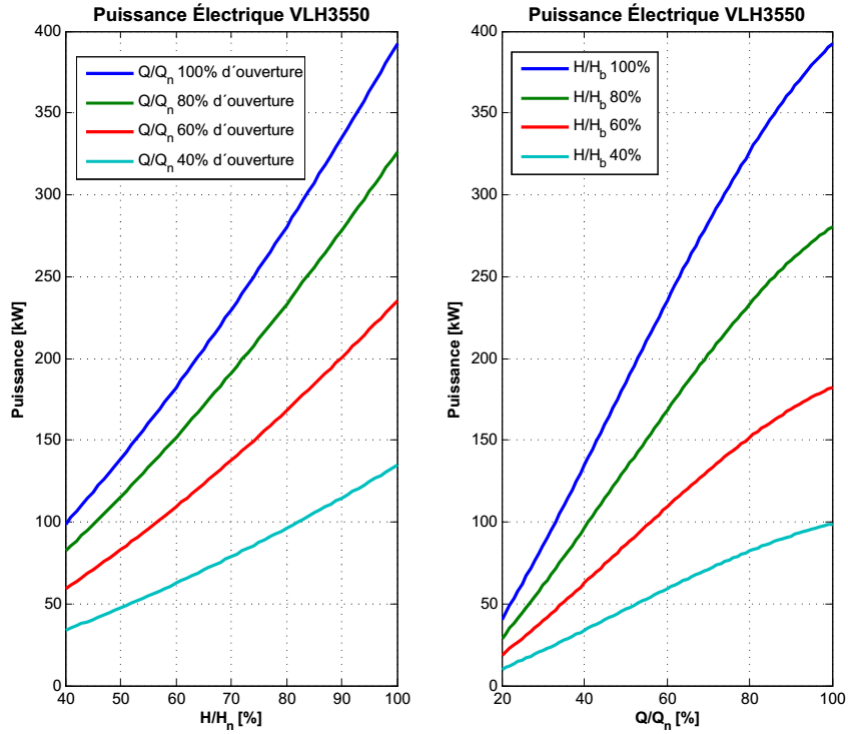


Figura 5.26: Potencia Eléctrica VLH 3550 estándar vs  $\frac{Q}{Q_n}$ ,  $\frac{H}{H_b}$  (elaboración propia)

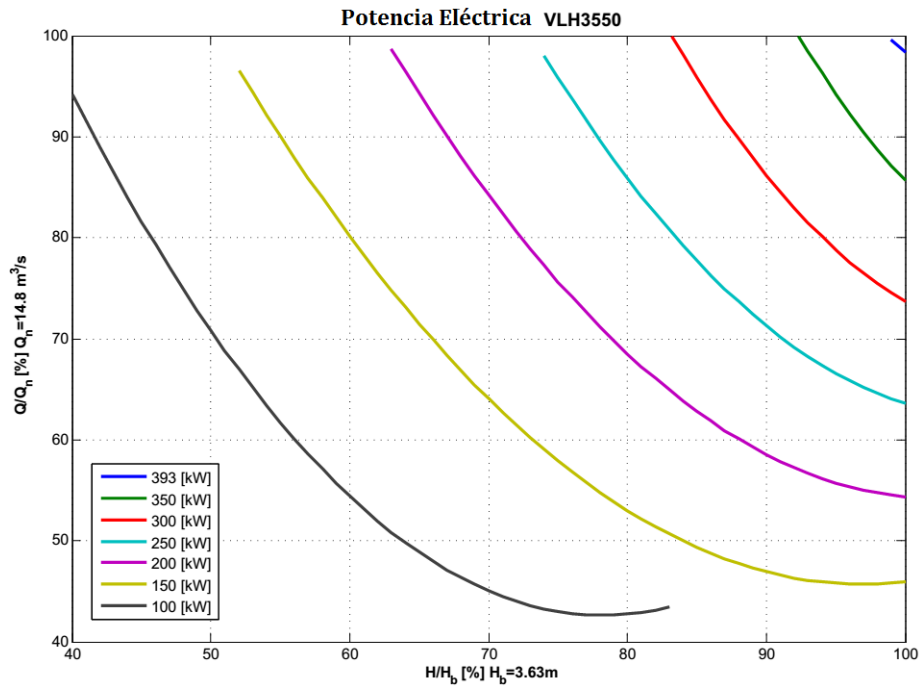


Figura 5.27: Potencia Eléctrica VLH 3550 estándar  $\frac{Q}{Q_n}$  vs  $\frac{H}{H_b}$  (elaboración propia)

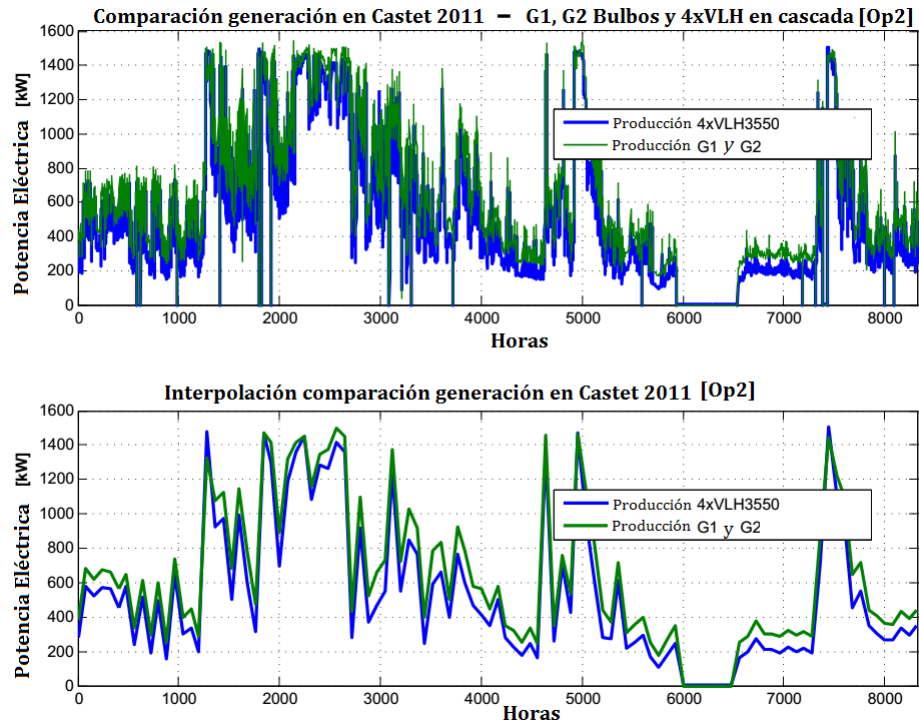


Figura 5.28: Comparación producción energía en Castet 2011 - G1 y G2 Bulbos y 4xVLH en cascada (elaboración propia)

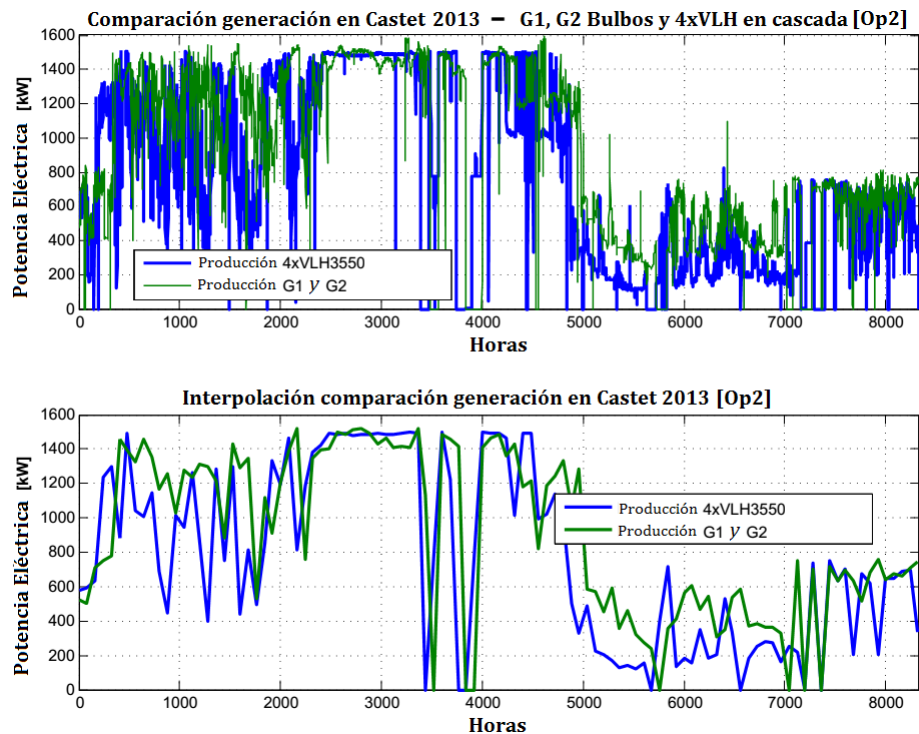


Figura 5.29: Comparación producción energía en Castet 2013 - G1 y G2 Bulbos y 4xVLH en cascada (elaboración propia)

## Resultados

Tabla 5.15: Comparación de producción de energía actual y la opción No 2-a VLH (elaboración propia)

	<b>Año 2011</b>	<b>Año 2013</b>
	31/12/2010 à 15/12/2011	07/01/2013 à 24/12/2013
Producción G1 Bulbo	3129477 [kWh]	4392700 [kWh]
Producción VLH-1 aguas arriba	1173200 [kWh]	1666700 [kWh]
Producción VLH-1 aguas abajo	1421700 [kWh]	2047100 [kWh]
Producción VLH-1 total	2594900 [kWh]	3713800 [kWh]
Producción G2 Bulbo	2047725 [kWh]	3170500 [kWh]
Producción VLH-2 aguas arriba	777830 [kWh]	1252700 [kWh]
Producción VLH-2 aguas abajo	944310 [kWh]	1509500 [kWh]
Producción VLH-2 total	1722140 [kWh]	2762200 [kWh]
<b>TOTAL 2xBulbos</b>	<b>5.177.202[kWh]</b>	<b>7.563.200 [kWh]</b>
<b>TOTAL 4xVLH 3550</b>	<b>4.317.040 [kWh]</b>	<b>6.476.000 [kWh]</b>
<b>% Diferencia</b>	16.6 %	14.37 %

## Opción No 2-b: 2 grupos reforzados y 2 grupos estándar para la altura restante

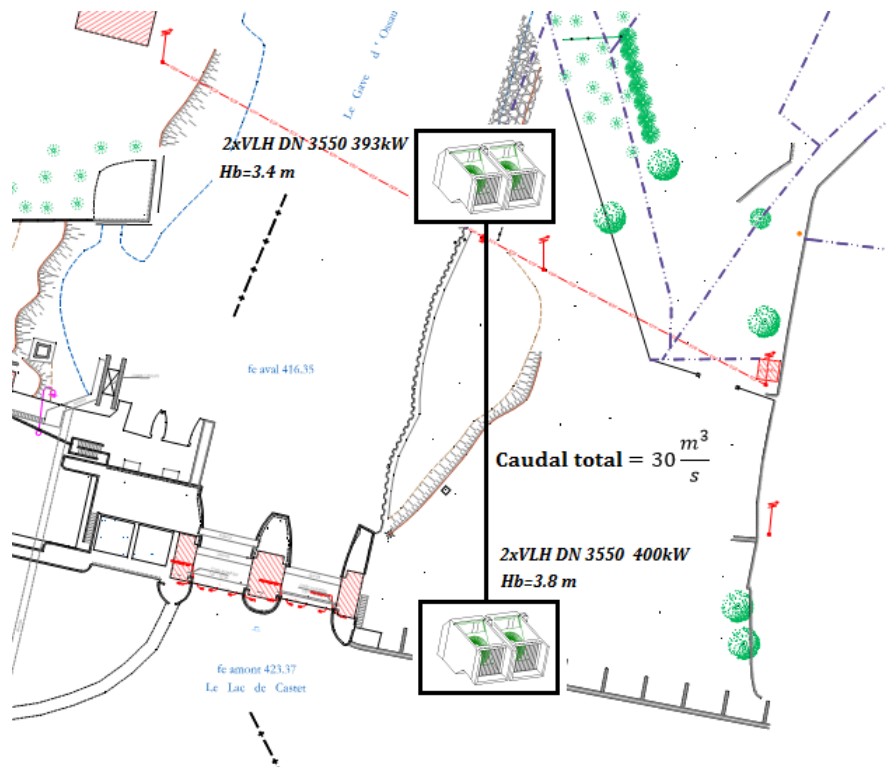


Figura 5.30: Opción No 2-b: 2 grupos reforzados y 2 grupos estándar para la altura restante (elaboración propia)

### Hipótesis:

- Altura bruta total: 7.25 m
- Caudal total:  $30 \frac{m^3}{s}$
- 2 grupo reforzados 3550 para 3.8 m (altura) de 400 [kW] y 2 grupos 3550 para el salto restante de 3.4 m (altura bruta) de 393 [kW].
- Inclinación de los grupos 45 degrees

## Análisis Energético

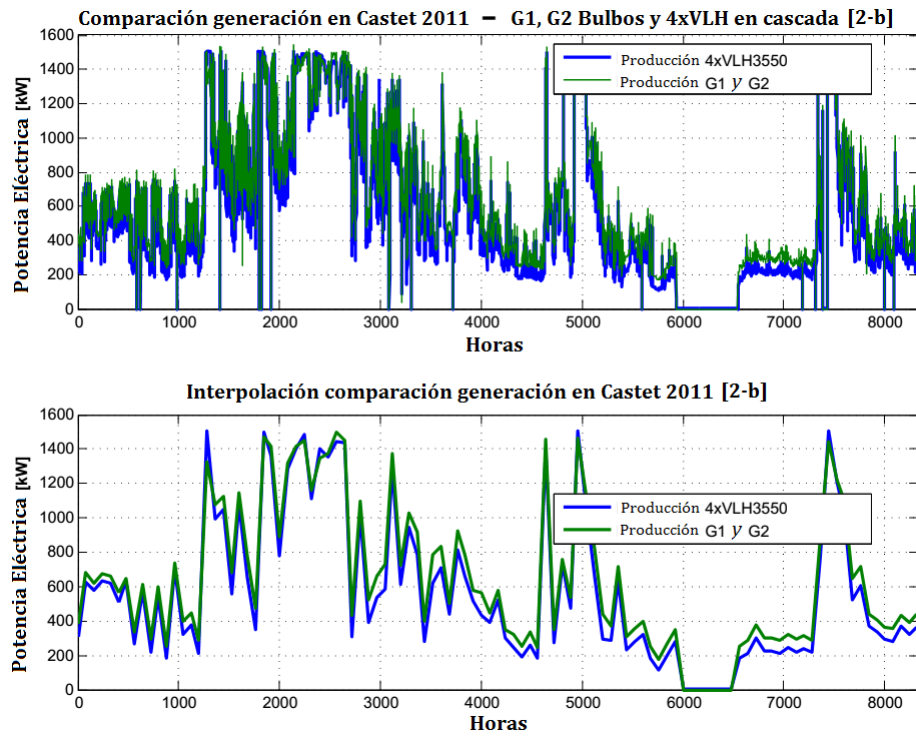


Figura 5.31: Comparación producción de energía en Castet 2011 - G1 y G2 Bulbos y 4xVLH en cascada (elaboración propia)

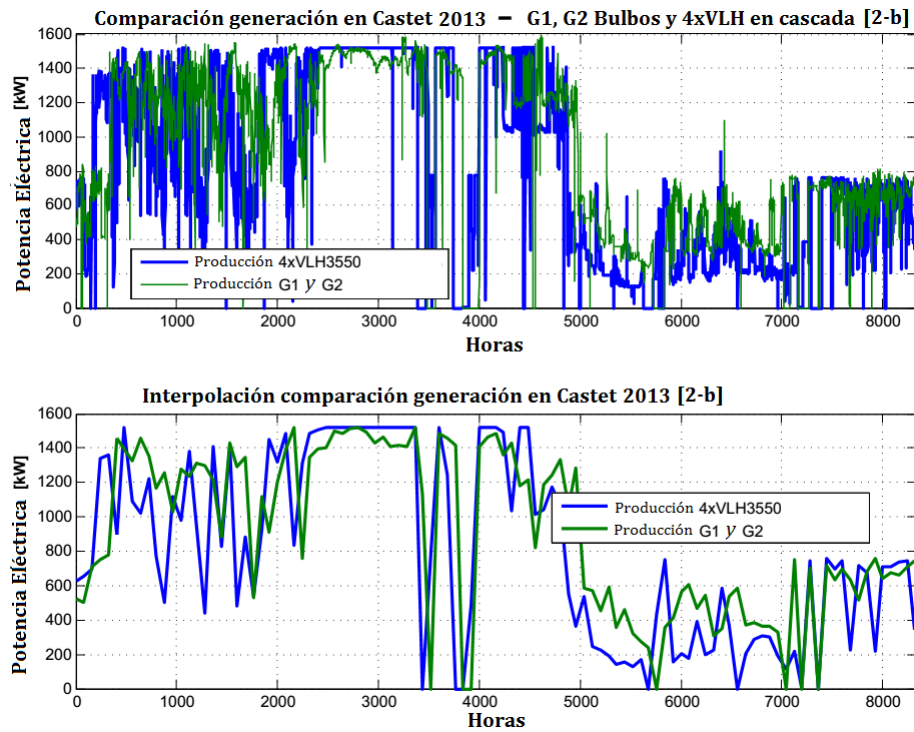


Figura 5.32: Comparación producción de energía en Castet 2013 - G1 y G2 Bulbos y 4xVLH en cascada (elaboración propia)



## Resultados

Tabla 5.16: Comparación de producción de energía actual y la opción No 2-b VLH (elaboración propia)

	<b>Año 2011</b>	<b>Año 2013</b>
	31/12/2010 a 15/12/2011	07/01/2013 a 24/12/2013
Producción G1 Bulbo	3129477 [kWh]	4392700 [kWh]
Producción VLH-1 aguas arriba	1283200 [kWh]	1904700 [kWh]
Producción VLH-1 aguas abajo	1508500 [kWh]	1999700 [kWh]
Producción VLH-1 total	2791700 [kWh]	3904400 [kWh]
Producción G2 Bulbo	2047725 [kWh]	3170500 [kWh]
Producción VLH-2 aguas arriba	852150 [kWh]	1423100 [kWh]
Producción VLH-2 aguas abajo	998810 [kWh]	1458200 [kWh]
Producción VLH-2 total	1850960 [kWh]	2881300 [kWh]
<b>TOTAL 2xBulbos</b>	<b>5.177.202[kWh]</b>	<b>7.563.200 [kWh]</b>
<b>TOTAL 4xVLH 3550</b>	<b>4.642.660 [kWh]</b>	<b>6.785.700 [kWh]</b>
<b>% Diferencia</b>	10.3 %	10.2 %

### Análisis de las opciones

- La estimación de la producción de energía para las 4xVLH 3550 400kW (opción 1) en configuración cascada mostró una producción de 12% menos comparado a la producción real generada en los años 2011 y 2013 en Castet. Así también muestran una disminución en la producción las opciones 2-a con un 15% menos y un 10% menos para la opción 2-b.
- La mayor influencia de esta pérdida es debida a la variación de los niveles de agua de la presa. La variación de 1.5 metros puede llegar a ser el 40% de la altura bruta para los grupos VLH aguas arriba y por lo tanto un gran déficit pudiendo afectar además la eficiencia. Para el caso de los grupos bulbos, la variación de 1.5 metros solo equivale al 20% no afectando en demasía su desempeño.
- La opción 2-b tiene las menores pérdidas de carga debido a un mejor rendimiento de las turbinas aguas arriba debido a un mayor aprovechamiento de la altura bruta.
- Durante los periodos donde la variación de los niveles de agua son más o menos constantes, el rendimiento de los grupos VLH es mejor comparado a las turbinas bulbos.
- Es necesario incorporar una pérdida en la eficiencia para los grupos aguas abajo debido a la turbulencia generada por los grupos aguas arriba y las pérdidas de carga debido al canal de conexión.

