

# NOTE TECHNIQUE

## ANGOSTURA

**Projet** Fisuras en rodets – Fase 2 – Conclusiones y recomendaciones

**Référence**

**Date** 06/11/2018

**Indice** B

**35 page(s)**

**2 annexe(s)**

**Résumé** El informe presenta las conclusiones y recomendaciones de EDF para explicar y solucionar las problemas de fisuras

**Unité propriétaire** DPIH

**Sous-Unité** CIH

**Site** Le Bourget du Lac

**Entité rédactrice** Direction Développement Externe

**Auteur(s)** S Guyot – T Sautereau

**EOTP** E124/024350/E8HCOLB-EXP2

**Accessibilité** Restreint

(Classification et règles de protection des informations d'EDF SA, DSIE-2017-000046.)

**Confidentiel** (Lister nominativement en page 2 Diffusion : les personnes destinataires)

**Restreint** (Indiquer explicitement en page 2 Diffusion : les destinataires (nom ou fonction) ou de manière implicite le périmètre restreint retenu : Projet, groupe de personnes, ...)

**Interne** (Indiquer le périmètre d'accès retenu : EDF SA, Direction, Division, Entité, Projet, Liste de diffusion)

**Libre** (Accessible à tout public interne ou externe EDF SA)

SIGNATURES						
Date	Rédacteur(s)		Vérificateur(s)		Approbateur(s)	
	Nom	Visa	Nom	Visa	Nom	Visa
7/06/2018	S Guyot	SGt	G Duc	GDc	D Surla	DSa
27/06/2018	T Sautereau	TSu				
06/11/2018	T Sautereau	TSu				

LIEU DE CONSERVATION	
Original papier	Original numérique
/	

DIFFUSION INTERNE AU CIH			
Destinataire	Département / Service	Nb ex.	Format
D Surla	Direction Développement Externe		@

DIFFUSION EXTERNE AU CIH			
Destinataire	Organisme	Nb ex.	Format
Bernardo Suarez Miranda	Colbun		@

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS		
Ind.	Date	Nature des évolutions
A0	2/07/2018	Primer borrador
A	27/08/2018	Estado final con la adición de un anexo
B	06/11/2018	Adición de un segundo anexo (Anexo 2)

## SOMMAIRE

<b>1. CONTEXTO.....</b>	<b>4</b>
<b>2. ANÁLISIS DE LOS MODOS DE EXPLOTACIÓN DE LOS GRUPOS .....</b>	<b>5</b>
2.1 SITUACION ACTUAL.....	5
2.2 RANGOS DE FUNCIONAMIENTO CONTRACTUALES .....	7
2.3 INESTABILIDAD HIDRÁULICA EN EL RANGO DE FUNCIONAMIENTO CONTRACTUAL .....	8
2.4 CONDICIONES EFECTIVAS DE EXPLOTACIÓN DE LOS GRUPOS DE ANGOSTURA.....	12
2.5 AMBIGÜEDAD EN LA DURACIÓN CONTRACTUAL PERMITIDA EN EL RANGO DE FUNCIONAMIENTO TEMPORAL.....	15
2.6 PARADAS REALIZADAS POR EL CONSTRUCTOR PARA OPERAR MÁS ALLÁ DE LAS CONDICIONES NORMALES DE FUNCIONAMIENTO DE LAS RODETES FRANCIS.....	16
2.7 EFICACIA DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE AIRE COMPRIMIDO .....	16
2.8 DAÑOS POR FATIGA MECÁNICA.....	18
<b>3. ANÁLISIS DEL EXPEDIENTE DE FABRICACIÓN Y DE LOS INFORMES DE INSPECCIÓN DE LAS RODETES .....</b>	<b>20</b>
3.1 EXPEDIENTE DE FABRICACIÓN .....	20
3.2 INFORMES DE INSPECCIÓN DE LAS RODETES .....	20
3.3 EXAMEN DE LAS INDICACIONES .....	21
3.4 EXAMEN DE LOS PROCESOS DE REPARACIÓN Y CONTROL .....	22
3.5 SÍNTESIS Y CONCLUSIÓN.....	23
<b>4. RECOMENDACIONES DE EDF .....</b>	<b>25</b>

**ANEXO 1 – Mediciones de ruido y presión**

**ANEXO 2 – Medidas inutilizables de presión del difusor**

## 1. CONTEXTO

La central hidroeléctrica de Angostura dispone desde 2014 de tres rodets Francis, dos de ellas de 144 MW y la otra de 47 MW de potencia. Según el explotador, desde su puesta en servicio en 2014 los grupos funcionan en un intervalo comprendido entre 144 mW y 33.6 MW para los grupos n°1 y n°2, y entre 47 MW y 8.4 MW para el grupo n°3.

En su inspección anual de rodets, los explotadores de COLBUN Angostura detectan desde 2016 signos puntuales de fisuras. COLBUN ha solicitado por tanto el asesoramiento de EDF para determinar el origen de estas disfunciones.

A tal efecto y en una primera fase, Colbun transmitió a EDF una documentación técnica sobre estos tres grupos. Entre otros aspectos, la documentación incluye: informes de fabricación de las rodets, informes de inspección y reparación de las rodets, los informes de pruebas hidromecánicas del constructor, notas de cálculo de las rodets con algunos planos de las turbinas, los rangos contractuales de funcionamiento permanente y temporal, etc. El análisis de EDF de este expediente técnico se sometió a un primer informe de análisis sobre los factores susceptibles de provocar las disfunciones que han aparecido en los rodets.

Posteriormente, la segunda fase del apoyo técnico consistió en la intervención in situ de dos especialistas de EDF durante el periodo de reparación del rodete del grupo 3. Uno es especialista en turbinas hidroeléctricas, y el otro en materiales y soldaduras. Su misión consistió, por una parte, en examinar y analizar in situ las condiciones efectivas de control y reparación de las rodets y, por otra, en aclarar con el personal de Colbun las condiciones reales de explotación de los grupos, intercambiar sobre ciertos puntos del expediente técnico transmitido en la primera fase y obtener información técnica adicional para ampliar el campo de investigación. En particular, EDF ha podido consultar los dos informes de pruebas de los modelos a escala reducida y obtener historiales de explotación relevantes de los tres grupos desde 2014.

Por tanto, este documento constituye el informe de investigación para esta segunda fase de apoyo técnico, que modifica y complementa el primer informe de análisis de la primera fase.

## 2. ANÁLISIS DE LOS MODOS DE EXPLOTACIÓN DE LOS GRUPOS

### 2.1 SITUACION ACTUAL

La información recogida durante la visita sobre el terreno de EDF en mayo de 2018 permite establecer el siguiente estado:

Los años y las localizaciones de las fisuras aparecidas y reparadas desde 2014 (año de puesta en servicio de los grupos) se especifican en las tablas siguientes.

UNIDAD N°1										
Paradas/Arranques	119	118	75	74	87	87	178	180	75	74
Horas Funcionamiento entre Mantenimientos	4645		769		4467		1669		6111	
ALABE	2014		2015		2016		2017		2018	
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-
5	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	X	-	X	-
10	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X

UNIDAD N°2										
Paradas/Arranques	148	149	30	30	240	237	220	220	181	181
Horas Funcionamiento entre Mantenimientos	3928		172		4204		2784		5927	
ALABE	2014		2015		2016		2017		2018	
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	X	-	-	-	X	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

UNIDAD N°3										
Paradas/Arranques	208	210	114	113	326	328	252	252	131	132
Horas Funcionamiento entre Mantenimientos	2770		3448		3754		5286		1997	
ALABE	2014	2015	2016	2017	2018					
1	-	-	-	-	-					
2	-	-	-	-	-					
3	-	-	-	-	-					
4	-	-	-	-	-					
5	-	-	-	-	-					
6	-	-	-	-	-					
7	-	-	-	-	-					
8	-	-	-	-	X					
9	-	-	-	-	-					
10	-	-	-	-	-					
11	-	-	-	-	-					
12	-	-	-	-	-					
13	-	-	-	-	-					

*Nota: no se consideran indicaciones (porosidades) ni micro fisuras causadas por ésta.*

El número acumulado de arranques, paradas y horas de funcionamiento por año y grupo se indica en las tres tablas siguientes.

Unidade N°1					
	2014	2015	2016	2017	2018
Horas acumuladas	4645	5414	9881	11550	17661
Parades / Arranques acumuladas	237	386	560	918	1067

Unidade N°2					
	2014	2015	2016	2017	2018
Horas acumuladas	3928	4100	8304	11088	17015
Parades / Arranques acumuladas	297	357	834	1274	1636

Unidade N°3					
	2014	2015	2016	2017	2018
Horas acumuladas	2770	6218	9972	15258	17255
Parades / Arranques acumuladas	418	645	1299	1803	2065

Esta información transmitida por el explotador confirma que la distribución de la producción está relativamente bien equilibrada entre los grupos, con una media de casi 3 500 horas de funcionamiento al año por grupo.

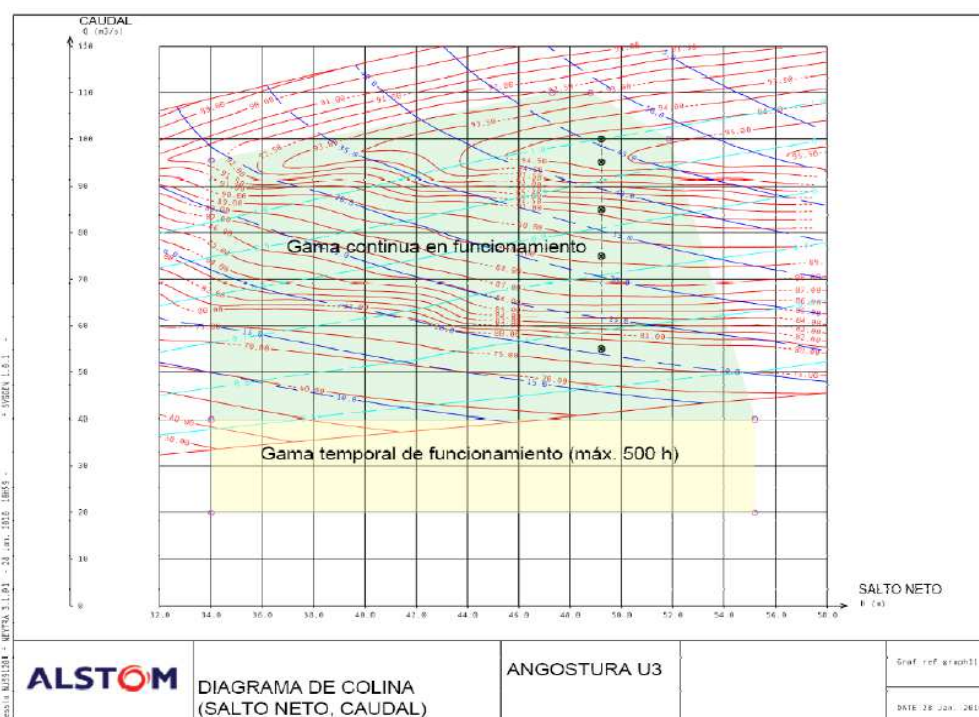
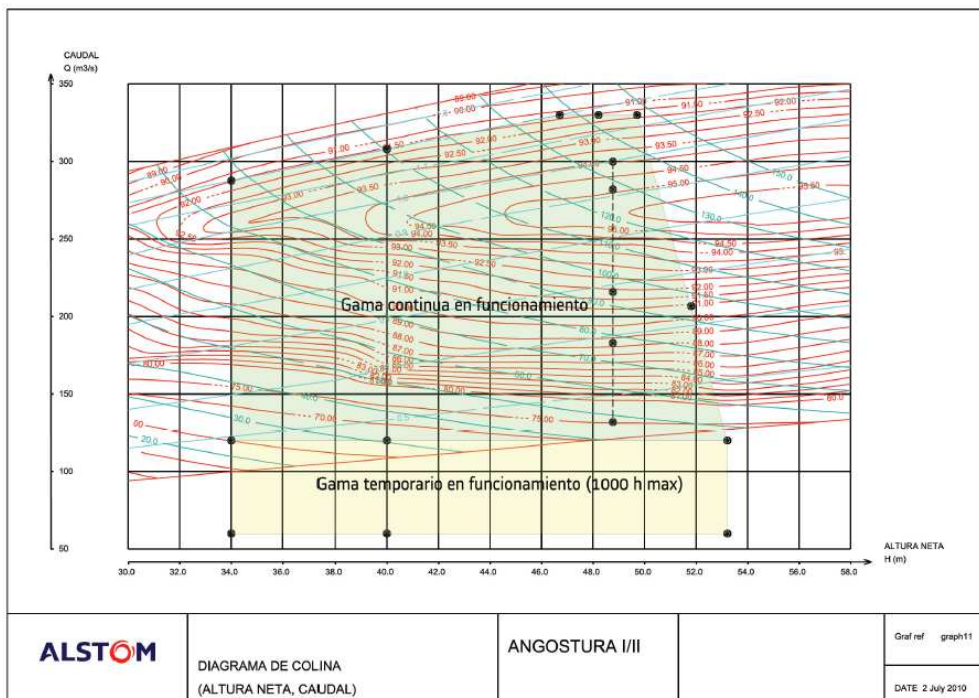
Cabe señalar que el número de horas de funcionamiento y de ciclos de arranque y parada es ligeramente inferior al número de ciclos considerado en la nota de estudio del constructor sobre la resistencia a la fatiga de la rodete del grupo 3 ("*Runner Fatigue Calculation*", referencia HEU AGT 03 MEA ED 00 017, EDF no ha recibido la nota de cálculo de sobre la fatiga de las rodetes 1 y 2).



