



**GAIA**



**DIGSILENT Ltda.**

**Informe de Consultoría para la Empresa**



**Identificación de Sistemas**

**Validación de Modelos Matemáticos Unidades Generadoras**

**Tiempo de Partida y Parada**

**Central Hidroeléctrica Cumbres, Unidad # 1**

*Mayo de 2019*

---

## Contenido

1.	ANTECEDENTES .....	4
2.	DOCUMENTOS UTILIZADOS.....	4
3.	OBJETIVO.....	4
4.	DESCRIPCION DE LA CENTRAL .....	5
5.	VALIDACIÓN U HOMOLOGACIÓN DE MODELOS .....	5
5.1	Unidad Cumbres 01 .....	6
5.1.1	Regulador Automático de Tensión .....	6
5.1.2	Malla de Control por Factor de Potencia .....	8
5.1.3	Limitador de Sobre Excitación OEL.....	10
5.1.4	Limitador Subexcitación UEL .....	12
5.1.5	Controlador de Carga y Velocidad .....	14
6.	DETERMINACIÓN DE TIEMPOS DE PARTIDA Y PARADA .....	23
6.1	Tiempo de Partida/Arranque .....	23
6.2	Tiempo de Parada/Detención.....	25
7.	CONCLUSIONES .....	27
8.	ANEXO 1: Central Hidroeléctrica Cumbres.....	28

## Lista de Tablas

Tabla 1. Parámetros AVR Unidad Cumbres 01. ....	11
Tabla 2. Parámetros UEL Unidad Cumbres 01.....	14
Tabla 3. Parámetros GOV Central Cumbres.....	21
Tabla 4. Parámetros Turbina Central Cumbres. ....	22
Tabla 5. Tiempos de Partida, Central Cumbres. ....	23
Tabla 6. Tiempos de Parada, Central Cumbres. ....	25

## 1. ANTECEDENTES

La empresa Hidroeléctrica SCOTTA tiene la necesidad de identificar y validar los modelos matemáticos que representen la dinámica de los sistemas de control y proceso de la Central Hidroeléctrica Cumbres de 2 X 12 MVA, la cual emplea turbinas tipo Pelton.

En este sentido, dicha empresa debe realizar los ensayos y estudios eléctricos en los que se identifique el comportamiento dinámico de sus unidades, mediante la elaboración y homologación de modelos matemáticos.

Para tal propósito SCOTTA ha contratado servicios de consultoría a DIGSILENT LTDA Chile de manera de determinar las prestaciones dinámicas de sus unidades mediante pruebas u ensayos en campo. Adicionalmente, ha contratado la elaboración de modelos matemáticos que representen las dinámicas actuales de los controles de gobernador y sistema de excitación.

En este sentido DIGSILENT LTDA Chile, realiza el trabajo conjuntamente con GAIA Ingeniería S.R.L.

La Central Hidroeléctrica Cumbres consta de dos unidades generadoras, con sus respectivas turbinas y sistemas de control. Las unidades G1 y G2, comparten el sistema de aducción de agua y son de idénticas características técnicas.

El presente informe abarca la identificación de sistemas y pruebas de validación de modelos de la central de Cumbres.

## 2. DOCUMENTOS UTILIZADOS

Los documentos utilizados para la elaboración del presente estudio son los siguientes:

- Oferta técnica económica relativa a los estudios eléctricos
- Información técnica suministrada por el propietario de la central
- Mediciones efectuadas en campo mediante ensayos dinámicos

## 3. OBJETIVO

El objetivo general del presente trabajo es determinar el comportamiento dinámico de las unidades de la Central Hidroeléctrica Cumbres.

En el caso de las unidades G1 y G2, al ser de idénticas características y dado que comparten el sistema de aducción de agua, mediante un "pantalón" en la tubería de presión, el cual se encuentra a menos de 10 metros de cada turbina, es que se asumirá que el comportamiento de una de las unidades es válido para representar el comportamiento de la otra. Habida consideración de ello, se realizarán los ensayos dinámicos en una de ellas y se asumirá el modelo dinámico obtenido para ambas.

Se determinará el comportamiento dinámico elaborando modelos matemáticos de los sistemas de control de las unidades de generación de la central en cuestión. Los

modelos serán validados mediante ensayos y corresponden al Regulador Automático de Velocidad (RAV) y al Regulador Automático de Tensión (AVR).

La determinación del comportamiento dinámico permitirá realizar ensayos mediante simulaciones, que caracterizarán el desempeño dinámico de cada unidad.

Los modelos podrán ser utilizados en el modelo de la red eléctrica completa del Sistema Interconectado Nacional, para realizar distintos estudios eléctricos requeridos por el Coordinador u otros.

#### **4. DESCRIPCION DE LA CENTRAL**

La Central Hidroeléctrica Cumbres se encuentra ubicada en las cercanías de la ciudad de Entre Lagos en la XIV región de Los Ríos, a pies del Volcán Puyehue, con una potencia nominal de 19 MW. La central, consta de una bocatoma de tipo lateral para la captación de agua desde el río Salto, y una casa de máquinas con 2 turbinas Pelton horizontales de 2 inyectores acopladas directamente a sus respectivos generadores síncronos: G1 y G2.

En el caso de los generadores G1 y G2 los mismos son de 12 MVA con factor de potencia 0,85. Las turbinas hidráulicas tienen potencia máxima de 9 MW cada una. En cuanto a la presión de trabajo de las turbinas hidráulicas, se tiene una caída bruta de 745 m.

Los generadores G1 y G2 poseen conexión estrella con de tensión nominal L-L de 13,2 kV. Su sistema de excitación del tipo brushless con un controlador PID de la marca Ghisalba, modelo CNB28. El gobernador de velocidad es mediante PLC digital y servomecanismos oleo hidráulicos con piloto tipo servo válvula electro - hidráulica.

El equipamiento y tecnología de implementación es de procedencia italiana en su mayoría, en lo específico del fabricante Scotta.

Las unidades G1 y G2 poseen cada una un transformador elevador con relación de 13,2/24,2 kV de 13 MVA de capacidad, con cambidores de taps en relación +/- 5%. La conexión a la red es mediante una línea de servicio rural, la cual posteriormente se conecta al sistema de transmisión adicional de STS, que permite la transformación de la energía desde la tensión a 110kV.

#### **5. VALIDACIÓN U HOMOLOGACIÓN DE MODELOS**

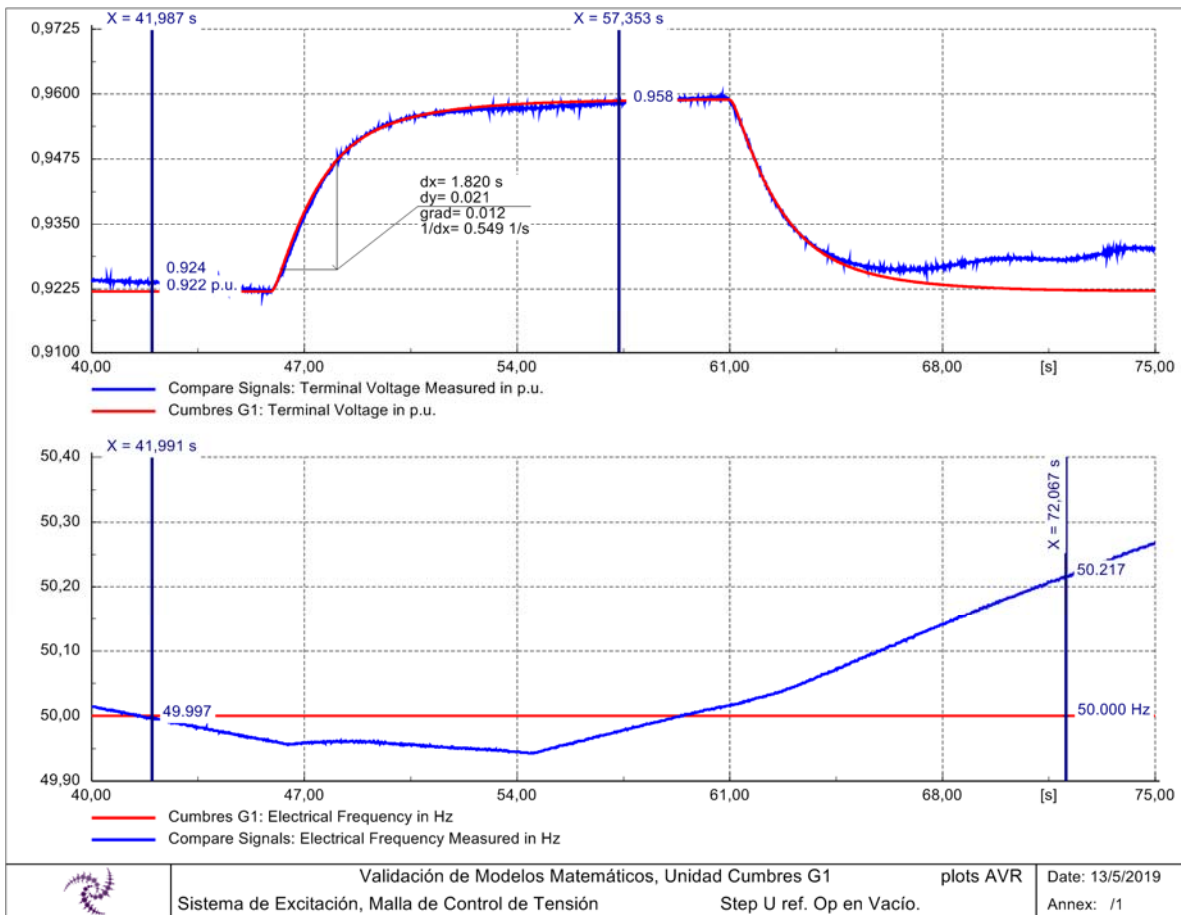
Inicialmente se determinarán los modelos matemáticos a ser homologados en función a las características tecnológicas de la central hidroeléctrica y la experiencia del consultor.

En base a los distintos ensayos realizados se aplica la validación de cada elemento que representa la respuesta dinámica de la central.



