



## Informe Técnico

# Determinación del Mínimo Técnico en la Unidad N° 1 de la Central Angostura COLBÚN 2019

SUBGERENCIA DE SISTEMAS ELÉCTRICOS

Rev.	Fecha	Naturaleza de revisión	Preparado	Revisado	Aprobado
A	06.02.2019	Revisión interna	JL	OM	GN

### Contenido

1. Introducción .....	3
2. Objetivo .....	3
3. Metodología .....	3
4. Antecedentes .....	4
4.1 Antecedentes técnicos de diseño .....	4
4.2 Recomendaciones del fabricante .....	7
4.3 Antecedentes nacionales o internacionales de unidades similares .....	7
4.4 Antecedentes operacionales .....	8
4.5 Justificaciones de eventuales fuentes de inestabilidad .....	8
4.6 Otros .....	9
5. Conclusiones .....	10
6. Anexos .....	11
Anexo 1 Diagrama PQ Angostura 1 .....	11
Anexo 2 Curvas de colina Angostura 1 .....	11
Anexo 3 Derechos de agua Angostura .....	11
Anexo 4 Registro operacional .....	11
Anexo 5 Hydro-mechanical Test - Unit 1 .....	11
Anexo 6 Inspección y reparación rodete unidad N° 1 .....	11
Anexo 7 Análisis defectos rodete U2 .....	11
Anexo 8 Funcionamiento Sistema Anti Cavitación CHA rev 2 .....	11
Anexo 9 Informe de EDF .....	11

### 1. Introducción

En el marco de la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio (NTSyCS), el Coordinador Eléctrico Nacional (“Coordinador”) aprobó el valor de Mínimo Técnico de la unidad N°1 de la Central Hidroeléctrica (“CH”) Angostura (en adelante “Angostura 1”), mediante su carta DE01100-18 de fecha 12 de marzo de 2018.

A raíz de nueva evidencia recabada durante el mantenimiento mayor de la CH Angostura realizado durante el mes mayo de 2018, Colbún S.A. (“Colbún”) decidió contratar la asesoría técnica de la empresa francesa Electricité de France (“EDF”) para determinar el valor de Mínimo Técnico que permita operar la unidad sin sufrir fisuras en sus rodetes.

En este contexto, el presente documento entrega los antecedentes que respaldan un nuevo valor de Mínimo Técnico para Angostura 1 conforme a lo establecido en el Anexo Técnico “Determinación de Mínimo Técnico de Unidades Generadoras” de la NTSyCS, versión mayo 2018.

### 2. Objetivo

Actualizar el parámetro de Mínimo Técnico de la unidad Angostura 1 de acuerdo con lo establecido en el Anexo Técnico “Determinación de Mínimos Técnicos en Unidades Generadoras” de la NTSyCS, versión mayo 2018.

### 3. Metodología

Para determinar el Mínimo Técnico de la unidad Angostura 1 se consideraron los siguientes antecedentes:

1. Parámetros técnicos de la unidad;
2. Diagrama PQ;
3. Curva de colina;
4. Información operacional;
5. Análisis de fisuras de rodetes;
6. Recomendaciones de la asesoría técnica de EDF.

Luego, el valor de Mínimo Técnico será la mínima potencia capaz de generar respetando los antecedentes técnicos señalados.

**4. Antecedentes**

Para la actualización del valor del Mínimo Técnico de Angostura 1 se tomaron en cuenta los siguientes antecedentes.

**4.1 Antecedentes técnicos de diseño**

A continuación, se muestran los datos de placa del generador de la unidad Angostura 1:

DATOS DE PLACA DEL GENERADOR DE LA UNIDAD ANGOSTURA 1		
ITEM	DESCRIPCIÓN	VALOR
1	N° de Fases	3
2	Potencia Nominal	150,5 MVA
3	Potencia Máxima	151,1 MVA
4	Voltaje Nominal	13,8 kV
5	Corriente Nominal	6.296 A
6	Frecuencia Nominal	50 Hz
7	Factor de Potencia	0,9
8	Velocidad Nominal	107,14 rpm
9	Velocidad Embalamiento	220 rpm
10	Polos	56

*Tabla 1: Datos de placa del generador de la unidad Angostura 1.*

A continuación, se muestran los datos de placa de la turbina de la unidad Angostura 1:

DATOS DE PLACA DE LA TURBINA DE LA UNIDAD ANGOSTURA 1		
ITEM	DESCRIPCIÓN	VALOR
1	Unidad	Angostura 1
2	Tipo turbina	Francis de eje
3	Año de construcción	2013
4	Velocidad nominal	107,14 rpm
5	Altura neta	50 m
6	Potencia nominal	136 MW
7	Potencia máxima	142 MW
8	Caudal	300 m <sup>3</sup> /s
9	Diámetro rodete	5.904 mm
10	Rotación	Antihorario

*Tabla 2: Datos de placa de la turbina de la unidad Angostura 1.*

**4.1.1 Manual de operación y mantenimiento**

Actualmente, no se cuenta con una versión digital del manual de operación y mantenimiento de la unidad Angostura 1 y, debido a que este es una colección de tomos, tampoco es posible adjuntarlo. Sin embargo, en las secciones siguientes, se presentan el diagrama PQ y la curva de colina de la unidad que forman parte del manual del generador y de la turbina.

### 4.1.2 Diagramas de operación

En la Figura 1 se muestra el diagrama PQ de Angostura 1 (adjunto en el Anexo 1), del cual se desprende que no existe un valor de Mínimo Técnico distinto de cero.

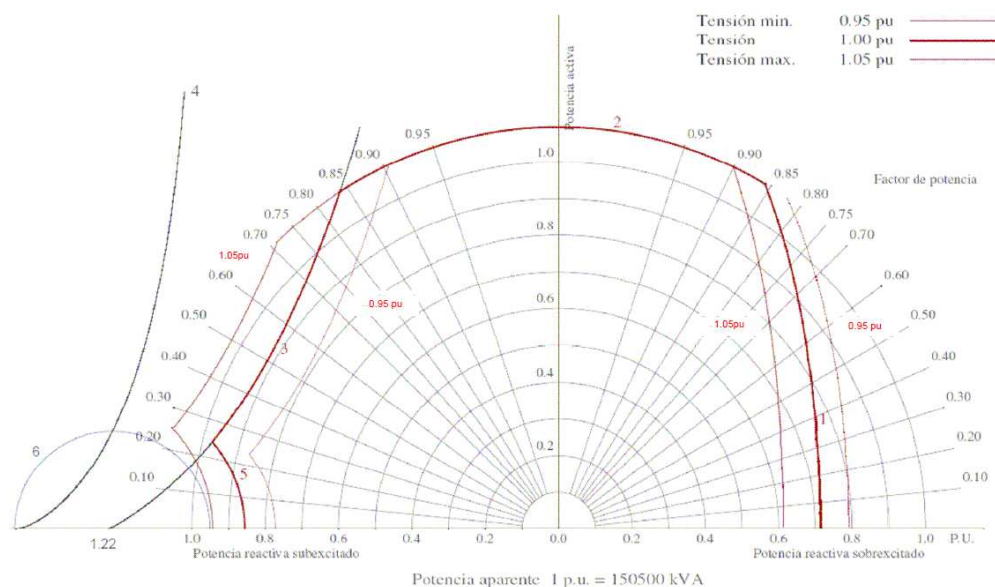


Figura 1: Diagrama PQ Angostura 1.

### 4.1.3 Curvas de eficiencia de la turbina

En la Figura 2 se muestra la curva de colina de la unidad generadora Angostura 1 (adjunta en el Anexo 2), en la cual se marcan en color rojo los límites de operación de la turbina dados por el fabricante.

Dado que la curva de colina entregada por el fabricante no indica la curva de potencia mínima, esta se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$P_{\min} = \frac{\rho \cdot Q_{\min} \cdot H_{\max} \cdot \eta}{102}$$

Donde  $\rho$  es la densidad del agua ( $1.000 \text{ kg/m}^3$ ),  $Q_{\min}$  es el caudal mínimo ( $118,6 \text{ m}^3/\text{s}$ ),  $H_{\max}$  es la altura máxima ( $53,3 \text{ m}$ ) y  $\eta$  es el rendimiento ( $70\%$ ). Estos últimos datos se obtuvieron de la misma curva de colina.

Considerando la fórmula y los valores mencionados anteriormente, se obtiene una potencia mínima de  $43,3 \text{ MW}$  brutos para cualquier condición de operación. Luego, dicho valor correspondería al Mínimo Técnico impuesto por las características de diseño de la unidad Angostura 1.