## 5.2.6. Esquema de Implementación

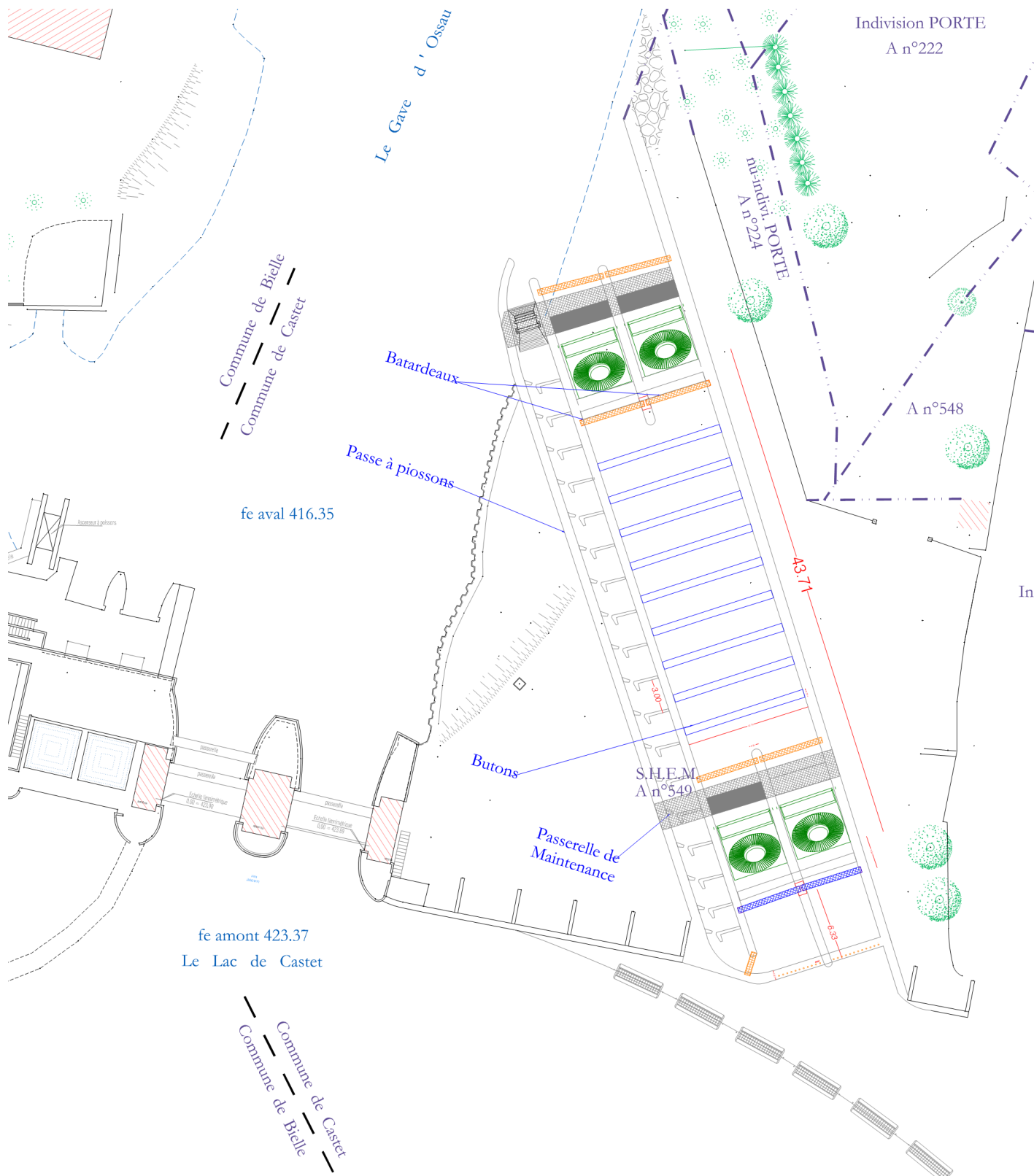


Figura 5.33: Esquema de Implementación escenario No. 2 VLH (Elaboración Propia)

## 5.2.7. Descripción de la Implementación

El esquema de implementación tiene como objetivo visualizar de manera general la instalación de 4 turbinas VLH en configuración cascada con sus componentes principales y por lo tanto poder generar una estimación de su costo.

La idea de esta configuración es asegurar la función de regulación del caudal, usando la característica de álabes variables de las turbinas aguas arriba de acuerdo al nivel de la presa y al caudal entrante, además se deben incorporar compuertas automáticas conectadas a un medidor de nivel aguas abajo, para asegurar un correcto funcionamiento y una total seguridad.

Por ejemplo, si uno o dos de los grupos aguas abajo se detienen ya sea por mantención o por alguna falla, las compuertas automáticas aguas arriba pueden asegurar un correcto funcionamiento de la regulación de caudal.

Por otro lado, si las turbinas aguas abajo están detenidas ya sea por mantención o por alguna falla, usando los cilindros hidráulicos incorporados se pueden elevar dejando pasar de manera normal el flujo sin causar algún problema para las turbinas aguas arriba y al mismo tiempo controlando el nivel aguas abajo a través del medidor y las compuertas automáticas.

En la figura 5.33 se muestra la instalación compuesta de un canal para la toma de agua, de manera de controlar el caudal entrante, la eliminación de basura y la deposición de los sedimentos a través de una barrera flotante siguiendo un perfil probable y rejillas de barras, seguido por 2 compuertas deslizantes automáticas y la entrada para el sistema de escala de peces. Este sistema debe ser incorporado debido a que los peces montan de acuerdo a un caudal de atracción y este caudal de atracción se encontraría notoriamente a la salida de los grupos VLH por lo que la recomendación de las autoridades medioambientales es ubicar estos sistemas lo más cerca posible de los caudales de atracción. Detrás de cada grupo se consideran ataguías para crear un ambiente seco de trabajo en caso de mantención si es necesario.

El canal que conecta ambos grupos requiere una distancia mínima para poder generar un flujo laminar para los grupos aguas abajo, reduciendo las pérdidas por turbulencia. Hasta hoy en día, existe insuficiente información, bibliografía e investigación para determinar esta distancia mínima. Para este presente trabajo fue considerada el juicio de experto de los constructores de la turbina VLH que estimaban un mínimo de 40 metros para asegurar un flujo laminar para los grupos aguas abajo. La estructura es diseñada con paredes de hormigón armado con pilares transversales añadiendo estabilidad a lo largo de toda la estructura. La estructura de hormigón necesaria para instalar las turbinas también colabora en asegurar esta estabilidad, generando una distribución homogénea a lo largo del canal.

Las dimensiones de la estructura fueron diseñadas en base al proyecto La Cavaletalde (visitada en terreno), donde se instalaron 2 turbinas VLH en paralelo con un canal toma de agua bastante largo, entregando valores de órdenes de magnitud de medidas, formas, espesores de las paredes como también de los pilares transversales, radiers, etc.

El pasaje para los peces fue diseñado para una migración multi-especies aguas arriba en base a la orientación del equipo especializado de la SHEM, cada cuenca es de 3mx2m y entre

cada una puede haber un máximo desnivel de 25cm. En el esquema 5.33 es representado a través de un canal recto de 20 cuencas pero en realidad deberían ser necesarios 30 cuencas para completar la altura completa, por lo tanto la forma que debería tener para completar la altura total es sujeto de otro estudio. De todas maneras, la estimación del costo se realiza en base a la cantidad total de cuencas. A pesar de tener normalmente un caudal de  $0.5 \left[\frac{m^3}{s}\right]$  será necesario incorporar un caudal adicional de atracción a la entrada del pasaje de  $1 \left[\frac{m^3}{s}\right]$ , al costado de las turbinas. Para este propósito, el caudal extra puede ser enviado a través de un conducto tomado desde el canal de conexión, posterior a los grupos aguas arriba, ganando la oportunidad de turbinar ese  $1 \left[\frac{m^3}{s}\right]$ . Finalmente, debido a la variación de nivel de la presa, el pasaje de peces también necesita contar con una compuerta deslizante.

### 5.2.8. Estimación de costos

La estimación de costos fue basada en proyectos llevados a cabo por la SHEM (La Cavaletalde, Saint Gery [ver anexos], Montbrun) usando ratios de acuerdo a la magnitud del trabajo realizado además contó con la ayuda del Ingeniero Civil Jean-Marc Gourdon. El costo de los equipos electromecánicos fueron solicitados a través de una oferta presupuestaria de la empresa MJ2 Technologies, únicos constructores del producto VLH.

Tabla 5.17: Estimación de costos para el escenario No. 2: Reemplazo con tecnología VLH (Elaboración propia)

	<b>Trabajos</b>	<b>Actividad Principal</b>	<b>Costo</b>
Obras civiles	Generalidades - Estudios Civiles	-	250.000 €
	Trabajos en la presa	Trabajos de protección/refuerzo	238.000 €
	Trabajos bloque turbinas	Excavaciones y trabajos en HA	942.000 €
	Trabajos canal de conexión	Excavaciones y trabajos en HA	435.000 €
	Trabajos pasaje de peces	30 cuencas + compuerta deslizante	384.000 €
	Trabajos no considerados	15 %	336.000 €
		<b>Subtotal</b>	<b>2.578.000 €</b>
Electromecánicos	<b>Equipos</b>	<b>Costo Opción 1</b>	<b>Costo Opción 2</b>
	MJ2 Technologies 4xVLH	2.504.000 €	2.406.000 €
	Turbo-Generador	Incluido	Incluido
	Rake de limpieza	Incluido	Incluido
	Sistema de levantamiento	Incluido	Incluido
	Central de aceite	Incluido	Incluido
	Compresor presurizador	Incluido	Incluido
	Control comando	Incluido	Incluido
	Transformador	Incluido	Incluido
	Conexión al sistema	Incluido	Incluido
	2 Compuerta deslizantes	160.000 €	160.000 €
	Rejillas	50.000 €	50.000 €
	Trabajos no incluido 10 %	270.000 €	260.000 €
	<b>Subtotal</b>	<b>2.984.000</b>	<b>2.876.000 €</b>
<b>TOTAL</b>	<b>5.562.000 €</b>	<b>5.454.000 €</b>	

### 5.2.9. Síntesis Escenario No. 2

Luego de los intercambios técnicos con MJ2 Technologies, único fabricante de las turbinas VLH, el diseño implementado para Castet con una configuración en cascada (2x2VLH) es teóricamente posible, pero este tipo de instalación jamás ha sido construida antes.

Por lo tanto, existen muchas interrogantes que no están resueltas desde el punto de vista técnico debido a que no hay retorno de experiencia, estudios o investigación para la configuración en cascada. Por ejemplo, la distancia mínima entre los grupos con el fin de reducir la turbulencia o las pérdidas de carga, además de la reconstrucción del flujo laminar aguas abajo. Inclusive, se puede generar olas y afectar el funcionamiento.

Para comenzar a operar, la configuración en cascada añade también ciertas dificultades en relación al canal de conexión dado que hasta hoy en día la turbina VLH debe poseer niveles de aguas suficientes para comenzar a funcionar, tanto aguas arriba como aguas abajo. Una posible solución puede ser añadir un bypass desde la presa que permita realizar un llenado del canal de conexión y que al mismo tiempo pueda establecer un cierto flujo con el fin de garantizar el abastecimiento de las turbinas aguas abajo en el caso de una mantención de las turbinas en seco, utilizando ataguías. De todas maneras, desde un punto de vista técnico, la turbina VLH puede ser forzada por una primera vez a comenzar a funcionar sin un nivel de agua suficiente en el canal de conexión.

Asimismo, en situaciones extremas, sea en caso de una falla de funcionamiento o sea en caso de una crecida, será necesario tener otros medios para evacuar la totalidad del caudal entrante, inclusive considerar la opción de que el mecanismo de levantamiento sea posible realizarse en funcionamiento o pequeñas compuertas insertadas en la misma estructura que permitan el paso del flujo. De todos modos, la solución más segura consiste en incluir 2 bypass, tanto aguas arriba con la presa y aguas abajo entre el canal de conexión y el río. Todos estos problemas son materia de estudios hidráulicos que permitan encontrar la mejor solución técnica-económica.

En lo relativo a la función de regulación de caudales, es muy importante contar con el control de  $30[\frac{m^3}{s}]$  o más (hoy en día fijado por la concesión), especialmente durante primavera donde el caudal puede alcanzar fácilmente los  $60[\frac{m^3}{s}]$  y por lo tanto exigiendo en demasía la utilización de las compuertas deslizantes, actualmente no automatizadas y previstas para esta función. La opción de solo contar con 2 turbinas en cascada fue desechada por este mismo hecho, al solo contar con  $15[\frac{m^3}{s}]$  para la regulación de caudal y de todos modos las obras civiles podrían ser tan costosas como tener 4 en la misma configuración.

A pesar de que existe suficiente espacio para la realización de esta opción en el costado derecho de la central, será necesario de todas formas arrendar el terreno vecino (Casau) dado que el actual acceso a dicho lugar es limitado, además de necesitarse más espacio para las instalaciones generales antes de comenzar los trabajos. Además, será necesario realizar un estudio para resolver la evacuación de la energía, ya sea evacuando la electricidad en 63kV a la red RTE (Réseau de Transport d'Électricité) o realizar la evacuación de la electricidad en 20kV a la red ERDF (Électricité Réseau Distribution France).

Las ventajas de esta solución son:

- Solución Ictiófila reconocida por la administración francesa, evitando la instalación de un mecanismo de migración aguas abajo de un costo aproximado de 700.000 €.
- Realización de obras en el costado derecho de la central permitiendo la instalación y desarrollo de las obras civiles sin la detención de la producción energética de los actuales grupos bulbos así como también de la función regulación de caudales, ganando un aspecto económico importante y también el cumplimiento de una imposición por decreto que condiciona no solo el funcionamiento de Castet sino también de grandes centrales aguas arriba.
- Posibilidad de satisfacer las recomendaciones de seguridad de la CFBR impuestas a la presa (destrucción del muro contra-fuerte y la construcción de un aliviadero en hormigón con un costo aproximado de 2.600.000 €).
- Posibilidad de turbinas el caudal de atracción ( $1 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ ) con los 2 grupos aguas arriba.
- Una solución innovadora y desafiante con respecto a la fauna acuática, pudiendo ser bien considerada por el Estado francés, todo dentro de la perspectiva de un nuevo decreto de concesión.
- Tomando en consideración el carácter obligatorio del refuerzo al muro contra-fuerte y un acceso a una subvención del 40 % para el pasaje de peces, puede convertir la solución VLH más atrayente desde el ámbito financiero. La figura 5.34 muestra la construcción de la central La Cavaletalde con 2 turbinas en paralelo.

**El costo mínimo estimado para esta solución es de 5.454.000 €**



Figura 5.34: Central Cavaletalde (fotos propias)



### 5.3. Reemplazo con tecnología Tornillo Hidrodinámico

La tecnología tornillo hidrodinámico es una turbina que utiliza el principio del tornillo de Arquímedes para convertir la energía potencial del agua en un nivel aguas arriba en energía cinética. Puede ser comparada a un molino de agua, teniendo en cuenta que el tornillo hidrodinámico mantiene niveles de eficiencia más elevados. La turbina esta compuesta de un rotor en forma de tornillo que gira en una carcasa cilíndrica. El agua circula dentro de la turbina y su propio peso apoyado en los álabes de la turbina permite entregar la fuerza que realiza el giro de la turbina. El caudal circula libremente al extremo de la turbina en el río. La extremidad superior del tornillo está conectado a un generador a través de una caja reductora.



Figura 5.35: Centrales con tornillos hidrodinámicos, empresa RONCUZZI, Italia [30]

### 5.3.1. Descripción General

Los tornillos hidrodinámicos transforman la diferencia de energía entre dos niveles de altura de agua fluyendo en energía mecánica, la cual es aplicada al eje del rotor para luego ser transmitida al generador. Así, de manera inversa, añadiendo energía eléctrica al tornillo puede funcionar como una bomba, es decir, llevar un caudal aguas abajo al nivel superior.

Los tornillos hidrodinámicos pueden llegar a alcanzar eficiencias de 92 % [?]. La variación de los niveles de agua y del caudal tienen un efecto marginal en la eficiencia y no afectan el funcionamiento y operación de la máquina. Con los tornillos hidrodinámicos, pequeños potenciales que van desde 1kW (hasta 500 kW) pueden ser económicamente viables explotarlos.

Los tornillos hidrodinámicos pueden ser fácilmente integrados en el medio-ambiente del lugar y la tecnología es amigable con la fauna acuática. Con los tornillos, la instalación de las rejillas finas para protección contra pequeños objetos flotantes y peces necesarias en todas las instalaciones de pequeñas turbinas puede ser omitidas. Solo debe colocarse una rejilla gruesa ya que todos los objetos pequeños y los peces pueden pasar a través del tornillo sin problemas y vivos. Otro aspecto positivo es que el agua se enriquece de oxígeno, lo que mejora la calidad del agua del nivel aguas abajo.

#### **Principales ventajas:**

- Altas eficiencias para niveles de agua fluctuantes y pequeños volúmenes de agua.
- Utilización eficaz a partir de una potencia de 1kW, incluido con un potencial hidroeléctrico bajo.
- Diseño robusto con casi ningún desgaste
- Poca necesidad de Mantenimiento, necesitando muy poca limpieza.
- Funcionamiento solo necesitando una rejilla gruesa (no son necesarias las rejillas finas).
- Sola una pequeña porción de excavaciones son necesarias con respecto a las demás tecnologías convencionales.
- Amigable con la fauna acuática (No está calificada por la administración francesa como Ictiófila).



### 5.3.2. Variedad de Instalaciones

#### Tornillo con carcasa metálica basal

En un tornillo hidrodinámico con una carcasa metálica basal, el cuerpo de la turbina es ubicado en una estructura de hormigón junto con la carcasa y la misma carcasa es recubierta con concreto. El generador y la caja reductora también son ubicadas en una estructura de hormigón. Este diseño ofrece el mejor desempeño de funcionamiento con los mínimos costos de mantención y cuidado

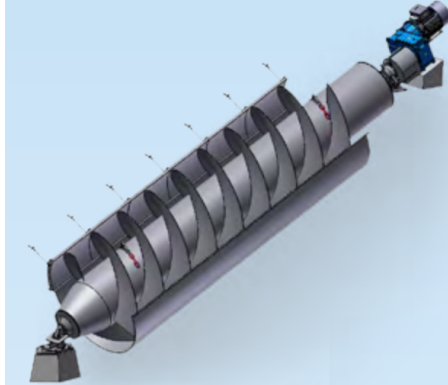


Figura 5.36: Tornillo con carcasa metálica basal [32]

#### Tornillo con estructura autoportante

En una estructura autoportante, no hay necesidad de recubrir con hormigón la estructura. El eje inferior es montado en la misma estructura y las fuerzas son transmitidas a lo largo de la carcasa metálica. El generador y la caja reductora son montadas en una estructura de hormigón.

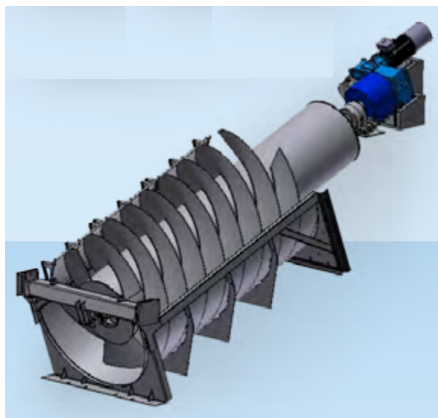


Figura 5.37: Tornillo con estructura autoportante [32]

## Diseño Compacto

En este caso, el tornillo hidrodinámico es ubicado en una estructura autoportante. La unidad completa es una estructura autoportante con el generador integrado. El sistema compacto es ajustado de acuerdo a los parámetros solicitados por el cliente. Un soporte central debe ser construido en forma de álabe de aproximadamente unos 11m.

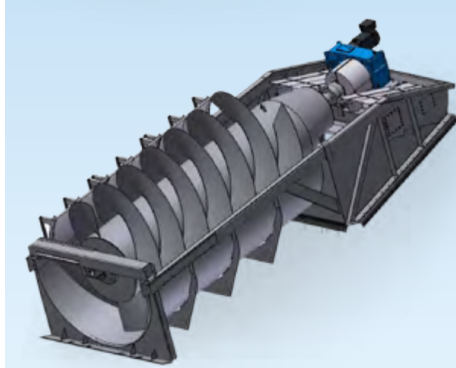


Figura 5.38: Système compact [32]

## Tubo de tornillo compacto

En este caso, el cuerpo de la turbina rota entorno a un tubo que recubre totalmente a la turbina. La unidad completa es una estructura autoportante con el sistema integrado del generador. Particularmente esta tecnología esta pensada para pequeño saltos. Por ejemplo, aguas salientes de un proceso de tratamiento de aguas.