## 2.2 RANGOS DE FUNCIONAMIENTO CONTRACTUALES

En términos contractuales, el rango de funcionamiento de los tres grupos está definido en las curvas de rendimiento de las turbinas, en las cuales se delimita una zona de funcionamiento continua (sin límite de tiempo) y una zona de funcionamiento temporal. Según las siguientes curvas de rendimiento del constructor, el rango temporal está limitado en duración a:

- 1000 horas para los dos grupos 1 y 2 por debajo de 120 m<sup>3</sup>/s;
- 500 horas por debajo de 40 m<sup>3</sup>/s para el grupo 3.



Dado que el caudal turbinado no es una cantidad fácilmente accesible por la medida, es preferible intentar definir estos límites de funcionamiento mediante umbrales de potencia. Expresados en potencia, los límites bajos del rango de funcionamiento permanente asociados a estos límites de caudal (120 y 40 m<sup>3</sup>/s) varían obviamente en función de las caídas de explotación. Sin embargo, según la información recogida in situ por EDF, los grupos estarían apenas explotados en toda la gama de la caída neta posible, tal como sugieren las curvas de rendimiento anteriores, sino casi exclusivamente bajo una caída neta situada en torno a 49 mCA. Partiendo de esta hipótesis simplificadora, estos límites de caudal de 120 y 40 m<sup>3</sup>/s corresponden a un límite bajo de 40 MW de potencia para los grupos 1 y 2, y de 12 MW para el grupo 3.

Por lo tanto, considerando que los grupos se explotan casi exclusivamente en torno a 49 mCA, el rango de funcionamiento contractual permanente está aproximadamente definido por un límite de potencia bajo:

- 40 MW para los grupos 1 y 2, es decir el 28 % de la potencia máxima (120/144);
- 12 MW para el Grupo 3, es decir el 26% de la potencia máxima (12/47).

En lo que respecta al rango de funcionamiento temporal, el límite inferior de potencia del rango se define mejor en los anexos 4.4 de los informes de pruebas en modelos reducidos. En las curvas de rendimiento prototipo de este anexo, el límite se dibuja globalmente al nivel del iso-rendimiento 0%, lo que corresponde por definición a los caudales de funcionamiento en vacío de las turbinas. En otras palabras, el explotador es contractualmente libre de hacer que los tres grupos de Angostura funcionen a muy baja carga, hasta 0 MW, siempre que el tiempo total invertido en zonas de alta inestabilidad no exceda de:

- 1000 horas para los grupos 1 y 2 (por debajo del 28% de la potencia máxima);
- 500 horas para el grupo 3 (por debajo del 26 % de la potencia máxima).

#### **Conclusión:**

- Los grupos pueden explotarse contractualmente con cualquier carga, permanentemente hasta potencias menos de la mitad de la potencia nominal, y varios cientos de horas a muy baja potencia.
- EDF considera que estos rangos de funcionamiento contractuales son totalmente inusuales y excesivos.

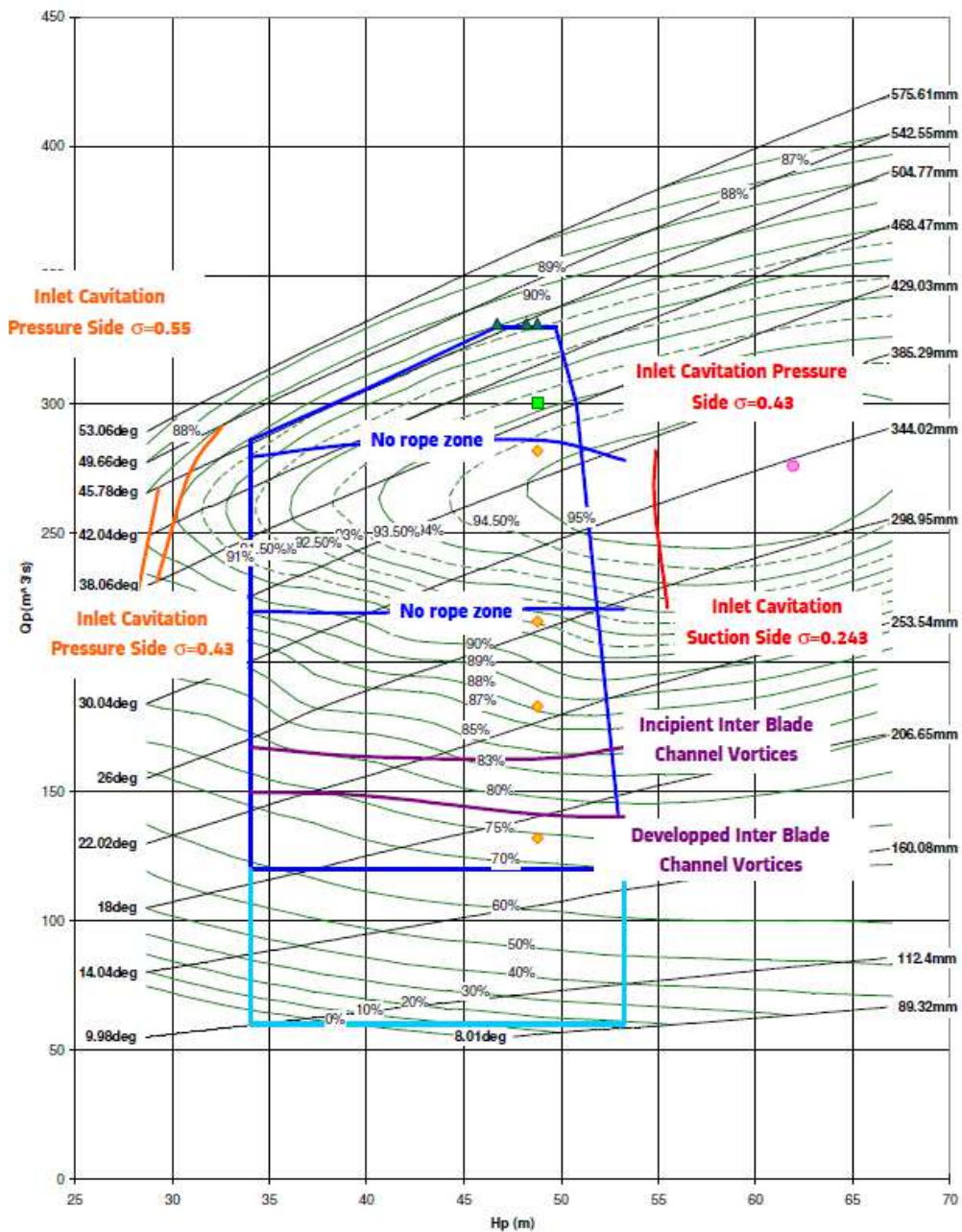
### **2.3 INESTABILIDAD HIDRÁULICA EN EL RANGO DE FUNCIONAMIENTO CONTRACTUAL**

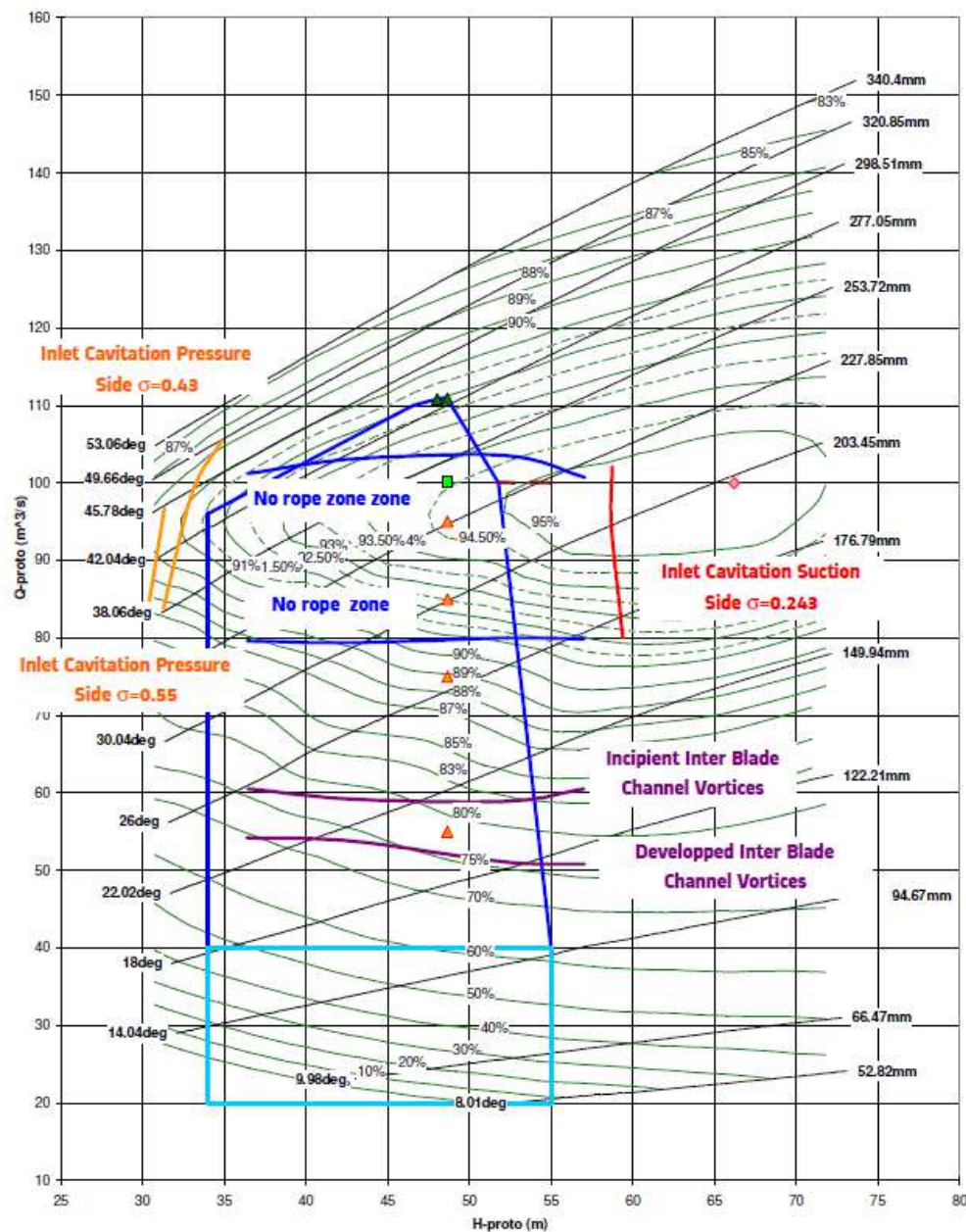
En general, las especificaciones técnicas estándar de EDF para el suministro de un rodete diseñada con un nuevo trazado hidráulico delimitan el límite inferior del rango de funcionamiento permanente al 50% de la potencia máxima. Normalmente no se prevé un funcionamiento temporal por debajo de este límite, salvo en el caso de condiciones específicas de explotación, que son examinadas caso por caso por el Centro de Ingeniería Hidráulica de EDF. Estas restricciones son comparables a las que se recomiendan comúnmente en hidroelectricidad para turbinas Francis.

Los límites de funcionamiento son a veces aún más severos para los rodets Francis de baja caída. De hecho, estos rodets suelen ser de mayores dimensiones y, sobre todo, las zonas de aparición de los vórtices entre álabes están generalmente más cerca del punto de funcionamiento óptimo que para los rodets Francis de caídas elevadas. Así, para evitar el funcionamiento con vórtices pulsantes entre álabes, que se consideran muy perjudiciales para la resistencia mecánica de los rodets Francis, el rango de funcionamiento permanente puede limitarse al 60% de la potencia nominal, mientras que este límite se amplía normalmente al 45% de la potencia nominal para los rodets Francis de caídas elevadas.