## Informe Técnico

Determinación de Mínimo Técnico en la  
Unidad N°1 Central Hidroeléctrica Angostura

Sin embargo, debido a la aparición de fisuras que se han observado en cada uno de los rodetes de las unidades de CH Angostura, actualmente los límites definidos por la fábrica en la curva de colina están en revisión.

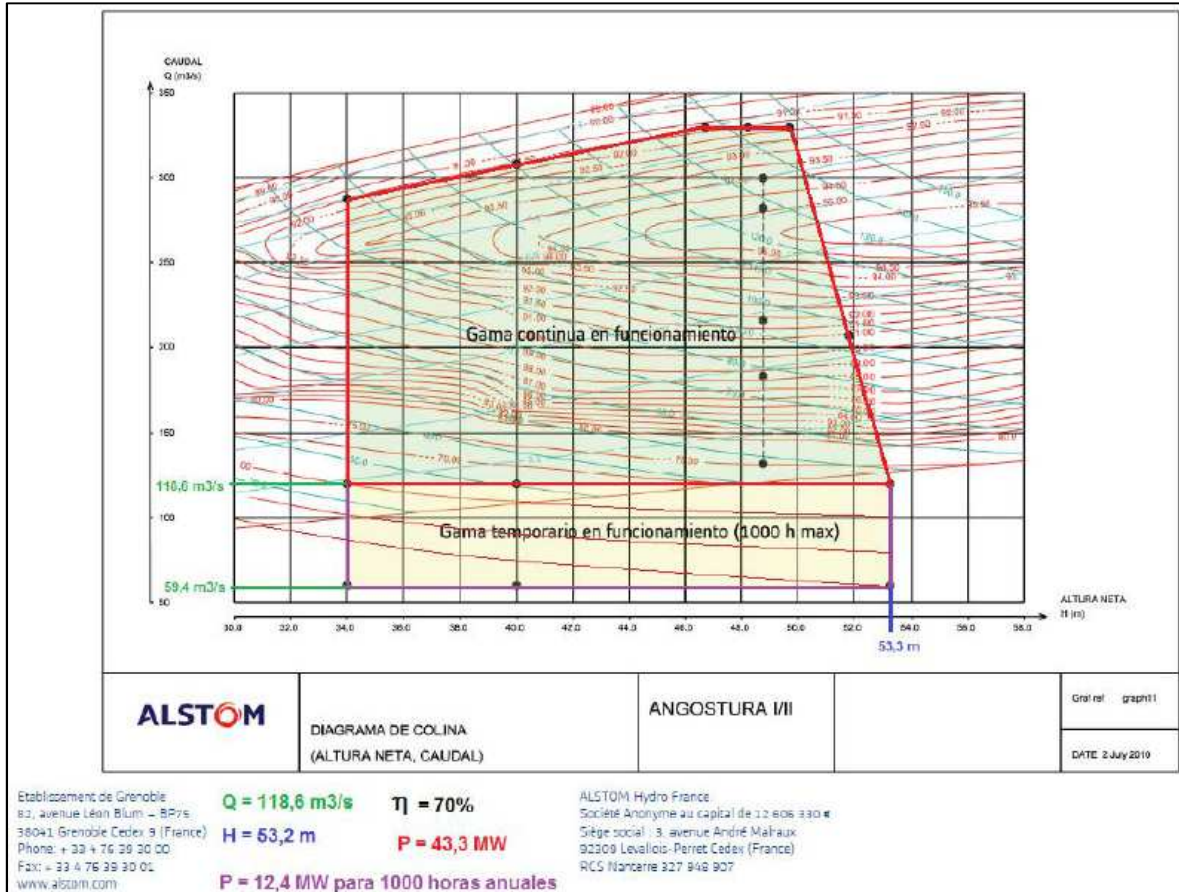


Figura 2: Curva de colina Angostura 1.

### 4.1.4 Informe de performance y ajustes de los automatismos

Del informe de performance y ajustes de automatismos, no se obtiene ninguna información que permita definir el parámetro de Mínimo Técnico.

### 4.1.5 Informe de mantenimiento mayor del grupo turbina/generador

De los manuales e informes de mantenimiento disponibles, no se extrae ninguna información que permita definir el parámetro de Mínimo Técnico.