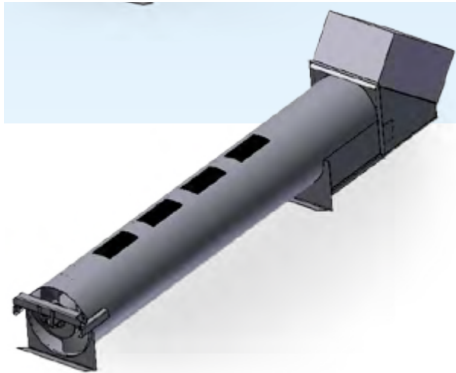


Figura 5.39: Tornillo de tube compact [32]

### 5.3.3. Adaptación a Castet

Opción No. 1: 6 Tornillos en paralelo

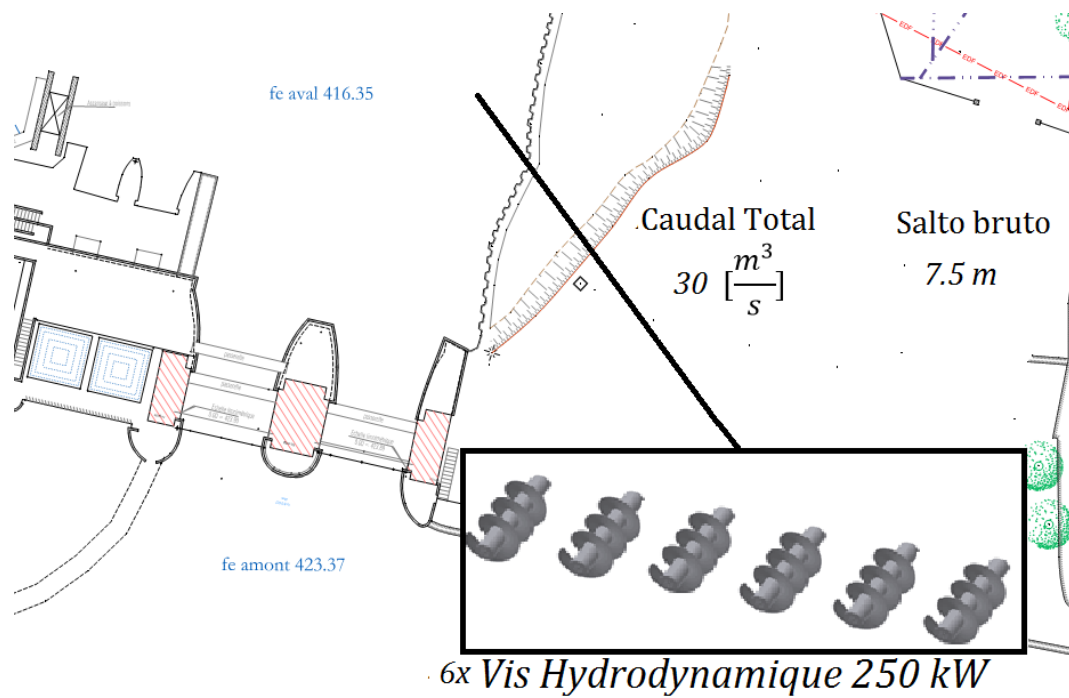


Figura 5.40: Opción No. 1: 6 Tornillos en paralelo (elaboración propia)

#### Hipótesis:

- Altura bruta total:: 7.5 m
- Caudal total equipado::  $30 \frac{m^3}{s}$
- 6 Tornillos hidrodinámicos de 250 kW
- Inclinación: 32 degrees
- Diámetro: 3700 mm

## Análisis Energético

Para el análisis energético se utilizaron los datos y curvas del constructor polaco de tornillos de arquímedes GESS-CZ. En las figuras 5.41, 5.42, 5.43 y 5.44 se presentan las principales curvas utilizadas para realizar los cálculos.

### La curva de potencia del tornillo hidrodinámico - GESS-CZ

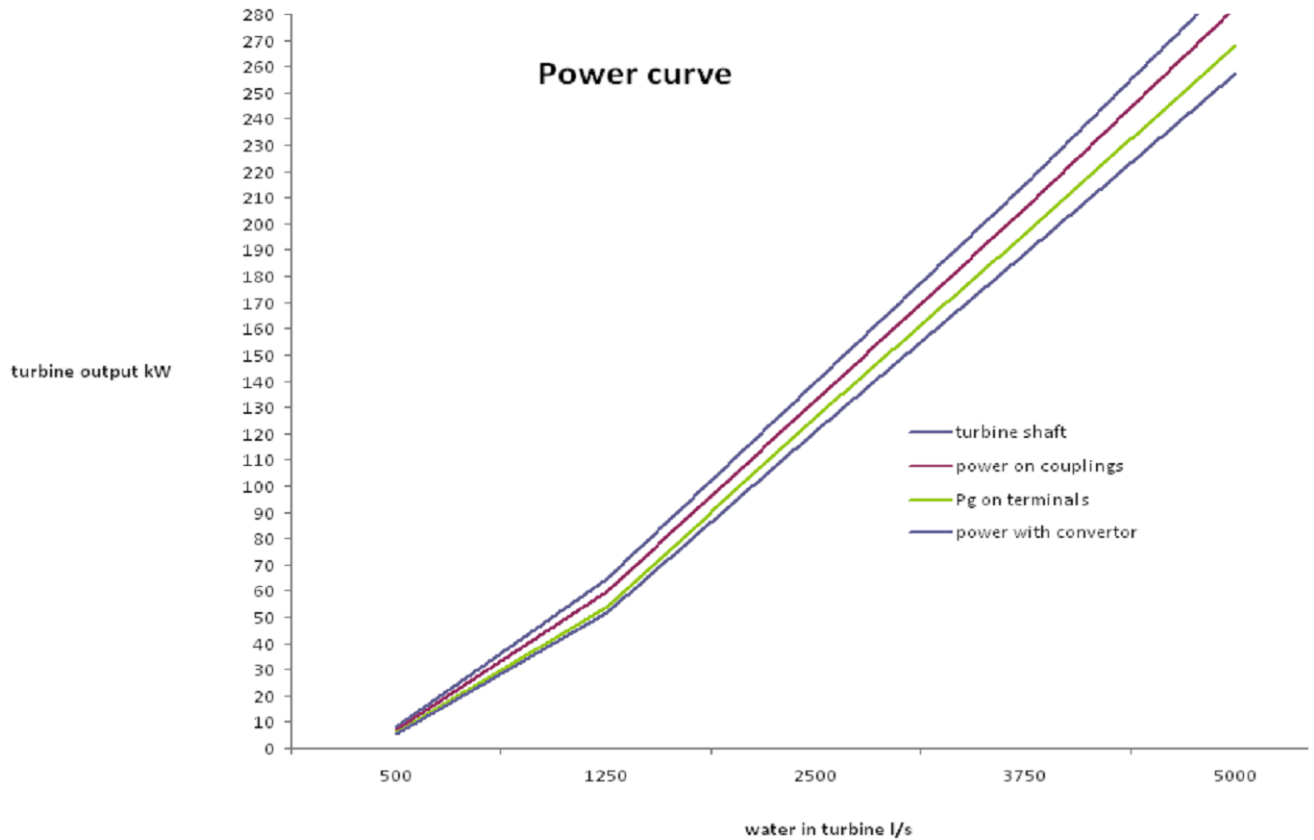


Figura 5.41: La curva de potencia del tornillo hidrodinámico [17]

### Curva de Eficiencia del tornillo hidrodinámico - GESS-CZ

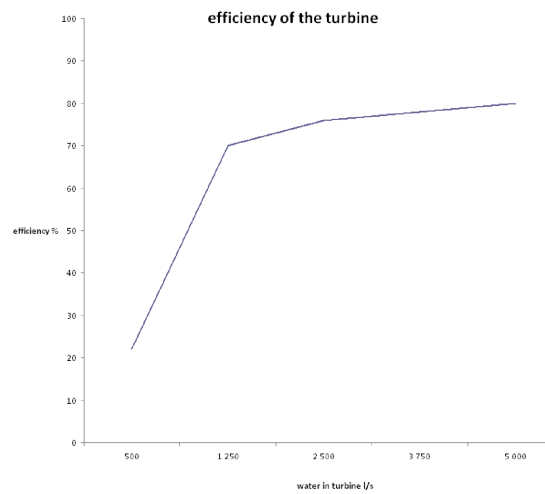


Figura 5.42: Curva de Eficiencia del tornillo hidrodinámico [17]

### Eficiencia de la caja reductora - GESS-CZ

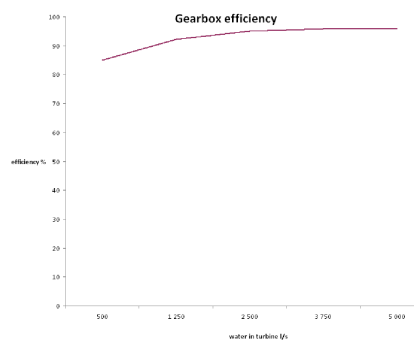


Figura 5.43: Eficiencia de la caja reductora [17]

### Eficiencia del generador del tornillo hidrodinámico - GESS-CZ

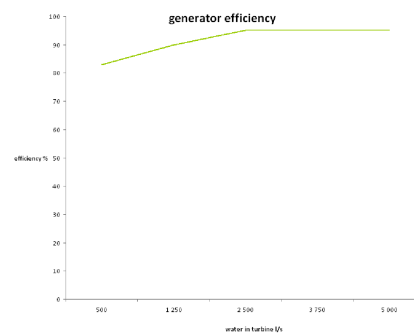


Figura 5.44: Eficiencia del generador del tornillo hidrodinámico [17]

## Estimación de la energía producida en Castet

### Hipótesis:

- Control automático del caudal y de la regulación de la velocidad de rotación en cada instante
- Operación en el punto máximo de la curva de eficiencia para diferentes niveles de agua
- Algoritmo: Comenzar a utilizar siempre el tornillo No.1, ssi se encuentra a plena capacidad usar el siguiente, hasta completar los  $30 \frac{m^3}{s}$
- Datos GESS-CZ
- Datos SHEM: Caudales turbinados por hora(Q), niveles de agua presa y del río (Altura total bruta) por hora.

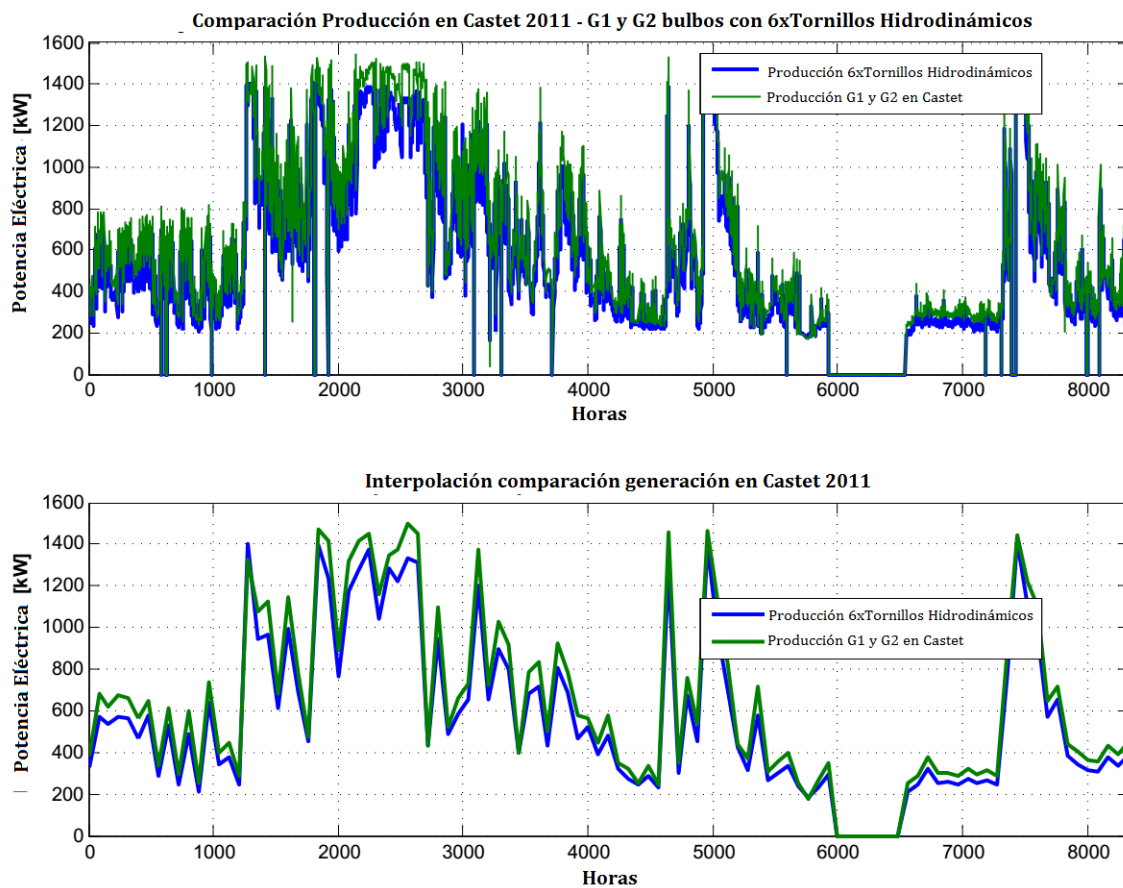


Figura 5.45: Comparación producción de energía en Castet, 2011 (elaboración propia)

### Resultados

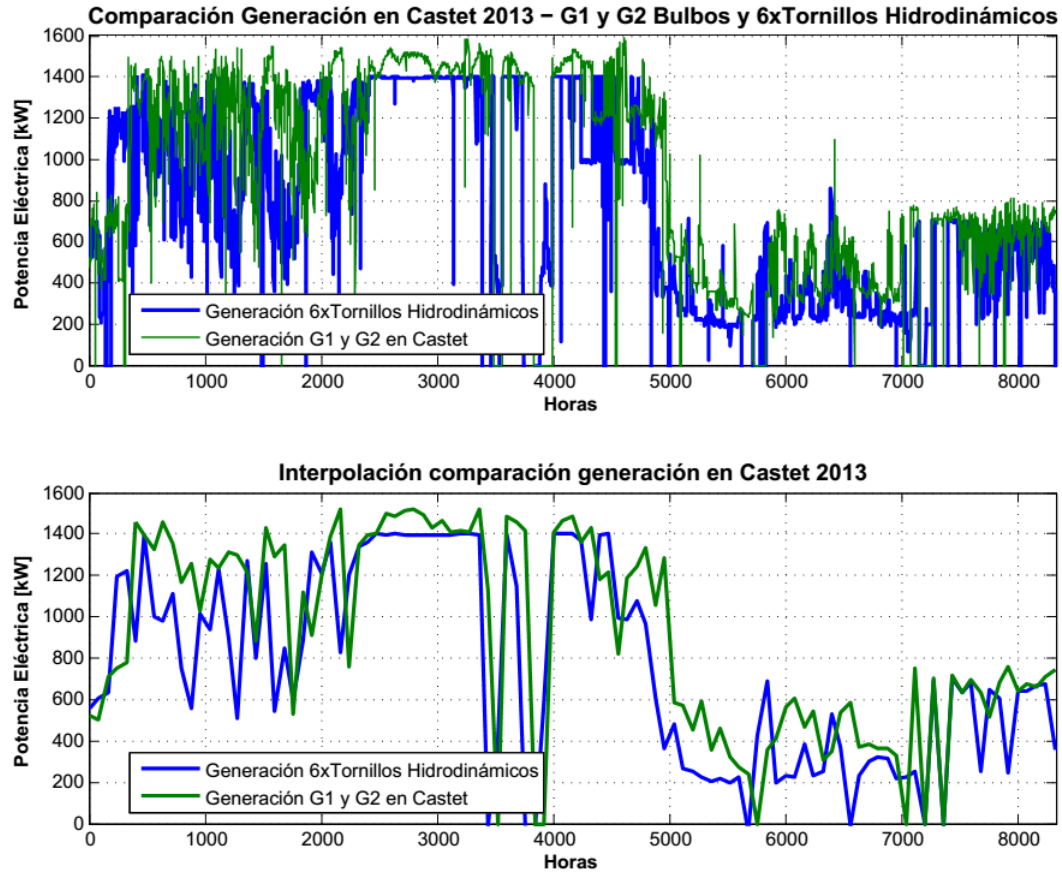


Figura 5.46: Comparación producción de energía en Castet, 2013 (elaboración propia)

Tabla 5.18: Comparación entre la actual producción y la opción No. 1 Tornillo Hidrodinámico (elaboración propia)

	<b>Año 2011</b>	<b>Año 2013</b>
	31/12/2010 al 15/12/2011	07/01/2013 al 24/12/2013
Producción G1 Bulbo	3.129.477 [kWh]	4.392.700 [kWh]
Producción G2 Bulbo	2.047.725 [kWh]	3.170.500 [kWh]
Producción Tornillo Hidrodinámico 1	1.782.200 [kWh]	1.794.400 [kWh]
Producción Tornillo Hidrodinámico 2	1.241.600 [kWh]	1.446.100 [kWh]
Producción Tornillo Hidrodinámico 3	751.060 [kWh]	1.165.200 [kWh]
Producción Tornillo Hidrodinámico 4	456.470 [kWh]	902.400 [kWh]
Producción Tornillo Hidrodinámico 5	268.120 [kWh]	700.280 [kWh]
Producción Tornillo Hidrodinámico 6	87.504 [kWh]	324.320 [kWh]
<b>TOTAL 2xBulbos</b>	<b>5.177.202[kWh]</b>	<b>7.563.200[kWh]</b>
<b>TOTAL 6xTornillo Hidrodinámico</b>	<b>4.586.954 [kWh]</b>	<b>6.332.700 [kWh]</b>
<b>% Diferencia</b>	<b>11.4 %</b>	<b>16.2 %</b>

Opción No. 2: 4 Tornillos Hidrodinámicos en paralelo

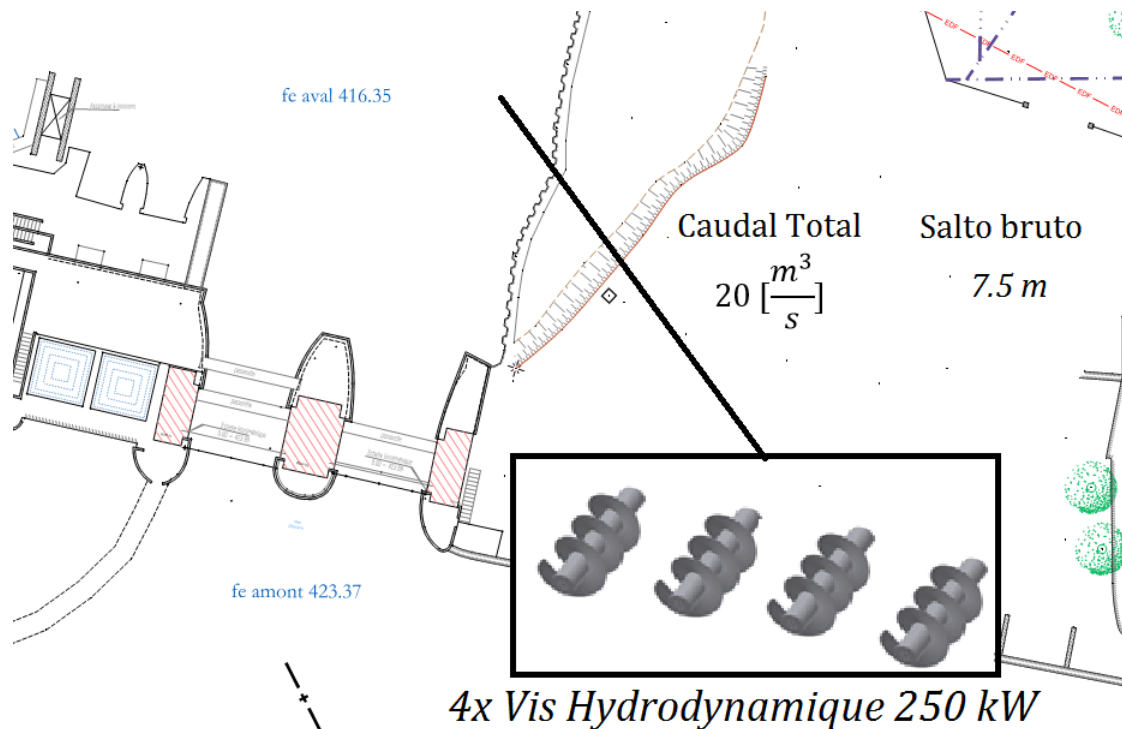


Figura 5.47: Opción No. 2: 4 Tornillos Hidrodinámicos en paralelo (elaboración propia)

**Hipótesis:**

- Altura bruta total:: 7.5 m
- Caudal total equipado::  $20 \frac{m^3}{s}$
- 4 Tornillos hidrodinámicos de 250 kW
- Inclinación: 32 degrees
- Diámetro: 3700 mm

**Resultados**

Tabla 5.19: Comparación entre la actual producción y la opción No. 2 Tornillo Hidrodinámico (elaboración propia)

	<b>Año 2011</b>	<b>Año 2013</b>
	31/12/2010 al 15/12/2011	07/01/2013 al 24/12/2013
<b>TOTAL 2xBulbos</b>	<b>5.177.202[kWh]</b>	<b>7.563.200[kWh]</b>
<b>TOTAL 4x Tornillos Hidrodinámicos</b>	<b>4.231.330 [kWh]</b>	<b>5.308.100 [kWh]</b>
<b>% Diferencia</b>	18.2 %	29.8 %



### 5.3.4. Información Técnica [17]

- Diámetro  $\phi$  D: 3700 mm
- Longitud de la hoja  $L$ : 14.450 mm
- ángulo  $\alpha$ : 32 grados
- Altura  $H$ : 7500 mm
- Flujo:  $5000 \frac{L}{s}$
- Número de álabes: 3
- Material: Acero Estructural St. 37 incl. revestido
- Vida útil mínima esperada: 30 años - mantenimiento regular anual
- Fabricante: GESS-CZ

#### Rodamientos

- Fabricante: ZKL o SKF
- Grasa lubricada cojinetes superior e inferior, rodamientos inferiores de elementos lubricados por un sistema de lubricación automático conectado a un sistema de control, utilizando una bomba de grasa (grasa ecológica aprobada)
- Rodamientos esperados para una vida mínima de diseño:
  - cojinetes superiores: 100 000 hrs
  - rodamientos inferiores: 80 000 hrs

#### Acoplamiento

- Manufacturer: Siemens - Flender
- Esperado para una vida mínima de diseño: 100 000 hrs

#### Caja reductora

- Fabricante: Siemens - Flender
- 3-etapas
- Esperado para una vida mínima de diseño: 100 000 hrs
- Incluye fundaciones
- Incluye indicación visual del nivel de aceite

