

---

## ENSAYOS Y SIMULACIONES PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL REGULADOR AUTOMÁTICO DE VELOCIDAD DE TV DE CICLO COMBINADO

**P. D. GILL ESTÉVEZ\***  
**TRANSENER S. A.**  
Universidad de Buenos Aires  
Argentina

**L. TORRES**  
**Mercados Energéticos S. A.**  
Argentina

**A. CONTI**  
**Mercados Energéticos S. A.**  
Universidad de Buenos Aires  
Argentina

**Resumen** –Se presenta un estudio de ajuste del regulador automático de velocidad (RAV) de la turbina de vapor de 60 MW de un ciclo combinado. Se llevaron a cabo las siguientes tareas:

- Realización de ensayos para diferentes condiciones de funcionamiento.
- Análisis de la estructura del RAV y confección de modelo matemático correspondiente. Adopción de modelos de turbina de vapor, caldera de recuperación de calor y generador, los cuales fueron necesarios para reproducir con mayor precisión los ensayos de la unidad operando en paralelo con la red.
- Homologación de los modelos con los registros obtenidos. En virtud de la necesidad de proponer nuevos ajustes, la homologación exigió que los parámetros proporcional, integral y derivativo del modelo matemático se correspondan con los que se encuentra ajustado el RAV.
- Estimación de nuevos ajustes que permitan una correcta operación de la unidad.

**Palabras clave:** Turbina de vapor – Ensayos – Regulador de velocidad – Homologación de modelos – Ajuste de parámetros

### 1 INTRODUCCIÓN

Se presenta un estudio de ajuste del regulador automático de velocidad (RAV) de la turbina de vapor de 60 MW de un ciclo combinado, mediante la utilización de un modelo homologado con ensayos bajo diferentes condiciones de funcionamiento. En el momento de la realización del trabajo, el autor se desempeñaba como consultor en Mercados Energéticos S.A.

Tradicionalmente los controles de caldera y turbina han sido analizados con un único sistema para controlar ambos elementos. Esto puede considerarse cierto debido a que ambos operan de manera conjunta para entregar una determinada potencia. Asimismo debe existir cierta coordinación para que la energía que se almacena entre ambos sistemas permita la operación estable tanto en régimen estacionario como transitorio. De manera que surgen dos alternativas ampliamente conocidas y utilizadas [1].

Una estrategia de control es la conocida como “caldera seguidora”, donde la consigna de potencia controla la posición de la válvula de vapor. Cuando se producen variaciones de carga, la caldera sigue dicho cambio a expensas de su energía almacenada.

Otro esquema de control es el denominado “turbina seguidora”, también conocido como “control de presión de admisión”. La turbina de vapor sigue las variaciones del calor generado por la caldera tratando de mantener constante la presión en la válvula de admisión de vapor. Consecuentemente se producen cambios en la potencia que genera la turbina. La configuración “turbina seguidora” es utilizada generalmente en unidades que operan en carga base. Ya que este control produce una respuesta muy lenta, incluso con calderas rápidas, es utilizado en turbinas de vapor de ciclo combinado, como el caso presentado en este trabajo.

El esquema de controlador estudiado está constituido por dos lazos en cascada: Un control de presión lento (constituido de un lazo proporcional, integral y derivativo PID) modula la velocidad de referencia del generador. El control de velocidad también es un lazo PID, pero relativamente más rápido, de forma tal que la máquina pueda aportar RPF ante variación rápidas de frecuencia de red, y luego restablecer el valor de presión en la admisión.