#### 4.1.6 Capacidad de captación, capacidad de conducción, derechos de agua, caudales ecológicos, caudal captado y caudal turbinado

Como se muestra en el Anexo 3, la CH Angostura posee derechos de aprovechamiento de agua no consuntivo tanto de ejercicio permanente y continuo como de ejercicio eventual y continuo, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Caudal	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Uso permanente y continuo, en m <sup>3</sup> /s	91,4	68,8	54,6	47,9	103,1	330,5	333,9	347,4	348,1	382,9	302,2	157,6
Uso eventual y continuo, en m <sup>3</sup> /s	151,3	86,7	59,0	158,4	496,9	269,5	266,1	252,6	251,9	217,1	297,8	413,0

Tabla 3: Derechos de agua por mes.

Como caudal ecológico, se establecen los siguientes valores según el mes:

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Caudal ecológico, en m <sup>3</sup> /s	43,6	41,6	31,0	31,6	81,9	81,9	81,9	81,9	81,9	81,9	81,9	64,3

Tabla 4: Caudal ecológico por mes.

Adicionalmente, por derechos de agua de riego, se debe respetar el paso continuo de la totalidad de los derechos pertenecientes a los regantes de los canales de Biobío Sur, Biobío Norte y Biobío Negrete. La totalidad de esos derechos, constante para todos los meses del año, corresponde a 78,8 [m<sup>3</sup>/s]. De esta forma, considerando el caudal ecológico y los derechos de riego, se deberá respetar el mayor valor de estos caudales para cada mes.

De la curva de colina, se extrae que el caudal mínimo de operación de Angostura 1 es igual a 90,4 [m<sup>3</sup>/s], por lo que el caudal ecológico y derechos de riego no permiten la operación de la unidad a Mínimo Técnico (no limitantes).

#### 4.2 Recomendaciones del fabricante

Como se aprecia en la curva de colina, el fabricante admite la operación con cargas de menor valor, pero restringiendo la cantidad de horas de funcionamiento. Para el caso de Angostura 1, se recomienda un máximo de 1.000 horas de operación, con potencia de hasta 12,4 MW brutos. El valor anterior, se calcula utilizando la ecuación mostrada en la sección 4.1.3 y los siguientes valores:  $\rho=1.000 \text{ kg/m}^3$ ;  $Q_{\text{mín}}=59,4 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $H_{\text{máx}}= 53,3 \text{ m}$  y  $\eta=40\%$ .

#### 4.3 Antecedentes nacionales o internacionales de unidades similares

Para unidades generadoras que operan con turbinas tipo Francis, normalmente se puede considerar como referencia que el valor de Mínimo Técnico sea cercano al 40% de la potencia máxima.

### 4.4 Antecedentes operacionales

En el Anexo 4 se muestra gráficamente la operación de Angostura 1 durante el año 2016, con datos obtenidos del Sistema de Información en Tiempo Real de Colbún. De ellos, se puede observar que la unidad Angostura 1 no registró operación bajo el Mínimo Técnico recomendado por curva de colina de forma estable y permanente.

Adicionalmente, en las pruebas hidromecánicas realizadas por ALSTOM (informe “Hydro-mechanical Test - Unit 1”) a la unidad Angostura 1 (adjuntas en el Anexo 5) se concluye que la operación por debajo de 40 MW brutos está fuera de la zona de operación normal. Dichas pruebas tuvieron como objetivo estudiar el comportamiento hidromecánico y la eficiencia de la unidad mediante el análisis de desplazamiento del eje de la turbina y eficiencia para distintos niveles de carga y configuraciones de admisión e inyección de aire.

### 4.5 Justificaciones de eventuales fuentes de inestabilidad

Durante el mantenimiento mayor del año 2017 de la unidad Angostura 1, se inspeccionó el rodete de la unidad encontrando fisuras en los álabes N° 2, 5, 7, 8, 9, 10, 11 y 12. Las fisuras encontradas, y posteriormente reparadas, eran visibles a simple vista y tenían longitudes que iban desde los 40 a 70 mm (ver Anexo 6). A raíz de lo anterior, Colbún solicitó un análisis por parte del fabricante (ALSTOM<sup>1</sup>) con el fin de conocer la causa de dichas fisuras.

Por otra parte, como se muestra en el Anexo 7, “Análisis Defectos Rodete U2”, el fabricante recomienda que la unidad Angostura 2 no opere con una potencia menor a 40 MW con el fin de evitar las zonas con altos niveles de vibración. Dado que las unidades N°1 y N°2 de la central Angostura son de iguales características, dicha recomendación también es aplicable a la unidad Angostura 1.