El modelo de la Figura 1 representa un sistema brushless con AVR que comprende mallas de control de tensión y factor de potencia válido tanto para los generadores G1 y G2.

El ensayo utilizado para la validación del modelo del sistema de excitación en su sección de malla de control de tensión, corresponde a un escalón en la referencia de tensión terminal operando en vacío. La Figura 2 presenta los resultados, tanto medidos como los simulados con el ajuste identificado.



**Figura 2. Validación Modelo AVR Cumbres 01 (U\_CTRL)**

En la Figura 2 se presenta la tensión terminal y la frecuencia ante el ensayo de escalón en la referencia de tensión, operando en vacío. Las curvas rojas son obtenidas a partir de simulación y las azules en medición.

No se mide la tensión de campo por ser un sistema de libre de escobillas.

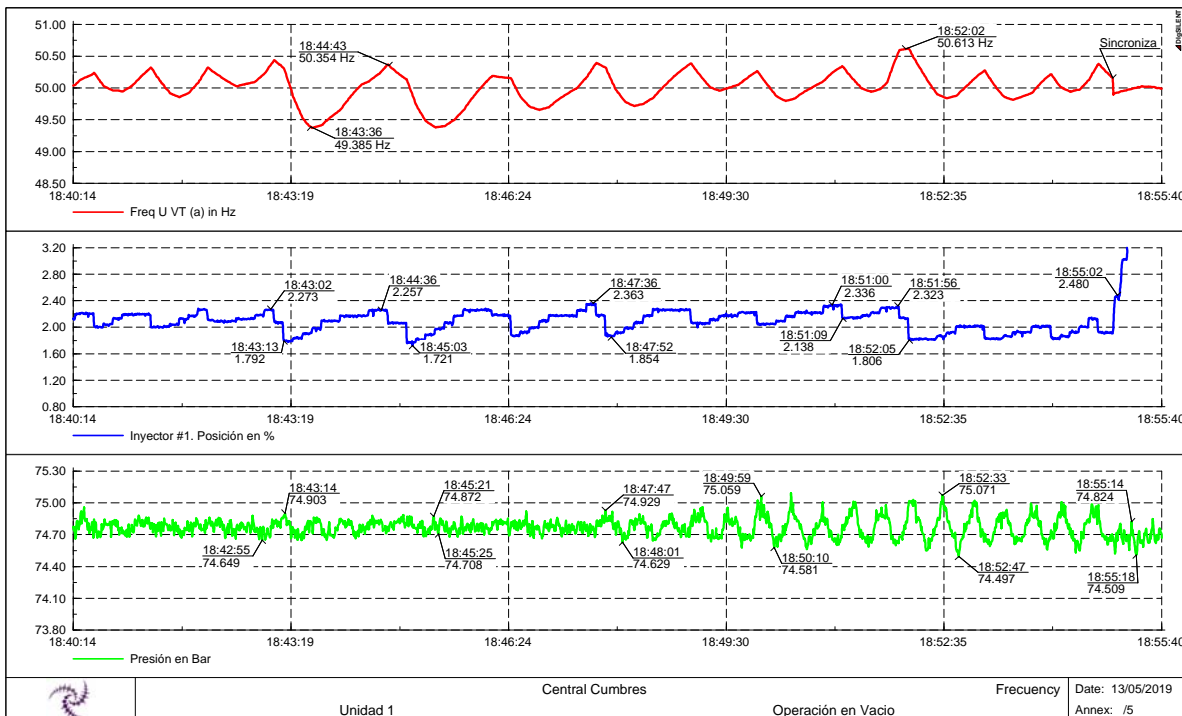
Se tiene una respuesta con buen amortiguamiento y normal en su velocidad. Se ha estimado un tiempo de crecimiento de 1,8 s, lo cual puede ser considerado como una velocidad lenta.

Las diferencias entre las mediciones y simulación se deben esencialmente a la capacidad de regulación de frecuencia de la unidad Cumbres 01 cuando opera en vacío.

La unidad autoalimenta su sistema de excitación mediante un PM que alimenta a su vez al rectificador, por lo que la velocidad influye directamente en la tensión. La variación de tensión se encuentra en fase con la variación de velocidad, pero en este caso no es notorio, ya que la variación sucedida durante la medida no fue significativa. En la simulación la variación de velocidad en vacío es nula, ya que el modelo debe operar de esa manera.

Por lo expuesto se considera una respuesta satisfactoria del modelo de simulación en referencia a las mediciones.

Como referencia, se presenta en la Figura 3 la operación en vacío de Cumbres 01, por un periodo prolongado.



**Figura 3. Operación en Vacío Cumbres 01**

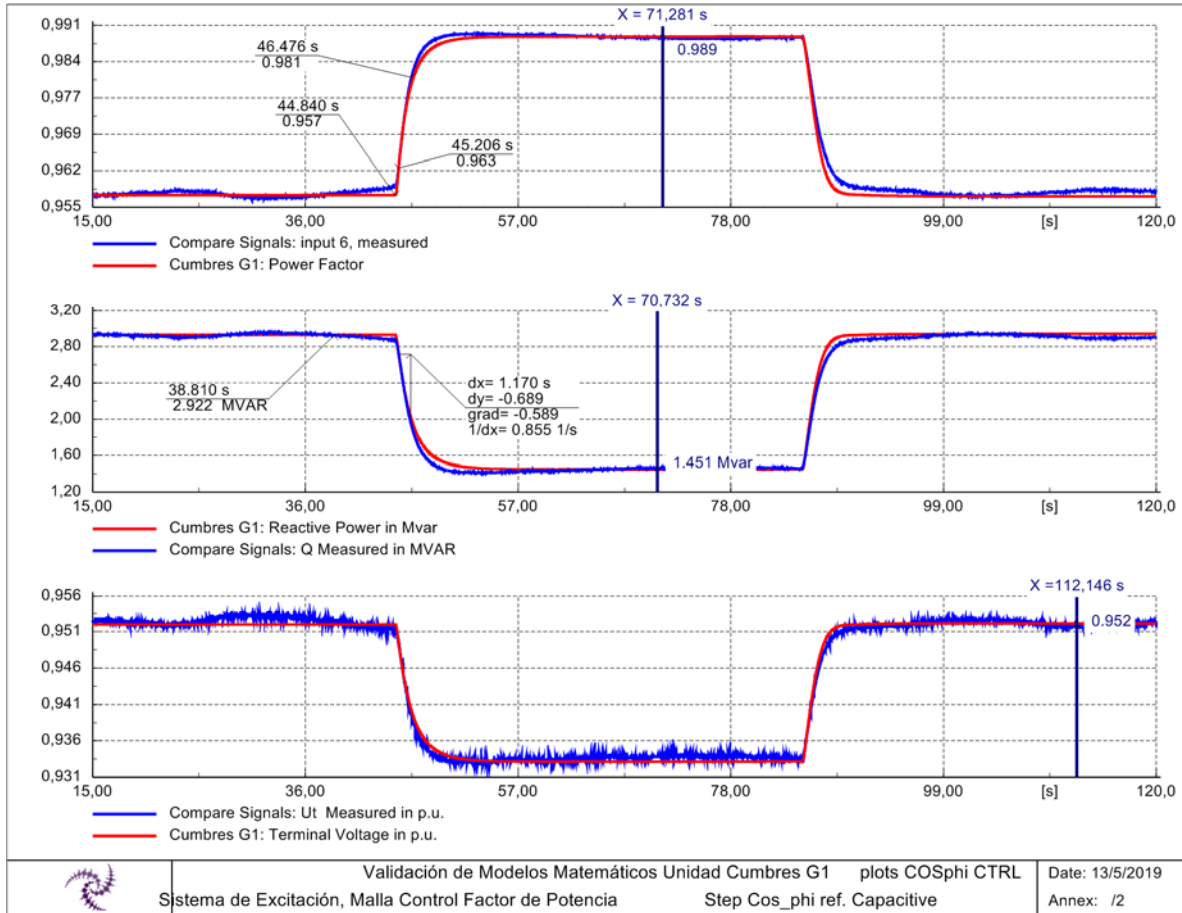
En la Figura 3 se presenta la frecuencia, la posición del inyector # 1, y la presión de agua en la turbina, para una operación en vacío. Se observa que el rango de variación de la frecuencia es del orden de 1 Hz; así mismo se tiene la constante acción de control del inyector con una amplitud de orden de 0,3%. La presión varía alrededor de 0,5 Bar.

Las condiciones de operación se consideran normales.

### 5.1.2 Malla de Control por Factor de Potencia

La malla de control de factor de potencia se valida mediante el ensayo de escalón en la referencia de factor de potencia, operando la unidad conectada a la red. Los resultados se presentan en la Figura 4.





**Figura 4. Validación Modelo AVR CUMBRES (COSφ\_CTRL)**

En la Figura 4 se presenta la tensión terminal, el factor de potencia y la potencia reactiva de la unidad de Cumbres 01, tanto medida como simulada.