## 2 MODELO DEL REGULADOR DE VELOCIDAD

El esquema del regulador, expuesto en la Fig. N° 1, está constituido por un bloque de control de presión de vapor de entrada, en cascada con el control de velocidad/frecuencia. El regulador permite la posibilidad de adoptar dos alternativas de realimentación para implementar el estatismo:

1. Estatismo en función de la salida del regulador
2. Estatismo en función de la potencia (por medio de la instalación de un transductor de potencia activa)

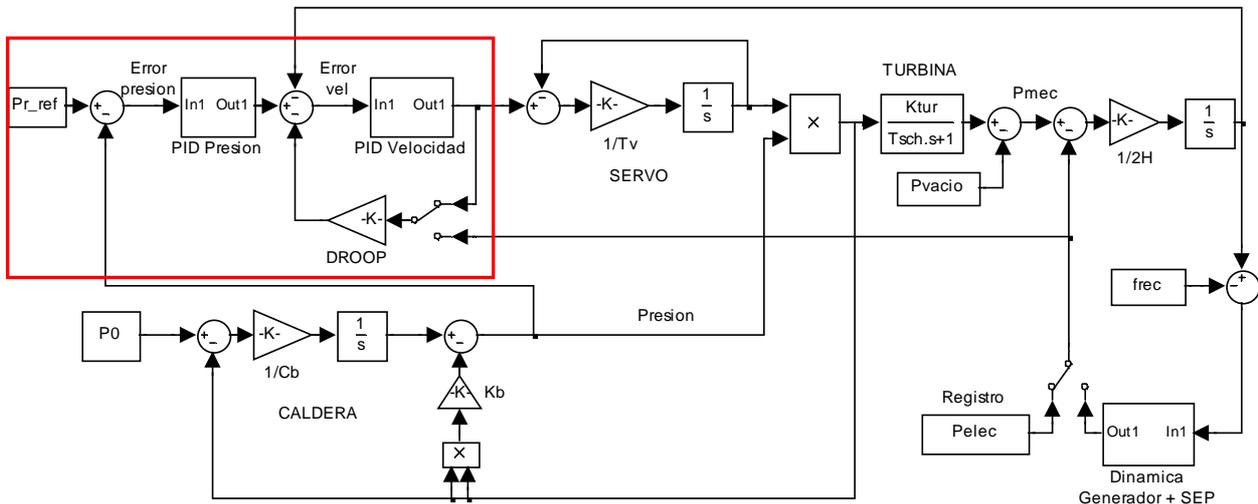


Fig. N° 1. Diagrama en bloques del modelo del sistema estudiado

Los reguladores de presión y velocidad son del tipo PID (control proporcional, integral y derivativo). La función de transferencia de los bloques PID se puede ajustar a partir de los siguientes parámetros: P es la ganancia proporcional, I la ganancia integral y SDR el denominado "Derivative ratio". Dentro de las opciones que brinda el regulador, se adopta un esquema de control del tipo "feedback dominant" (SDR>1), para el cual se presenta en la Fig. N° 2 el diagrama en bloques correspondiente para los controles PID reportado en la hoja de datos del regulador.

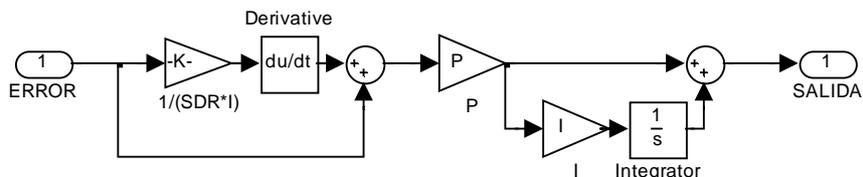


Fig. N° 2. Diagrama en bloques de regulador PID

## 3 ENSAYOS REALIZADOS

Se efectuaron ensayos con la máquina en vacío y en operación en paralelo con la red. La Tabla 1 resume los ensayos efectuados. En cada caso se registran: referencia de velocidad, velocidad, presión de vapor de entrada, salida del regulador y potencia eléctrica.