En cuanto a los rodets de Angostura, la inestabilidad hidráulica está claramente identificada en los informes de pruebas sobre modelos reducidos, y la transposición de estas zonas a la curva prototipo se presenta en gráficos en el anexo 5.2 de los informes "Informe modelo turbina U3 - U2" e "Informe modelo turbina U3":





Observamos que estas inestabilidades están bien desarrolladas para caudales en torno a 150 m<sup>3</sup>/s para las dos rodets 1 y 2, y en torno a 55 m<sup>3</sup>/s para la rodet 3. En un modelo reducido, la regla que define el límite del "Incipient Inter Blade Chanel Vortex" es el conjunto de puntos de funcionamiento para los cuales son visibles (desde el cono de aspiración) los vórtices entre álabes en al menos 3 canales entre álabes: el constructor obtiene así un límite de 160 m<sup>3</sup>/s para las rodets de Angostura en los dos grupos 1 y 2, y de 60 m<sup>3</sup>/s en el grupo 3.

Como en el capítulo anterior, si se considera la caída habitual de funcionamiento de las turbinas de Angostura de 49 mCA, a estos caudales de 150 m<sup>3</sup>/s y 55 m<sup>3</sup>/s corresponden potencias en torno a 55 MW para los grupos 1 y 2 y de 20 MW para el grupo 3.



Estos rangos inestables, extra idos de los informes de prueba en modelos reducidos, se definen para niveles de restitución estándar aguas abajo que parecen algo elevados respecto a las condiciones habituales de la instalación. De hecho, las fronteras de los vórtices entre álabes mencionados anteriormente se habrían trazado para un nivel aguas abajo de 166,89 m. No obstante, parece que, cuando los grupos pueden funcionar en la zona de v rtice entre álabes, el nivel aguas abajo más probable estaría entre 163 y 164 m. Esta duda queda por aclarar, en la medida en que si se confirmara, la frontera de los vórtices entre álabes sería de hecho más elevada.

### Conclusión:

1. Para evitar funcionar con vórtices entre álabes, respecto a los cuales se sabe que producen daños rápido en las rodets debido a fenómenos de fatiga mecánica, los grupos de Angostura deben ser explotados por encima de:
  - a. 55 MW para los grupos 1 y 2;
  - b. 20 MW para el grupo 3.
2. Estos límites se incrementan si el nivel aguas abajo se establece por debajo de 166,89 m durante la explotación.
3. No existe correspondencia entre estos límites de inestabilidad y los rangos de funcionamiento contractuales.
4. Los límites de 55 y 20 MW definidos para reducir el índice de degradación en las rodets de Angostura siguen siendo aproximados, y podrían definirse mejor mediante el análisis de frecuencia de las pulsaciones de presión a diferentes cargas: la aparición espectral en una gama de frecuencias más allá de la frecuencia de rotación puede ser un signo de la existencia de vórtices entre álabes. Sin embargo, seguir  siendo difícil predecir su nocividad.
5. En el mejor de los casos, las medidas embarcadas de tensiones mecánicas en los álabes permitirían definir muy claramente los límites de baja potencia para obtener un buen control del compromiso entre las limitaciones de explotación y la nocividad del funcionamiento con cargas parciales y con cargas muy bajas.

## 2.4 CONDICIONES EFECTIVAS DE EXPLOTACIÓN DE LOS GRUPOS DE ANGOSTURA

La siguiente tabla, construida por el explotador, contiene [de forma aproximada] el número de horas durante las cuales las turbinas han funcionado dentro del rango de funcionamiento contractual temporal, es decir por debajo de 120 m3/s para los dos grupos 1 y 2 y de 40 m3/s para el grupo 3:

HOARS CON CAUDAL IGUAL O MENOR A 120 m3/s					HORAS CON CAUDAL IGUAL O MENOR A 40 m3/s		
AÑOS	U-1	U-1 acumuladas	U-2	U-2 acumuladas	AÑOS	U-3	U-3 acumuladas
2014	633	633	262	262	2014	193	193
2015	147	780	177	439	2015	143	336
2016	200	980	351	790	2016	27	363
2017	138	1118	410	1200	2017	123	486
2018	37	1155	49	1249	2018	6	492

Se observa que:

- Para los dos grupos 1 y 2, el límite de 1000 horas de funcionamiento con cargas muy bajas (inferiores a 120 m3/s) se alcanzó en 2017;
- Para el grupo 3, el límite de 500 horas con cargas muy bajas (inferiores a 40 m3/s) se alcanzar  probablemente antes de finales de 2018.

Las primeras fisuras aparecieron aproximadamente incluso en el momento en que los tiempos de funcionamiento acumulados en el rango temporal superaban estos límites contractuales: esta concomitancia se analiza en el apartado "*Ambigüedad de la duración contractual permitida en el rango de funcionamiento temporal*".

El examen del número de arranques y paradas no requiere ningún comentario particular.

Durante la inspección de los especialistas de EDF, el explotador especificó la forma en que suelen explotarse los grupos:

- cada hora, los grupos 1 y 2 reciben una norma de potencia entre 144 y 33 MW para los grupos 1 y 2, y entre 47 y 8 MW para el grupo 3;
- para los grupos 1 y 2, uno permanece en su norma de potencia, mientras que el otro se explota en torno a la norma en un intervalo de +/- 10 MW dependiendo de las necesidades de ajuste de la red eléctrica;
- el grupo 3 varía en torno a su punto de norma en función de las necesidades de ajuste de la red eléctrica;
- el explotador permuta regularmente la función de cada uno de los dos grupos 1 y 2 para, globalmente y durante un largo periodo de tiempo, equilibrar su funcionamiento.

Sobre la base de estas reglas de explotación, Colbun ha transmitido a EDF (archivo "*Valores Horario Central Angostura 2017-2018.xlsx*", transmitido por correo electrónico el 8/06/2018) el historial horario de las normas de potencia de los tres grupos para 2017 y para principios de 2018.

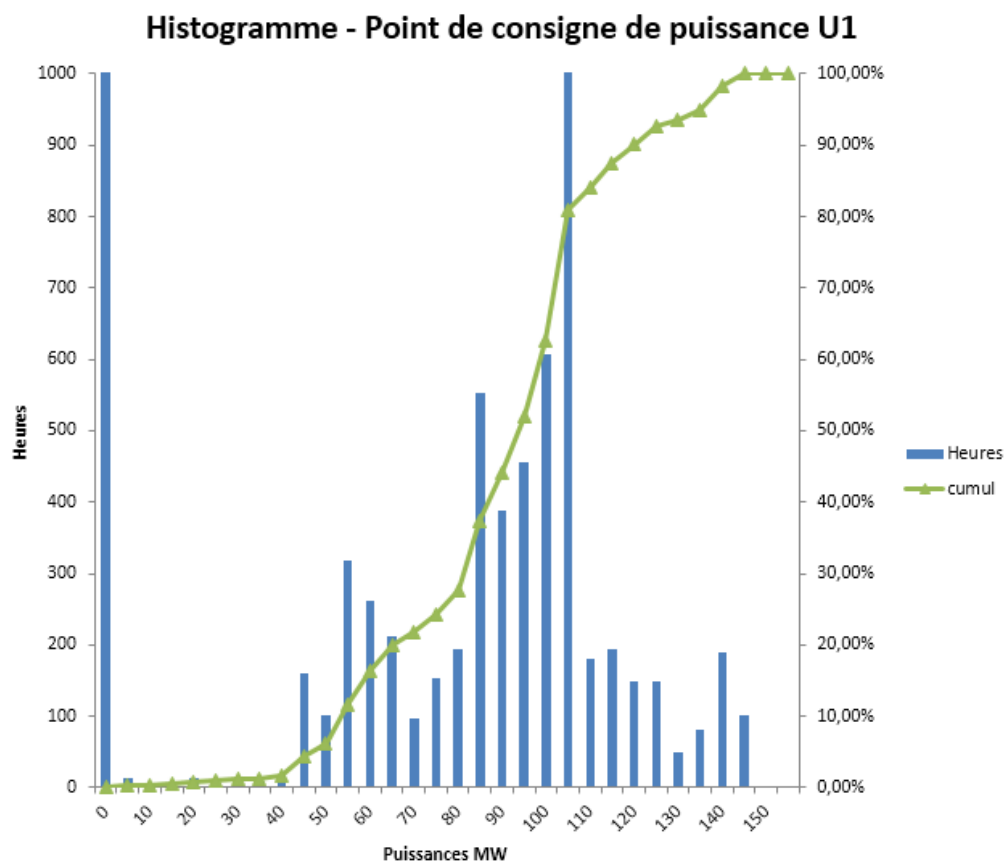
Partiendo de esta base de datos, EDF ha calculado para 2017 los histogramas de estos puntos de norma de potencia para los tres grupos de Angostura. Para cada intervalo de potencia eléctrica por grupos, los histogramas dan el número de horas de explotación con un punto de norma de potencia situado en este intervalo (en torno al cual la potencia puede variar en +/- 10

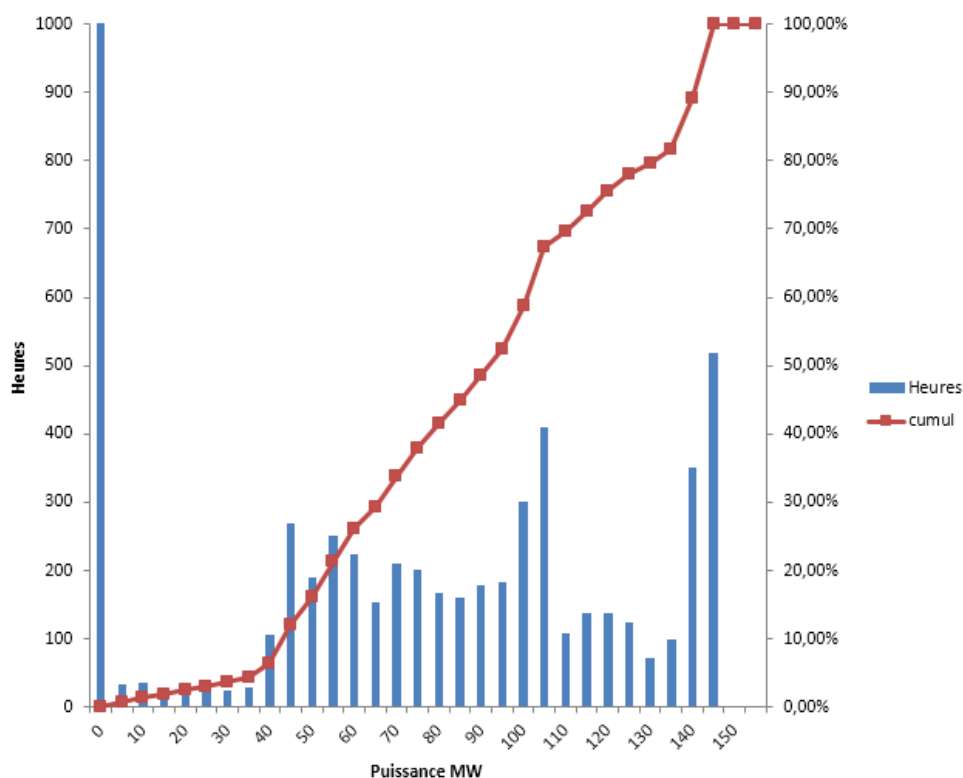
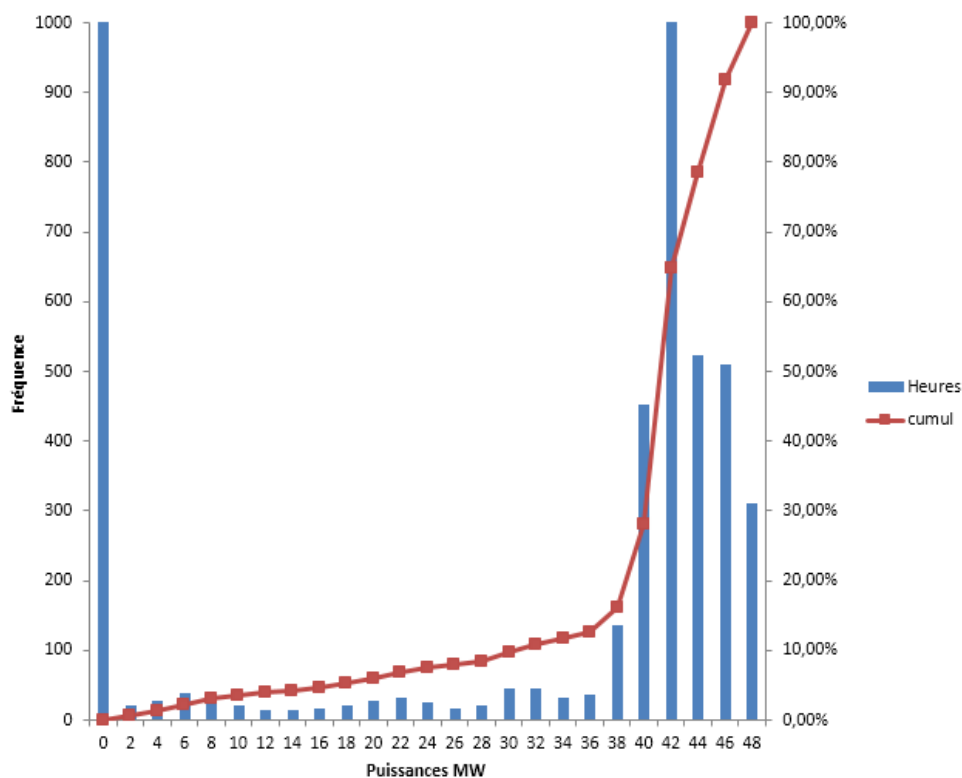


MW en al menos un grupo). Los histogramas también especifican el porcentaje de tiempo de explotación pasado con un punto de norma menor o igual al intervalo de potencia.