#### Generador

- Motor asíncrono de potencia de 250 kW, 4 polos
- Fabricante: Siemens
- 400V, 3 fases, 3 hilos, 50Hz neutro puesto a tierra.
- Generador tiene su máximo en continuo (MC), un relación igual al 15 % de la máxima potencia de la turbina por sobre sus valores operativos
- Esperado para una vida mínima de diseño : 100000 hrs

#### Frenos

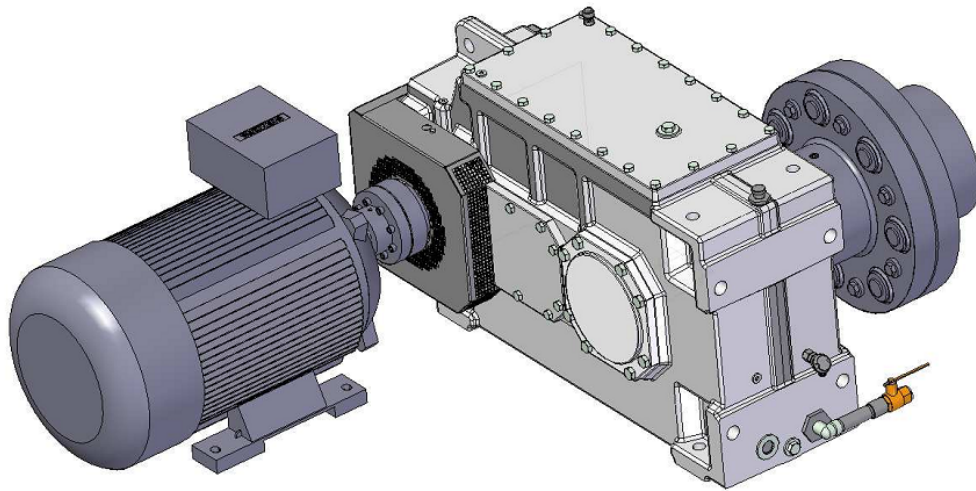


Figura 5.48: Motor-generador asíncrono y la caja reductora del sistema

- El freno es capaz de detener la máquina a máxima potencia y velocidad máxima en menos de 10 segundos.
- El sistema es capaz de aplicaciones repetidas sin daño a las piezas de desgaste
- El sistema es controlado de manera electrónica e indicarán la necesidad de mantenimiento.
- El freno se encuentra en la caja de cambios del eje secundario

### **Compuerta deslizante**

- Doble control (i.e. se puede controlar en ambas direcciones - apertura y cierre)
- Regula el caudal a través de la turbina y mantiene el nivel de agua superior según valores preestablecidos

### **Sistema de Control**

El sistema de control proporciona:

- Apagado automático o puesta en marcha (en caso de parada de emergencia)
- Generador automático principal para la conexión a la red (fase de puesta en marcha de la conexión)
- Regulación de salida de potencia de turbina automático (por parámetros preestablecidos)
- Control de energía general
- regulación del nivel de agua superior (control de compuerta automática)

La parte eléctrica incluye:

- Fusibles e interruptores conexión general con llave de encendido / apagado
- Salida del generador protegida
- Terminales para un ordenador de control y sensores

- Un computador industrial (PLC) Unitronics incluyendo 6 pantalla táctil a color
- fuente de alimentación de reserva (mantiene el sistema de control se ejecuta durante 1 h en caso de corte de energía)
- módem GSM para el envío y recepción de mensajes SMS
- Enrutador para la capacidad de conexión a Internet

SMS en formato definido enviados al sistema de control permiten:

- Control remoto planta (Elegir estado de la central on/off )
- petición por mensaje SMS informativo que contiene el estado de funcionamiento real
- En caso de ocurrir un error, el envío de SMS informativos hasta para cuatro números de teléfono móvil

Conexión a Internet y la aplicación de acceso remoto permiten:

- Completo control remoto central eléctrica y monitoreo (con PC a distancia)
- Descarga artículo (formato MS Excel) de las estadísticas operacionales detalladas y mensajes de error (diaria, registros mensuales y anuales de electricidad producida, tiempos de ejecución, las temperaturas rodamientos, etc.)
- diagnóstico completo de la aplicación del sistema de control y sus actualizaciones y mantenimiento

### 5.3.5. Esquema de Implementación

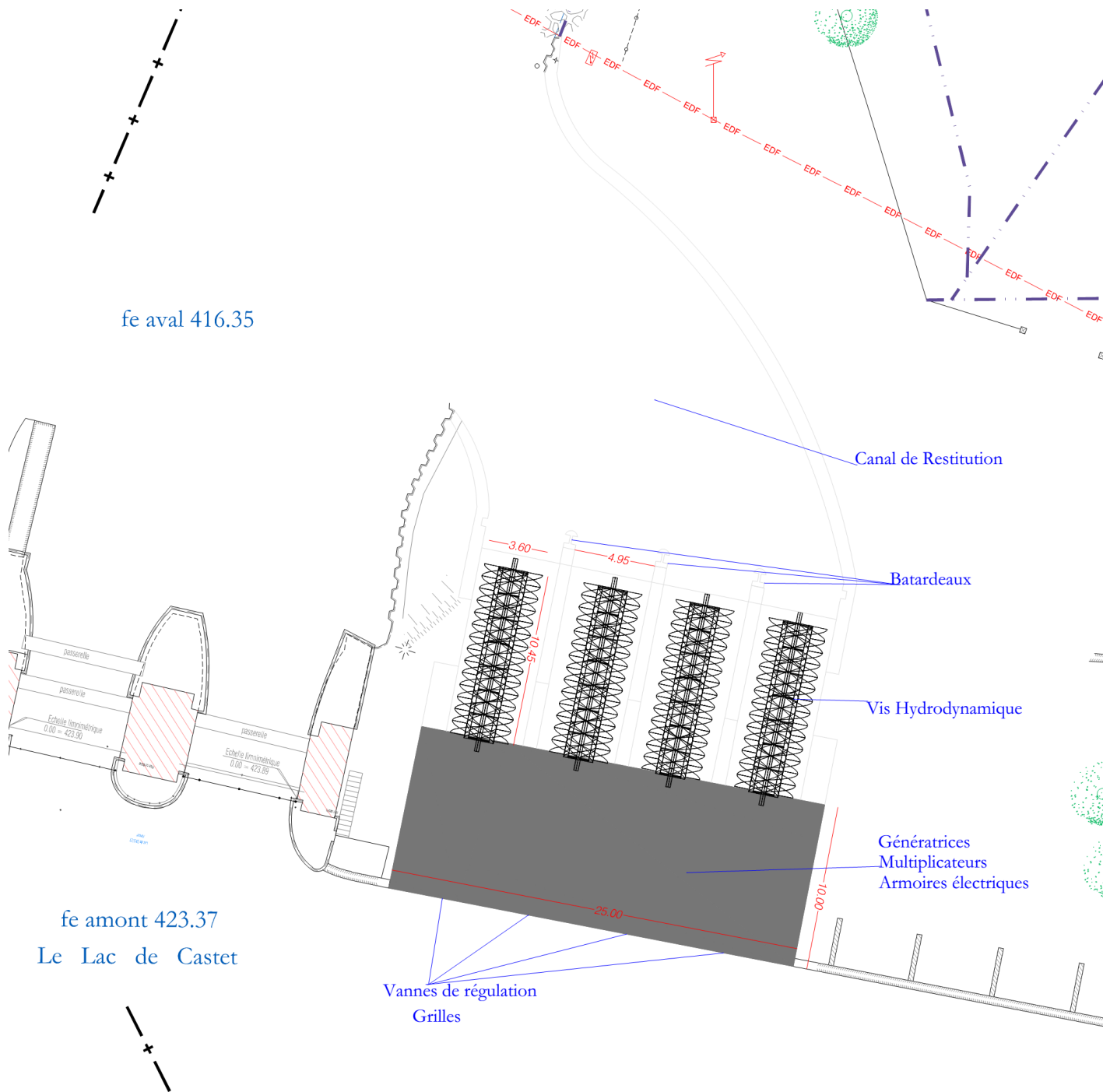


Figura 5.49: Esquema de Implementación escenario No. 3 (Elaboración Propia)

## Descripción de la Implementación

Luego de la visita a la central Canal Albert ubicada en Bélgica y construida por la empresa Cofely, que tuvo por fin observar las instalaciones de tres tornillos hidrodinámicos en paralelo con una altura bruta de 10 metros y un caudal de  $5 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  por cada una. La visita otorgó una idea general de una posible implementación en Castet, además intercambiar información sobre costos y desafíos involucrados. De acuerdo a lo observado se concluyó la imposibilidad de proponer 6 tornillos en paralelo en Castet debido a la magnitud que eso conllevaría, por lo tanto será pertinente escoger la segunda opción de 4 tornillos hidrodinámicos en paralelo para el análisis técnico-económico. Además, es importante destacar que existe un compromiso entre el largo del tornillo y su diámetro, lo que haría bastante difícil la posibilidad de incrementar el caudal máximo a través de los tornillos, sin embargo podría estudiarse una manera de reforzar e incrementar la capacidad del caudal máximo a  $6 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ , tomando en cuenta la importancia de poder controlar mayor caudal para la regulación en Castet.

El esquema de implementación tiene como objetivo visualizar de manera general la instalación de 4 tornillos hidrodinámicos en paralelo y por lo tanto poder realizar una estimación de los costos.

Es posible observar en la figura 5.49 un gran bloque que representa el lugar donde se encuentran todos los componentes eléctricos por ende el único componente sumergido es el tornillo, una importante ventaja tomando en cuenta los problemas de filtraciones y sellados. Debajo del edificio de máquinas se encuentran rejillas para evitar el paso de componentes grandes y compuertas deslizantes para cada tornillo hidrodinámico aguas arriba. En el extremo inferior es necesario que cada tornillo tenga una ataguía para momentos de mantención y se finaliza con el canal de restitución.

El problema más importante para el escenario de los tornillos hidrodinámicos es la variación de los niveles de agua que se encontrarían en Castet (pudiendo llegar a 2 metros). La primera idea para resolver este problema es instalar cada tornillo a una diferente altura cubriendo toda la gamma posible pero al mismo tiempo añadiendo mayores restricciones a la operación y generación de energía. La solución más apropiada es insertar una compuerta especial en la misma estructura metálica de los tornillos como se puede observar en la figura 5.50 a través de la cual es posible adaptar cada tornillo a una variación del nivel aguas arriba.

De manera adicional, para asegurar un correcto funcionamiento de la función regulación de caudales, es muy importante poder regular dichos caudales a través de la máquina es si misma. De hecho, usando las compuertas deslizantes y la electrónica de potencia teóricamente se lograría poder controlar el caudal entre los rangos  $0 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  a  $5 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  a voluntad pero, debajo de los  $3 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  existen importantes problemas a nivel de la estabilidad eléctrica, principalmente relacionados con el control de frecuencia. La central visitada en Bélgica regula el caudal entre los rangos 3 y  $5 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  por tornillo, por lo tanto con todos los tornillos hidrodinámicos funcionando en Castet se lograría un control de  $8 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  maniobrando compuertas y uso de la electrónica de potencia. En el peor caso, la regulación se puede realizar simplemente encendiendo o apagando las máquinas.

En términos generales, las obras civiles no son complicadas. La construcción se realizaría en el costado derecho de la central comenzando con trabajos de aislamiento tanto aguas abajo

como aguas arriba, excavaciones, trabajos en hormigón armado en el edificio de máquinas y finalmente en el canal de restitución que puede realizarse incluidoo ahorrando hormigón utilizando tablestacas como muros.



Figura 5.50: compuerta especial en la misma estructura metálica de los tornillos (foto propia)

### 5.3.6. Estimación de costos

La estimación de costos fue basada en proyectos llevados a cabo por la SHEM usando ratios de acuerdo a la magnitud del trabajo realizado además contó con la ayuda del Ingeniero Civil Jean-Marc Gourdon. El costo de los equipos electromecánicos fueron solicitados a través de una oferta presupuestaria de la empresa GESS-CZ.

Tabla 5.20: Estimación de costos para el escenario No. 3: Reemplazo con tecnología tornillo hidrodinámico (Elaboración propia)

	<b>Trabajos</b>	<b>Actividad principal</b>	<b>Costo</b>
Obras civiles	Instalaciones generales	Estudios Ing. Civil	250.000 €
	Dispositivos impermeabilizantes	Protección/Refuerzo	202.000 €
	IC Bloque turbinas	Excavaciones/Trabajos Edificio	800.000 €
	IC Canal de restitución	Excavaciones/Trabajos Edificio	236.000 €
	Trabajos no considerados	15 %	223.200 €
		<b>Total Parcial</b>	
	<b>Material</b>	<b>Detalle</b>	<b>Costo</b>
Electromecánicos	Conjunto Tornillo Hidrodinámico	4 unidades	2.400.000 €
	Generador	4 unidades	incluido
	Estructura	4 unidades incluido	incluido
	Multiplicador	4 unidades incluido	incluido
	Compuertas deslizantes	4 unidades	incluido
	Control comando	incluido	incluido
	Convertidor de Frecuencia	2 unidades	61.974 €
	Transformador	0.5kV/63kV	80.000 €
	Puesto HTA	disyuntores / seccionadores	47.000
	Servicio Auxiliar alternativo	-	100.000 €
	Trabajos no considerados	15 %	225.373 €
	-	<b>Total Parcial</b>	
<b>TOTAL</b>			<b>4.803.520 €</b>

### 5.3.7. Síntesis escenario 3

Luego de los intercambios técnicos, principalmente con la empresa GESS-CZ y posterior a la visita realizada a la central Canal Albert construida por Cofely en Bélgica, el espacio disponible en Castet es muy limitado para la instalación de 6 tornillos hidrodinámicos en paralelo. Por otra parte, tomando en consideración la altura bruta total, un proyecto de tal envergadura podría convertirse en el más importante a nivel mundial en relación a los tornillos hidrodinámicos.

Es por esto, que el presente trabajo consideró pertinente la instalación de 4 tornillos hidrodinámicos en paralelo. Por esta razón, el mayor inconveniente es el caudal total a través del conjunto de tornillos, reduciendo el caudal total que puede ser controlado por las actuales turbinas y consecuentemente empeorando la función de regulación de caudal.

Por consiguiente, la única posibilidad de hacer factible a este escenario a nivel de prefactibilidad es incrementar el caudal que atraviesa cada tornillo a los 6  $[\frac{m^3}{s}]$ . Todos los diseños estudiados limitan hasta 5  $[\frac{m^3}{s}]$  el caudal para tornillos adaptados a los 7.5 metros de altura bruta. Esto puede ser solucionado solicitando un diseño reforzado especial, adicionalmente incorporando la compuerta especial inserta en la misma estructura metálica logrando adaptar la variación del nivel aguas arriba.

El análisis energético mostró que existe una diferencia promedio del 24% menos con respecto a la cantidad de energía producida actualmente, con un valor promedio de 4.642 MWh. Por otro lado, en términos normalizados, los tornillos hidrodinámicos producen mayor energía por unidad que las actuales turbinas bulbos, ya que pueden funcionar con un caudal muy pequeño.

Con respecto a la migración aguas abajo de los peces, ciertamente la tecnología es una solución. Así lo demuestran estudios en Inglaterra, Holanda y en Bélgica confirmando el carácter ictiófilo de la turbina, sin embargo esta tecnología no está considerada así por la administración francesa (ONEMA). Por lo tanto, por el momento esta opción no podría solucionar el problema de la migración desde el punto de vista legal. Es importante destacar que existen estudios para migración aguas arriba a través de los tornillos cuando está funcionando como bomba. Tal flexibilidad podría ser bastante interesante en el futuro para aquellos sitios donde existe también una obligación ambiental para ambos sentidos de migración y se deba atravesar por las turbinas. Claramente una vez que la autoridad francesa catalogue la tecnología como ictiófila.

Es evidente que todas las obras civiles necesarias son simples y reducidas en comparación a una instalación con una tecnología convencional y además posee una mantención reducida, principalmente el relleno de aceite para la lubricación de rodamientos en el extremo inferior, conjunto generador-caja multiplicadora y la limpieza del canal de entrada.

Las ventajas de esta solución:

- Solución Ictiófila reconocida por la administración francesa, evitando la instalación de un mecanismo de migración aguas abajo de un costo aproximado de 700.000 €.



- Realización de obras en el costado derecho de la central permitiendo la instalación y desarrollo de las obras civiles sin la detención de la producción energética de los actuales grupos bulbos así como también de la función regulación de caudales, ganando un aspecto económico importante y también el cumplimiento de una imposición por decreto que condiciona no solo el funcionamiento de Castet sino también de grandes centrales aguas arriba.
- Posibilidad de satisfacer las recomendaciones de seguridad de la CFBR impuestas a la presa (destrucción del muro contra-fuerte y la construcción de un aliviadero en hormigón con un costo aproximado de 2.600.000 €).
- Una solución innovadora y desafiante con respecto a la fauna acuática, pudiendo ser bien considerada por el Estado francés, todo dentro de la perspectiva de un nuevo decreto de concesión.
- Tomando en consideración el carácter obligatorio del refuerzo al muro contra-fuerte y un acceso a una subvención del 40 % para el pasaje de peces, puede convertir la solución Tornillo Hidrodinámico más atrayente desde el ámbito financiero.

**El costo mínimo estimado para esta solución es de 4.803.520 €**



Figura 5.51: Central Canal Albert, Bélgica (imagenes propias)

# Capítulo 6

## Análisis económico

Este capítulo tiene como objetivo analizar la inversión necesaria y realizar un análisis económico con distintos horizontes de tiempo, tomando en cuenta la producción energética estimada, el tiempo sin producir energía en periodo de trabajos, subsidios, tiempo total operando, acceso especial a tarifas, etc. Así poder tener una mirada general en términos económicos para cada escenario y completar el análisis técnico-económico.

Todos los cálculos fueron realizados por el software de la CNR (Compagnie Nationale du Rhône) “Évaluation financière des projets d’investissement” para proyecto hidroeléctricos. Básicamente, el análisis consistió en considerar dos horizontes de tiempo para cada escenario: 20 y 40 años (dos escenarios posibles de renovación de concesión). Se presentan los extractos síntesis que entrega el software (en francés), en Anexos se puede observar más detalles.

Dentro de las hipótesis comunes para los tres escenarios fue considerar:

- Año 2017 como inicio de producción de electricidad.
- Tasa de reajuste anual de tarifas: 1,35 %
- Primeros 20 años acceso a tarifa H07
- Gastos de operación: 12.000 euros
- Gastos en estructuras y personal: 15.000 euros
- Promedio Ponderado del Costo de Capital: 8 %
- Impuestos de Castet: 50.726 euros
- Inversión a través de fondos propios sin préstamo.