Tabla 1 Ensayos Realizados

ENSAYO	Control de presión	Estatismo
VACIO 1	Desactivado	Deshabilitado
VACIO 2	Activado	Deshabilitado
PARALELO 1	Desactivado	Salida de regulador
PARALELO 2	Activado	Salida de regulador
PARALELO 3	Desactivado	Potencia eléctrica
PARALELO 4	Activado	Potencia eléctrica

## 4 HOMOLOGACIÓN DEL SISTEMA

### 4.1 PID de velocidad

La homologación del regulador se efectúa inyectando al bloque PID de velocidad la señal de error medida y luego comparando la salida de la simulación con la salida registrada. En las condiciones de los ENSAYO EN VACIO 1 y ENSAYO EN PARALELO 1, se aplica un escalón a la referencia de velocidad. Se identifica la necesidad de introducir un factor de escala a la salida del modelo matemático del PID y otro en el lazo de realimentación del estatismo, para utilizar exactamente los parámetros ajustados en el regulador por display (P, I y SDR). La Fig. N° 3 y la Fig. N° 4 muestran salida del regulador simulada y registrada en cada ensayo. En el caso de operación en paralelo, se aprecia superpuesta la acción de ante variaciones de frecuencia de la red.

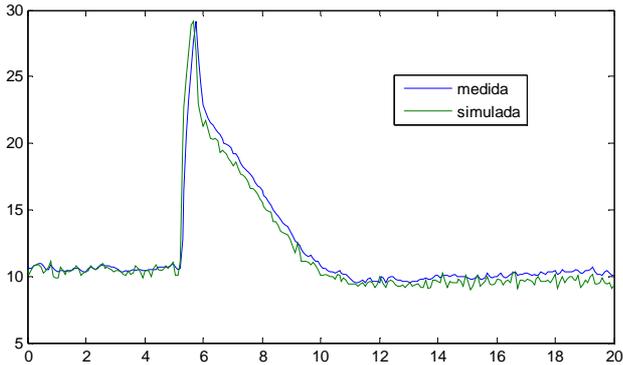


Fig. N° 3 Salida regulador de velocidad.  
Ensayo en vacío 1

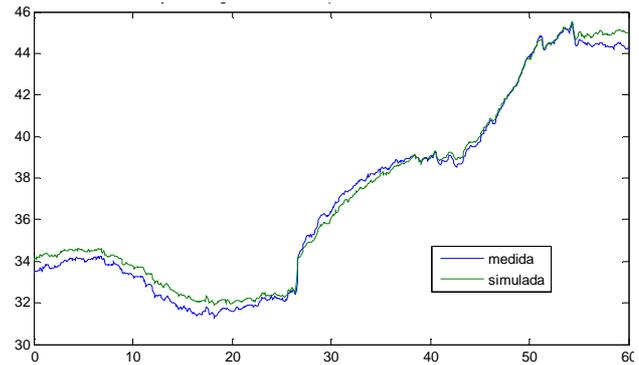


Fig. N° 4. Salida regulador de velocidad.  
Ensayo en paralelo 1

### 4.2 PID presión

Se efectúa la aplicación de un escalón en la referencia de presión en las condiciones de ENSAYO EN PARALELO 2. Se inyecta la señal de error de presión medida al modelo del PID de presión y se compara la salida simulada y registrada. Los resultados se exponen en la Fig. N° 5. Se identifican nuevamente factores de escala necesarios.

### 4.3 Turbina

Se ajusta un modelo simplificado de turbina mediante los registros obtenidos la aplicación de un escalón en la referencia de velocidad en las condiciones de ENSAYO EN VACIO 1. Se inyecta la señal de error de velocidad registrada sobre el modelo y se supone que la presión del vapor de entrada se mantiene constante (anulando así el bloque que representa la caldera, cuyo modelo aún se desconoce). Los parámetros que se obtienen son:  $T_v$  (constante de tiempo del servo),  $T_{sch}$  (constante de tiempo de la dinámica de la turbina),  $H$  (constante de inercia) y  $P_{vacio}$  (constante para ajustar potencia mecánica de vacío a cero). Notar que el modelo de cada elemento no se homologa por separado, sino en su conjunto.