Por lo tanto, se observa que el tiempo invertido en explotar las zonas de flujo inestables está lejos de ser insignificante:

- unas 500 horas en 2017 para el grupo 1;
- 700 a 800 horas para el grupo 2;
- aproximadamente 300 horas para el Grupo 3.



**Histogramme - Point de consigne de puissance U2**

**Histogramme - Point de consigne de puissance U3**




### Conclusión:

1. Se observa a lo largo de 2017 que los tiempos de funcionamiento en las zonas afectadas por los vórtices entre álabes distan mucho de ser insignificantes. No hay duda de que estas condiciones particulares de explotación para grupos Francis de baja caída tienen un impacto muy negativo en la vida útil de los rodetes.
2. Si se dispone de los historiales de funcionamiento, podrían calcularse histogramas de años anteriores y compararse con los tiempos de detección de grietas.

## 2.5 AMBIGÜEDAD EN LA DURACIÓN CONTRACTUAL PERMITIDA EN EL RANGO DE FUNCIONAMIENTO TEMPORAL

- ✓ Para poner en perspectiva los tiempos contractuales permitidos para los diferentes rangos de funcionamiento de Angostura, EDF indica que el referencial interno de EDF para la explotación de turbinas hidráulicas de reacción (referencia EDF : IT-RT 11704) prescribe a los explotadores que no rebasen las 25 horas de funcionamiento al año en los rangos de explotación en los que las pulsaciones de presión en los aspiradores son elevadas (con cargas bajas, especialmente en el caso de los rodetes Francis). Según estas recomendaciones, considerando una vida útil de los rodetes de 40 años, a 25 horas de funcionamiento al año corresponden un total de 1000 horas en toda la vida útil de los rodetes. Por esta razón, EDF consideró inicialmente que los límites temporales estipulados para los rangos de funcionamiento temporales deberían entenderse a lo largo de la vida útil de las turbinas, y no por año.
- ✓ Por el contrario, Colbun ha indicado que siempre ha explotado su parque de turbinas hidráulicas (Francis, Kaplan y Pelton) a baja carga durante periodos comparables a los contratados para Angostura. Las turbinas hidroeléctricas del parque de Colbun se explotan normalmente en sus rangos de funcionamiento temporalmente por periodos entre 500 y 1000 horas al año, sin que los rodetes se vean afectados por problemas de fisuración de los álabes. Por consiguiente, parece natural para Colbun que el límite de duración contractual estipulado para Angostura se entienda por año de explotación, y no durante la vida útil de las turbinas.

Es muy probable que la ambigüedad relativa al periodo para el cual deben considerarse los límites de 1000 o 500 horas no figure explícitamente en los documentos contractuales (las cláusulas técnicas contractuales no se han remitido a EDF). Si por ejemplo se toman como referencia las garantías sobre la resistencia de los rodetes a la erosión por cavitación, que se evalúan en el primer o segundo año de explotación de las máquinas (de acuerdo con la norma IEC 60609), el contrato con el constructor especifica que la garantía [de cavitación] se mantiene mientras el tiempo de funcionamiento en el rango temporal no exceda, por año, de 1.000 horas para los grupos 1 y 2, y de 500 horas para el grupo 3. Sin embargo, la cláusula no especifica que la garantía de resistencia a la fatiga del rodete se aplique con las mismas restricciones de funcionamiento.

Por otra parte, al leer el párrafo 3.5 del entregable "*Runner Fatigue Calculation*", referencia HEU AGT 03 MEA ED 00 017, queda claro que el constructor considera estas 500 horas como un límite por año. De tal forma, la tabla de ciclos da una relación de 9 entre los ciclos de "*potencia máxima*" y "*potencia reducida*", que corresponde al tiempo de funcionamiento anual en el rango permanente (4500 horas) en el tiempo permitido en el rango temporal (500 horas).

Del mismo modo, si el documento de estudio de la fatiga existe para los dos grupos 1 y 2 (este documento no se ha transmitido a EDF), sería muy instructivo investigar si la misma observación puede aplicarse a estos dos grupos.

**Conclusión:**

Parece legítimo considerar los periodos de 1000 y 500 horas como límites contractuales por año de explotación. No obstante, estas garantías parecen excesivas para EDF.

## 2.6 PARADAS REALIZADAS POR EL CONSTRUCTOR PARA OPERAR MÁS ALLÁ DE LAS CONDICIONES NORMALES DE FUNCIONAMIENTO DE LAS RODETES FRANCIS

Teniendo en cuenta estas condiciones contractuales particularmente exigentes en los rangos de funcionamiento, se asume que el constructor de las turbinas ha tomado medidas de diseño específicas para que, en particular, sean aptas para:

- el funcionamiento continuo con cargas relativamente bajas, autorizadas en el rango de funcionamiento continuo (por debajo de 0,3 Pn);
- el funcionamiento durante periodos bastante largos con cargas muy bajas (es decir, 1000 o 500 horas al año).

El uso de la inyección forzada de aire en la rodete mediante dos compresores de aire es probablemente uno de los medios aplicados por el constructor para llevar los límites del rango de funcionamiento a bajas potencias. Sin embargo, sobre la base de los documentos transmitidos por Colbun, EDF no ve ninguna otra disposición de diseño aplicada por el constructor para hacer que las turbinas sean más resistentes a estas condiciones de explotación inestables:

- ni desde el punto de vista del perfil hidráulico, sobre la constatación de las excelentes prestaciones del rendimiento hidráulico, que generalmente van de la mano con los perfiles de grosores débiles, por lo tanto menos duraderos;
- ni desde el punto de vista de la fabricación, sobre la constatación de la elección de un acero de resistencia mecánica relativamente baja (acero inoxidable 316 L en lugar de una soldadura homogénea de acero martensítico 13-4).

**Conclusión:**

No se han detectado ejecuciones en el diseño de la turbina, aparte de la inyección de aire comprimido, que hubieran permitido explotar las máquinas en un rango de funcionamiento particularmente amplio para una rodete Francis.

## 2.7 EFICACIA DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE AIRE COMPRIMIDO

En general, se reconoce que la inyección de aire forzado tiende a reducir significativamente la amplitud de las fluctuaciones de presión de la turbina, y EDF ya ha verificado en el prototipo que estas disminuciones de amplitud de la presión están directamente relacionadas con una cierta reducción de los daños en los rodets.

De hecho, para una de las plantas del parque EDF, muy similar a Angostura en velocidad específica de las rodets (planta de Quinson con una turbina Francis de 40 MW, 105 m<sup>3</sup>/s bajo 45 mCA), el explotador quería estudiar las posibilidades de explotación en una gama de potencias más amplia reduciendo el límite inferior del rango de funcionamiento (establecido desde el principio en 80 m<sup>3</sup>/s). Para ello, el rodete prototipo se equipó con galgas extenso métricas para tomar lecturas de todas las cargas para diferentes configuraciones de inyección de aire forzado en el rodete (foto inferior). Las medidas mostraron una reducción a la mitad de las amplitudes oscilatorias de las tensiones mecánicas del rodete con una inyección de aire del orden del 0,25 % del caudal turbinado, para funcionamiento a media carga. Sin embargo, a cargas muy bajas, las amplitudes se mantuvieron elevadas a pesar de la inyección de aire.



En el caso de Angostura, el informe de prueba sobre los modelos reducidos de los grupos U1 y U2 (apartado 7) afirma paradójicamente que la inyección forzada de aire en el modelo no tuvo una influencia significativa en las amplitudes de fluctuación de presión. Para el grupo 3, no se encuentran en el informe de pruebas constataciones del constructor que especifiquen el efecto de la inyección de aire comprimido. Cabe señalar que los informes de pruebas tampoco especifican los efectos de la inyección forzada de aire en el rendimiento hidráulico (no será improbable que se produjeran pérdidas de eficiencia en torno al 1%).

Contradictoriamente, los informes de pruebas hidromecánicas realizadas por el constructor sobre los prototipos mencionan efectos significativos de la inyección de aire forzado, dando resultados positivos para reducir la amplitud de las pulsaciones de presión (los efectos de la inyección de aire comprimido en un modelo reducido no se reconocen como transponer en prototipo).

Basándose en estos resultados de pruebas de prototipos, el constructor recomienda en cada uno de estos tres informes diferentes configuraciones para introducir aire en los rodetes:

- Para el grupo 1, inyección de aire forzado en los dos compresores al mismo tiempo, por debajo del 40% de la potencia máxima, en la brida superior (manteniendo cerrada la válvula axial).
- Para el grupo 2, inyección de aire forzado en los dos compresores al mismo tiempo, por debajo del 40% de la potencia máxima, en las bridas superior e inferior (manteniendo cerrada la válvula axial).
- Para el grupo 3, inyección de aire forzado en los dos compresores al mismo tiempo, por debajo del 40% de la potencia máxima, en la brida superior (manteniendo cerrada la válvula axial).

Para EDF, la inyección de aire forzado a través de las bridas superior e inferior está especialmente recomendada para contrarrestar los efectos indeseables de los vórtices entre los álabes. Sin embargo, la razón de las diferentes configuraciones recomendadas por el constructor entre los tres grupos no se entiende bien.

Teniendo en cuenta que los vórtices entre álabes parten de la parte superior del rodete, podría ser interesante evaluar la efectividad de la inyección de aire cuando se inyecta preferentemente en la brida superior en lugar de la brida inferior.

Por último, el constructor recomienda no utilizar la inyección natural a través de la válvula axial. Parece que Colbun no ha seleccionado esta disposición y EDF comparte esta decisión. A la vista

de los tres informes de medidas hidromecánicas del constructor, el mantenimiento cerrado de las válvulas axiales aporta mejoras que siguen siendo muy cuestionables. Por otro lado, el interés de poder aportar a través de esta válvula una gran cantidad de aire durante una parada de emergencia resulta fundamental cuando los cálculos transitorios indican un margen de presión en comparación con el vacío relativamente bajo en la rodete (según el "*Estudio del comportamiento transitorio en regímenes de operación*", referencia HEU AGT 03 MEA ED 00 012, EDF no ha recibido los estudios transitorios de los grupos 1 y 2).

Para la aireación forzada, EDF constata in situ que la planta de Angostura dispone de un sistema de inyección de aire comprimido operativo compuesto por dos compresores de tornillo Atlas Corps, cada uno capaz de suministrar un caudal de 168 l/s (según las condiciones de presión definidas por la norma ISO 1217).

El principio de funcionamiento de los compresores se especifica en la nota de Colbun "*Funcionamiento Sistema Anti Cavitación CHA rev.2*", transmitida por Colbun. Este documento menciona en particular que la inyección de aire se pone en servicio cuando la potencia de los grupos 1 o 2 es inferior a 77 MW, o a 34 MW para el grupo 3. Además, se indica que los dos compresores están programados para funcionar en paralelo en solo uno de los dos grupos 1 y 2 a la vez, con el fin de proporcionar un caudal total de 336 l/s.

El resultado es que 1 o 2 grupos pueden funcionar a veces sin inyección de aire. Por ejemplo, uno de los informes de análisis de Colbun "*Explicación registros funcionamiento compresores 2016*" indica que de un total de 1634 situaciones de explotación del grupo 1 que requerirían inyección de aire, la inyección de aire es efectiva en 912 casos, y en 158 casos dicha inyección no es posible porque el aire se inyecta en los otros grupos. Para los 564 casos restantes, los registros no aclaran la configuración de inyección.

Finalmente, el flujo de aire inyectado parece ser suficiente en comparación con el flujo turbinado: 2x168 l/s frente a 120 m<sup>3</sup>/s representa un porcentaje de inyección del 0,28 %, orden de magnitud habitual que encontramos en la literatura técnica para obtener cierta eficacia. El caudal de aire admitido naturalmente por la válvula axial no se inyecta en el mismo punto del conducto y actúan de manera diferente en las inestabilidades hidráulicas, ya que una actúa en la rodete y apunta a los vórtices entre álabes y la otra en el aspirador y apunta a la antorcha helicoidal de cargas parciales. Sin embargo, la antorcha helicoidal y los vórtices entre álabes pueden interactuar con fenómenos de resonancia en los conductos y pueden modificar la nocividad de las inestabilidades entre álabes.