## 6.1. Escenario 1

### 6.1.1. Evaluación a 20 años

#### Hipótesis Claves

- Duración de la evaluación: 20 años
- Año de comienzo de la explotación: 2017

#### Producción

- Potencia total instalada: 1,53 [MW]
- Producción anual promedio: 6075 [MWh]
- Ingresos año 1: 436.947 €

#### Tarifas

- Tarifa escogida: OA+RALM
- Duración de la obligación de compra: 20 años
- Año de solicitud del índice K: 2016

#### Financiamiento

- Parte de deuda externa: 0 %
- Duración: 15 años
- Tasa de interés: 5 %

#### Inversión

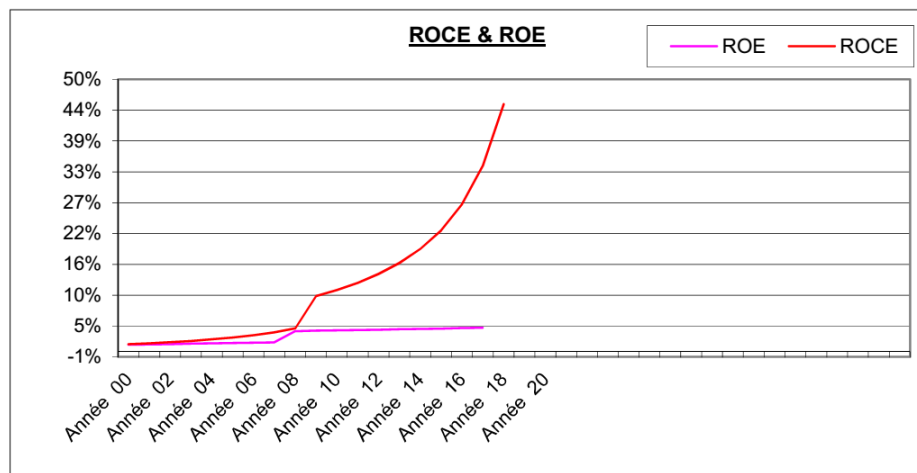
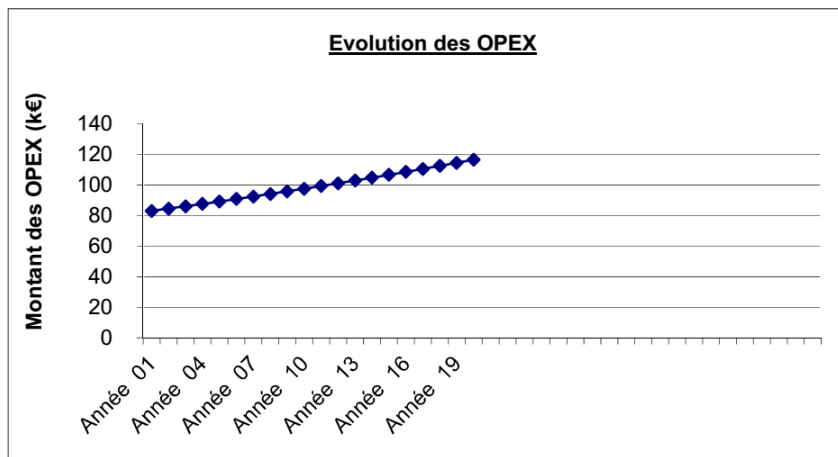
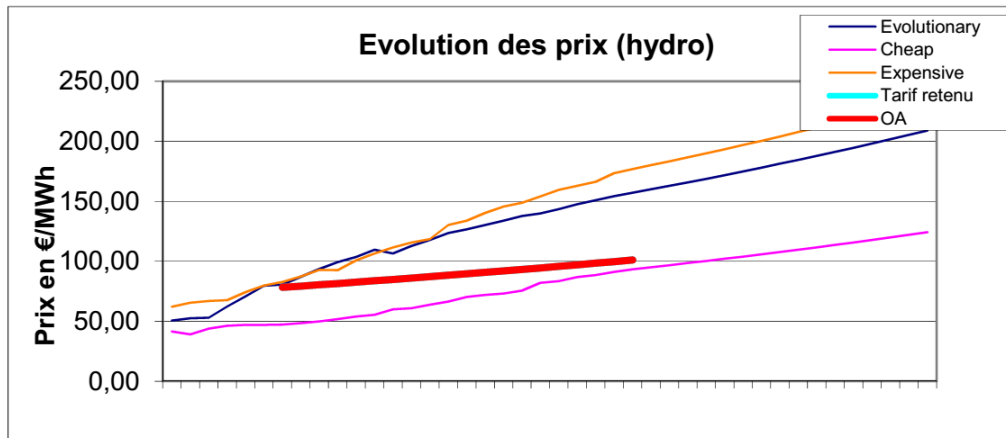
- Monto de la inversión inicial: 4.333.000 €
- Relación inversión inicial / MW: 2832 [k€]/MW
- Relación inversión total / MW: 2832 [k€/ MW]

#### Cifras de operación

- OPEX año 1: 83 k€
- Relación OPEX / MW: 54 [k€/ MW]
- Relación OPEX / MWh: 14 [€/ MWh]

#### Parámetros fiscales

- Impuesto profesional año 1: 40.244 €
- Contribución territorial año 1: 10.482 €
- Impuesto integración fiscal: 34,43 %
- Impuesto de inflación: 1,8 %
- Impuesto social: 0,16 %



**WACC** 8,00%  
**VAN (WACC) sur 20 ans** -1 049 628 €

<b>IRR1 sur 20 ans</b>	<b>4,87%</b>
<b>TRI (sans IS) sur 20 ans</b>	<b>6,40%</b>
<b>IRR3 sur 20 ans</b>	<b>4,87%</b>

Figura 6.1: Gráficos resúmenes del análisis económico escenario No. 1 para 20 años

## 6.1.2. Evaluación a 40 años

### Hipótesis Claves

- Duración de la evaluación: 40 años
- Año de comienzo de la explotación: 2017

### Producción

- Potencia total instalada: 1,53 [MW]
- Producción anual promedio: 6075 [MWh]
- Ingresos año 1: 436.947 €

### Tarifas

- Tarifa escogida: OA+RALM
- Duración de la obligación de compra: 20 años
- Año de solicitud del índice K: 2016

### Financiamiento

- Parte de deuda externa: 0 %
- Duración: 15 años
- Tasa de interés: 5 %

### Inversión

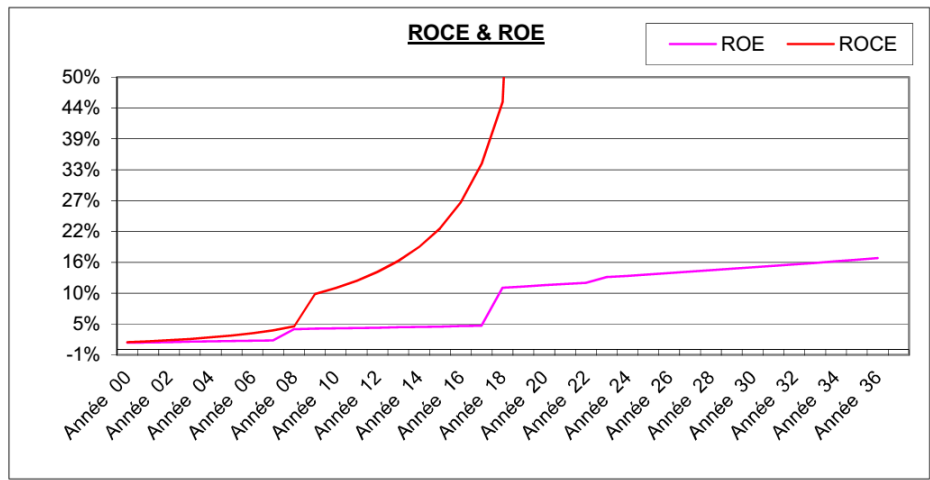
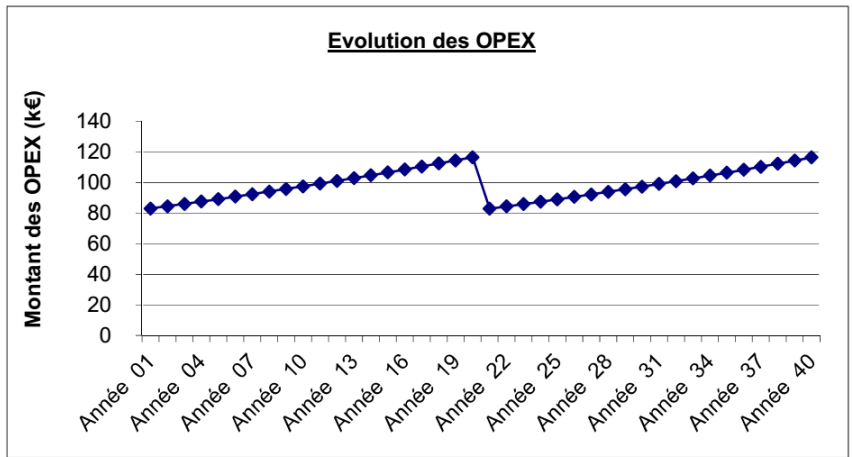
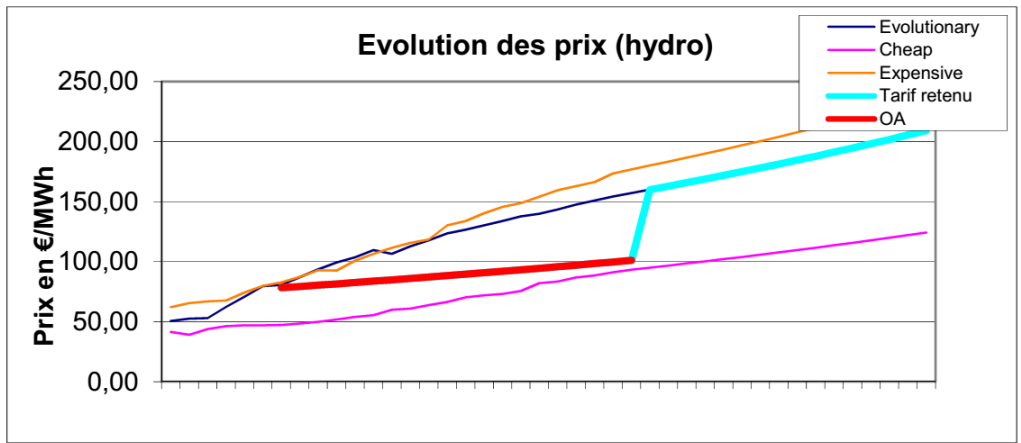
- Monto de la inversión inicial: 4.333.000 €
- Relación inversión inicial / MW: 2832 [k€]/MW
- Relación inversión total / MW: 2832 [k€]/ MW

### Cifras de operación

- OPEX año 1: 83 k€
- Relación OPEX / MW: 54 [k€/ MW]
- Relación OPEX / MWh: 14 [€/ MWh]

### Parámetros fiscales

- Impuesto profesional año 1: 40.244 €
- Contribución territorial año 1: 10.482 €
- Impuesto integración fiscal: 34,43 %
- Impuesto de inflación: 1,8 %
- Impuesto social: 0,16 %



**WACC** 8,00%  
**VAN (WACC) sur 40 ans** 64 982 €

<b>IRR1 sur 40 ans</b>	<b>8,11%</b>
<b>TRI (sans IS) sur 40 ans</b>	<b>9,79%</b>
<b>IRR3 sur 40 ans</b>	<b>8,11%</b>

Figura 6.2: Gráficos resúmenes del análisis económico escenario No. 1 para 40 años

## 6.2. Escenario 2

### 6.2.1. Evaluación a 20 años

#### Hipótesis Claves

- Duración de la evaluación: 20 años
- Año de comienzo de la explotación: 2017

#### Producción

- Potencia total instalada: 1,6 [MW]
- Producción anual promedio: 5497 [MWh]
- Ingresos año 1: 430.691 €

#### Tarifas

- Tarifa escogida: OA+RALM
- Duración de la obligación de compra: 20 años
- Año de solicitud del índice K: 2016

#### Financiamiento

- Parte de deuda externa: 0 %
- Duración: 15 años
- Tasa de interés: 5 %

#### Inversión

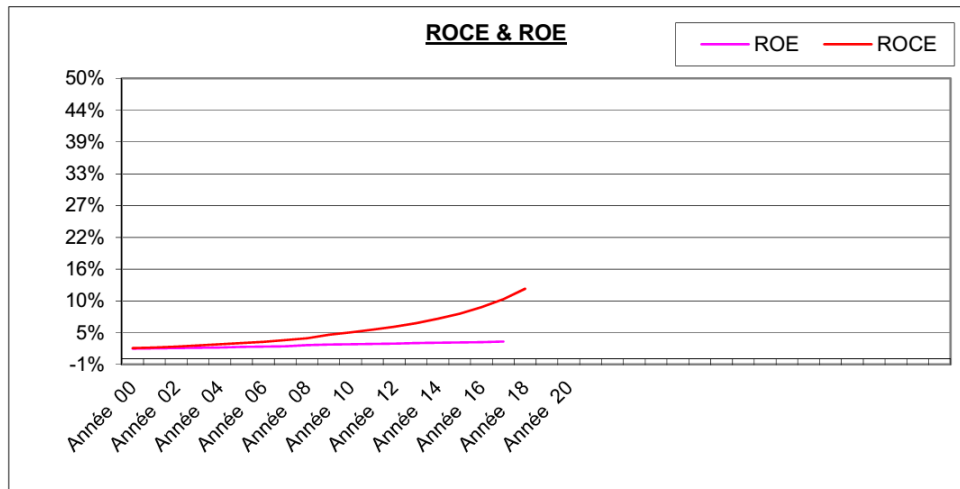
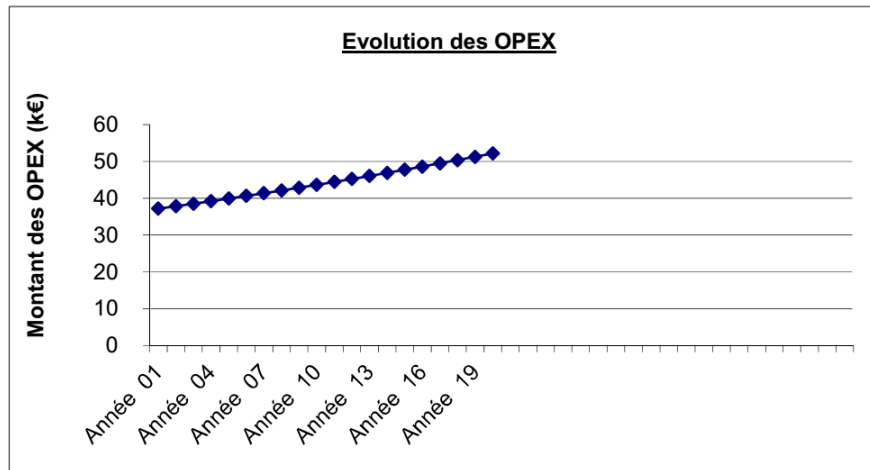
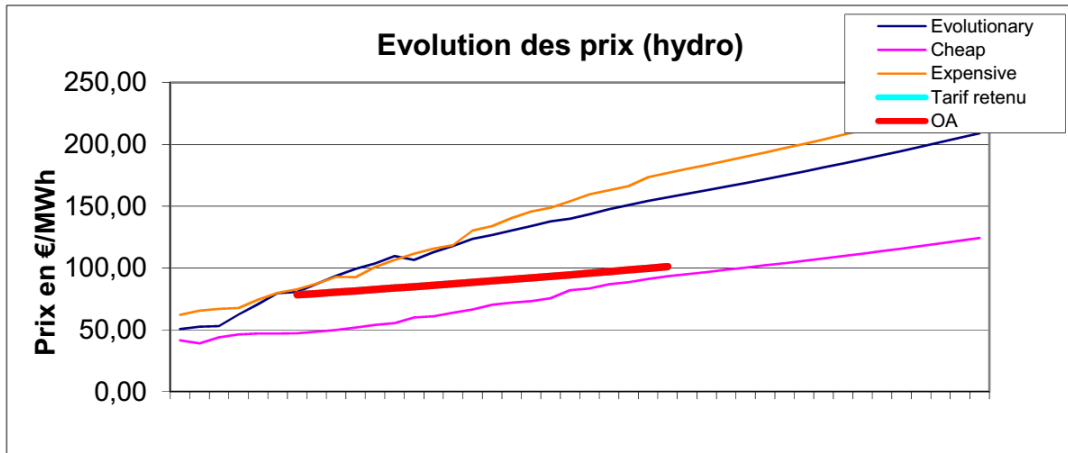
- Monto de la inversión inicial: 5.630.000 €
- Relación inversión inicial / MW: 3519 [k€]/MW
- Relación inversión total / MW: 3519 [k€/ MW]

#### Cifras de operación

- OPEX año 1: 37 k€
- Relación OPEX / MW: 23 [k€/ MW]
- Relación OPEX / MWh: 7 [€/ MWh]

#### Parámetros fiscales

- Impuesto profesional año 1: 16.465 €
- Contribución territorial año 1: 8.300 €
- Impuesto integración fiscal: 34,43 %
- Impuesto de inflación: 1,8 %
- Impuesto social: 0,16 %



**WACC** **8,00%**  
**VAN (WACC) sur 20 ans** **-2 097 878 €**

<b>IRR1 sur 20 ans</b>	<b>3,08%</b>
<b>TRI (sans IS) sur 20 ans</b>	<b>4,69%</b>
<b>IRR3 sur 20 ans</b>	<b>3,09%</b>

Figura 6.3: Gráficos resúmenes del análisis económico escenario No. 2 para 20 años



## 6.2.2. Evaluación a 40 años

### Hipótesis Claves

- Duración de la evaluación: 40 años
- Año de comienzo de la explotación: 2017

### Producción

- Potencia total instalada: 1,6 [MW]
- Producción anual promedio: 5497 [MWh]
- Ingresos año 1: 430.691 €

### Tarifas

- Tarifa escogida: OA+RALM
- Duración de la obligación de compra: 20 años
- Año de solicitud del índice K: 2016

### Financiamiento

- Parte de deuda externa: 0 %
- Duración: 15 años
- Tasa de interés: 5 %

### Inversión

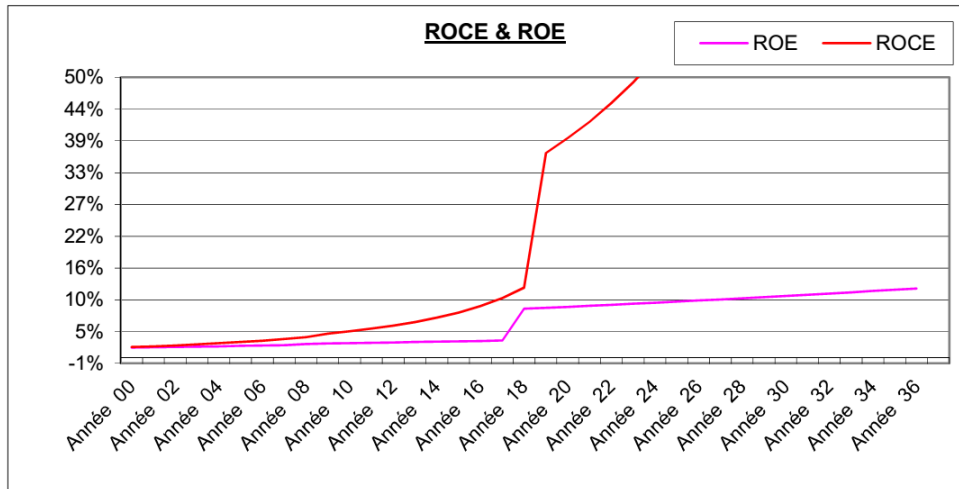
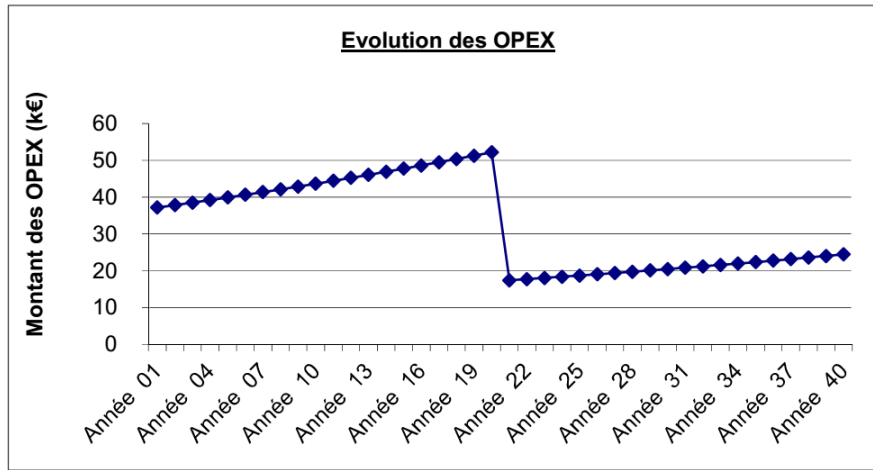
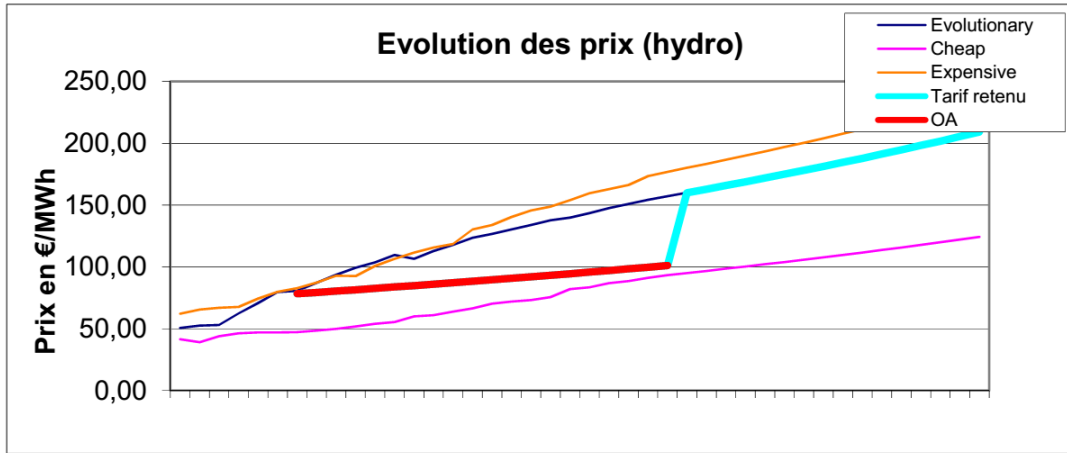
- Monto de la inversión inicial: 5.630.000 €
- Relación inversión inicial / MW: 3519 [k€]/MW
- Relación inversión total / MW: 3519 [k€/ MW]

### Cifras de operación

- OPEX año 1: 37 k€
- Relación OPEX / MW: 23 [k€/ MW]
- Relación OPEX / MWh: 7 [€/ MWh]

### Parámetros fiscales

- Impuesto profesional año 1: 16.465 €
- Contribución territorial año 1: 8.300 €
- Impuesto integración fiscal: 34,43 %
- Impuesto de inflación: 1,8 %
- Impuesto social: 0,16 %



**WACC** 8,00%  
**VAN (WACC) sur 40 ans** -945 799 €

**IRR1 sur 40 ans** 6,70%  
**TRI (sans IS) sur 40 ans** 8,39%  
**IRR3 sur 40 ans** 6,70%

Figura 6.4: Gráficos resúmenes del análisis económico escenario No. 2 para 40 años