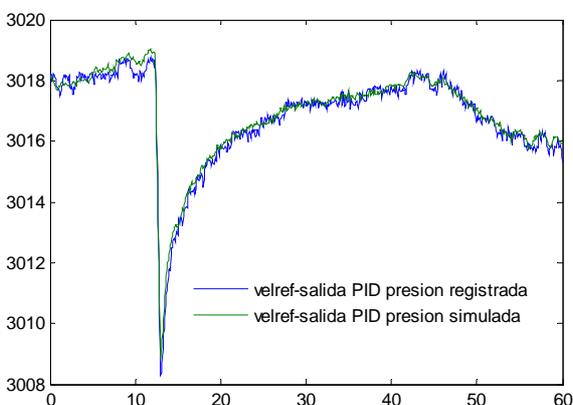


Fig. N° 5. Salida regulador de presión.  
Ensayo en paralelo 2

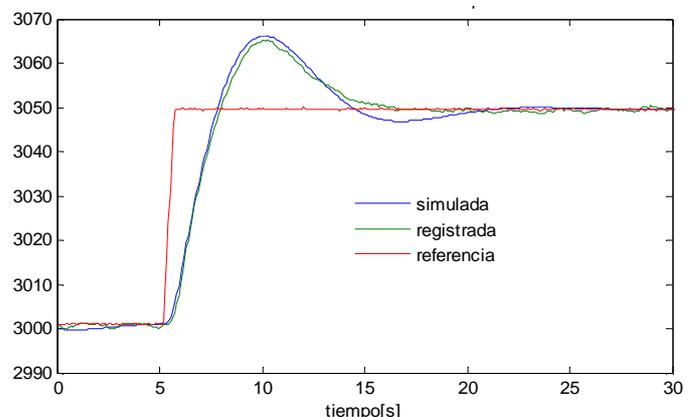


Fig. N° 6. Velocidad  
Ensayo en vacío 1

#### 4.4 Caldera

Debido a que la máquina posee un lazo de regulación de presión, es necesario modelar la dinámica de la caldera, generalmente despreciada en modelos para estudios de estabilidad transitoria. La estructura del modelo de caldera está basada en las recomendaciones IEEE [2]. Se utilizan los registros obtenidos en condiciones del ENSAYO EN VACIO 1 ante un escalón en la velocidad de referencia y los registros en las condiciones de ENSAYO PARALELO 1, solamente observando los cambios debidos a la variación de frecuencia de la red. Además, en el caso de paralelo, se inyecta al modelo la señal de potencia eléctrica registrada. Se ajustan los parámetros: constante de tiempo  $C_b$  y el coeficiente de fricción  $K_b$ . La entrada que depende del estado de las TG se mantiene fija en este estudio ( $P_0$ ). Los resultados se muestran en la Fig. N° 7 y la Fig. N° 8.