### Conclusión:

1. La capacidad de los compresores no es suficiente para alimentar los tres grupos.
2. Los umbrales actuales de inyección forzada de aire son adecuados y permiten la inyección de aire cuando los vórtices entre los álabes están presentes en la rodete. No obstante, suele suceder muy a menudo que los grupos se explotan en estas zonas inestables sin inyección de aire.

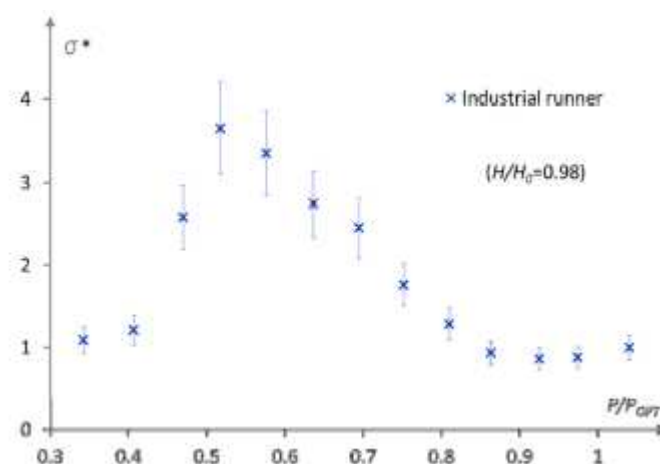
## 2.8 DAÑOS POR FATIGA MECÁNICA

Las amplitudes oscilatorias de las tensiones mecánicas en el rodete no están necesariamente correlacionadas con las amplitudes de fluctuación de presión que pueden medirse en la pared de los conductos. Por lo tanto, es arriesgado tratar de definir las restricciones del rango de explotación sobre la base de las fluctuaciones de presión. Por ejemplo, suele aceptarse que a alta carga el aumento de las pulsaciones de presión en el aspirador no conduce necesariamente a un aumento significativo de las amplitudes oscilatorias de las tensiones mecánicas que ventilan los rodetes Francis. Por el contrario, las fluctuaciones de presión causadas por los vórtices entre álabes dentro de los canales de la rodete pueden no ser fácilmente detectables en la pared de los conductos, pero pueden generar grandes pulsaciones de presión en el espacio entre álabes

de la rodete, causando pues fuertes oscilaciones de tensión mecánica en las uniones del álabe con la cintura y el techo.

Para Angostura, los aspectos de fatiga mecánica fueron estudiados por el constructor en el grupo 3 en su documento "*Runner Fatigue Calculation*", referencia HEU AGT 03 MEA ED 00 017 (EDF no ha recibido el estudio de fatiga para los grupos 1 y 2). En este estudio se examinan los ciclos de tensiones para carga completa y parcial (casos de carga LC44, LC33 y LC34), para los que las amplitudes de las oscilaciones de tensión se estiman respectivamente en un 5% y un 10% de la tensión est tica. Estas hipótesis parecen poco convincentes, ya que los resultados de los cálculos permiten concluir que el grupo puede funcionar indefinidamente con estas cargas reducidas sin que aparezcan daños (ver el apartado 5 del documento). Asimismo, estas hipótesis conducen a amplitudes oscilatorias de tensiones mecánicas prácticamente iguales a la carga nominal y a las cargas parciales (tabla 2 del párrafo 5).

Estos supuestos dan la impresión de que son demasiado conservadores en cuanto a la amplitud de las oscilaciones de tensión mecánica en el rodete. Por ejemplo, según el siguiente gráfico extraído de una publicación de un constructor que equipó un rodete Francis con galgas extenso métricas, existe un ratio muy plausible de 3 a 4 entre las amplitudes de las oscilaciones de tensión en el rodete a plena carga y con carga parcial.



Además, la nota de estudio de la fatiga no tiene en cuenta que el rango de funcionamiento permanente incluye una gran parte de la zona de funcionamiento inestable con vórtices entre álabes: el número de ciclos y la amplitud de las oscilaciones de tensión deberían aumentarse significativamente para un funcionamiento a "potencia reducida".

No obstante, las hipótesis de la nota de cálculo de fatiga para la rodete 3 son mucho más creíbles respecto a los daños relacionados con los ciclos de arranque y parada, puesto que las amplitudes oscilatorias de las tensiones son el resultado directo de los cálculos en est tico, y por lo tanto con buena precisión en los resultados. Estos cálculos muestran que los daños asociados con los ciclos de arranque y parada son bajos.

Las inestabilidades de las cargas medianas que pueden causar estas fisuras pueden ser de dos naturalezas diferentes: la antorcha helicoidal de media carga, fácilmente detectables en la pared del cono del aspirador por sensores de presión, que oscilan con frecuencias del orden de un Hertz, y los vórtices entre álabes, más difíciles de medir, que oscilan a frecuencias de varias decenas de Hertz. Dada la rapidez de la aparición de grietas, parece que son los vórtices entre álabes que est n en el origen de los deterioros por fatiga dada la diferencia de ciclos entre estos dos fenómenos en un período tan corto de operación.



**Conclusión:**

1. Las conclusiones extraídas de la nota de estudio sobre la resistencia a la fatiga del rodete del grupo 3 relacionada con el funcionamiento prolongado con cargas parciales y cargas muy bajas no son sólidas, porque las hipótesis de carga mantenidas sobre las amplitudes oscilatorias de las tensiones son muy discutibles.
2. Los vórtices entre álabes son ciertamente el fenómeno inestable que causa las fisuras.
3. La antorcha helicoidal de media carga probablemente no sea directamente la causa de las fisuras, pero puede interactuar negativamente con los vórtices entre álabes para amplificar los daños.
4. El número de arranques y paradas de los grupos no es responsable de las disfunciones observadas en los rodetes.

### **3. ANÁLISIS DEL EXPEDIENTE DE FABRICACIÓN Y DE LOS INFORMES DE INSPECCIÓN DE LAS RODETES**

#### **3.1 EXPEDIENTE DE FABRICACIÓN**

EDF llevó a cabo una revisión documental de los tres rodetes. Parece que las rodetes de 144 MW se ensamblaron por soldadura en dos talleres diferentes: en Francia para las rodetes de 144 MW (rodetes n°1 y n°2) y en India para la rodete de 47 MW (rodete n°3).

La unión de los álabes en las cinturas y techos se realizó soldando con acero inoxidable austenítico tipo 316L ( $R_y = 220$  MPa), mientras que los álabes, cinturas y techos son de acero inoxidable martensítico X3 Cr Ni Mo 13-4 QT 780 ( $R_y = 650$  MPa).

Este modo de diseño tiene la ventaja de facilitar las operaciones de soldadura (eliminación del riesgo de fisuración en frío en el metal fundido). Sin embargo, debido a las características mecánicas más débiles del acero austenítico, este diseño reduce la resistencia mecánica y la resistencia a la fatiga en las zonas de unión de los álabes con la cintura y de los álabes con el techo. Este modo de diseño también limita la eficacia de los controles de volumen por ultrasonidos en las soldaduras.

Por lo tanto, la salud interna de las soldaduras de unión de los rodetes de Angostura no se ha verificado en los nuevos rodetes. En la recepción de los rodetes solo se efectuó un control de superficie por exudación. Los miembros de COLBUN también asistieron a este control, que reveló la ausencia total de indicación en estos rodetes.

#### **3.2 INFORMES DE INSPECCIÓN DE LAS RODETES**

El examen documental continuó con los informes de control y reparación de los rodetes tras las inspecciones anuales de Colbun.

En estos documentos, parece que las indicaciones puntuales y las fisuras aparecen de un año a otro en la unión del álabe con la cintura.

Las fisuras observadas se localizan en la salida del radio de conexión entre el álabe y la cintura, en la zona en la que el álabe es más fino y sistemáticamente en el lado de presión del álabe.

Estas fisuras atraviesan en su mayoría la nariz del álabe. (Ver fotos).

El examen de los informes de socavación de las fisuras durante las reparaciones de los grupos 1, 2 y 3 indica que estas fisuras forman sistemáticamente un plano paralelo a la cintura y no siguen la dirección de los chaflanes de soldadura.





### 3.3 EXAMEN DE LAS INDICACIONES

EDF acudió a la planta de Angostura los días 27, 28 y 29 de junio durante la inspección anual del rodete n  3.

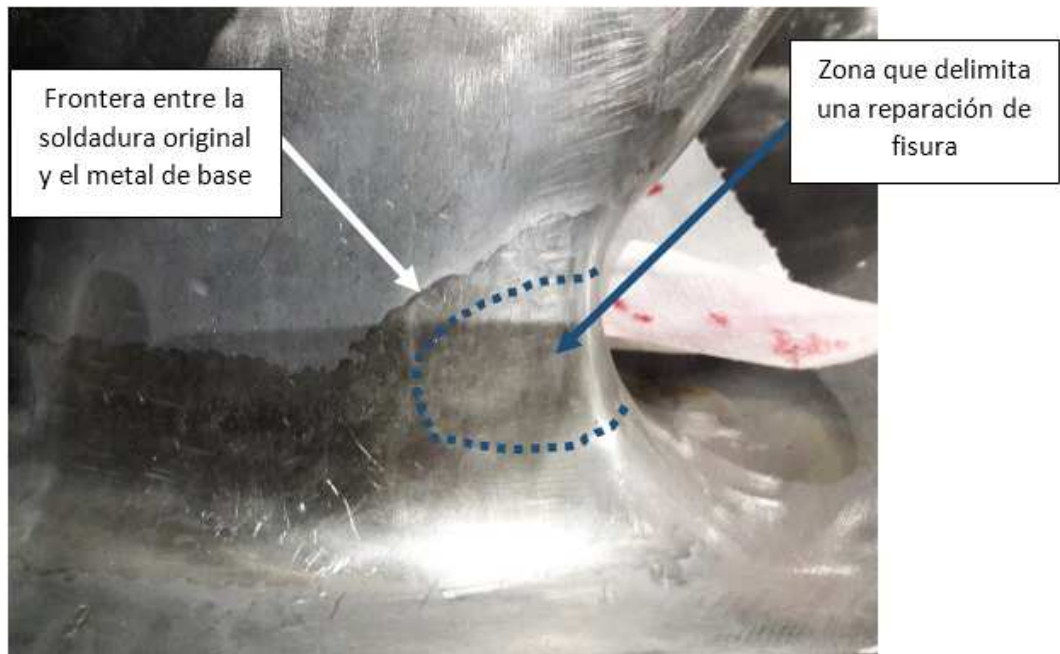
Se realizaron los controles de exudación y solo se observaron algunas indicaciones puntuales, en particular en el álabe n 2. Estas indicaciones puntuales no se detectaron el año anterior durante la última inspección realizado en 2017

EDF analizó por tanto los procesos de control de reparación de este rodete. La sensibilidad del control se verificó mediante placas "Runchek". Parece que los productos utilizados para realizar el control PT parecen insensibles y merecen ser reemplazados por productos más sensibles.

Este análisis se complet  con un examen por ataque químico de las zonas de unión entre el álabe y la cintura. Se realizaron análisis metalográficos y controles de dureza. Se llevó a cabo una investigación para localizar la posición exacta de estas fisuras en el grupo n  3 en presencia de EDF.

Durante la inspección el grupo 3 no presentaba fisuras, ya que se trataba de una zona reparada en 2017 que fue pulida y atacada químicamente para identificar la posición de la reparación respecto a la junta soldada.

El ataque químico muestra que la reparación está bien ubicada en el extremo de conexión (presión lado zona) en la zona donde el álabe es más fino. Parece que el inicio de la fisuración está probablemente localizado en la soldadura austenítica, tal como se muestra en la foto siguiente.



Queda una duda en cuanto a la posición exacta de la fisura original, ya que este análisis solo se realizó únicamente en una reparación. Por lo tanto, sería interesante concluir sobre la ubicación exacta de las fisuras que COLBUN, en la próxima inspección de la rodete si aparecen nuevas fisuras, efectúe un ataque químico en la zona fisurada (lado presión y lado de succión) para validar la localización del defecto plano con respecto a la posición de la ZAT y la soldadura original. La recopilación de esta información es extremadamente útil para concluir definitivamente sobre el origen del craqueo. De hecho, una grieta originada en el metal fundido validar  la hipótesis del agrietamiento por fatiga.

Durante su examen, EDF pidió realizar placas micrográficas y durezas en metal de base en las soldaduras de origen, en las zonas térmicamente afectadas y en las reparaciones. Aunque todavía no se ha publicado el informe oficial de la empresa encargada, parece que los resultados no indican ningún desorden particular o fragilidad adicional en las aleaciones presentes. Las conclusiones de estos análisis (ver el informe TRACETON LD TA "INFORME ANÁLISIS DE MATERIALES COLB N-122-2018") validan la ausencia de fase sigma que podría haberse formado durante los distintos ciclos de fabricación. Se teme a esta fase cuando está contenida en acero austenítico porque aumenta significativamente la fragilidad del metal. Las imágenes metalográficas en la soldadura austenítica también validan la ausencia de defectos interdendríticos en el origen del agrietamiento en caliente.