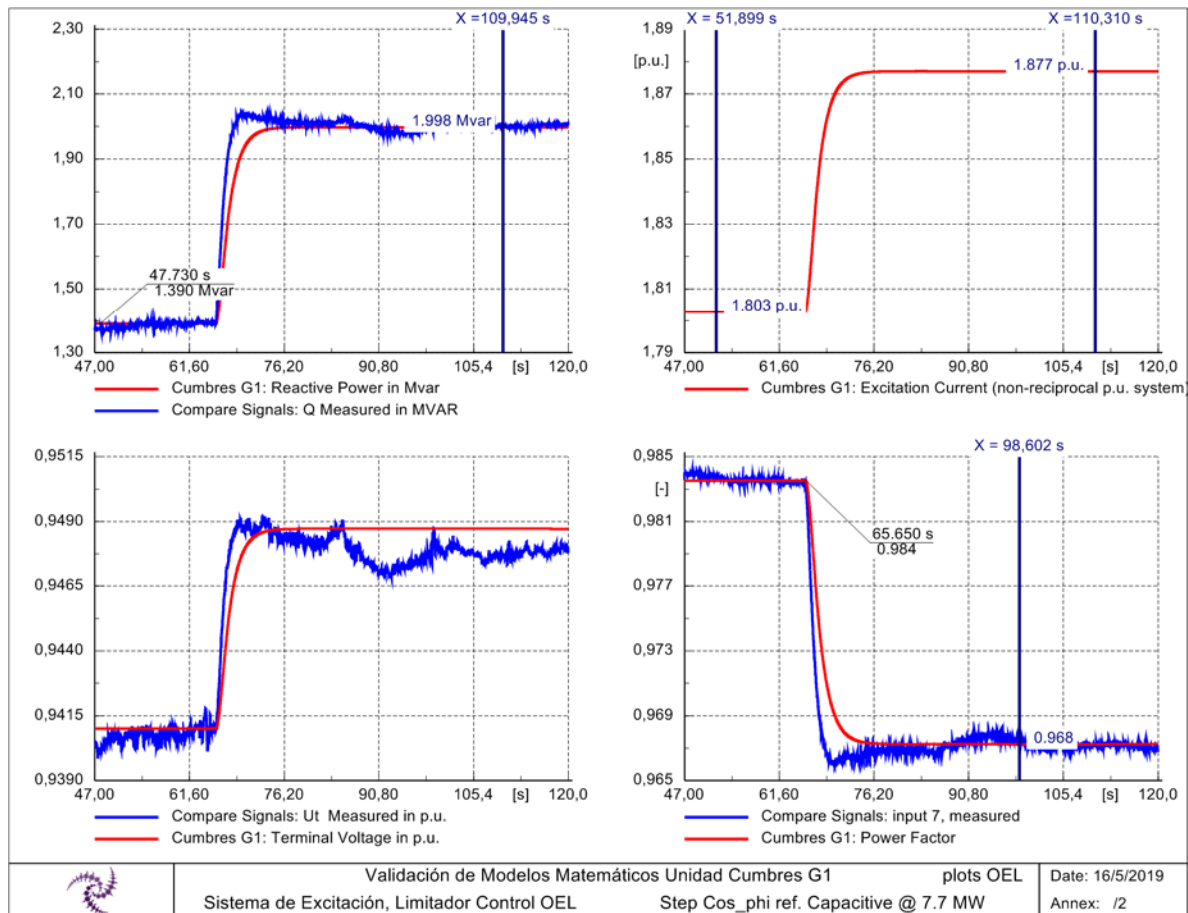
Se observa buena convergencia entre el modelo y la medición para el flanco positivo como negativo.

### 5.1.3 Limitador de Sobre Excitación OEL

El limitador de corriente de excitación es un limitador fijo y de acuerdo a información relevada en terreno, se encuentra ajustado en el valor de corriente de excitación nominal el cual es de 9,5 A.

La homologación de dicho limitador no presentó ninguna dinámica de lazo de control, por lo que dicho limitador se implementa en la salida del modelo de fuente de corriente, de acuerdo a la presentado en la Figura 1, señal IFD\_MAX.

Para el ensayo de homologación del limitador se redujo el valor de corriente a 6,5 A. La respuesta se presenta en la siguiente Figura.



**Figura 5. Validación OEL CUMBRES (COSφ\_CTRL)**

Para probar el funcionamiento del limitador se da un escalón en la referencia de consigna de factor de potencia a 0,95 capacitivo. Se observa que la unidad no llega a dicho valor y es limitada la corriente de excitación en 1,877 p.u. que corresponde a los 6,5 A del sistema de excitación brushless.

Dado que la limitación real es de 9,5 A y el valor de 6,5 A solo fue utilizado para la prueba es que el parámetro final de dicha variable es de 2,6918 p.u.

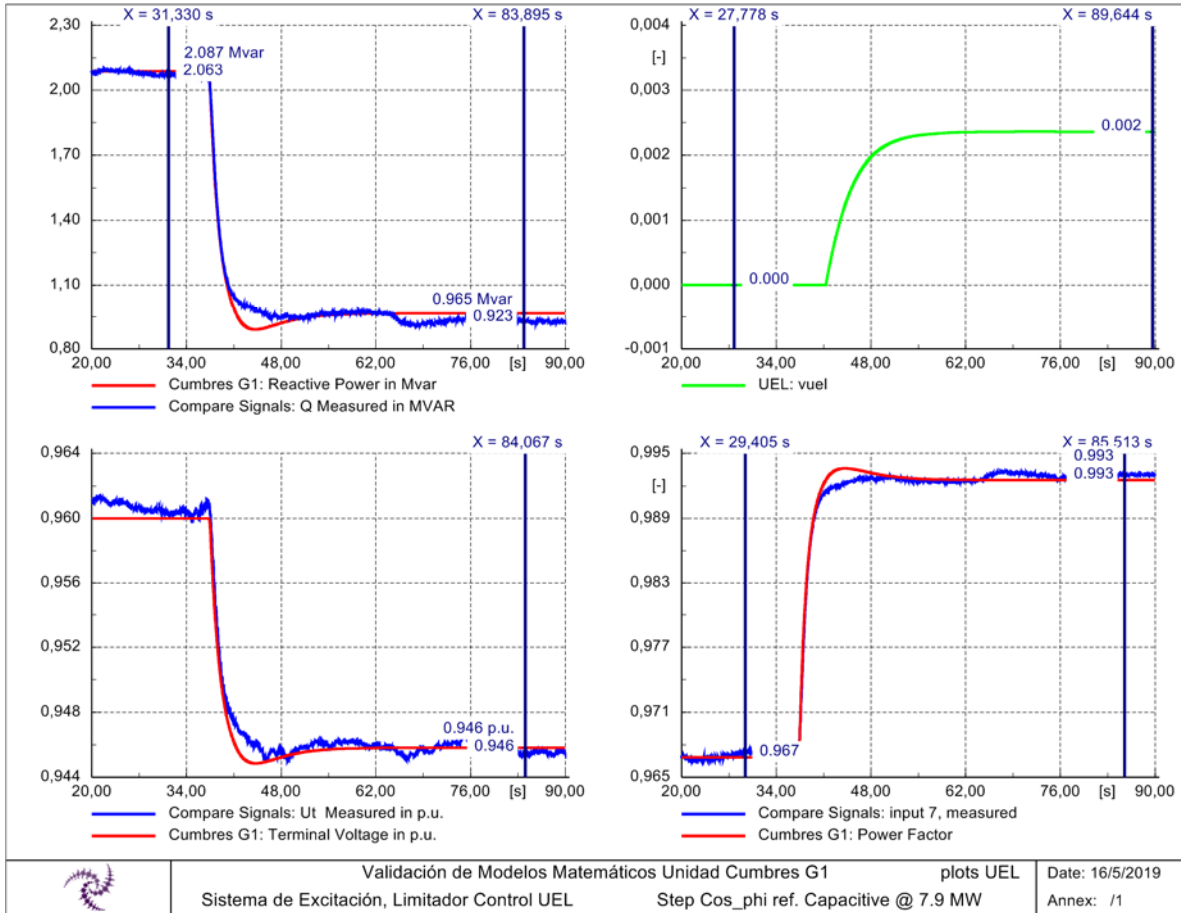
Los parámetros del controlador AVR + OEL finalmente identificados se presentan en la Tabla 1.

Parámetros AVR Cumbres G1				
Name	Value	Unit	Description	Origen
Tr	0,02	[s]	Ut Measurement Time const	Estimado
Tr_PQ	0,01	[s]	PQ Measurement Time const	Estimado
KP	0,08	[pu]	Proportional Gain	Homologado
KP_Cos	0,3	[pu]	Proportional Gain for cos phi Control	Homologado
Ka	10	[pu]	Controller Gain	Estimado
Ta	0,01	[s]	Controller Time Constant	Estimado
Ke	0,35	[pu]	Exciter Constant	Estimado
KI	0,03	[pu]	Integral Gain	Homologado
KI_Cos	0,12	[pu]	Integral Gain for cos phi Control	Homologado
Te	0,25	[s]	Exciter Time Constant	Estimado
E1	3,9	[pu]	Saturation Factor 1	Estimado
Se1	0,1	[pu]	Saturation Factor 2	Estimado
E2	5,2	[pu]	Saturation Factor 3	Estimado
Se2	0,5	[pu]	Saturation Factor 4	Estimado
KD_cos	0,1	[pu]	Derivative Gain for cos phi Control	Homologado
TD_cos	0,1	[s]	Time Const. Derivative Action for cos phi Control	Homologado
KD	0,03	[pu]	Derivative Gain	Homologado
TD	0,1	[s]	Time Const. Derivative Action	Homologado
CTRL_Mode	0	[pu]	0 for cos phi CTRL and 1 for voltage CTRL	Homologado
Lead_Lag	-1	[pu]	-1 For lagging and +1 for leading	Selector de Modo
VRMIN	0	[pu]	Controller Minimum Output	Homologado
VRMAX	8,75	[pu]	Controller Maximum Output	Homologado
IFD_MAX	2,6918	[pu]	Maximum Excitation Current	Homologado

**Tabla 1. Parámetros AVR Unidad Cumbres 01**

En cuanto a los parámetros del generador síncrono utilizados, estos se encuentran en el Anexo 1 y provienen de la información obtenida en sitio.





**Figura 7. Validación UEL CUMBRES (COSφ\_CTRL)**

La consigna dada es de factor = 1, para la cual se tuvo que limitar la potencia reactiva al valor positivo de 1 MVAR, ya que la tensión de la red era muy baja para efectuar los ensayos.