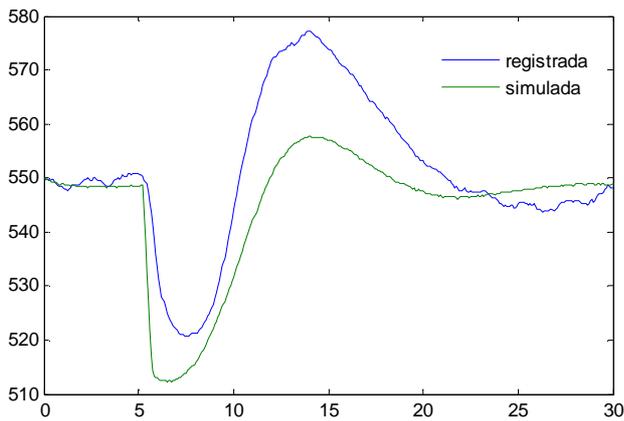


Fig. N° 7. Presión  
Ensayo en vacío 1

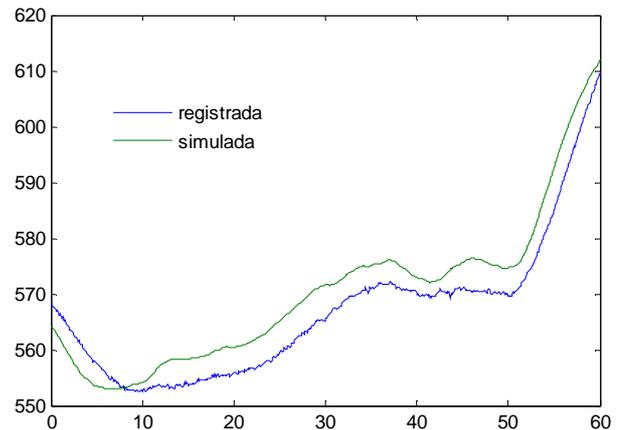


Fig. N° 8. Presión  
Ensayo en paralelo 1

## 5 PRUEBAS ADICIONALES

### 5.1 Prueba control de presión - Estatismo por salida de regulador

Se utilizaron los registros obtenidos de la aplicación de un escalón en la presión de referencia en las condiciones del ENSAYO EN PARALELO 2. Adicionalmente al registro de presión de referencia, se inyecta el registro de la potencia eléctrica como entrada al modelo. En las Fig. N° 9 y Fig. N° 10 se puede comprobar un correcto desempeño del modelo.

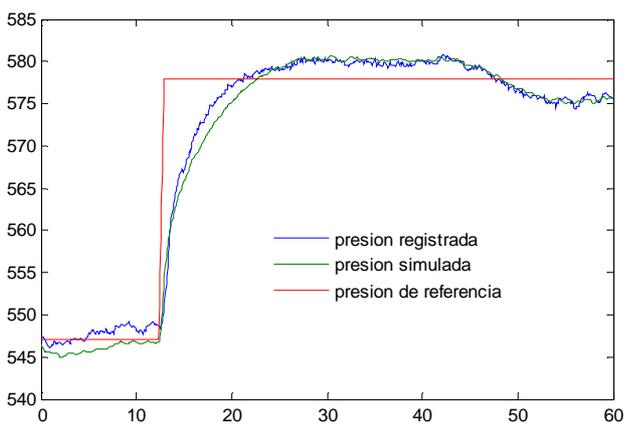


Fig. N° 9. Presión  
Ensayo en paralelo 2

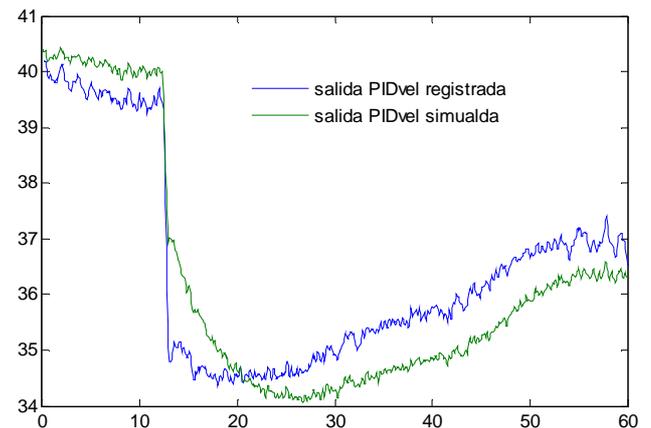


Fig. N° 10 Salida de regulador  
Ensayo en paralelo 2

### 5.2 Estatismo por potencia eléctrica – Sin control de presión

Se considera el estatismo por la medición de la potencia. Los registros efectuados en las condiciones de ENSAYO PARALELO 3 reflejaron un comportamiento oscilatorio del sistema, con el ajuste que tenía el regulador originalmente. Para poder representar estos modos en el modelo, fue necesario incluir la dinámica

del generador más sistema de potencia, simplificada como una función transferencia de segundo orden, según muestra la Fig. N° 1. Esta función de transferencia se ajustó de forma tal que los registros coinciden con las salidas del modelo cuando se inyecta la señal de frecuencia de red registrada. En las Fig. N° 11 y Fig. N° 12 se muestran los resultados de la simulación.