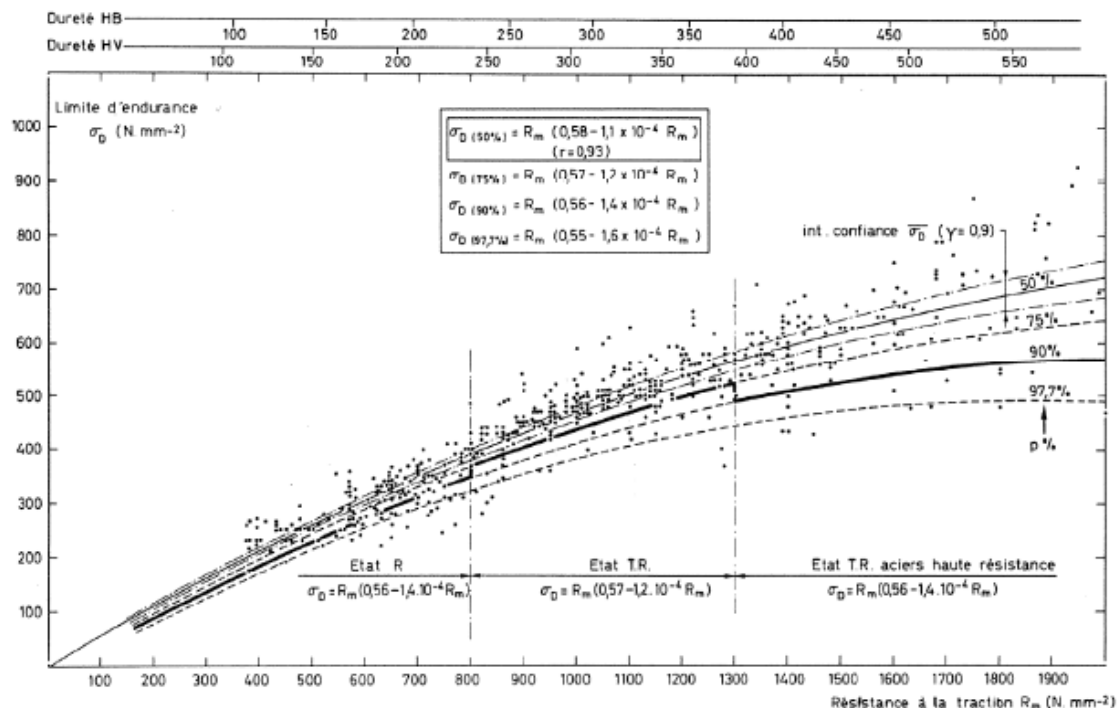
Las durezas logradas en las diversas zonas no indican ninguna fragilidad particular (durabilidad mucho menor que los 300 HB admitidos en ZAT martensítico).

### 3.4 EXAMEN DE LOS PROCESOS DE REPARACIÓN Y CONTROL

Los procedimientos de reparación propuestos por ALSTOM han sido analizados por EDF y no requieren ninguna observación particular sobre los parámetros de soldadura propuestos.

ALSTOM propone reparaciones con metal de aporte austenítico, lo que facilita las operaciones de soldadura in situ (riesgo de fisuración en frío durante la soldadura limitado a las ZAT si la reparación solapa el metal de base de los álabes y las cinturas). Tal como se ha indicado anteriormente, este tipo de reparación impide un control ultrasónico de la reparación (y por lo tanto un control de calidad de la misma) y reduce la resistencia a la fatiga de la zona en cuestión.

Se ha analizado la aplicación in situ de este procedimiento de soldadura. Parece que sería deseable una mayor vigilancia en el control de los tiempos y temperaturas de precalentamiento y pos calentamiento que, al parecer, los soldadores no tuvieron suficientemente en cuenta. Estos parámetros son cruciales para limitar la fisuración en frío en zonas martensíticas.



*Evolución del límite de resistencia a la fatiga de los aceros en función de su valor de límite a la rotura*

Una vez realizada la reparación por soldadura, COLBUN procedió a su control por exudación. Teniendo en cuenta los aceros presentes, EDF recomienda posponer el control por exudación 24 horas tras la soldadura para garantizar la detección de los defectos que aparecen más tarde.

### 3.5 SÍNTESIS Y CONCLUSIÓN

Sobre la base de la información recogida en los documentos de fabricación, los informes de control y reparación y las investigaciones in situ, las conclusiones de EDF son las siguientes.

La detección de nuevas indicaciones puntuales y fisuras durante las diversas inspecciones de los rodets no parece estar relacionada con un defecto de fabricación original. Es decir:

La soldadura de los 3 rodets se efectuó en dos talleres diferentes y las alteraciones observadas en explotación afectan a los 3 rodets casi de la misma manera.

1. Los planos de las fisuras no siguen los planos de unión de los álabes ni de las cinturas, lo que tiende a mostrar que estas fisuras se iniciarían en la superficie y luego se propagarían al volumen. Aparte de los controles de exudación realizados en la recepción de las rodets y en los primeros años anteriores a la fisuración, no hay defectos superficiales originales en las zonas incriminadas. Los exámenes de volumen llevadas a

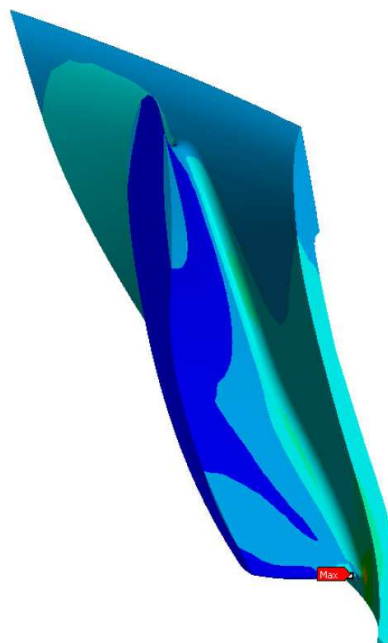
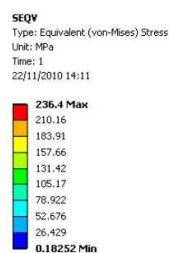
cabo especialmente en las reparaciones que han vuelto a romperse también indican que no hay indicación después de la reparación;

2. El examen en la rodete n  3 de la microestructura de los aceros existentes, principalmente las estructuras martensíticas de los metales de base y de las ZAT, no muestra una fragilidad anormal (dureza media menos de 300 HB en las zonas martensíticas y a proximidad de las reparaciones);
3. Aunque no se ha verificado, la presencia de fase sigma debilitante en la soldadura austenítica es poco probable (a confirmar en el informe de examen microestructural realizado in situ);
4. La fisuración en frío, un fenómeno temido durante la soldadura de aceros inoxidable martensíticos, aparece directamente después de la soldadura, y en este caso las primeras fisuras fueron detectadas después de más de 4000 horas de funcionamiento (rodete n  2).

Por lo tanto es más probable que los fenómenos observados se deban a fenómenos relacionados con las tensiones de esfuerzo mecánicas y, en particular, con la fatiga.

Así pues:

1. Las fisuras se desarrollan sistemáticamente en las mismas zonas;
2. Las zonas en las que se desarrollan las indicaciones puntuales y las fisuras corresponden a las zonas más solicitadas de las rodets (punto de conexión la salida álabe cintura y salida álabe techo) y presentan localmente grosores más finos;
3. Los planos de fisuración son perpendiculares a las superficies de las cinturas, y por tanto perpendiculares a los campos de tensión local, lo que apoya una propagación mecánica de la fisura independientemente de la geometría de los chaflanes de soldadura;
4. La fisura se desarrolla en la aleación menos resistente y por tanto más sensible a la fatiga de la rodete (soldadura 316 L);
5. Las tres máquinas, de diferente diseño, funcionan regularmente a bajo nivel de carga, lo que genera fenómenos hidráulicos, especialmente pulsantes, que ejercen un gran esfuerzo mecánico en los elementos del rodete.



Von-Mises stresses on pressure side

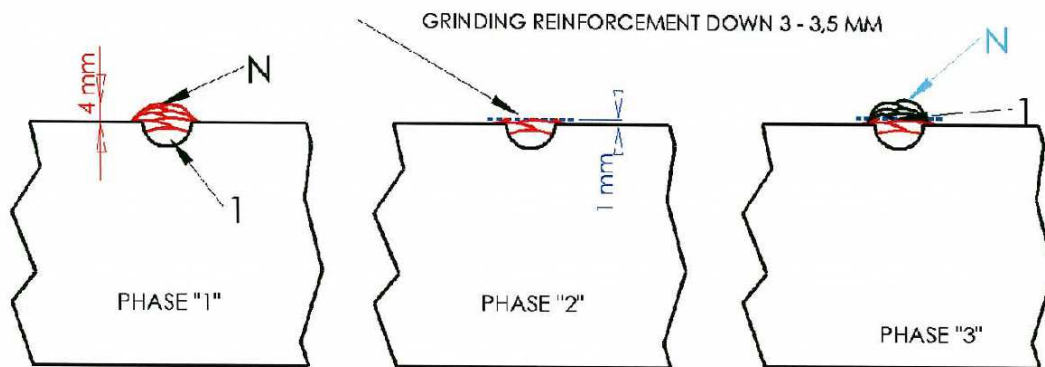
*Extracto de los estudios de dimensionamiento de los rodets de Angostura, que indica que la carga es máxima en la zona de fijación de álabes y cintura (lado presión)*

Este haz de información sugiere que la aparición de las fisuras está relacionada con un fenómeno de fatiga, probablemente como resultado de la explotación regular en las zonas de aparición de los vórtices entre álabes. Esta hipótesis se apoya finalmente en la observación por parte de COLBUN de la génesis de nuevas indicaciones tras un cierto número de horas de funcionamiento, lo que correspondería a la fase de inicio de la fisura, seguida por la fase de propagación de la fisura.

## 4. RECOMENDACIONES DE EDF

1. La fisuración por fatiga está causada por tensiones alternas en los álabes del rodete. Por lo tanto la erradicación de las fisuras pasa prioritariamente por la reducción de dichas tensiones. Es necesario pues actuar sobre el modo de explotación de los tres grupos, dejando de considerar los rangos de funcionamiento contractuales como una referencia de explotación realista. De tal forma, convendría limitar estrictamente el margen de funcionamiento de los grupos a valores entre 50 y 100% de la potencia máxima y utilizar principalmente el grupo 3 para modular las cargas bajas.
2. La capacidad actual de los compresores de aire comprimido ciertamente no es suficiente para prever la explotación de los grupos en rangos en los que los vórtices entre álabes están aún poco desarrollados. El caudal de aire inyectado debería duplicarse, dando prioridad a la inyección entre la rodete y el distribuidor en la brida superior.
3. Debe evitarse el funcionamiento de los grupos con cargas muy bajas.
4. Paralelamente, también puede realizarse un trabajo sobre la reparación para reducir la sensibilidad de las reparaciones a fenómenos hidráulicos inestables. Para reducir la sensibilidad de las soldaduras al fenómeno de la fatiga, EDF recomienda para cada reparación:
  - a. Martillar cada pase de soldadura de reparación (martillado inmediatamente después de la soldadura mientras la soldadura está aún muy caliente y durante un periodo de 2 a 3 segundos)
  - b. Realizar un "temper bead" (templado) en las soldaduras de reparación en contacto con las zonas martensíticas para recristalizar en la superficie las posibles estructuras martensíticas formadas durante la soldadura y reducir su fragilidad (ver modo operatorio más abajo)





5. Puede ser apropiado cambiar el metal de aporte por un metal del mismo tipo que el metal de base (acero inoxidable tipo 13-4). Este acero tiene mayor resistencia mecánica a la rotura ( $R_m$ ) y por tanto mayor solidez frente a la fatiga. Este acero también presenta mejor comportamiento frente a la cavitación. Sin embargo, EDF advierte a COLBUN sobre la aplicación de este tipo de reparación. La soldadura de acero martensítico (tipo 13-4) sobre acero austenítico (tipo 316 L) debe realizarse con mucha precaución para evitar la fisuración en frío durante las operaciones de soldadura. En este caso concreto debe llevarse a cabo un procedimiento de soldadura específico.
6. La reparación local por soldadura de las fisuras que se desarrollan en los rodets de Angostura debe supervisarse con una atención particular. Estas reparaciones generan tensiones residuales y zonas adicionales afectadas térmicamente que aportan localmente más fragilidad al rodete. Esto explica por qué se encontraron nuevas fisuras en las soldaduras ya reparadas. Se recomienda pues encarecidamente la continuación de los exámenes anuales de superficie.
7. EDF asistió a las operaciones de exudación de las soldaduras. Dada la importancia del problema en los rodets de Angostura, podría ser interesante mejorar la sensibilidad de detección de las indicaciones por control de exudación. Esto sería posible obteniendo productos de exudación más sensibles (p.ej. productos que respeten un nivel de sensibilidad al menos igual a 2 según la norma ISO 3452-2).
8. Como los defectos pueden aparecer con un tiempo de retardo en los aceros inoxidables martensíticos, se recomienda realizar el control final 24 horas después de la operación de reparación por soldadura.