## 6.3. Escenario 3

### 6.3.1. Evaluación a 20 años

#### Hipótesis Claves

- Duración de la evaluación: 20 años
- Año de comienzo de la explotación: 2017

#### Producción

- Potencia total instalada: 1 [MW]
- Producción anual promedio: 4542 [MWh]
- Ingresos año 1: 355.867 €

#### Tarifas

- Tarifa escogida: OA+RALM
- Duración de la obligación de compra: 20 años
- Año de solicitud del índice K: 2016

#### Financiamiento

- Parte de deuda externa: 0 %
- Duración: 15 años
- Tasa de interés: 5 %

#### Inversión

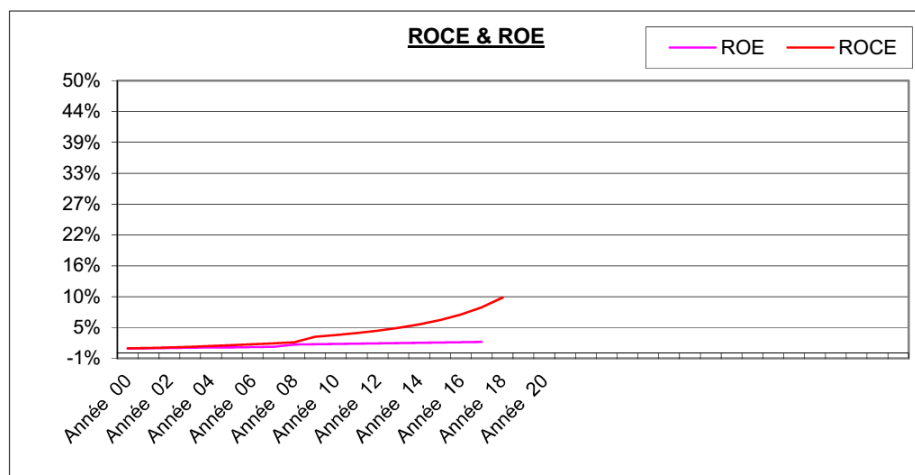
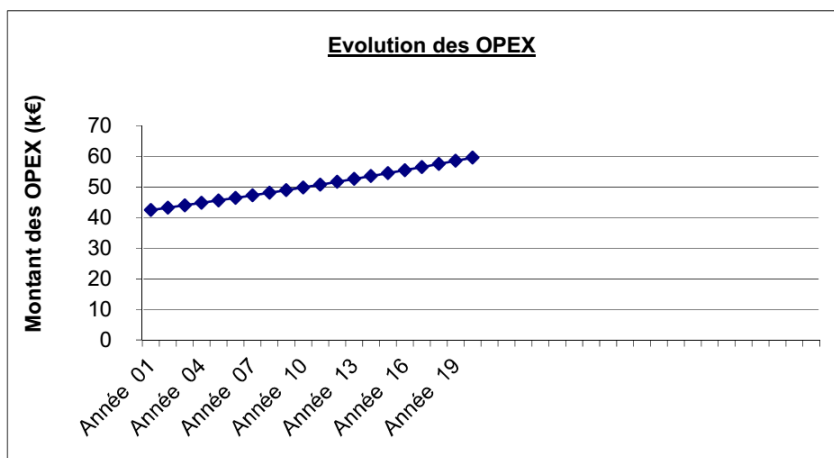
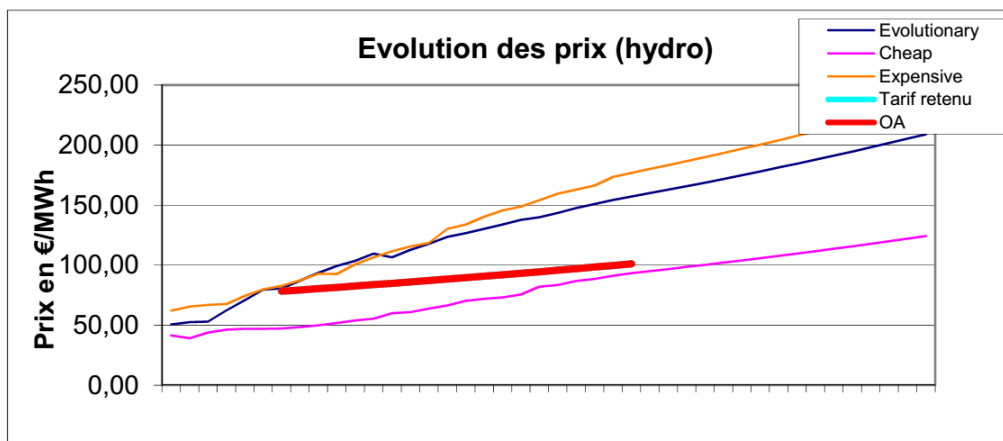
- Monto de la inversión inicial: 4.804.000 €
- Relación inversión inicial / MW: 4804 [k€]/MW
- Relación inversión total / MW: 4804 [k€/ MW]

#### Cifras de operación

- OPEX año 1: 42 k€
- Relación OPEX / MW: 42 [k€/ MW]
- Relación OPEX / MWh: 9 [€/ MWh]

#### Parámetros fiscales

- Impuesto profesional año 1: 40.244 €
- Contribución territorial año 1: 10.482 €
- Impuesto integración fiscal: 34,43 %
- Impuesto de inflación: 1,8 %
- Impuesto social: 0,16 %



**WACC** 8,00%  
**VAN (WACC) sur 20 ans** -2 094 069 €

**IRR1 sur 20 ans** 2,16%  
**TRI (sans IS) sur 20 ans** 3,12%  
**IRR3 sur 20 ans** 2,16%

Figura 6.5: Gráficos resúmenes del análisis económico escenario No. 3 para 20 años

### 6.3.2. Evaluación a 40 años

#### Hipótesis Claves

- Duración de la evaluación: 40 años
- Año de comienzo de la explotación: 2017

#### Producción

- Potencia total instalada: 1 [MW]
- Producción anual promedio: 4542 [MWh]
- Ingresos año 1: 355.867 €

#### Tarifas

- Tarifa escogida: OA+RALM
- Duración de la obligación de compra: 20 años
- Año de solicitud del índice K: 2016

#### Financiamiento

- Parte de deuda externa: 0 %
- Duración: 15 años
- Tasa de interés: 5 %

#### Inversión

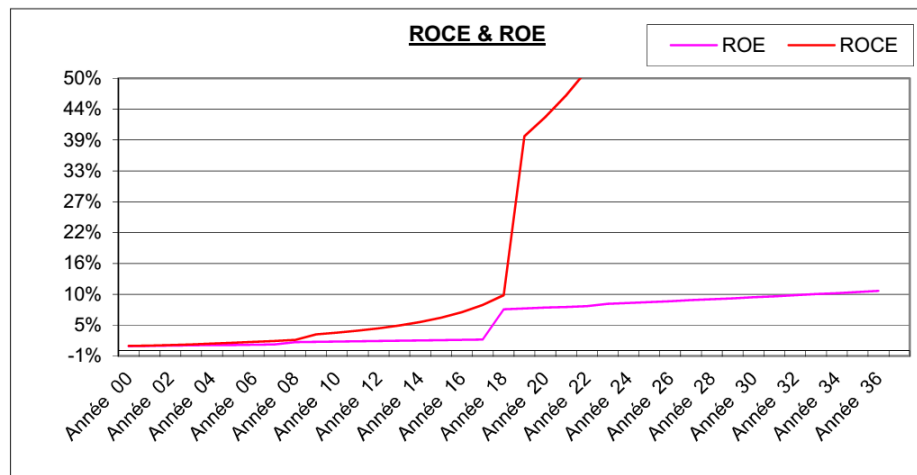
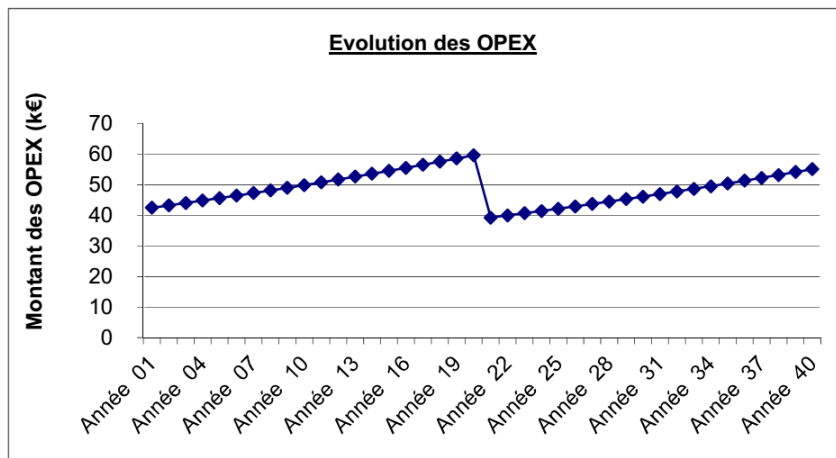
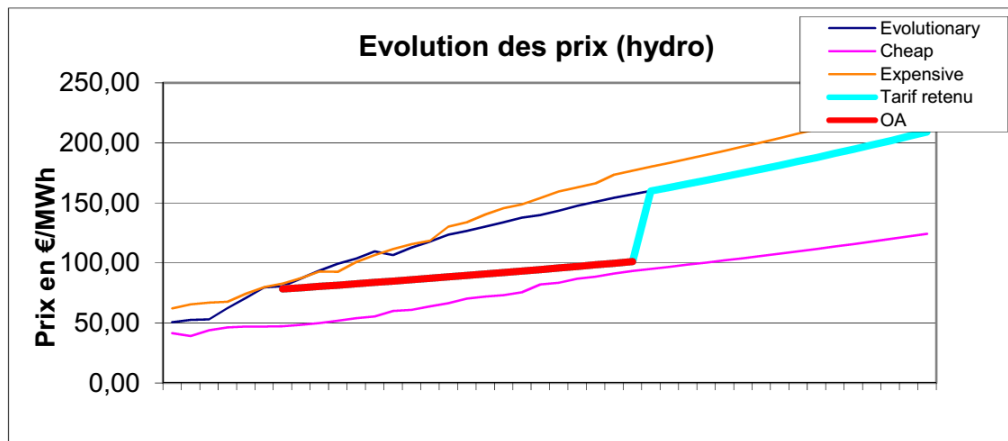
- Monto de la inversión inicial: 4.804.000 €
- Relación inversión inicial / MW: 4804 [k€]/MW
- Relación inversión total / MW: 4804 [k€]/ MW

#### Cifras de operación

- OPEX año 1: 42 k€
- Relación OPEX / MW: 42 [k€/ MW]
- Relación OPEX / MWh: 9 [€/ MWh]

#### Parámetros fiscales

- Impuesto profesional año 1: 40.244 €
- Contribución territorial año 1: 10.482 €
- Impuesto integración fiscal: 34,43 %
- Impuesto de inflación: 1,8 %
- Impuesto social: 0,16 %



<b>WACC</b>	<b>8,00%</b>
<b>VAN (WACC) sur 40 ans</b>	<b>-1 268 880 €</b>
<b>IRR1 sur 40 ans</b>	<b>5,91%</b>
<b>TRI (sans IS) sur 40 ans</b>	<b>7,26%</b>
<b>IRR3 sur 40 ans</b>	<b>5,91%</b>

Figura 6.6: Gráficos resúmenes del análisis económico escenario No. 3 para 40 años

# Conclusión

Se puede notar que ninguno de los tres escenarios estudiados es rentable. En efecto, ninguna proposición logra alcanzar un TIR superior al 5% y por consecuencia el VAN de cada proposición es negativa. Esto podría por si solo representar un argumento suficiente para desechar el conjunto de opciones.

Este trabajo muestra de manera precisa que el mero análisis económico no puede representar por si solo el argumento para la renovación de Castet. Por el contrario, el acento debe ser colocado a resolver la problemática de la migración aguas abajo. Conviene destacar que la renovación de concesiones puede llevarse acabo a fines del año 2015 y una eventual promesa al estado que la problemática estará resuelta sin ningún proyecto serio puede jugar en contra. Especialmente debido a que la Central Castet es la puerta de entrada a nivel ambiental para todas las demás centrales del Valle d'Ossau, pudiendo afectar a todas las centrales considerando que es una obligación impuesta desde 1991 y aún sin resolverse.

Es por esto que a nivel financiero, si el perímetro de análisis es solo considerar los ingresos de la Central Castet ningún proyecto será rentable. La inversión para la renovación debe añadirse al conjunto de centrales del Valle d'Ossau. La producción eléctrica de Castet solo equivale al 1% de la producción total en el Valle pero se debe recordar que el objetivo de Castet es realizar la función de regulación de caudales lo que permite que centrales de mayor envergadura puedan funcionar. Por lo tanto una inversión entre 4 y 5 millones de euros debe pensarse en que permite una ganancia de unos 30 millones de euros por año en el Valle d'Ossau.

De todos modos, ante un eventual reemplazo de los grupos bulbos existe un notable incremento en las ganancias con el acceso a la tarifa H07, siendo posible acceder a ella en los tres escenarios, siempre y cuando sean en el marco de una renovación. Actualmente, con un promedio de 5.785.934 [kWh] la ganancia anual promedio es de 285.290 euros por año y ante un eventual acceso a la tarifa H07 puede lograr a ser 471.403 euros, logrando un incremento del 165%. Para lograr un acceso a la tarifa H07 se debe realizar una inversión de 1214  $\left[\frac{\text{euros}}{\text{kW}}\right]$ , que en el caso de Castet es del orden de 1.821.000 euros, sin embargo es suficiente demostrar el 60% de la inversión para empezar tratando la tarifa H07, por ende es necesario una inversión mínima de 1.092.600 euros para acceder a la tarifa H07. Esta situación se vuelve aun más interesante considerando que los trabajos se puede desarrollar al costado derecho de la central, sin afectar la producción de la actuales turbinas bulbos durante los trabajos.

Todos los escenarios son técnicamente factibles cumpliendo en menor o mayor grado los requerimientos básicos y restricciones de la central Castet. De todas formas, este trabajo

concluye que el escenario No. 3 con la tecnología Tornillo Hidrodinámico no es recomendable para Castet. Específicamente debido al hecho de turbinar una pequeña porción del caudal ( $20 \frac{m^3}{s}$ ), además de necesitar realizar un especial diseño para la compuerta que se encargue de regular el nivel aguas arriba. Además el estado Francés aún no cataloga la tecnología como ictiófila.

El escenario No. 2 con la tecnología VLH se muestra como la solución más interesante para la problemática de la migración de los peces además de ser una oportunidad para ahorrar costos en el refuerzo del muro contra-fuerte. Es un escenario difícil de analizar debido a que jamás se ha construido una configuración en cascada, especialmente si se debe además tener un especial cuidado en la regulación de los caudales. Este trabajo concluye que a pesar de una configuración en cascada, la función de regulación de caudales sería posible a través de una compleja coordinación entre los álabes móviles de las turbinas, las compuertas deslizantes aguas arriba y el control de nivel aguas abajo. De todas formas, ante una situación extrema sería necesario de implementar sistemas bypass tanto aguas arriba como aguas abajo, incrementando el costo del escenario. Todas estas problemáticas son materia de estudios hidráulicos que permitan encontrar la mejor opción técnica-económica. De todas maneras, la tecnología VLH puede proveer una clara, desafiante e innovadora propuesta para el Estado considerando la pronta renovación de concesiones. Más aún si es necesario de realizar trabajos de reforzamiento en el muro contra-fuerte para cumplir con los estándares CFBR. Este escenario puede beneficiarse de una subvención del 40 % del costo de la pasarela para los peces (unos 160.000 euros). Finalmente, este escenario posee el nivel de inversión más alto pudiendo llegar a costar difícilmente no menos que 5.500.00 euros.

El escenario No. 1 se muestra como la solución más costo efectiva comparada a las otras dos. El ahorro en obras civiles es significativo y la instalación de nuevas turbinas no supone mayores problemas, manteniendo a salvo la función de regulación de caudal. El trabajo debe ser completado durante el verano para poder tomar ventaja de los bajos caudales entrantes y reemplazar los grupos con una logística del reemplazo de un grupo mientras el segundo continúa trabajando en la regulación. Esta forma de reemplazo no estaría exenta de problemas, dado que existe un gran riesgo a tener que realizar maniobras manuales de las compuertas deslizantes si el caudal entrante supera el caudal nominal de la turbina bulbo ( $15 \frac{m^3}{s}$ ). Además de diversas complejidades en cuanto a la conexión a la red y la sincronización de los controles comando al control general de la Central Castet. De todas formas, debería existir un mínimo de 3 semanas en que la función de regulación deberá realizarse a través del uso de las compuertas deslizantes.

Por otro lado, si la SHEM prefiere esperar la renovación de la concesión y priorizar la visión económica para Castet, este trabajo recomienda un total reemplazo de las compuertas deslizantes que permitan realizar la función de regulación de caudales de manera automática a través de un control hidráulico, considerando además la alta precisión necesaria, por ejemplo, una apertura de 10cm implica el flujo de  $14 \frac{m^3}{s}$ . El costo estimado por la SHEM para compuertas de este estilo sería del orden de 1.000.000 euros por compuerta. Puede ser estudiado, al mismo tiempo, una solución para la migración aguas abajo a través de las nuevas compuertas. Esta solución implicaría la detención de la producción de energía y probablemente una solución así no sería bien recibida por las autoridades al detener una producción de 6 [GWh].



Existen ciertas hipótesis y suposiciones en el presente trabajo que deben ser resueltas para poder considerar alguno de los tres escenarios para la renovación de la central Castet. La clarificación de ellas puede cambiar radicalmente las problemáticas encontradas.

Las siguientes medidas son propuestas por este trabajo para ser consideradas ante una eventual toma de decisión o trabajo futuro:

- Realizar un estudio detallado sobre el estado actual de las compuertas deslizantes, sobretodo del estado mecánico del material y su sistema de elevación, esto con el fin de predecir su eventual comportamiento para distintos escenarios de utilización.
- Se recomienda rehacer un estudio del actual estado del muro contra-fuerte para tomar una decisión de reparación partiendo del principio que el estudio de Coyne et Bellier [8] fue realizado con hipótesis bastante conservadoras.
- Realizar un estudio de ingeniería civil detallada con el fin de determinar el mejor camino a través de la central para un posible mecanismo de migración aguas abajo así como también poder clarificar el costo que implicaría tal proposición.

# Bibliografía

- [1] Ley 20.257 Generación de energía eléctrica con fuentes de energías no convencionales web: <http://www.leychile.cl/Navegar?idLey=20257>
- [2] Aporte Potencial de Energías Renovables No Convencionales y Eficiencia Energética a la Matriz Eléctrica , Programa de Estudios e Investigaciones en Energía del Instituto de Asuntos Públicos de la Universidad de Chile. y Núcleo Milenio de Electrónica Industrial y Mecatrónica, Centro de Innovación en Energía de la Universidad Técnica Federico Santa María. (2008)
- [3] Reporte CER Noviembre 2014 <http://www.cifes.gob.cl/mailling/2014/noviembre/REPORTENov2014.pdf>
- [4] Funcionamiento de CASTET [1953-2009], documento confidencial, Société Hydro-Électrique du Midi (SHEM).
- [5] “Contrôle Commande de Castet” Rapport de synthèse de la phase 1, rapport 11 684 RP 01. Documento Confidencial.
- [6] Artículo L.432-6 del código Francés del medio-ambiente: <http://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT000006074220&idArticle=LEGIARTI000006834117&dateTexte=&categorieLien=cid>
- [7] Google Earth web: <http://earth.google.com>
- [8] Barrage de Castet “Étude de Laminage et de Stabilité ”, Informe No P.004128-RP-03, Coyne et Bellier, [2012].
- [9] “Creation d’un ouvrage de dévalaison sur le barrage de Castet”, Étude diagnostic et de présentation de scenario d’aménagement pour la dévalaison des espèces migratrices, BIOTOPE, Enero 2013.
- [10] Planos N°R.U.Ct.10 de la SHEM.
- [11] “Dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages” du Comité Français des Barrages Réservoirs (CFBR), version de Junio 2012.
- [12] “Ciffre d’affaire Castet 2003-2013” del departamento DEX de la SHEM. Documento confidencial.