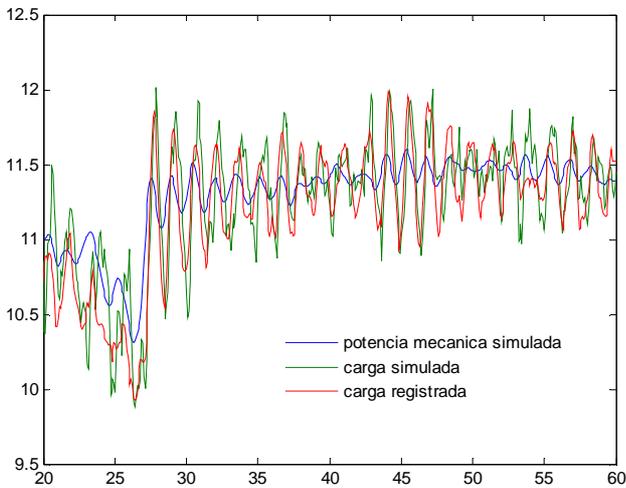


Fig. N° 11 Potencia mecánica y eléctrica  
Ensayo paralelo 3

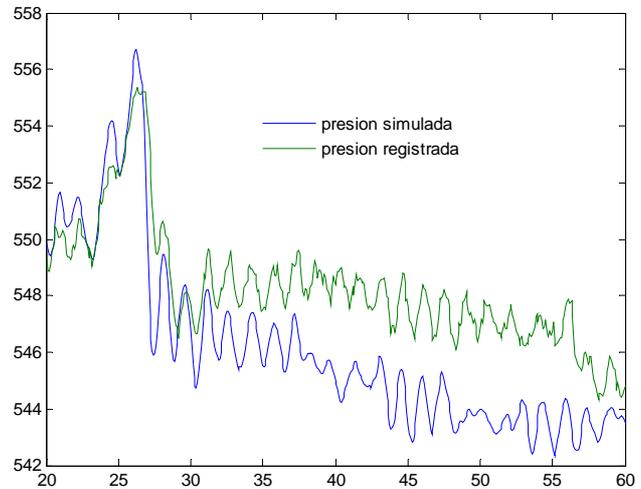


Fig. N° 12 Presión  
Ensayo paralelo 3

## 6 AJUSTE DEL REGULADOR

El objeto del diseño es lograr un control de velocidad relativamente más rápido que el control de presión, de forma tal que la máquina pueda aportar RPF ante variación rápidas de frecuencia de red, y luego restablecer el valor de presión en la admisión. Debido a las diferentes escalas temporales, el control de velocidad se ajusta manteniendo desactivado el control de presión. Luego se procede al ajuste del control de presión con el sistema completo.

### 6.1 Control de velocidad

Se adopta el esquema de estatismo a través de la potencia eléctrica. El lugar de raíces del sistema se muestra en la Fig. N° 13. Se aprecia una rama que tiende hacia el semiplano complejo derecho, tendiente a volver al sistema inestable. La respuesta de potencia mecánica ante un escalón en la velocidad de referencia con el ajuste original se muestra en la Fig. N° 14. Se verifica la presencia del modo poco amortiguado presente en los registros. El controlador fue ajustado para obtener una respuesta rápida (tiempo de establecimiento de aproximadamente 5s) y un aumento del margen de ganancia, así como un estatismo del 4%, cumpliéndose los requisitos de los procedimientos de CAMMESA [3]. En la Fig. N° 15 se expone la respuesta con el ajuste propuesto.

### 6.2 Control de presión

En la Fig. N° 16 se aprecia el lugar de raíces del sistema completo realimentado. Se aprecia que el control de presión produce un fuerte aumento del margen de ganancia, anulando la rama del diagrama que tiende hacia el semiplano complejo derecho. Se ajustan el control para lograr un control de presión relativamente más lento, con un tiempo de subida de aproximadamente 30s, tal como muestra la respuesta ante un escalón en la presión de referencia en la Fig. N° 17.