## ANEXO 1 – MEDICIONES DE RUIDO Y PRESION

### CONDICIONES DE MEDICIÓN

Las pruebas de registros de ruidos y presiones estaban programadas para realizarse entre los días 7, 8 y 9 de agosto de 2018. Los registros de ruido y presión de las unidades N 1 y n 3 son transmitidos por formato electrónica “.txt” el día 21/02/2018.

En el archivo se encuentra la carpeta “Files\_for\_EDF”. En esta carpeta está la planilla Excel “Measurements En cada una de estas pestañas se describen las mediciones disponibles en las carpetas comprimidas “ANG-1.rar” y “ANG-3.rar”. Las mediciones corresponden a:

- i) potencia;
- ii) presión en la escotilla de hombre del caracol;
- iii) sonómetro frente a la escotilla del difusor;
- iv) micrófono frente a la escotilla del difusor.

Las señales en estos archivos tienen una frecuencia de muestreo simultáneo en los cuatro canales de 2 kHz. Las características de las se ales son las siguientes:

- Unidad 1:

Please open file **ANG-1.rar**

Available measurements in compressed .txt files:

Column n  1: **Active Power**

Column n  2: **Spiral Case Pressure**

Column n  3: **Sonometer**

Column n  4: **Microphone**

All measurements correspond to voltage signals

For active power and spiral case pressure, measurements correspond to voltage from a current signal using a precision resistor:

#### Active Power

Resistor	469,1 $\Omega$	
4mA	-30 MW	1,876 V
20mA	180 MW	9,382 V



#### Spiral Case Pressure

Resistor	466,4 $\Omega$	
4mA	-1 bar	1,866 V
20mA	9 bar	9,328 V

For Sonometer and Microphone, the transducer sensitivities are:

#### Sonometer

Sensitivity 0,01 V/dBA

#### Microphone

Sensitivity 0,045 V/Pa



### • Unidad 3:

Please open file **ANG-3.rar**

Available measurements in compressed **.txt** files:

Column n  1: **Active Power**

Column n  2: **Spiral Case Pressure**

Column n  3: **Sonometer**

Column n  4: **Microphone**

All measurements correspond to voltage signals

For active power and spiral case pressure, measurements correspond to voltage from a current signal using a precision resistor:

#### Active Power

Resistor	469,1 $\Omega$	
4mA	-10,04 MW	1,876 V
20mA	60,24 MW	9,382 V

#### Spiral Case Pressure

Resistor	466,4 $\Omega$	
4mA	-1 bar	1,866 V
20mA	9 bar	9,328 V



For Sonometer and Microphone, the transducer sensitivities are:

#### Sonometer

Sensitivity 0,1 V/dBA

#### Microphone

Sensitivity 0,045 V/Pa



## MEDIDAS ANALIZADAS POR EDF

Hasta la fecha (27/08/2018), EDF no ha podido analizar las señales del unidad 1 porque los datos del archivo "ANG-1.rar" no se pudieron extraer (archivo corrupto).

Sin embargo, EDF pudo procesar las medidas del unidad 3.

Los datos más interesantes disponibles hoy para intentar de evaluar de manera relativa la nocividad de los vórtices entre álabes son la medición de la presión dela escotilla de hombre del caracol y, en menor medida, el registro de sonido en las puertas del difusor.

Pero, sobre todo, hubiera sido muy útil tener disponible la medida de la presión en las portas del difusor para intentar de descubrir en esta señal de presión una firma espectral de los vórtices entre álabes. EDF le pregunta a Colbun si realmente se ha medido la presión del difusor, y, como que otros puntos de presión están disponibles (correo electrónico de 25/08/2018 de Colbun), EDF desea recibir esto registro de esta presión.

En ausencia de una medida de presión en la puerta del difusor, se buscara las firmas de los vórtices entre álabes en el análisis espectral de la señal de la presión en la escotilla de hombre del caracol.

## ANÁLISIS DEL UNIDAD 3

Los registros del unidad 3 están disponibles para diferentes potencias: 5 MW, 9 MW, 14 MW, 15 MW, 19 MW, 24 MW, 28 MW, 33 MW, 37 MW, 42 MW 44 MW et 47 MW.

Para cada una de estas potencias, podemos ver evolucionar las diferentes inestabilidades de las cargas parciales que existen en el difusor, llevando a cabo análisis espectrales de la presión dela escotilla de hombre del caracol [en lugar de la presión en la porta del difusor].

Las fluctuaciones del vórtice axial de carga media siguen siendo muy visibles en el espectro con líneas muy pronunciadas en torno de la frecuencia 0.25 fo (fo: frecuencia de rotación: 3.13 Hz); es decir en torno de 0.9 Hz.

Las fluctuaciones relacionadas a los vórtices entre álabes deben ser aceptadas desde rangos de frecuencias a 10 y 50 Hz.

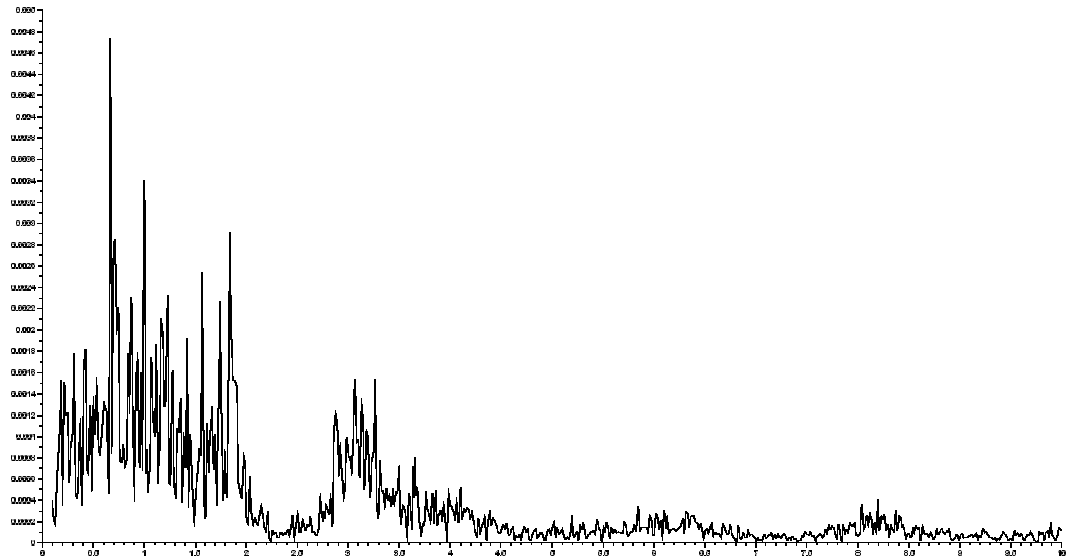
Centramos nuestro análisis en el rango de potencia donde los vórtices entre álabes son los más predominantes a priori, es decir, alrededor de **15 MW**.

A esta potencia, las mediciones se realizan con diferentes configuraciones de inyección de aire comprimido, con el fin de realizar un análisis comparativo de la eficiencia de la inyección de aire para reducir las inestabilidades relacionadas con los vórtices entre álabes:

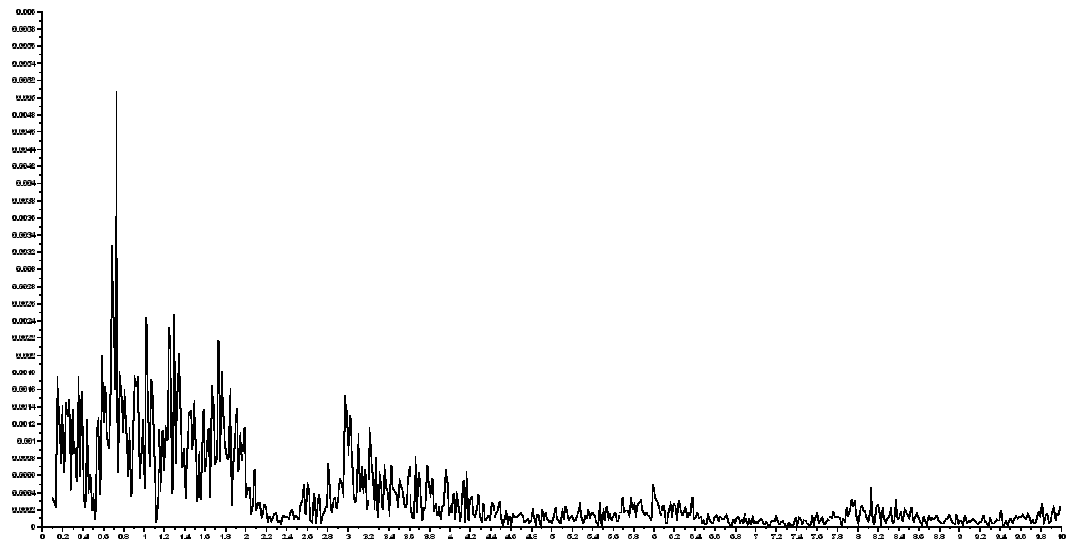
- A. inyección normal;
- B. inyección en la parte superior solamente;
- C. inyección en la parte inferior solamente;
- D. sin inyección de aire (y válvula axial abierta libremente a priori (a confirmar).

En la señal de presión del caracol, no observamos una diferencia significativa entre los espectros con inyección de aire desde arriba o desde abajo solo:

### Espectro presión caracol 15 MW – Conf. B

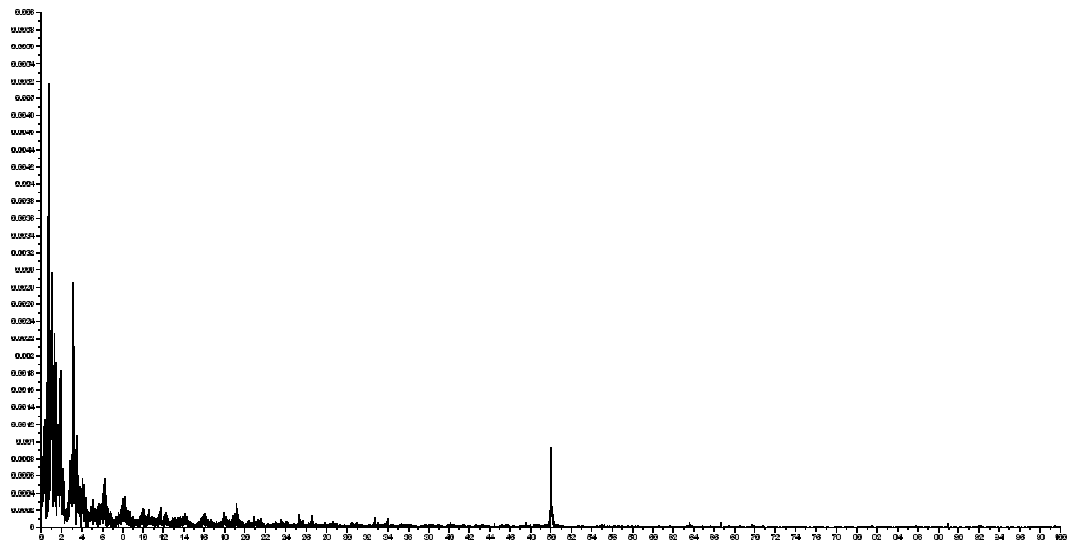


### Espectro presión caracol 15 MW – Conf. C



Del mismo modo, no hay una diferencia significativa entre la configuración de inyección de aire normal (Conf. A) y las configuraciones B et C. Más allá de 10 Hz, las intensidades de las frecuencias pulsantes son bajas.

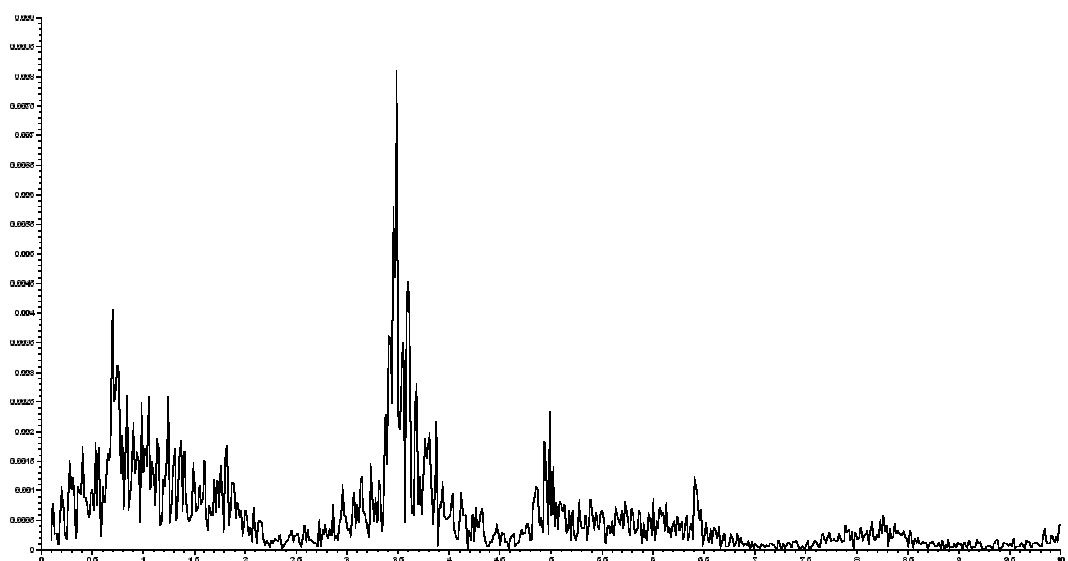
### Espectro presión caracol 15 MW – Conf. A



En estos espectros, las líneas alrededor de 1 Hz son sin duda la firma pulsátil del v rtice axial.