- [13] Cotización turbinas bulbos a la empresa B.P Études en el año 2008. Documento confidencial.
- [14] Presupuesto de 3 turbinas ECObulbs por Andritz para la Central Capdenac, año 2013. Documento Confidencial.
- [15] resupuesto de 3 turbinas Bulbos por Mavel para la Central Capdenac, año 2013. Documento Confidencial.
- [16] Offre budgétaire pour la fourniture de groupe(s)turbogénérateur VLH, Projet:Castet Référence:14-019 rev a. Mayo 2014 MJ2 Technologies. Documento Confidencial.
- [17] Offre budgétaire GESS-CZ, Projet: Castet NT2659 / 14. June 2014. Documento Confidencial
- [18] “Replacement of old camel-back double discharge francis units through ECObulb TM technology: The exemple of Tombetta (Italy)”, Pierre Duflon, VA Tech Hydro 2006.
- [19] Kueny, J. 2005. “Critères Ichtyophiles, préétude 8 pales”. Préétude Turbine Basse Chute VLH, INPG.
- [20] U.S Army Corps of Engineers, 1995. “Turbine passage survival of juvenile spring chinook Salmon at lower Granit Dam, Snake River, Washington”. Portland District: Hydraulic Design Center.
- [21] VLH turbine sitio-web: <http://www.vlh-turbine.com/>
- [22] Leclerc, M. 2007. “La turbine de très basses chute ou VLH (pour very low turbo-generator). Documento comercial, MJ2 Technologies S.A.R.L.
- [23] MJ2 Technologies. Nuevo perfil Ictiófilo, primer contrato en Bélgica. “Turbines de très basse chute”, lettre d’information No 8, Febrero 2009.
- [24] MJ2 Presentación General, “Un projet industriel de fabrication de groupes Turbo Générateurs Hydroélectriques pour très basses chutes d’eau”, Diciembre 2013.
- [25] “Creation d’un ouvrage de devalaison sur le barrage de Castet”, Fish-Pass - BIOTOPE, Enero 2013.
- [26] Mini-centrales hidroeléctrica 2011, Pierre Lavy, EYROLLES.
- [27] Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant, ESHA 2004.
- [28] ANDRITZ Group site web: <http://www.andritz.com/>
- [29] GESS-CZ sitio web: <http://www.gess.cz/en/>
- [30] Roncuzzi sitio web: <http://www.roncuzzi.com/index.asp?cl=1>
- [31] State of technology and design guidelines for the Archimedes screw turbine, Alois Las-

hofer, Werner Hawle? Bernhard Pelikan. Institute of Water Management, Hydrology and Hydraulic Engineering University of Natural Resources and Life Sciences Vienna (BOKU), 2012.

- [32] Étude des solutions de production d'énergie pour une microcentrale à vis hydrodynamique, Mathilde LOUCHEUX, INSA Strasbourg, 2013.
- [33] Bockman, T., Fleten, S.-E., Juliussen, E., Langhammer, H. J., Revdal, I. (2008). Investment timing and optimal capacity choice for small hydropower projects. *European Journal of Operational Research*.
- [34] Lautier, P., Ph, D., Ieee, M., Neil, C. O., Sc, M., Deschenes, C., Leclerc, M. (2007). Variable Speed Operation of a New Very Low Head Hydro Turbine with Low Environmental Impact.
- [35] Cooke, S. J., Hatry, C., Hasler, C. T., Smokorowski, K. E. (2011). Literature Review , Synthesis and Proposed Guidelines Related to the Biological Evaluation of "Fish Friendly " Very Low Head Turbine Technology in Canada Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 2931.
- [36] Anagnostopoulos, J. S., Papantonis, D. E. (2007). Optimal sizing of a run-of-river small hydropower plant. *Energy Conversion and Management*.

# Anexos

# Anexo 1

	Remplacement des 2 groupes Bulbes	Technologie VLH	Technologie Vis Hydrodynamique
<i>Priorités</i>	Assuré par les groupes bulbes (pales réglables). Précision du débit pour les bas débits. Aucun problème avec le mariage existant (1.5 m)	Assuré par les groupes VLH (pales réglables) + vannes à l'amont avec un contrôle du niveau d'eau pour la 2 <sup>ème</sup> rangée de VLH à l'aval (marrage : possibilité d'avoir 2m). Précision du débit pour les bas débits	Assuré par les vis hydrodynamiques (l'automatisme ajuste le débit entre 0 et 5 m <sup>3</sup> /s par vis) + volet mobile amont réglable pour régler le marrage.
	Création d'un ouvrage de dévalaison (900 k€). Grilles Fines + Dégrilleur + Bypass	Technologie Ichtyophile (reconnue par l'ONEMA, 2013)	Technologie Ichtyophile (à faire valider par l'ONEMA)
	Les recommandations du CFBR ne sont pas satisfaites	Eventuellement opportunité pour satisfaire les recommandations du CFBR	Eventuellement opportunité pour satisfaire les recommandations du CFBR
<i>Aspects Techniques</i>	1650 mm	3550 mm	3700 mm
	Non	non	Oui
	Alternateur ou synchrone à aimants permanents	Synchrone + Convertisseur de fréquence	Asynchrone + Convertisseur de fréquence
	Réutilisation de vannes et batardeaux existants	Vannes amont, batardeaux, grilles (espace inter-grille 300mm), drome.	Vannes amont, batardeaux, grilles (espace inter-grille 300mm), drome.
	Nettoyage du plan d'eau existant avec le clapet (Nécessité d'arrêter les groupes)	Nettoyage du plan d'eau existant avec le clapet (présent sur la vanne de crue) + le clapet sur les VLH	Nettoyage du plan d'eau existant avec le clapet (présent sur la vanne de crue)
	ECObulbs: Pas de Multiplicateur: Espace limité dans le puits pour accès aux équipements. Problématique important avec l'efficacité et les fuites.	Pas de multiplicateur, paliers dimensionnés pour limiter les apports de graisse. Dispositif de relevement pour la maintenance.	Multiplicateur principal cause de maintenance. Roulement inférieur à circulation huile, roulement supérieur lubrifiés à la graisse.
	ECObulb: Première installation en France en 2001. Alternateur calculé a priori pour une durée de vie de 30 ans. Faible REX sur la durée des aimants permanents.	Première installation en France en 2007 (28 machines en fonctionnement en 2014). Alternateur calculé a priori pour une durée de vie de 30 ans. Faible REX sur la durée de vie des aimants permanents	Première installation en France en 2013. Génératrice calculée a priori pour une durée de vie minimale de 100.000 heures à pleine charge (GESS-CZ)
	250 [tr/min]	40 [tr/min]	42 [tr/min]
<i>Réalisation des Travaux</i>	Env. 12 mois + pertes de production. Idéal pendant l'été (fonction démodulation, faibles débits).	Env. 18 mois sans contrainte d'arrêter la production et la fonction démodulation. Ouvrage en rive droite.	Env. 14 mois sans contrainte d'arrêter la production et la fonction démodulation. Ouvrage en rive droite.
	Procédure: un groupe après l'autre. Idéalement 1 groupe au moins disponible tout le temps, grand risque d'utilisation des vannes de crue si débit entrant > débit d'armement d'un groupe (nécessité d'automatisation des vannes : 7k€ avant travaux)	Période d'indisponibilité de l'exploitation réduite. Turbinage 8760 h/an du débit de dé	Période d'indisponibilité de l'exploitation réduite.
<i>Complexité</i>	Principalement avec le raccordement au réseau et essais (il faut arrêter l'usine au moins 1-2 semaines), contrôle commande (en même temps que GC), vérification aspirateur et remplacement de vanne et pompe de puisard, Connexion automate des groupes avec les services généraux en même temps que l'exploitation.	Installation 2xVLH en cascade jamais réalisé.	Louer probablement la propriété CASAU pour le chantier, (accès actuel limité) Problème de l'évacuation de l'énergie: Soit déplacer le poste 63KV vers les groupes, soit ramener l'évacuation vers le poste 63KV existant. le raccordement au réseau et essais, soit évacuer sur réseau ERDF en 20KV ce qui permettrait de supprimer le poste 63KV et le TR associé.
<i>Avantages</i>		Turbinage 8760 [heures/an] du débit de dévalaison. Turbinage 8760 [heures/an] du débit d'atrait sur 2 des 4 VLH.	Turbinage 8760 [heures/an] du débit de dévalaison
<i>Production</i>	28 m <sup>3</sup> /s (14 m <sup>3</sup> /s par groupe) 1530 kW (765 kW par groupe) 6075 MWh	29,6 m <sup>3</sup> /s (14,8 m <sup>3</sup> /s par groupe) 1600 kW (400 kW par groupe) 5467 MWh	20 m <sup>3</sup> /s (5 m <sup>3</sup> /s par groupe) 1000 kW (250 kW par groupe) 4542 MWh
<i>Aspects Économiques</i>	Coût GC (avec alea 15%) Coût EM (avec alea 15%) Coût Dévalaison Montant Total d'investissement initial Ratio Investissement Total/MW Année de début d'exploitation Taux d'indexation annuelle des tarifs OPEX année 1	2.701.350 € 2.782.000 € 0 € 5.630.350 € 3519 k€/MW 2017 1.35% 40.000 €	1.711.200 € 3.092.320 € 0 € 4.803.520 € 4804 k€/MW 2017 1.35% 40.000 €
<i>Évaluation Financière</i>	Chiffre d'affaires année 1 Chiffre d'affaires pendant des travaux (H07)	430.691 € 655.420 €	355.867 € 524.336 €
	Durée de l'évaluation Tarif Choisi	20 ans H07	20 ans H07
	Durée d'obligation d'achat	40 ans H07 + RALM	40 ans H07 + RALM
	WACC	8%	8%
	VAN (IWACC)	-1.049.628 €	-2.097.878 €
	IRR1	4,87%	64.982 €
	TRI (sans IS)	6,40%	-945.799 €
	IRR3	4,87%	8,11%
		3,08%	-1.131.123 €
		4,69%	5,91 %
		3,09%	7,26 %
		8,11%	2,16 %
		8,11%	3,12 %
		8,11%	5,91 %

# Anexo 2

## HYPOTHESES PROJET HYDROELECTRICITE

Durée de l'évaluation : 20 années  
 Année de début du projet : 2017

Légende : à saisir par l'utilisateur / calculé automatiquement

Version finale 1.03

[Bas de page](#)

Attention, les tarifs RALM ne sont pas connus jusqu'à la fin de l'évaluation, ils sont extrapolés grâce à l'inflation

### PRODUCTION

Puissance totale installée : 1,53 MW  
 Productible annuel moyen : 6.075 MWh

### Ajustements de la production

	Année 01	Année 02	Année 03	Année 04	Année 05	Année 06	Année 07	Année 08	Année 09	Année 10
Indisponibilités ponctuelles	8,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Gains de production	-8,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Production annuelle nette (MWh)	5.577	6.075	6.075	6.075	6.075	6.075	6.075	6.075	6.075	6.075

### TARIFS

Choix du tarif adopté :

- Obligation d'achat (version 2006) et tarifs RALM \*
- Année de la demande de l'indice K : 2016
- Taux d'indexation annuelle des tarifs (L) : 1,35%
- Durée de l'obligation d'achat : 20 années
- Scénario adopté à la fin de l'OA : Evolutionary

MAJ RALM 01-sep-10

Intégrer des surcoûts et survalues  Saisir un tarif entièrement manuel

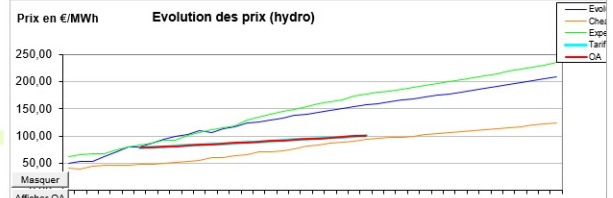


Tableau 2 : saisie du CAPEX

Saisir dans ce tableau toutes les nouvelles dépenses & investissements dont le prix est connu ou estimé

Libellé	Prix unitaire (€)	Quantité	Montant total (€)	% CAPEX total	Année d'invest.	Durée d'amort.	Type d'amort.	Source et commentaires	Soumis à l'inflation ?
<b>ACQUISITION DE NOUVEAU MATERIEL</b>									
Génie Civil	Études Préliminaires	15.000	1,0	15.000	0%	40 ans	linéaire		oui
	Châssis & installation	60.000	1,0	60.000	0%	40 ans	linéaire		oui
	Grue (rapide) & installation	35.000	1,0	35.000	0%	40 ans	linéaire		oui
	Tracé (montage-démontage) par groupe	18.000	1,0	18.000	0%	40 ans	linéaire		oui
	Gr. Groupes & Grue SR 1500kg	6.000	1,0	6.000	0%	40 ans	linéaire		oui
	on & 2 semaines	16.000	1,0	16.000	0%	40 ans	linéaire		oui
	Installation & matériel	40.000	1,0	40.000	0%	40 ans	linéaire		oui
	pièces à sceller & 2 semaine	30.000	1,0	30.000	0%	40 ans	linéaire		oui
	ALEA RALM	33.000	1,0	33.000	0%	40 ans	linéaire		oui
	<b>TOTAL GENIE CIVIL</b>			<b>253.000</b>	<b>6%</b>				
Composants mécaniques	Turbine MAHEL 6.2 Bulbes	722.675	2,0	1.445.350	0%	20 ans	linéaire		oui
		-	-	-	0%	20 ans	linéaire		oui
		-	-	-	0%	20 ans	linéaire		oui
		-	-	-	0%	20 ans	linéaire		oui
<b>TOTAL MECANIQUE</b>			<b>1.445.350</b>	<b>33%</b>					
Composants électriques	Alternateur Bernard et Bonnelord	464.312	2,0	928.624	0%	10 ans	linéaire		oui
	Transformateur 6.631V/10.5kV	80.000	1,0	80.000	0%	10 ans	linéaire		oui
	TA & Disjoncteurs / Sectionneurs flexible	47.000	1,0	47.000	0%	10 ans	linéaire		oui
	Convertisseur Commande	82.000	2,0	164.000	0%	10 ans	linéaire		oui
	Armoire alternatif & Services généraux	100.000	1,0	100.000	0%	10 ans	linéaire		oui
	<b>TOTAL ELECTRIQUE</b>			<b>1.318.624</b>	<b>84%</b>				
Divers	ALEA ELECTROMECHANIQUE REVISION (Vannes Fines + Dégivreur + Espaces)	900.000	1,0	900.000	0%	25 ans	linéaire		oui
		-	-	-	0%	25 ans	linéaire		oui
		-	-	-	0%	25 ans	linéaire		oui
		-	-	-	0%	25 ans	linéaire		oui
		-	-	-	0%	25 ans	linéaire		oui
		-	-	-	0%	25 ans	linéaire		oui
<b>TOTAL DIVERS</b>			<b>1.314.746</b>	<b>30%</b>					
Terrains & autres frais non amortissables					0%				oui
					0%				oui
<b>TOTAL TERRAINS</b>				<b>0%</b>					

INVESTISSEMENT INITIAL (CAPEX) : 4.332.720 € RATIO kWh/MWh : 2,832 €/MWh

### TABLEAU DES CASH-FLOWS HYDROELECTRICITE

	Année 00	Année 01	Année 02	Année 03	Année 04	Année 05	Année 06	Année 07	Année 08	Année 09	Année 10
Tous les montants sont en base	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Investissement CAPEX	4.332.720	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Production annuelle nette (MWh)	5.577	6.075	6.075	6.075	6.075	6.075	6.075	6.075	6.075	6.075	6.075
Tarif (€/MWh)	78,25	79,41	80,48	81,57	82,68	83,80	84,93	86,08	87,24	88,42	89,62
Chiffre d'affaires "brut"	0	436.947	492.417	498.945	495.560	502.295	509.061	515.948	522.929	530.004	537.175
Chiffre d'affaires supplémentaire	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chiffre d'affaires total	0	436.947	492.417	498.945	495.560	502.295	509.061	515.948	522.929	530.004	537.175
Locations terrains	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Frais d'exploitation	0	12.296	12.436	12.680	12.888	13.120	13.396	13.696	13.941	14.090	14.344
Assurances	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Autres charges & équipements	0	30.540	31.090	31.649	32.219	32.799	33.389	33.990	34.602	35.225	35.869
Maintenance	0	25.000	25.490	25.908	26.374	26.849	27.332	27.824	28.325	28.835	29.354
Frais de structure - personnel	0	12.270	12.545	12.825	13.100	13.399	13.696	13.995	14.291	14.593	14.891
Crédit-Bail	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total des DPEX	0	83.026	84.520	86.042	87.591	89.167	90.772	92.406	94.069	95.763	97.486
Redevance	0	4.072	4.145	4.220	4.296	4.373	4.452	4.532	4.614	4.697	4.781
Taxe foncière	0	10.482	10.671	10.863	11.058	11.257	11.460	11.668	11.876	12.090	12.308
Taxe professionnelle	0	40.244	40.988	41.706	42.457	43.221	43.999	44.791	45.597	46.418	47.253
Impôt DRT/AMC	0	699	712	732	750	764	778	792	807	821	836
DPEX & taxes	0	138.522	141.077	143.913	146.984	149.922	153.147	156.221	159.562	162.888	166.289
EBITDA	0	298.424	341.341	345.332	349.366	353.443	357.563	361.728	365.936	370.189	374.487
Amortissement de l'investissement	0	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145
Amortissement des actifs existants	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amortissement total	0	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145
EBIT - Base imposable	0	35.280	78.196	82.187	86.221	90.298	94.419	98.583	102.791	107.044	111.342
Résultat reporté	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Résultat imposable	0	35.280	78.196	82.187	86.221	90.298	94.419	98.583	102.791	107.044	111.342
Impôts sur les sociétés	0	12.147	26.823	28.297	29.686	31.090	32.509	33.942	35.391	36.856	38.336
Intérêts des emprunts	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Remboursement capital emprunt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Résultat Net	0	23.133	51.273	53.890	56.535	59.208	61.900	64.641	67.400	70.189	73.007
Variation du DFR	0	19.097	3.470	227	229	230	232	234	235	237	238
Free Cash Flow pour IRR1	-4.332.720	267.891	310.948	316.808	318.451	322.123	324.823	327.552	330.310	333.097	335.914
Free Cash Flow sans IS pour TRI	-4.332.720	279.327	337.071	345.800	349.137	352.210	357.131	361.494	365.701	369.962	374.249
Cash-Flow actionnaires pour IRR2	-4.332.720	267.891	310.948	316.808	318.451	322.123	324.823	327.552	330.310	333.097	335.914
ROE	0,52%	1,83%	1,84%	1,84%	1,84%	1,84%	1,84%	1,84%	1,84%	1,84%	1,84%
ROCE	0,57%	1,34%	1,01%	1,01%	1,01%	1,01%	1,01%	1,01%	1,01%	1,01%	1,01%

# Anexo 3

**OPEX**

**Tableau 4 : Saisie des charges d'exploitation (OPEX)**  *Les charges sont payées chaque année*

	Montant /	% CA	% CAPEX total	€/MWh	Source & commentaires
<b>Locations des terrains</b>					
Redevance	4.000				
Frais d'exploitation	12.000				
Assurance					
Frais de structure / frais de personnel	15.000				
Autres charges & équipements	30.000				

*Les charges d'exploitation s'appliquent dès la mise en service de l'installation, lorsque le chiffre d'affaires commence à être généré*

Maintenance de l'installation

Segment n° 1 pendant  
Segment n° 2 pendant  
Segment n° 3 pendant  
Segment n° 4 pendant

20 années

25.000

Part soumise à l'inflation: 100%

Remplir le tableau de maintenance

	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6
Montant de la maintenance	2.017	2.018	2.019	2.020	2.021	2.022
Maintenance inflatée	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000
	25.000	25.450	25.908	26.374	26.849	27.332

Présence de crédit-bail

**VACC** 8,00%

Valeur résiduelle globale du projet en fin d'évaluation: 1.000.000,1

**Impôts & taxes**

Taxe professionnelle

Calcul automatique : pourcentage de la Valeur Ajoutée: 3,00%

Saisie d'un montant déjà connu: 40.244,1

Taxe foncière

Calcul automatique : saisir un taux de taxe foncière: 20%

Saisie d'un montant déjà connu: 10.482,1

Méthode de calcul de l'impôt sur les sociétés

Report des déficits

Sur la maison mère (intégration fiscale)  D'une année sur l'autre

Cas du rachat : autres actifs - dette existante

*Les montants saisis ci-dessous seront ajoutés ("autres actifs") ou retranchés ("dette existante") au prix du projet (cas du rachat)*