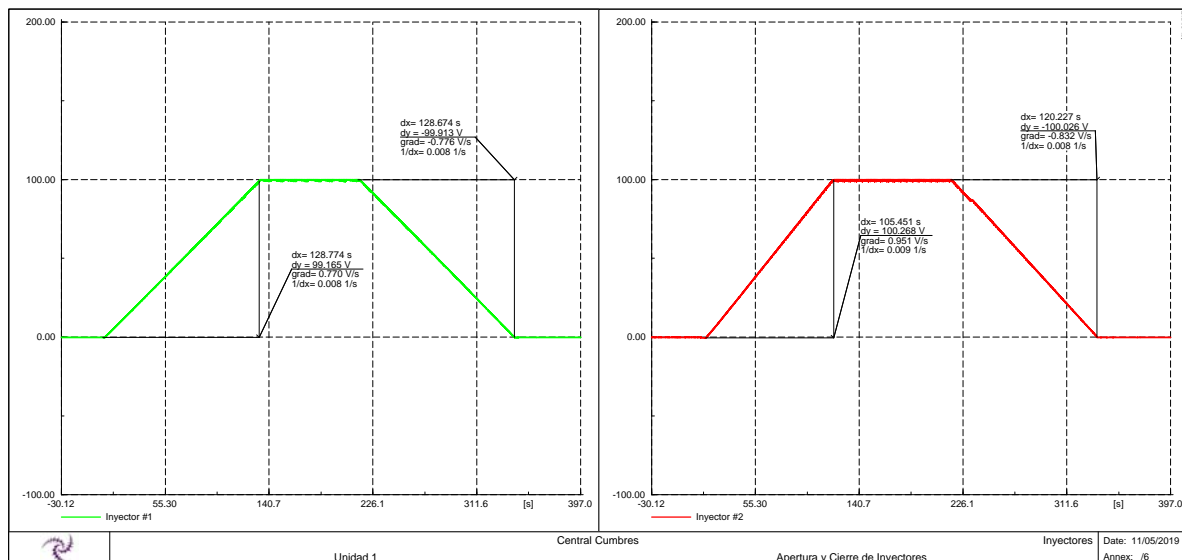
Parámetros Validados UEL Cumbres G1				
Name	Value	Unit	Description	Origen
Tru	0,02	[s]	Cte. de tiempo medición de tensión	Estimado
Tfp	10	[s]	Cte. de tiempo filtro medición de potencia	Estimado
Trp	10	[s]	Cte. de tiempo medición de potencia	Estimado
Tfu	0,02	[s]	Cte. de tiempo filtro medición de tensión	Estimado
Kuel	0,1	[p.u.]	Ganancia UEL	Homologado
Tuel	2	[s]	Cte. tiempo acción integral UEL	Homologado
UelMin	0	[p.u.]	Mínima salida UEL	Homologado
UelRefMin	-2	[p.u.]	Mínima referencia UEL	Estimado
UelMax	0,25	[p.u.]	Máxima salida UEL	Estimado
UelRefMax	2	[p.u.]	Máxima referencia UEL	Estimado
<b>q_vs_p:</b>				
Size	5			
Index	X	Q LIMIT SERVICE	Q LIMIT TEST	
0	0	-0,5	0,085	Homologado
1	0,2	-0,42	0,085	Homologado
2	0,6	-0,33	0,085	Homologado
3	0,8	-0,28	0,085	Homologado
4	1	0	0	Homologado

**Tabla 2. Parámetros UEL Unidad Cumbres 01**

Los parámetros identificados se encuentran en la Tabla 2. Los valores utilizados para la prueba son los presentados como Q LIMIT TEST, y los valores que deben ser utilizados para el modelo de simulación son presentados como Q LIMIT SERVICE.

### 5.1.5 Controlador de Carga y Velocidad

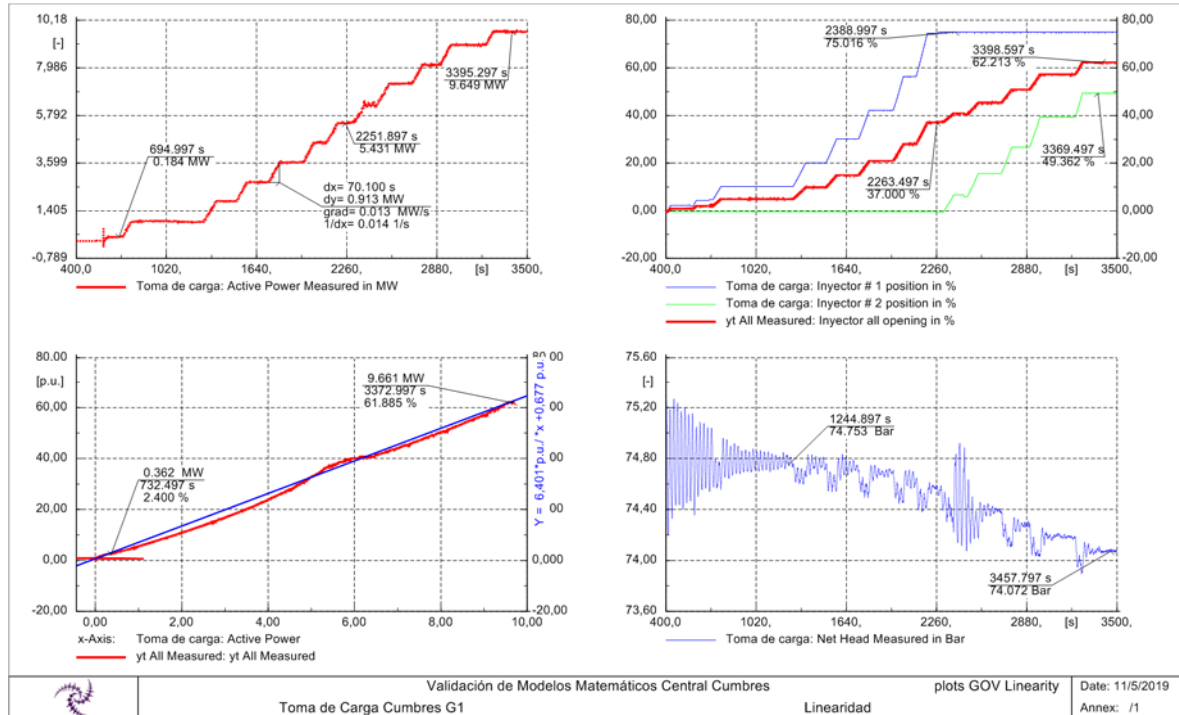
Inicialmente se realiza un diagnóstico de la operación. Lo anterior con el propósito de validar el correcto funcionamiento de los servomecanismos y determinar sus tiempos de operación, cuestión que se realiza mediante la apertura y cierre de inyectores con una sola consigna de posición. Los resultados logrados se presentan en la Figura 8.



**Figura 8. Operación de Inyectores, Central Cumbres 01**

En la Figura 8 se tiene la operación de todos los inyectores. Se observan condiciones normales y rampas constantes-lineales de apertura y cierre. Los tiempos de apertura se encuentran entre 100 s a 130 s. En cuanto al cierre se tienen tiempos del mismo orden.

En la Figura 9 se muestra la sincronización y toma de carga de la unidad hasta el máximo posible en el momento de las pruebas; el cual fue de 9,6 MW. Durante esta prueba la unidad 02 se encontraba detenida.



**Figura 9. Diagnóstico Gobernador de Carga**

Se presenta en la Figura 9, en la parte superior, la potencia activa y el movimiento de los 2 inyectores, así como una señal calculada equivalente al área de apertura total entre los 2 inyectores en %.

En la sección inferior de la Figura 9, al lado derecho, se presenta la señal de presión medida al ingreso de la turbina y al lado izquierdo se tiene la relación X-Y, de la potencia activa vs la apertura total de los inyectores en %.

El gradiente de toma de carga determinado es del orden de 13 kW/s. Es un gradiente relativamente lento, sin embargo, en este tipo de instalación es primordial no dar cambios de aceleración bruscos a la columna de agua, por lo que la respuesta puede ser considerada normal.

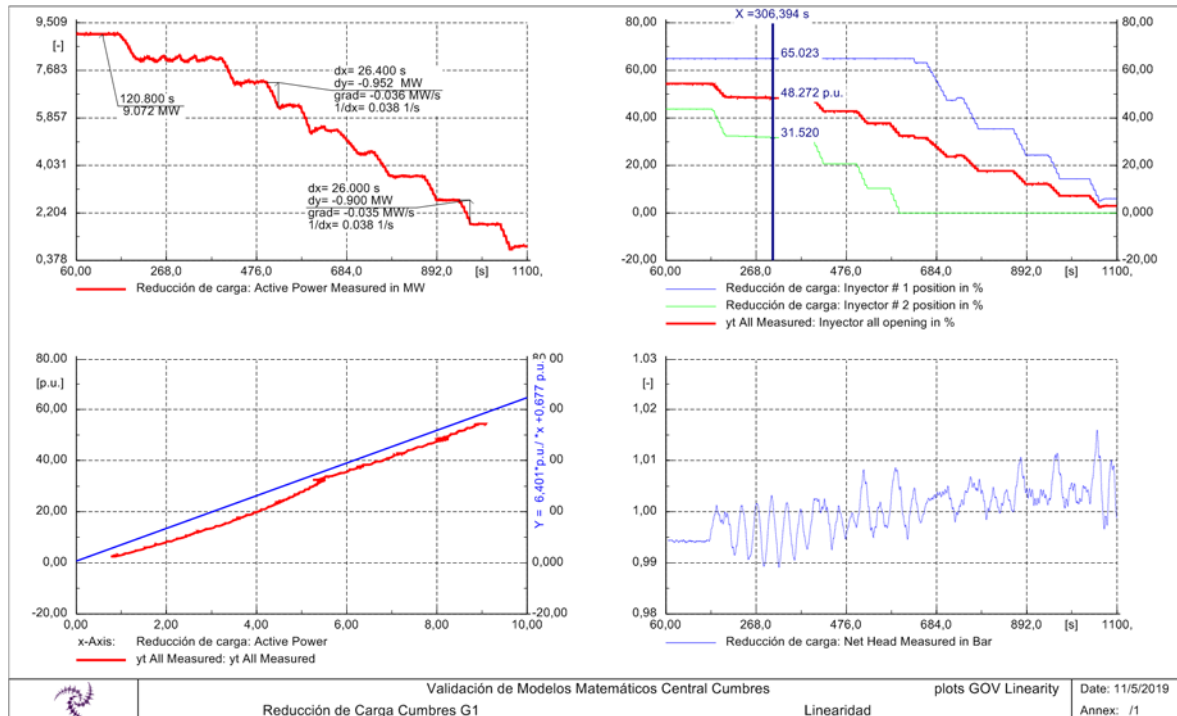
La unidad opera secuencialmente sus inyectores y se observa que cuando uno llega al 75 %, luego comienza la apertura del segundo.