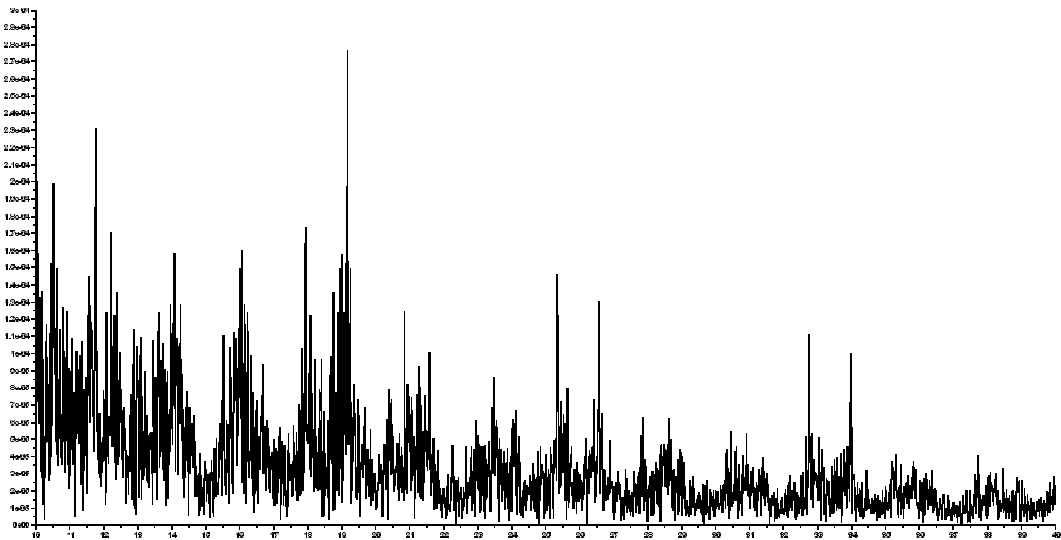
Sin aire (conf. D), la intensidad de las pulsaciones de presión es más fuerte, especialmente en frecuencias ligeramente más altas que la frecuencia de rotación  $f_0$ . Estas líneas a 3.5 Hz y 5 Hz probablemente no son las firmas de los vórtices entre álabes.

### Espectro presión caracol 15 MW – Conf. D

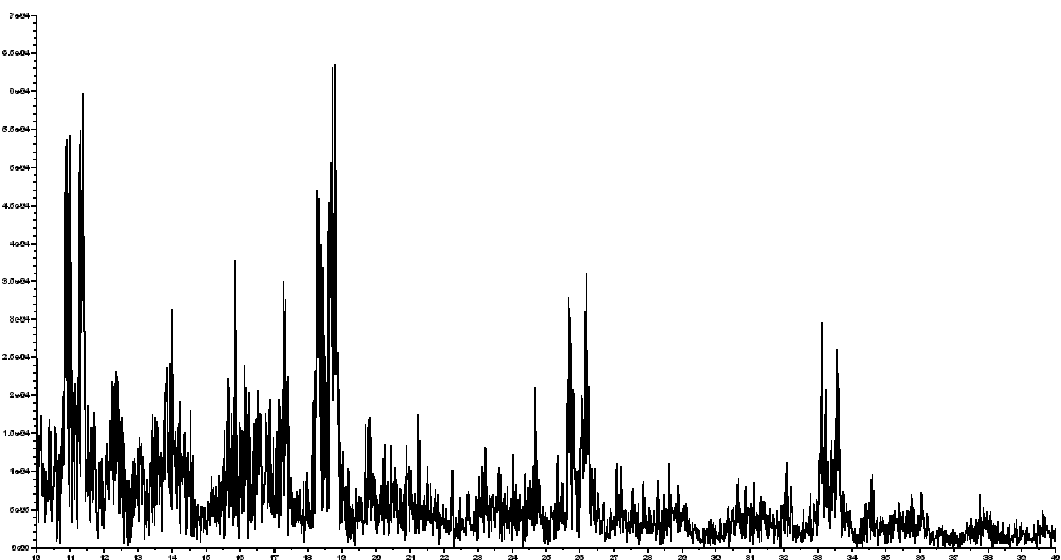


Las firmas de los vórtices entre álabes deben buscarse en un rango de frecuencia de 10 a 50 Hz:

*Espectro presión caracol 15 MW – Conf. A*



*Espectro presión caracol 15 MW – Conf. D*



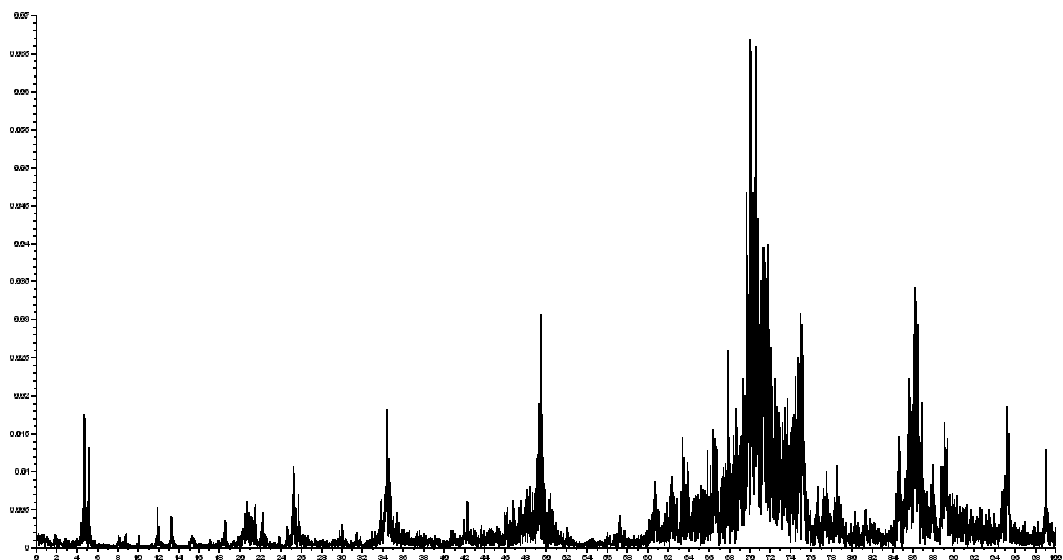
En este rango de frecuencias (aquí de 10 a 40 Hz), la energía pulsante es sustancialmente mayor para la configuración sin aire (conf. D), lo que puede sugerir que la inestabilidad hidráulica relacionada con los vórtices entre álabes se reduce efectivamente con la inyección de aire. Pero



es difícil ir más allá en el análisis de la nocividad de los vórtices entre álabes y la atenuación obtenida por la inyección de aire comprimido.

Para las otras señales, en 15 MW, el análisis espectral de la grabación de los sonidos a la escotilla del difusor indica mayores intensidades de sonido en la configuración sin aire, pero las naturalezas de las líneas espectrales son similares entre todas las configuraciones:

*Espectro del sonido frente a la escotilla del difusor 15 MW – Conf. B*



No hay nada audible que pueda indicar la presencia o ausencia de los vórtices entre álabes, independientemente de la configuración. Sin aire, hay una línea a 16 Hz que no existe en otras configuraciones, pero no está relacionada con los vórtices entre álabes.

El análisis espectral del sonómetro y la señal de potencia no aporta ningún interés particular.

## CONCLUSIÓN

1. Hasta la fecha, no ha sido posible extraer datos del unidad 1;
2. Para estudiar las inestabilidades hidráulicas que aparecen en la rodete y en el difusor, es esencial tener la medida de la presión en las portas del difusor. Estos fenómenos hidráulicas inestables son más difíciles de detectar en la señal de presión de caracol transmitida a EDF;
3. Estas mediciones permitieron observar el efecto beneficioso de la inyección de aire sobre la intensidad pulsátil de las inestabilidades hidráulicas, en particular en los rangos de frecuencia donde los vórtices entre  rabes son detectables;
4. De acuerdo con estas primeras observaciones desde la presión caracol, no se ve un lugar más apropiado para inyectar aire comprimido;
5. Con estas grabaciones, es difícil concluir que la inyección de aire brinda una eficacia real en la mitigación de la nocividad de los vórtices entre álabes;
6. Las pruebas con medidores de tensión en la rodete que operan a diferentes cargas podrían dar con gran certeza las áreas de operación a evitar, con y sin inyección de aire.

## ANEXO 2 – MEDIDAS INUTILIZABLES DE PRESION DEL DIFUSOR

### CORREO ELECTRÓNICO

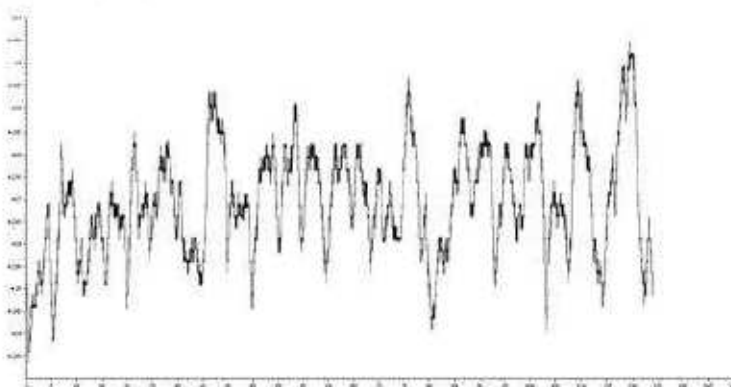
**SAUTEREAU Thierry**

De: SAUTEREAU Thierry  
Envoy : lundi 10 septembre 2018 12:16  
 : 'JGSoto@colbun.cl'; BSuarez@colbun.cl  
Cc: jfuentealba@colbun.cl; LMardones@colbun.cl; OMunoz@colbun.cl; mguarell@colbun.cl; Sylvain GUYOT (sylvain-maurice.guyot@edf.fr); SURLA David; Gilles DUC (Gilles.DUC@edf.fr)  
Objet: TR: Registros de mediciones U1-U3

Estimado Bernardo,  
Estimado Juan,

Hemos intentado analizar las medidas del difusor de presión transmitidas por los archivos en formato de texto. Desafortunadamente, las grabaciones de presión del difusor no parecen adecuadas para realizar análisis espectrales de las señales.

Por ejemplo, para la señal de presión de tiempo de la unidad 1, las amplitudes de pulso de la presión son tan pequeñas que aparecen como discontinuas en la escala de resolución del sensor:



Estas amplitudes pulsantes bajas se pueden explicar por la presencia del tubo flexible particularmente largo que conecta la toma de presión al sensor (foto). Este tubo flexible probablemente actúa como un filtro que elimina todas las frecuencias pulsantes en el sensor de presión.



Para la unidad 3, las amplitudes de pulsación de la presión del difusor son mayores que en el grupo 1. Sin embargo, parecen particularmente filtradas más allá de unos pocos hercios y esto no nos permite considerar un análisis de esta señal para intentar detectar firmas espectrales de los vórtices entre álabes.



Creemos que este filtro de frecuencia se origina en la presencia de un volumen de aire a un nivel del sensor que, como está conectado a la pared difusa por encima del toque de presión, probablemente pueda atrapar una burbuja de aire (proveniente de la inyección de aire forzado).



Como resultado, estas mediciones de presión adicionales a nivel del difusor no nos permiten matizar los análisis producidos en nuestro informe fase 2.

Sin embargo, esperamos que este informe final de la etapa 2 le haya brindado información técnica interesante para tratar el tema de las fisuras en los rodets. Y queríamos, Sylvain y yo, agradecerlos por vuestros recibimientos en junio pasado en la muy impresionante Central Angostura.

Cordialmente,

**Thierry SAUTEREAU**

Ingénieur en hydro lectricit 

EDF - DPIH - CIH - Service  lectrom canique

37, rue Diderot - BP176 - 38042 GRENOBLE cedex 9

[thierry.sautereau@edf.fr](mailto:thierry.sautereau@edf.fr)

Tél. mobile : +33 (0) 6 45 91 24 09