Autres actifs: 01

Dette existante: 01

**FINANCEMENT (PARTIE RESERVEE A DSF)**

Caractéristiques de l'emprunt

% de l'investissement initial: 0%

Montant Dette: 01

Fonds propres investis: 4.332.720,1

Durée de l'emprunt: 15 années

Taux de l'emprunt: 5,00%

Nature de l'emprunt: Echéancier Ceur

Pourcentage des cash-flows perçus: 100%



# Anexo 4

TABLEAU DES CASH-FLOWS HYDROELECTRICITE											
	Retour aux hypothèses					Synthèse de l'évaluation					
	Année 00	Année 01	Année 02	Année 03	Année 04	Année 05	Année 06	Année 07	Année 08	Année 09	Année 10
Tous les montants sont en Euros	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Investissement CAPEX	4.332.720	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Production annuelle nette (MWh)	5.577	6.075	6.075	6.075	6.075	6.075	6.075	6.075	6.075	6.075	6.075
Tarif (1 / MWh)	78,35	79,41	80,48	81,57	82,68	83,80	84,93	86,08	87,24	88,42	89,61
Chiffre d'affaires "brut"	436.947	482.417	488.945	495.560	502.265	509.061	515.948	522.929	530.004	537.175	544.446
Chiffre d'affaires supplémentaire	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chiffre d'affaires total	436.947	482.417	488.945	495.560	502.265	509.061	515.948	522.929	530.004	537.175	544.446
Locations terrains	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Frais d'exploitation	0	12.216	12.436	12.660	12.888	13.120	13.356	13.596	13.841	14.090	14.344
Assurances	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Autres charges & équipements	0	30.540	31.090	31.649	32.219	32.799	33.389	33.990	34.602	35.225	35.859
Maintenance	0	25.000	25.450	25.908	26.374	26.849	27.332	27.824	28.325	28.835	29.354
Frais de structure - personnel	0	15.270	15.545	15.825	16.100	16.399	16.695	16.995	17.301	17.613	17.930
Crédit-Bail	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total des OPEX	0	83.026	84.520	86.042	87.591	89.167	90.772	92.406	94.069	95.763	97.496
Redevance	0	4.072	4.145	4.220	4.296	4.373	4.452	4.532	4.614	4.697	4.781
Taxe foncière	0	10.482	10.671	10.863	11.058	11.257	11.460	11.666	11.876	12.090	12.308
Taxe professionnelle	0	40.244	40.968	41.706	42.457	43.221	43.999	44.791	45.597	46.418	47.253
Impôt ORGANIC	0	699	772	782	793	804	814	826	837	848	859
OPEX & taxes	0	138.523	141.077	143.613	146.194	148.822	151.497	154.221	156.993	159.815	162.688
EBITDA	0	298.424	341.341	345.332	349.366	353.443	357.563	361.728	365.936	370.189	374.487
Amortissement de l'investissement	0	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145
Amortissement des actifs existants	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amortissement total	0	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145	263.145
EBIT = Base imposable	0	35.280	78.196	82.187	86.221	90.298	94.419	98.593	102.791	107.044	111.342
Résultat reporté	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Résultat imposable	0	35.280	78.196	82.187	86.221	90.298	94.419	98.593	102.791	107.044	111.342
Impôts sur les sociétés	0	12.147	26.823	28.237	29.686	31.090	32.508	33.942	35.391	36.855	38.335
Intérêts des emprunts	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Remboursement capital emprunt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Résultat Net	0	23.133	51.273	53.950	56.535	59.208	61.910	64.641	67.400	70.189	73.007
Variation du BFR	0	19.097	3.470	227	229	230	232	234	235	237	238
Valeur résiduelle en fin d'évaluation	0	267.181	310.948	316.808	319.451	322.123	324.823	327.552	330.310	333.097	335.914
Free Cash Flow pour IRR1	-4.332.720	278.227	337.971	345.105	349.127	353.213	357.331	361.494	365.701	369.952	374.249
Free Cash Flow sans IS pour TRI	-4.332.720	278.227	337.971	345.105	349.127	353.213	357.331	361.494	365.701	369.952	374.249
Cash-Flows actionnaires pour IRR3	-4.332.720	267.181	310.948	316.808	319.451	322.123	324.823	327.552	330.310	333.097	335.914
RDE		0,53%	1,98%	1,24%	1,30%	1,37%	1,43%	1,49%	1,56%	1,62%	1,69%
ROCE		0,57%	1,34%	1,51%	1,71%	1,95%	2,23%	2,57%	2,99%	3,53%	4,23%

# Anexo 5

Postes de dépenses	Précisions d'options	Valeur repère	Montants	Choix concertés
<b>Travaux spécifiques de réparation de la digue RD du canal d'amenée des G1-2-3</b>				
■ Réparation digue RD du canal d'amenée	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Option reconstruction minimale (sur 30 ml)</li> <li>■ Option reconstruction maximale (sur 55 ml)</li> <li>■ Option reconstruction économique (demi largeur sur 55 ml)</li> <li>■ Option rideau palplanche rapporté</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>30 ml</li> <li>55 ml</li> <li>55 ml</li> <li>Economie de =</li> <li>40 ml</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>128 825 €</li> <li>221 550</li> <li>165 538</li> <li>56 012 €</li> <li>81 103 €</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>221 550</li> <li>221 550</li> <li></li> <li></li> </ul>
<b>Travaux groupe supplémentaire (+20% Loi Pope) - Option 13 m3/s (270 kW) (chute brute 2,40 env.) - VLH 3550</b>				
■ Groupe suréquipement 13 m3/s (270 kW)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Option fourniture et montage de 1 VLH 3550 (Voir information méca)</li> <li>■ Batardeau porte d'écluse de l'option 3550 (intégré à l'offre globale)</li> <li>■ Terrassements &amp; déroctages pour excavations au droit du groupe y compris accompagnements (batardeau terre à l'aval, etc...) y compris terrassements pour adaptations périphériques finales</li> <li>■ Installation &amp; chantier Bétons (volume défavorable pour cette option !)</li> <li>y compris adaptation à la configuration imposée par la digue y compris atelier de pompage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>4,79 largeur</li> <li>4,79 largeur</li> <li>4,79 largeur</li> <li></li> <li>9 600 €</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>25 596 €</li> <li>232 300 €</li> <li></li> <li></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>25 596</li> <li>232 300</li> <li></li> <li></li> </ul>
<b>Travaux groupe supp. (+20% Loi Pope) - Option 18,7 m3/s (355 kW) (chute brute 2,40 env.) - VLH 4500 - Option rejetée</b>				
■ Groupe suréquipement 18,7 m3/s (355 kW)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Option fourniture et montage de 1 VLH 4500 (Voir information méca)</li> <li>■ Batardeau porte d'écluse de l'option 4500 (intégré à l'offre globale)</li> <li>■ Terrassements &amp; déroctages pour excavations au droit du groupe y compris accompagnements (batardeau terre à l'aval, etc...) y compris terrassements pour adaptations périphériques finales</li> <li>■ Installation &amp; chantier Bétons</li> <li>y compris adaptation à la configuration imposée par la digue y compris atelier de pompage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>6,06 largeur</li> <li>6,06 largeur</li> <li>6,06 largeur</li> <li></li> <li>9 600 €</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>34 587 €</li> <li>245 771 €</li> <li></li> <li></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li></li> <li></li> <li></li> <li></li> </ul>
<b>Prestations &amp; fournitures liées au groupe supplémentaire VLH (quelle que soit l'option puissance groupe)</b>				
■ Montage VLH sur site	■ Grue montage de VLH quelle que soit l'option (Voir information méca)			
■ Liaison & d'évacuation d'énergie	■ Tranchée pour liaison & évacuation d'énergie	150 ml	21 028 €	21 028
■ Menuiseries pour la VLH (quelle que soit l'option)	■ Câbles liaison & évacuation d'énergie (Voir information élec)		15 702 €	15 702
■ Renforcement en sous œuvre de la passe à poissons	■ Pré-grille gros barreaux, garde corps, rainures batardeages, etc...		9 165	9 165
■ Assise du local technique	■ Option barge flottante lors des crues et amarrages par ducs d'albes		33 585	
	■ Option pilotis (sur puits bétons)		10 650	10 650
Sous total avant actualisation =				en € 314 440
Sous total suréquipement VLH (options plausibles actualisées de base 2010 à 2011) =				en € 330 162
				1,05

# Anexo 6

ST GERY - Liste des prix étudiés				Valeur repère	Montants	Choix concertés
Postes de dépenses	Précisions d'options	Valeur repère	Montants	Version 12/10/2011 selon choix concertés		
<b>Terrassements travaux communs :</b>						
■ Installation de chantier terrassements (Charges fixes)						
■ Coordination SPS pour tous les chantiers sur le site de St Gery			6 619 €		6 619	
■ Digue-épi existante en RG						
■ Batardeau protection amont chantier	Renforcement depuis RG (y cis stabilisation piste depuis pont de D10)	2 mois	68 489 €		68 489	
	■ Première opération de constitution avec appros	60 ml	41 003 €		41 003	
	■ Surcoût palanques adaptées passe à poissons (install/repli)	50 ml	83 059 €		83 059	
	■ Premier retrait entre phases 2012&2013 + loc terrain	6 ml	38 280 €		38 280	
	■ Deuxième opération de constitution (mêmes fournitures)	50 ml	20 018 €			
	■ Retrait définitif	50 ml	36 378 €			
■ Rampe d'accès en RG du plan de grilles	Constitution et repli en fin de chantier	50 ml	15 018 €		15 018	
		32 ml	4 642 €		4 642	257 109
<b>Equipements GC communs :</b>						
■ Drome de protection des embâcles (y compris glissières et floiteurs)						
	■ Dont duc d'albes (compris dans le montant précédent)	60 ml	96 284 €			
■ Drome barrière de sécurité pour kayaks (y compris glissières de manège et débrayage)			46 704 €			
■ Clapet de surface aménagés en rive gauche de la chaussée sur le Lot		50 ml	14 340 €			
			73 500 €			0
<b>Travaux grilles, vantelles &amp; GC sur groupes G1-G2-G3 :</b>						
■ Opération de rénovation des ronds carrés						
■ Pan de grille : Dépose/Repose/Reconstruction	Information méca (élément portés dans les sous totaux de dépenses méca)		255 000 €			
	■ Option dépose/repose avec réparations (campagne 1)	23,78 ml	48 300 €			
	(avec intervention plus lourde plan grilles G2, comprise)	7,26 ml	25 180 €			
	■ Option dépose seulement (reconstruction plan total avec entrefer 7 cm)		10 260 €		10 260	
	■ Option réno 1 seul plan grille (entrefer 7 cm inchangé)	7,26 ml	117 795 €			
	■ Option dépose définitive et valorisation acier	23,78 ml	5 288 €		5 288	
	■ Option goulotte pour plan existant	23,78 ml	38 962 €		38 962	
	■ Option avancée de radier pour plan de grille unique (entrefer 7 cm inchangé)	23,78 ml	96 227 €		96 227	
	■ Terrassements démolitions option nouveau plan de grille unique	23,78 ml	5 377 €		5 377	
	■ Structures béton pour option nouveau plan de grille unique	26,29 ml	7 305 €			
	■ Supports métal (poutrelles) en option nouveau plan grille	26,29 ml	79 474 €			
	■ Supports métal avec entretoises en option nouveau plan grille	26,29 ml	177 821 €			
	■ Goulotte option nouveau plan de grille unique	26,29 ml	193 682 €			
	■ Option nouveau plan de grille (entrefer 2 cm selon exigence adm.)	26,29 ml	58 883 €			
		26,29 ml	137 257 €			
■ Batardeaux de prises équipés en vannes	■ Option construction 3ème batardeau (y compris remise en état des 2 batardeaux existants)		74 341 €		74 341	156 113
	■ Option construction des sommiers (total pour les 3 vannes)		19 335 €		19 335	
	■ Equipement vétrins & oléo-hydraulique (information méca)		90 000 €			
<b>Sous total travaux globaux &amp; groupes G1 G2 G3 (options plausibles actualisées de base 2010 à 2011) =</b>			<b>1,05</b>		<b>93 676</b>	
					en € <b>506 898</b>	
					en € <b>532 243</b>	

# Anexo 7

St GERY - suréquipement VLH 4500 (18,7 m3/s) ou VLH 3550 (13 m3/s) - Chiffrage APS											Version : 23/06/2011	
Postes	Libellé des postes de dépenses	Détails	Pré calcul	u	Pré calcul	u	Q	u	PU	u	Sous totaux	
<i>Ces travaux s'entendent hors réparation de la digue, sur la zone des remants (l'implantation du projet de turbinié des 20% supplémentaires est à priori à prévoir au plus près de la passe à poissons)</i>												
<b>Section de la digue :</b>												
	Linéaire concerné =	10 ml										
	La crête de la digue est à 127,90 NGF		127,90	NGF								
	Le toit rocheux est estimé à 119,00 NGF		119,00	NGF								
	Dimensions digue (Merion principal pentes 1/1) = Reste =	8,90 m (h)										
	Largeur digue à la base =	30,00 ml env	4,00	crête	17,00	l moy			151	m²		
	Risberme en section supplémentaire =	4,70 m (h)	3,00	larg					14	m²		
										165	m²	
											123,18 NGF	
	<i>Le groupe est implanté selon une cote référence de 123,18 mini (RN chaussée)</i>											
	<i>La cote du lit de concession nous imposera un RN à 123,37 NGF (qui sera le calage réel, l'autre cote prise pour le calcul est un peu plus défavorable = plus de décaissé)</i>											
	<i>Rappel : Le toit rocheux est estimé à 119,00 NGF</i>											
	Total terrains instables (TN et enrochements de la digue) = Reste =	3,58 m (h)										
<b>Terrassements pour groupe VLH 4500 sur digue canal d'aménagé :</b>												
	Variables d'install : Prorata charges fixes (paniers, etc ...)		9	j			3	ouv	100	€j	850	
	Variables d'install : Bungalow vestiaire-réfectoire, toilettes		9	j			2	u	10	€j	170	
	Variables d'install : Véhicules de liaison (4x4) terrassements		9	j					83	€j	706	
	<b>Dimensions caractéristiques pour insertion</b>											
	Largeur pertuis =	6,06 m										
	Largeur mini terrassement (en radier) =	6,86 m										
	Profondeur utile à l'aval du groupe =	5,25 m (h)										
	Décaissé maxi à l'aval du groupe =				5,75	m (h)						
	Rappel hauteur terrains instables (TN et enrochements de la digue) =				3,58	m (h)						
	Hauteur terrains rocheux à dérocter = Reste =				2,17	m (h)						
	Longueur aval groupe VLH à dérocter sous la digue =	15,00 ml env										
	Emprise à dérocter par forages + minages =	102,90 m²			2,17	m (h)						
	Longueur à dérocter à l'aval (canal de chasse rampe à 7% maxi) =	31,00 ml			223,29	m³			50	€/m³	11 165	
					106,33	m³			50	€/m³	5 316	
	<b>Volumes à bouger :</b>											
	<i>Les terrassements se feront avec une pente talus supérieure à 1/1 du fait de la présence d'enrochements.</i>											
	<i>(D'un côté seulement, de l'autre côté, c'est le passe à poissons qu'il faudra envisager de renforcer en sous oeuvre)</i>											
	Volume équivalent sur largeur canal =	165,40 m³			1 135	m³						
	Rappel hauteur pour talutage à 2/1 =	8,90 m (h)										
	Largeur sur un côté pour talutage à 2/1 =	4,45 m										
	Volume équivalent sur un côté de talutage =				368	m³						
	Volume talutage résiduel estimé côté passe à poissons =	1/4			92	m³						
	Perimètre/volume des terrassements =				1 595	m³						
	Rendement d'un dumper (temps complet d'une noria)	15 m³	106	norias	0,17	h			18,07	h		
					2,58	j			3	j		

# Anexo 8

Répartition des temps estimés :					
Pelle: Retrait enrochements & dépôt à proximité	1 j	8 h	100 €/h	800	
Pelle: Travaux de masse en déblais au droit de la VLH	2 j	16 h	100 €/h	1 600	
Autres estimations de temps :					
Pelle: Remise enrochements pour raccordements et adaptation aval	1 j	8 h	100 €/h	800	
Pelle: Terrassements de raccordements de la digue (hors réparations)	1 j	8 h	100 €/h	800	
Pelle: Constitution batardeau de protection (matériaux tirés de la digue)	1 j	8 h	100 €/h	800	
Pelle: Travaux de masse pour adaptations finales à l'aval	2,5 j	20 h	100 €/h	2 000	
M/Oe terrassements (Pilotage dumper, compacteur, pelle)	2 ouv	9 j	40 €/h	5 440	
Compacteur		2 j	200 €/j	400	
Dumper capacité 15 m3 pour évacuations des déblais		9 j	440 €/j	3 740	
				<b>Sous total terrassements VLH4500 =</b>	<b>34 587 €</b>
<b>Terrassements pour groupe VLH 3550 sur digue canal d'aménée :</b>					
Variables d'install : Prorata charges fixes (paniers, etc ...)	7,5 j		3 ouv	100 €/j	750
Variables d'install : Bungalow vestiaire-réfectoire, toilettes	7,5 j		2 u	10 €/j	150
Variables d'install : Véhicules de liaison (4x4) terrassements	7,5 j			83 €/j	623
Dimensions caractéristiques pour insertion					
Largeur pertuis =		4,79 m			
Largeur mini terrassement (en radier) =		5,59 m			
Profondeur utile à l'aval du groupe =		4,70 m (h)			
Décaissé maxi à l'aval du groupe =		5,20 m			
Rappel hauteur terrains instables (TN et enrochements de la digue) =		3,58 m (h)			
Hauteur terrains rocheux à dérocter = Reste =		1,62 m (h)			
Longueur aval groupe VLH à dérocter sous le digue =		14,00 ml env			
Emprise à dérocter par forages + minages =		78,26 m²	1,62 m (h)		
Longueur à dérocter à l'aval (chenal de chasse rampe à 7% maxi) =		23,14 ml	126,78 m³	50 €/m³	6 339
			64,68 m³	50 €/m³	3 234
Volumés à bouger:					
<i>Les terrassements se feront avec une pente talus supérieure à 1/1 du fait de la présence d'enrochements.</i>					
<i>(D'un côté seulement, de l'autre côté, c'est la passe à poissons qu'il faudra envisager de renforcer en sous œuvre)</i>					
Volume équivalent sur largeur chenal =	165,40 m²		2/1 pente		925 m³
Rappel hauteur pour talutage à 2/1 =	8,90 m (h)				
Largeur sur un côté pour talutage à 2/1 =	4,45 m				
Volume équivalent sur un côté de talutage =					368 m³
Volume talutage résiduel estimé côté passe à poissons =	1/4				92 m³
Périmètre/volume des terrassements =	1 385 m³				
Rendement d'un dumper (temps complet d'une noria)	15 m³	92 norias	0,17 h	15,69 h	
			2,24 j	2,5 j	
Répartition des temps estimés :					
Pelle: Retrait enrochements & dépôt à proximité	1 j	8 h	100 €/h	800	
Pelle: Travaux de masse en déblais au droit de la VLH	1,5 j	12 h	100 €/h	1 200	
Autres estimations de temps :					
Pelle: Remise enrochements pour raccordements et adaptation aval	1 j	8 h	100 €/h	800	

# Anexo 9

Pelle: Terrassements de raccordements de la digue (hors réparations)	1 j	8 h	100 €/h	800	
Pelle: Constitution batardeau de protection (matériaux tirés de la digue)	1 j	8 h	100 €/h	800	
Pelle: Travaux de masse pour adaptations finales à l'aval	2,0 j	16 h	100 €/h	1 600	
M/Oe terrassements (Pilotage dumper, compacteur, pelle)	2 ouv	7,5 j	40 €/h	4 800	
Compacteur		2 j	200 €/j	400	
Dumper capacité 15 m3 pour évacuations des déblais		7,5 j	440 €/j	3 300	
				<b>Sous total terrassements VLH3550 =</b>	<b>25 596 €</b>
<b>Tranchée :</b>					
<i>Cette tranchée sera de préférence placée sur la crête de la digue (constitue en enrochement) &gt; difficulté &gt; majorer coût</i>					
Tranchée de liaison & évacuation d'énergie	170,00 ml				
Linéaire à aménager dans digue reconstruite =	55,00 ml	26 €/ml	1,0 maj	26 €/ml	1 430
Linéaire à aménager dans digue conservée =	115,00 ml	26 €/ml	1,2 maj	31 €/ml	3 588
Regards de tirages	4 u			407 €/u	1 628
Foureaux	3 u	170,00 ml	510,00 ml	28,20 €/ml	14 382
				<b>Sous total tranchée de liaison &amp; évacuation énergie =</b>	<b>21 028 €</b>
<b>GC pour la VLH 3550 :</b>					
<i>Les mises en place chantier sont déjà comptées ailleurs (en ensemble chantier)</i>					
<i>Les prix sont calés sur Comminges Bâtiment qui ont réalisé plusieurs ouvrages et ont fait partie des rationalisations du GC pour ces groupes VLH.</i>					
<i>Montant total dans une configuration sans autre suggestion = 107 029 €</i>					
Fourniture (bétons, armatures) et immo coffrages et MOe comprises dans les ratios suivants:					
Estimatif selon durée indiquée chantier St Martory (2 groupes) :	1,8 mois	44 j	9 sem		
Variables d'install : Prorata charges fixes (paniers, etc ...)	44 j	3 ouv	100 €/j	4 375	
Variables d'install : Bungalow vestiaire-réfectoire, toilettes	44 j	2 u	10 €/j	875	
				<b>6 100 Forfait =</b>	<b>6 100</b>
Bétons de propreté		78,26 m²	36 €/m²	2 817	
Radier BA	78,26 m²	47 m³	640 €/m³	30 052	
Voiles BA groupe et traversée digue	Surface d'un voile = 165 m²	2 u	165 m³	795 €/m³	131 493
Voiles BA guideaux latéraux aval	14,00 ml				
Hauteur résiduelle guideaux =	2,00 m (h)	0,40 epr	22 m³	795 €/m³	17 808
Déflecteur aspirateur en BA	1 u			10 530 €/u	10 530
Bétons de 2ème phases (selon guide VLH)	1 u			8 480 €/u	8 480
Passerelle BA	2 u			4 000 €/u	8 000
Regard technique abord immédiat du groupe	1 u			1 280 €/u	1 280
Réservations				1 990 Forfait	1 990
Installation (main d'œuvre + amenée pompe)				800 Forfait	800
Location & fonctionnement atelier de pompage	44 j			176 €/j	7 700
				<b>Sous total bétons pour la VLH3550 =</b>	<b>232 300 €</b>
				<b>Sous total atelier pompage pour la VLH3550 =</b>	<b>8 500</b>
<i>Ce total tient compte de toutes les suggestions pour les bétons à adapter à la configuration locale (très défavorable à cette option !)</i>					



# Anexo 10