En la tubería de presión se observan condiciones normales y bajo amortiguamiento en la oscilación de presión. El periodo de oscilación de presión por demanda de caudal

está en el orden de 25 s. La caída de presión dinámica se encuentran dentro rangos normales, del orden de 0,8 Bar para 9,5 MW y en condiciones que el G2 se encontraba detenido.

La relación X-Y de potencia activa-área total de apertura se muestra bastante lineal, por lo que el modelo de turbina lineal responderá adecuadamente.

En la Figura 10 se presenta la reducción de carga. Se observa un comportamiento bastante similar en dirección contraria. El sistema se comporta de forma lineal respecto a la toma de carga. El gradiente de reducción de carga es de 35 kW/s.



**Figura 10. Diagnóstico Gobernador de Carga**

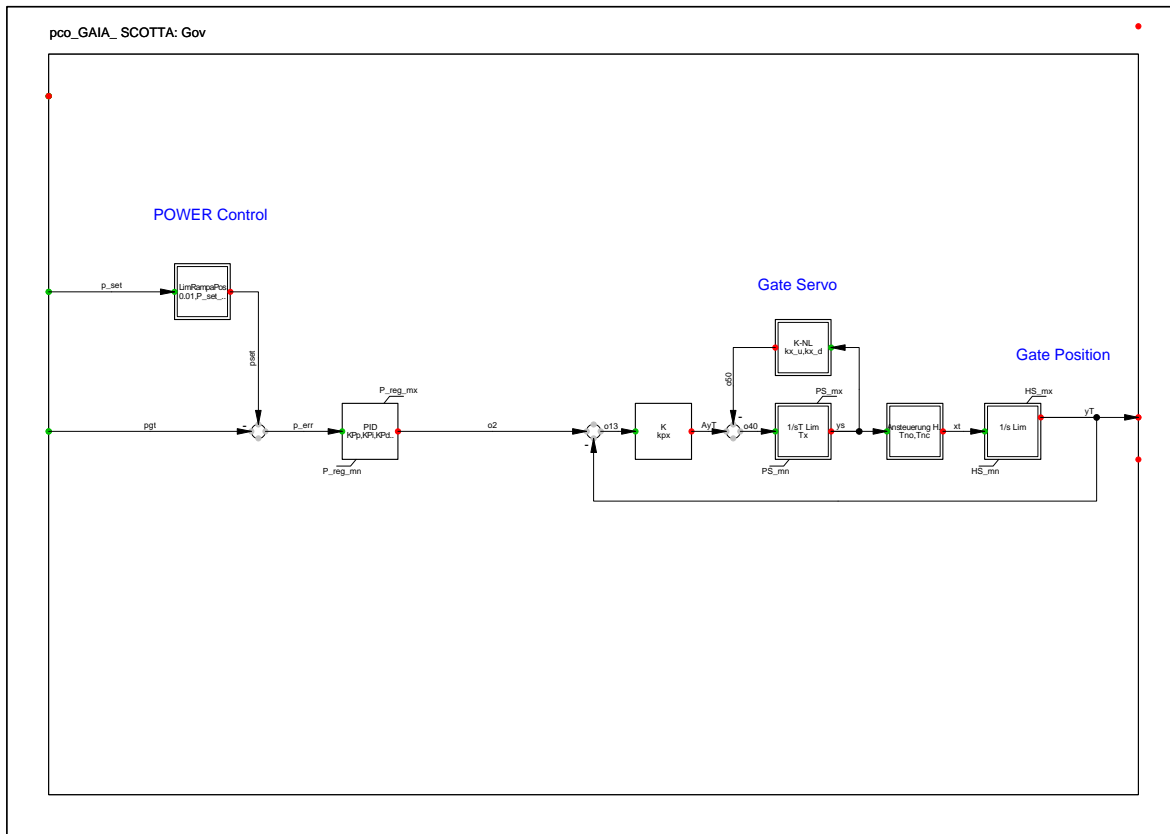
Una vez realizado el diagnóstico y verificada la información en sitio, se determina que el sistema de conducción de agua no cuenta con chimenea de equilibrio y el control de la turbina no posee estatismo transitorio. Cuando la unidad se encuentra sincronizada solo opera una malla de control de potencia por posicionamiento tipo rampa. La unidad no tiene la capacidad de realizar regulación primaria.

De acuerdo con información suministrada por el fabricante Scotta, el controlador de velocidad para arranque y sincronización, es del tipo PI, por señal de medición de velocidad en transductor de pulsos. Dicho controlador solo es utilizado para la sincronización y no es posible dar escalones en la referencia de velocidad ya que esta proviene directamente de la frecuencia de la red. Por otro lado, ante un rechazo de carga de cualquier tipo la unidad va a parada total.

En cuanto al deflector solo opera con control on-off frente a rechazos de carga.

En función a lo descrito se plantea la estructura matemática del regulador de acuerdo a la Figura 11.



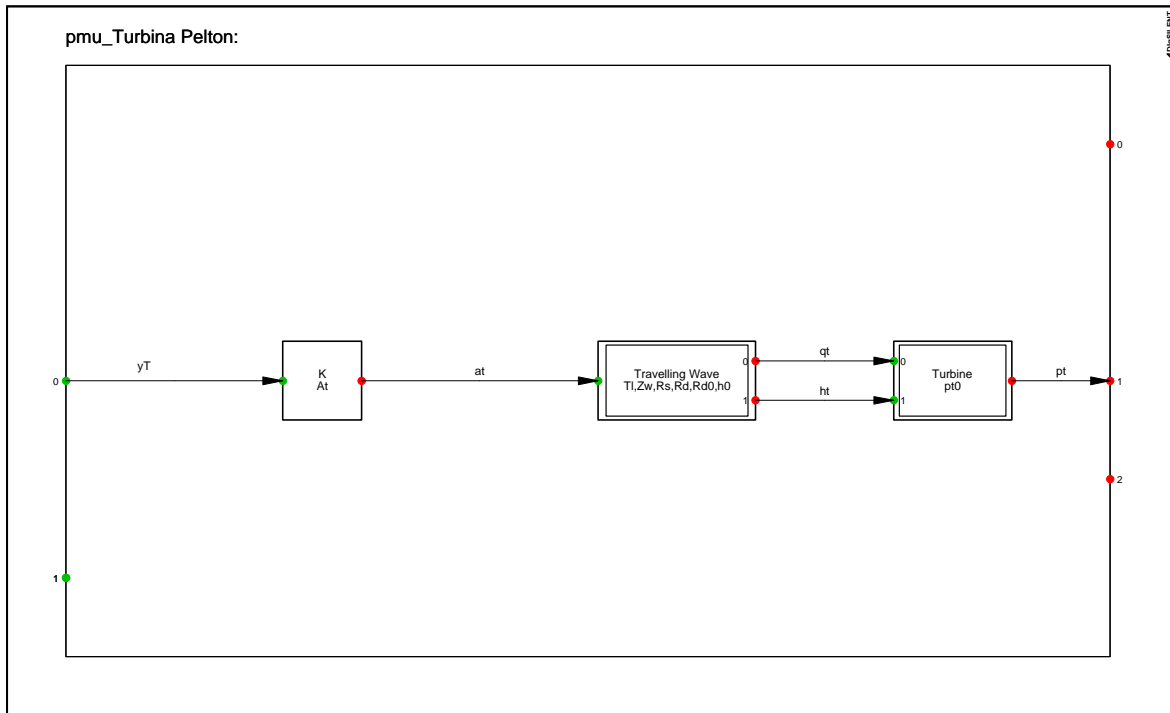


**Figura 11. Modelo Gobernador Central Cumbres**

El gobernador presentado en la Figura 11, es un regulador de carga con un controlador no lineal de tipo rampa. Se tiene un servomecanismo para el control de inyectores.

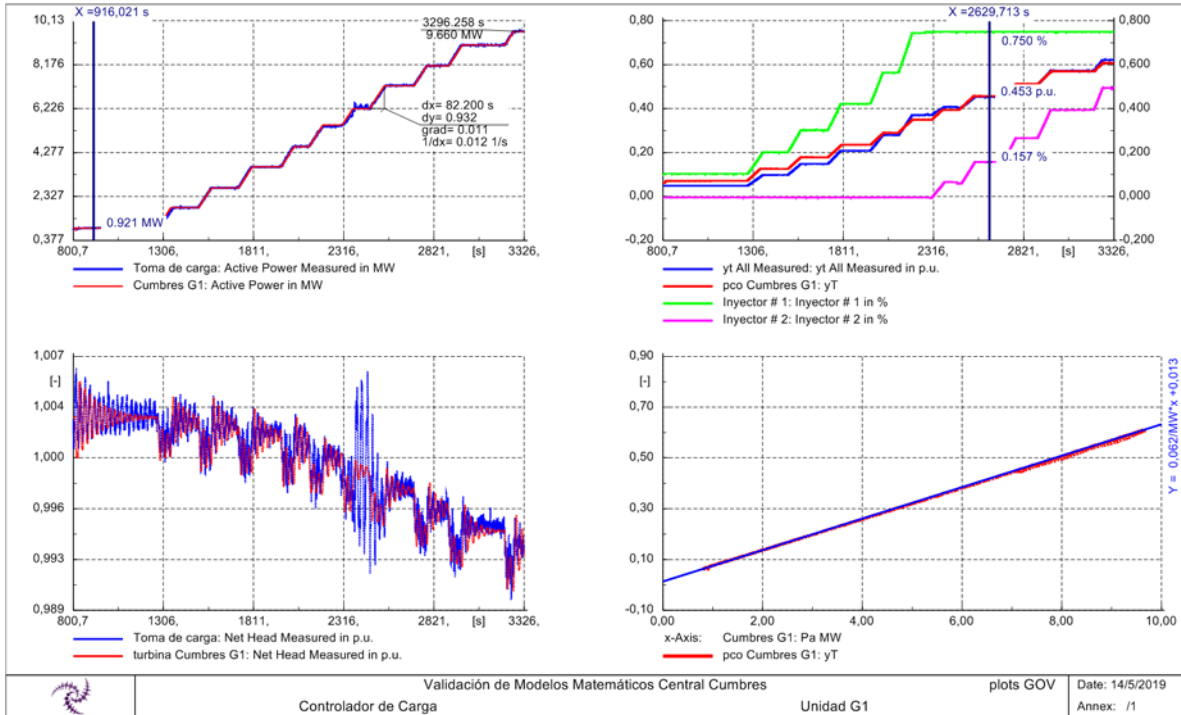
El modelo no presenta los lazos de velocidad, ya que no hubo la posibilidad de homologar los mismos y adicionalmente dicho modo de control solo se activa cuando la unidad opera en vacío.