Finalmente, en las Fig. N° 18 y Fig. N° 19 se muestra la respuesta del sistema ante un escalón en la frecuencia de red. Se verifica la actuación rápida del regulador de velocidad y luego un retorno relativamente más lento a la presión de referencia.

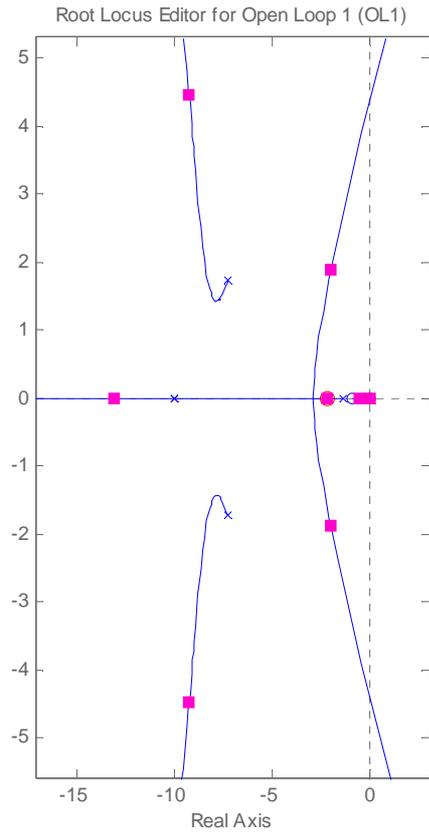


Fig. N° 13 Lugar de raíces, sin control de presión

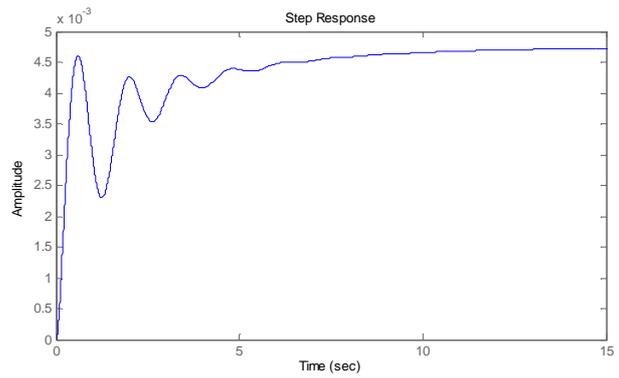


Fig. N° 14 Rta de potencia mecánica ante escalón en velocidad de referencia. Ajuste original

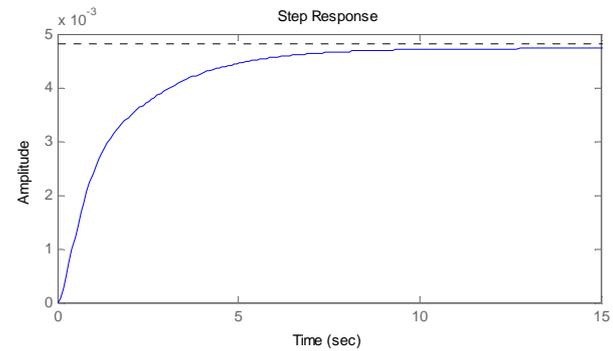


Fig. N° 15 Rta de potencia mecánica ante escalón en velocidad de referencia. Nuevo ajuste