Asimismo, durante el mantenimiento mayor del año 2018 se pudo detectar el aumento de las fisuras observadas durante el año 2017. Este fenómeno puede acortar significativamente la vida útil de los rodetes. A la fecha el fabricante de las turbinas, GE Hydro (ALSTOM), no ha esclarecido las causas de las fisuras detectadas, ni tampoco ha dado recomendaciones que permitan tomar acciones correctivas.

En este contexto, Colbún decidió contratar la asesoría de la empresa Electricité de France (“EDF”), quienes poseen una vasta experiencia en el diseño y operación de sus centrales, y un área de Ingeniería que presta servicios a terceros.

En el informe elaborado por EDF, Anexo 9, se concluye que la aparición de fisuras se debe al fenómeno de fatiga, que es causado por tensiones alternas en los álabes del rodete, debido a la presencia de vórtices que se producen por la operación en rangos de funcionamiento contractuales cercanos a los límites definidos por la fábrica, por lo tanto, la erradicación de las fisuras pasa prioritariamente por la reducción de dichas tensiones.

---

<sup>1</sup> Los negocios referidos a energía y redes de la empresa ALSTOM fueron adquiridos por General Electric (GE) completamente a fines de 2015.



## Informe Técnico

Determinación de Mínimo Técnico en la  
Unidad N°1 Central Hidroeléctrica Angostura

---



Por lo anterior se hace necesario actuar sobre el modo de explotación de las tres unidades generadoras, dejando de considerar los rangos de funcionamiento contractuales como una referencia de explotación realista. De tal forma, el informe indica la conveniencia de limitar estrictamente el margen de funcionamiento de las unidades a valores entre el 50 y 100% de la potencia máxima, es decir, entre 74 y 147 MW para las unidades 1 y 2 y entre 24 y 48 MW para la unidad 3 (valores brutos). Adicionalmente, recomienda utilizar principalmente la unidad 3 para modular las cargas bajas.

### 4.6 Otros

Como se explica en el informe “Funcionamiento Sistema Anti Cavitación CHA rev 2”, Anexo 8, el sistema anticavitacional de la central Angostura posee dos compresores. La unidad Angostura 1, al igual que la unidad Angostura 2, ocupa ambos compresores cada vez que se encuentra sincronizada y operando con una potencia menor a 77 MW. Por lo tanto, cada vez que se encuentren operando ambas unidades con una potencia menor a 77 MW cada una, el sistema anticavitación funcionará sólo para una de ellas. Por este motivo, si bien el Mínimo Técnico recomendado por EDF de la unidad Angostura 1 es igual a 74 MW brutos, si están en operación la unidad Angostura 1 y Angostura 2, la potencia mínima de operación de ambas unidades es de 151 MW brutos.

### 5. Conclusiones

El presente informe determina el valor de Mínimo Técnico de la Unidad N° 1 de la Central Hidroeléctrica Angostura en cumplimiento con el Anexo Técnico: “Determinación de Mínimo Técnico de Unidades Generadoras” de la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, versión mayo 2018.

Tomando en consideración todos los antecedentes anteriormente expuestos, se concluye que el valor de Mínimo Técnico para la unidad Angostura 1 es de **74 MW brutos**, permitiendo una operación de forma permanente, estable y segura.

Ahora bien, se debe destacar que, en caso de que se esté operando la unidad Angostura 1 en conjunto con la unidad generadora Angostura 2, el Mínimo Técnico para el conjunto será de **151 MW brutos**.

## **Informe Técnico**

Determinación de Mínimo Técnico en la  
Unidad N°1 Central Hidroeléctrica Angostura

---

### **6. Anexos**

**Anexo 1 Diagrama PQ Angostura 1**

**Anexo 2 Curvas de colina Angostura 1**

**Anexo 3 Derechos de agua Angostura**

**Anexo 4 Registro operacional**

**Anexo 5 Hydro-mechanical Test - Unit 1**

**Anexo 6 Inspección y reparación rodete unidad N° 1**

**Anexo 7 Análisis defectos rodete U2**

**Anexo 8 Funcionamiento Sistema Anti Cavitación CHA rev 2**

**Anexo 9 Informe de EDF**