El modelo de sistema de presión – caudal – potencia mecánica, correspondiente a la turbina, es un modelo desarrollado por DIG SILENT GmbH y se adapta a requerimientos de simulaciones en redes grandes. Este se ilustra en la Figura 12.



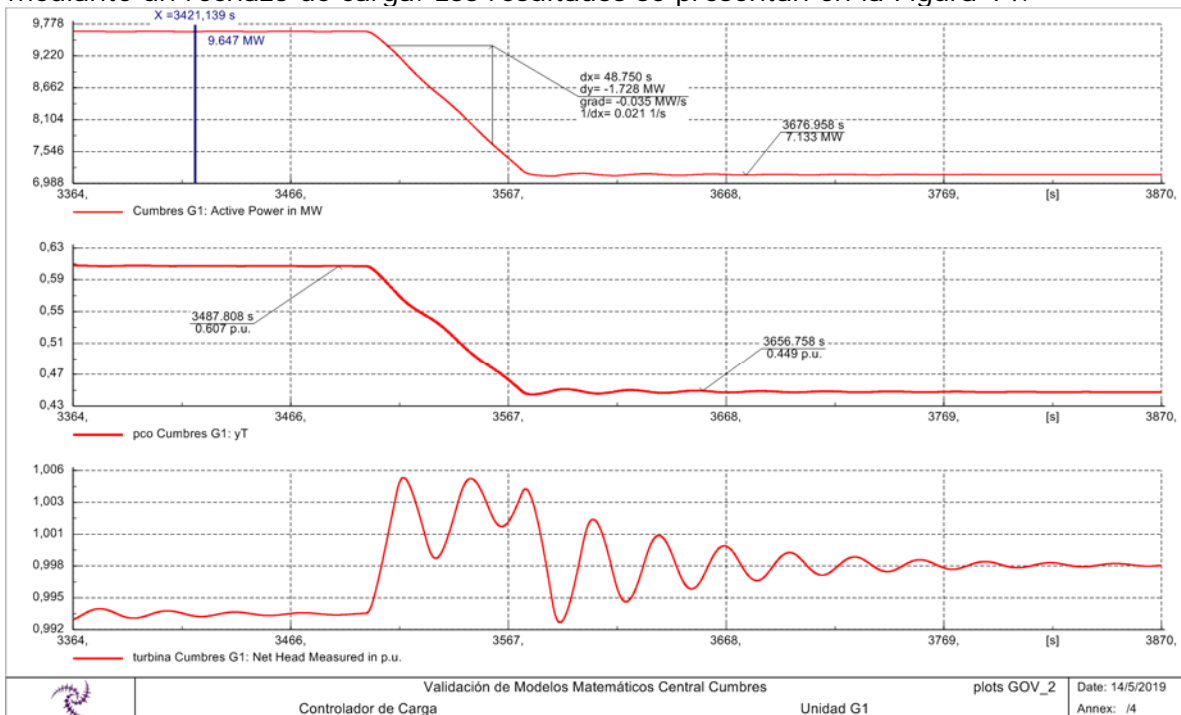
**Figura 12. Modelo Turbina Central Cumbres**

Se procede entonces a validar el modo de control de toma de carga, mediante el ensayo de escalón en la referencia de carga (escalón positivo en la referencia de carga). Los resultados se presentan en la Figura 13.



**Figura 13. Validación Gobernador Central Cumbres**

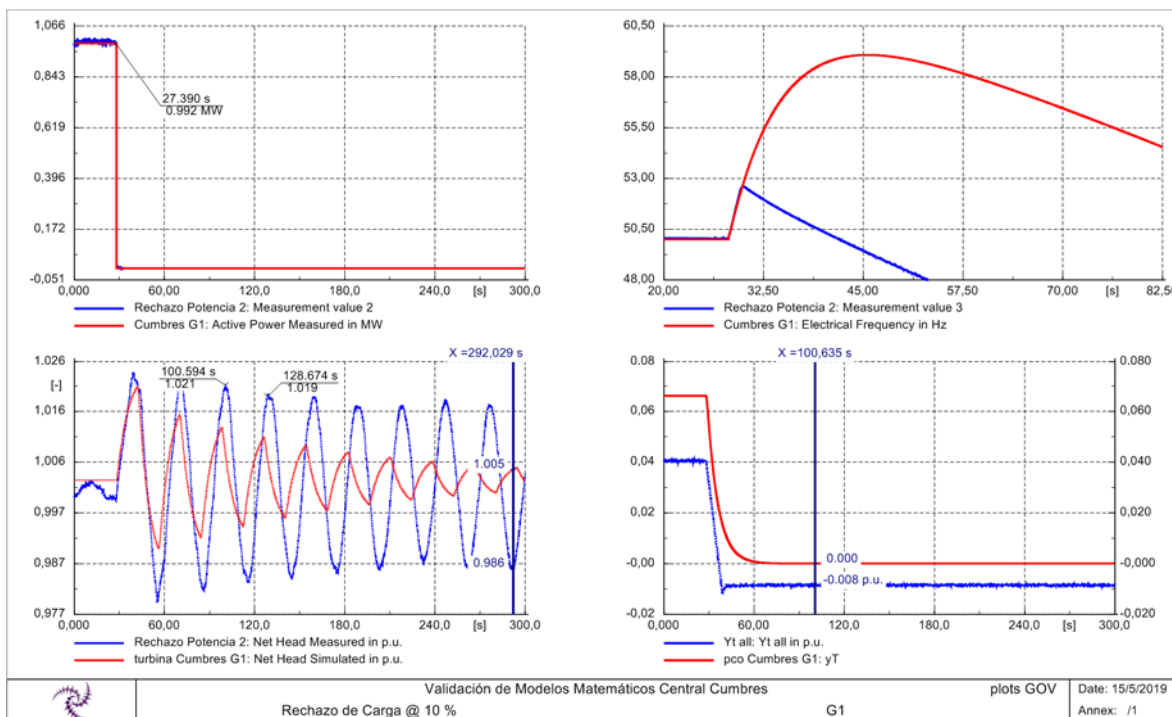
Se observa en la Figura 13 la respuesta frente a cambios en la consigna de potencia. Se presentan la potencia activa, la suma de posición de los inyectores medida y la presión. Las magnitudes en color rojo son simuladas y en azul medidas. Adicionalmente, se realiza la validación del modelo del sistema de conducción de agua, mediante un rechazo de carga. Los resultados se presentan en la Figura 14.



**Figura 14. Validación Gobernador, Central Cumbres**

En la Figura 14, se presenta el comportamiento simulado del modelo para escalón en la referencia de carga de flanco negativo, donde se puede observar la velocidad de reducción de carga es igual a la presentada/identificada en la Figura 10, donde se tiene un gradiente de reducción de 35 kW/s.

Habida consideración, seguidamente se realiza el ajuste del modelo del sistema tubería-sistema de presión-turbina, mediante el ensayo de rechazo de carga. El resultado se presenta en la Figura 15.



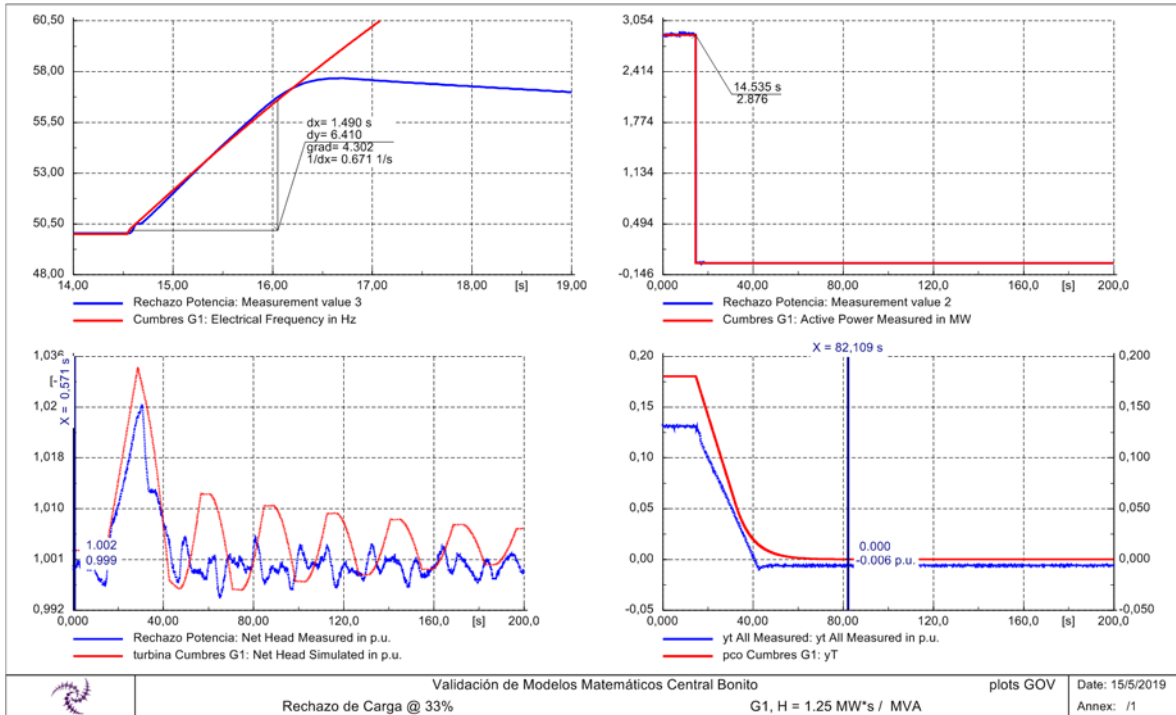
**Figura 15. Validación Turbina, Central Cumbres**

Se observa en la Figura 15 que los modos de oscilación de presión medidos y simulados son muy similares en la fase (lo relevante son los primeros segundos de ello). Respecto a la amplitud, en la medición se tiene que es mayor. Es posible ajustar el modelo para reproducir esa magnitud, sin embargo, en régimen estático se hace inestable, por lo que se ha dado prioridad en ajustar la fase del sistema.

En cuanto a la velocidad se observa que en el modelo la respuesta es distinta, ya que el mismo no incluye el sistema de deflectores. Para los efectos necesarios de simulación en el sistema de potencia no es necesario modelar el deflector, ya que solo opera en el rechazo de carga.

Se considera que la respuesta del modelo es satisfactoria, tanto para el gobernador (regulador de velocidad) como para la turbina.

Finalmente, se determina la inercia de la unidad mediante el ensayo de rechazo de carga. El resultado se presenta en la Figura 16.



**Figura 16. Rechazo de Carga con 2,8 MW de Potencia, Cumbres 01**

Del ensayo de rechazo de carga y las mediciones efectuadas se determina una inercia en la unidad de **H = 1,25 MW/s\*MVA**.

Considerando los resultados satisfactorios alcanzados con la estructura propuesta para el regulador de velocidad y la turbina, los parámetros asociados a estos se presentan en la Tabla 3 y Tabla 4.

Parámetros Gov Cumbres G1				
Name	Value	Unit	Description	Origen
Tx	0,05	[pu]	Injector pilot valve time constant	Estimado
kx_u	0,1	[pu]	Injector pilot valve gain 1 (open)	Estimado
kx_d	0,1	[pu]	Injector pilot valve gain 1 (close)	Estimado
KPp	2	[pu]	Controller Gain	Homologado
KPi	0,258	[pu]	Controller Integral Gain	Homologado
KPd	0	[pu]	Controller Derivative Gain	Homologado
TPd	5	[s]	Derivative Time Const.	Homologado
Tno	130	[s]	Opening time injector	Homologado
Tnc	130	[s]	Closing time injector	Homologado
P_set_rate_up	0,0000006	[pu/s]	Power Demand Rate Increase	Homologado
P_set_rate_down	0,0000017	[pu/s]	Power Demand Rate Decrease	Homologado
kpx	1,7	[pu]	Injector pilot valve gain 2	Estimado
HS_mn	0	[pu]	Injector/blade min. position	Estimado
PS_mn	-1	[pu]	Pilot valve min. position	Estimado
P_reg_mn	0	[pu]	Minimum Load	Estimado
HS_mx	0,65	[pu]	Injector/blade max. position	Homologado
PS_mx	0,65	[pu]	Pilot valve max. position	Homologado
P_reg_mx	0,65	[pu]	Maximum Load	Homologado

**Tabla 3. Parámetros Regulador Automático de Velocidad Central Cumbres**

Los parámetros del modelo de Turbina se presentan en la Tabla 4.

Parámetros Turbina Cumbres G1				
Name	Value	Unit	Description	Origen
At	1,6	[s ]	Turbine Gain	Homologado
Tl	7	[s ]	Water Travelling Time	Homologado
Zw	0,2	[--]	Allievie Constant	Homologado
Rs	0,01	[pu]	Static Head Losses	Homologado
Rd	0,4	[pu]	Dynamic Head Losses	Homologado
Rd0	0,1	[pu]	No load Dynamic Loss	Homologado
h0	1,003	[pu]	Nominal Head	Homologado
pt0	0,01	[pu]	No Load Losses	Homologado

**Tabla 4. Parámetros Turbina Central Cumbres**

## 6. DETERMINACIÓN DE TIEMPOS DE PARTIDA Y PARADA

Los tiempos de partida se obtienen de acuerdo a los lineamientos del "ANEXO TÉCNICO: DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA LOS PROCESOS DE PARTIDA Y DETENCIÓN DE UNIDADES GENERADORAS", vigente de acuerdo a la normativa Chilena.

### 6.1 Tiempo de Partida/Arranque

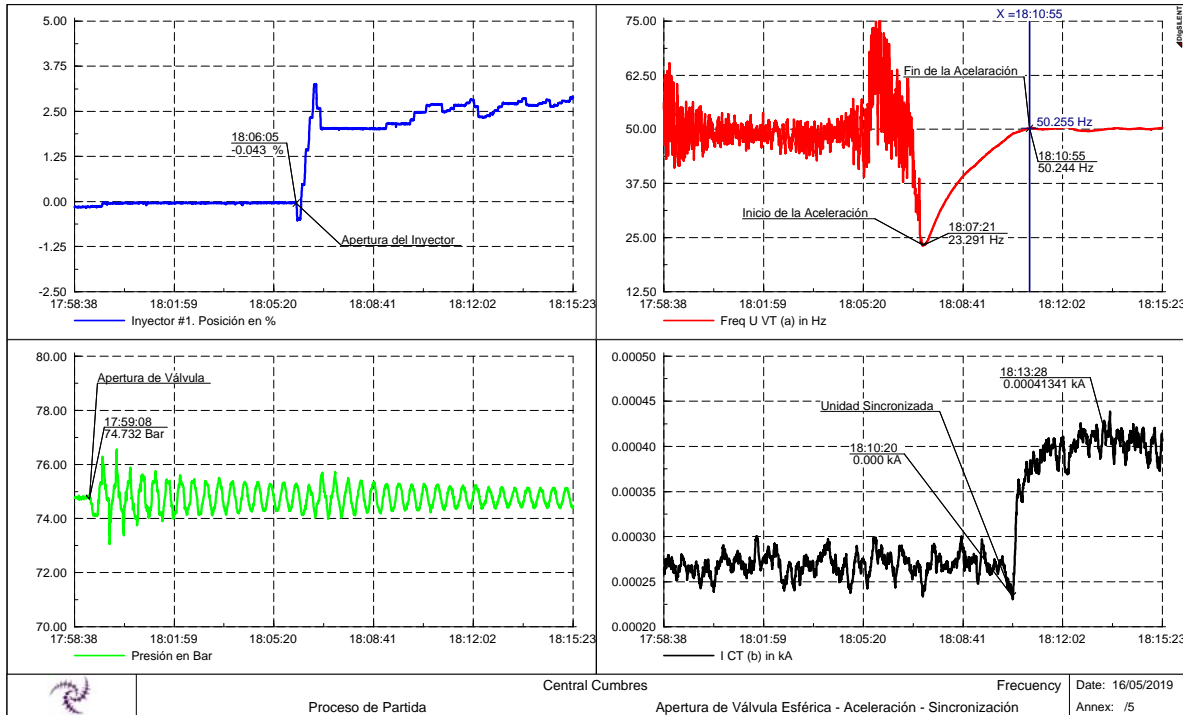
De acuerdo a información recabada en planta se presentan en la tabla siguiente los tiempos informados de cada maniobra del proceso de partida. Estos tiempos pueden tener variaciones no significativas respecto al proceso real; por otro lado, existe un tiempo de "Verificaciones del Sistema de Control", en el cual dicho sistema realiza las verificaciones de que la secuencia se esté desarrollando exitosamente mediante la retroalimentación de su lógica con los distintos sensores en campo.

Tiempo de Partida Unidad Cumbres 01		
Evento	Tipo de Evento	Tiempo (min:seg)
Apertura de "By Pass" y Equilibrio de Presiones	Inicial	01:00
Apertura de la Válvula Esférica	Secuencial	03:00
Apertura del Deflector	Secuencial	00:20
Aceleración	Secuencial	03:43
Arranque de Excitación	Secuencial	00:40
Sincronización	Secuencial	00:35
Toma de Carga Mínimo Técnico	Secuencial	00:22
Tiempos de Verificaciones Sistema de Control	Intermedio en la Secuencia	01:30
<b>TOTAL</b>	-	<b>11:10</b>
<b>Tiempo de Partida Asumido Basado en Mediciones</b>	-	<b>11:30</b>

**Tabla 5. Tiempos de Partida, Central Cumbres**

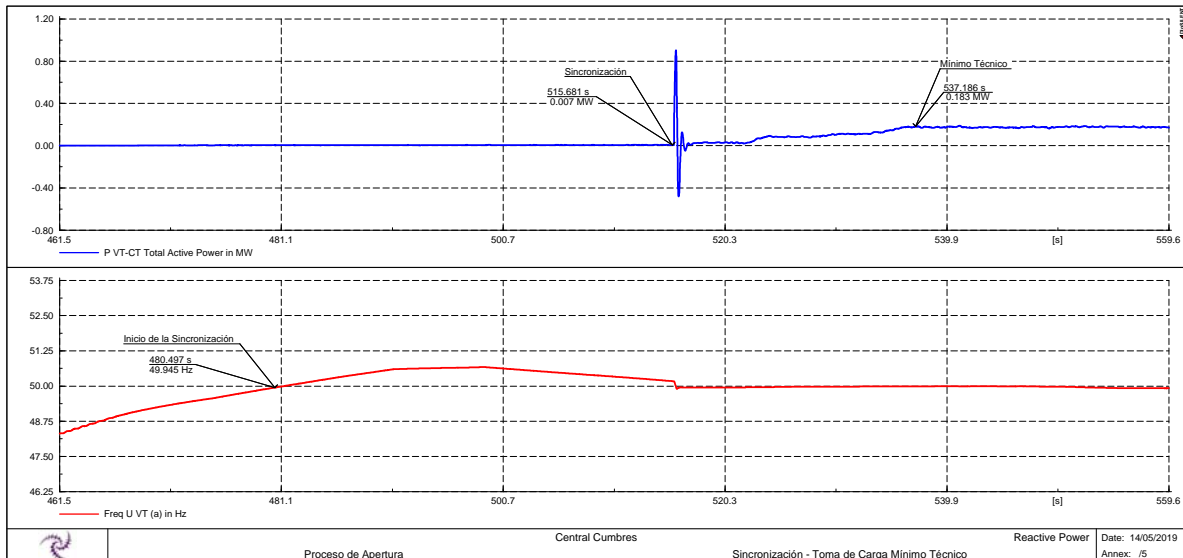
La característica de los eventos presentados en la Tabla 5 principalmente son secuenciales, ya que el proceso de arranque requiere de un evento se complete antes de iniciar el siguiente.

Para corroborar alguno de estos valores, en las Figuras 17 y 18 se presentan mediciones del proceso de arranque de la unidad Cumbres 01.



**Figura 17. Secuencia de Partida, Cumbres 01**

En la Figura 17 se presenta la presión, posición del inyector, frecuencia y corriente de fase del generador. En la señal de presión se observa el inicio del arranque por la perturbación en dicha señal producto de la apertura del “by pass” de la válvula esférica. Luego se observa la apertura del inyector y la consecuente aceleración de la unidad. Finalmente, en la señal de corriente de fase se observa la sincronización de la unidad. El tiempo total medido es de 11 minutos y 12 segundos desde el inicio de la apertura de la válvula hasta la sincronización.



**Figura 18. Sincronización y toma de carga mínima, Cumbres 01**



En la Figura 18 se presenta la sincronización y toma de carga. La sincronización en esta unidad es relativamente rápida, ya que, al no poseer una regulación en vacío con banda muerta pequeña, el sincronizador mantiene la tensión igualada y en cuando la unidad pasa por la frecuencia de red se da el comando de cierre al interruptor. De acuerdo a esta medición ello toma 35 s. Sincronizada la unidad, la toma de carga hasta el mínimo demora poco tiempo, aproximadamente 25 s.

En base a los tiempos presentados y al tiempo medido durante los ensayos es que se asume un tiempo de partida de **11 minutos y 30 segundos**.

## 6.2 Tiempo de Parada/Detención

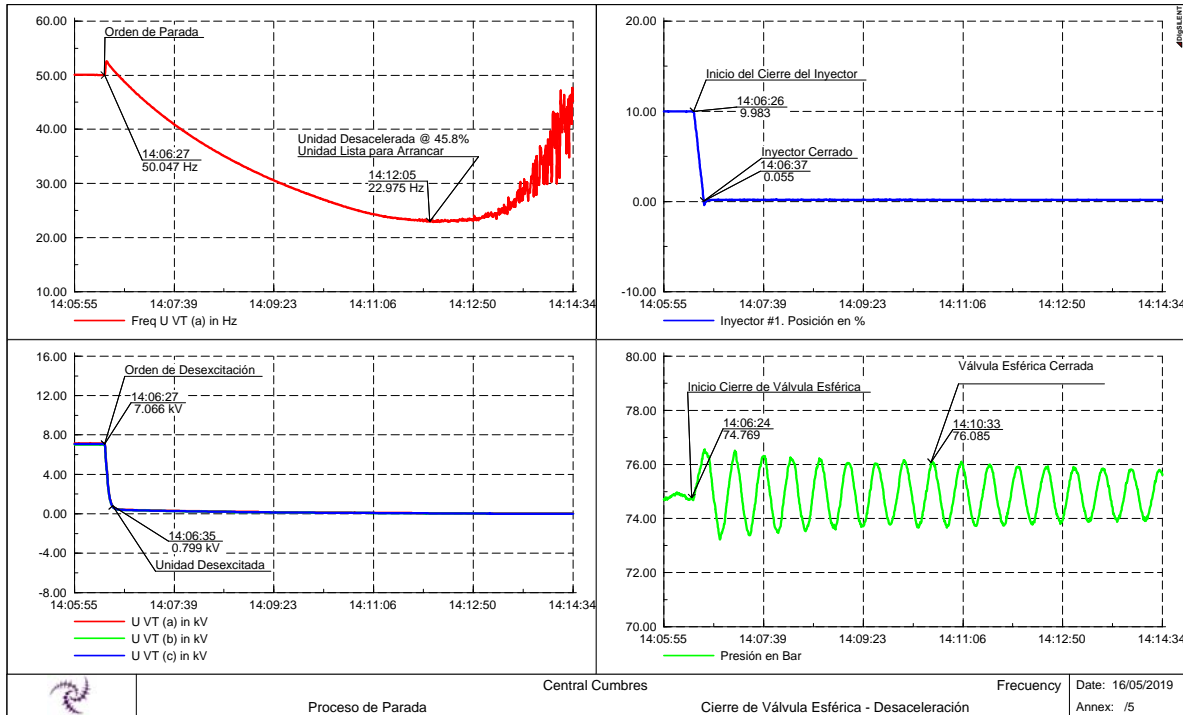
En el caso del tiempo de parada se tiene que los eventos que componen la maniobra no son necesariamente secuenciales y en su mayoría son simultáneos. La tabla siguiente presenta los eventos con su temporalidad de acuerdo a lo informado.

Tiempo de Detención Unidad Cumbres 01		
Evento	Tipo de Evento	Tiempo (min:seg)
Orden de Parada	Inicial	00:02
Desexitación	Simultánea	00:15
Cierre del Deflector	Simultánea	00:20
Cierre del Inyector	Simultánea	00:10
Desaceleración	Simultánea	05:35
Cierre de la Válvula Esférica	Simultánea	03:50
<b>Máximo Tiempo Entre Eventos Simultáneos</b>	-	<b>05:35</b>
<b>Tiempo de Detención Asumido</b>	-	<b>06:00</b>

**Tabla 6. Tiempos de Parada, Central Cumbres 01**

En referencia a los eventos presentados en la Tabla 6 se tiene que el de mayor duración es el de desaceleración de la unidad. La unidad no posee freno y se debe aguardar a que la velocidad de rotación sea del orden del 20 % para que se encuentre lista para arrancar.

Por otro lado, de las mediciones efectuadas y que se presentan en la Figura 19, es posible corroborar los tiempos señalados en la Tabla 6. Así, se tiene que el tiempo total de desaceleración hasta una velocidad del orden de 45 % es de aproximadamente de 5 minutos y 30 segundos, velocidad a la cual la unidad ya se encuentra en condiciones de arrancar nuevamente. También es posible determinar del gráfico, de manera aproximada, los tiempos de cierre del inyector, de desexitación y cierre de válvula esférica.



**Figura 19. Rechazo de Carga con 2,8 MW de Potencia, Cumbres 01**

De acuerdo a las mediciones efectuadas y los tiempos de eventos informados es que se asume un tiempo de parada para unidades de Central Cumbres **de 6 minutos**.

## 7. CONCLUSIONES

Luego de haber realizado los estudios presentados se concluye lo siguiente.

- Los modelos matemáticos (estructura y parámetros) obtenidos para el regulador automático de tensión han sido homologados de forma exitosa, en lo referente a la malla de control de tensión y la malla de control por factor de potencia.
- El sistema de excitación cuenta con limitadores de corriente máxima de excitación y potencia reactiva mínima; ambos implementados en un PLC externo que hace el control de la planta e introduce la limitación en la consigna de factor de potencia. Se han realizado ensayos para realizar su homologación sin embargo no se percibe una dinámica de actuación de limitadores, sino más pareciera una limitación en la misma consigna. Se recomienda que los limitadores del sistema de excitación sean los mismos que contiene el AVR, y no implementar limitadores externos, ya que podría haber un fallo en el PLC y la unidad quedaría sin limitadores.
- El modelo del regulador turbina ha sido identificado y homologado en forma satisfactoria. Los errores obtenidos se encuentran dentro parámetros normales. La unidad no cuenta con estatismo transitorio ni lazo de regulación primaria de frecuencia para la operación con carga.
- Se recomienda la utilización de los modelos matemáticos presentados para simulaciones y estudios eléctricos en el sistema de potencia.
- Se recomienda utilizar al modelo de la unidad Cumbres 01 para representar la dinámica y sistemas de control de la unidad Cumbres 02, dado que son unidades idénticas.

## 8. ANEXO 1: Central Hidroeléctrica Cumbres Parámetros Máquina Síncrona Generador 01.

Name:

Nominal Apparent Power:  MVA

Nominal Voltage:  kV

Power Factor:

Connection:

---

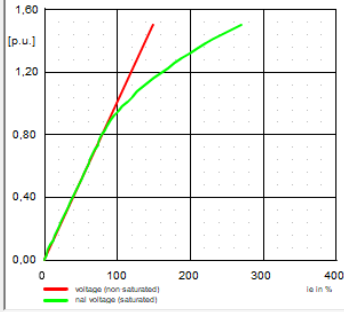
General Zero/Negative Sequence Data Saturation Damping Advanced

Main Flux Saturation:  Saturation:

Saturation Parameter

SG10:  p.u.

SG12:  p.u.



Model:  Input parameters:

Detailed model 2.1 (field and one damper winding in the d-axis, and one damper winding in the q-axis)

Inertia

Input Mode:

Inertia Constant H (rated to Sgn):  s

Stator parameters

rstr:  p.u.

xl:  p.u.

Synchronous Reactances

$x_d$ :  p.u.

$x_q$ :  p.u.

Rotor Type

Salient pole

Round Rotor

Rotor mutual reactances

xrld:  p.u.

xrlq:  p.u.

Transient Time Constants

$T_d'$ :  s

Transient Reactances

$x_d'$ :  p.u.

Subtransient Time Constants

$T_d''$ :  s

$T_q''$ :  s

Subtransient Reactances

$x_d''$ :  p.u.

$x_q''$ :  p.u.