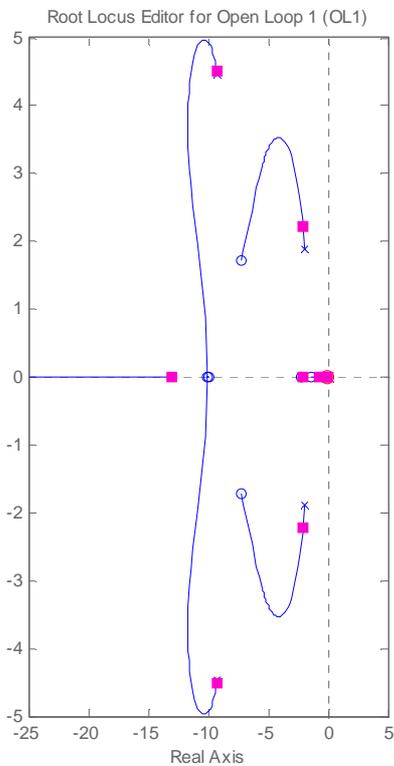


Fig. N° 16 Lugar de raíces. Sistema con control de presión

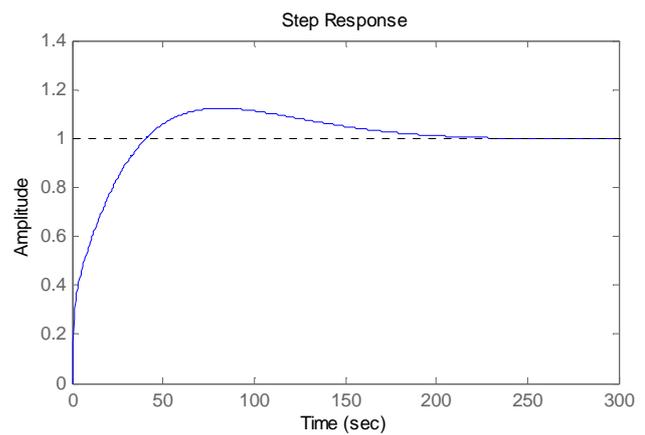


Fig. N° 17 Escalón presión de referencia

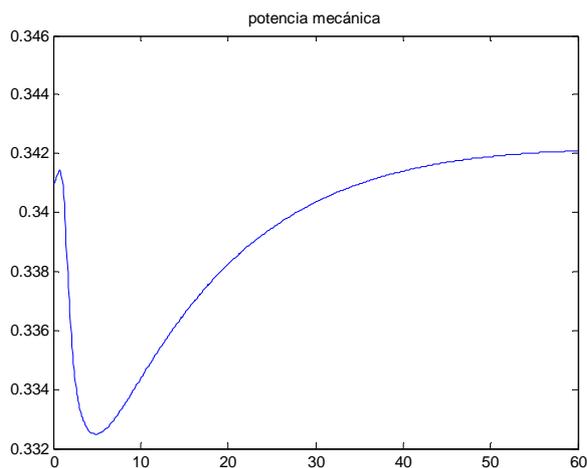


Fig. N° 18 Respuesta de potencia mecánica ante escalón de frecuencia de red.

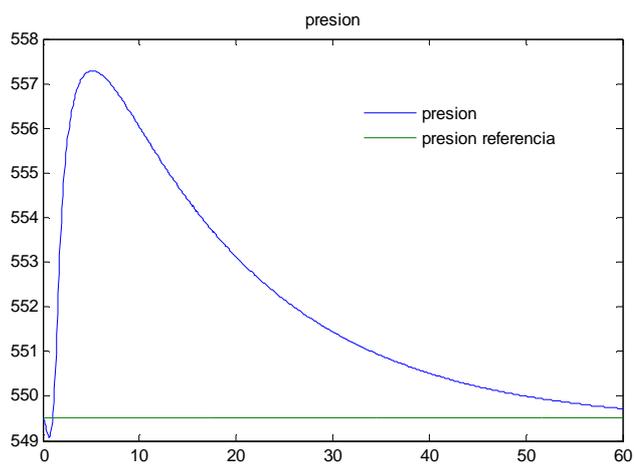


Fig. N° 19 Respuesta de presión ante escalón de frecuencia de red.

## 7 CONCLUSIONES

El trabajo tuvo como objetivo el estudio de ajuste del regulador de velocidad de un turbina de vapor de un ciclo combinado. Para esto se formuló un modelo de simulación, homologado a partir de ensayos en campo, que permitió representar las dinámicas de interés bajo diferentes condiciones de operación.

La parametrización del regulador de velocidad permite un control de velocidad relativamente más rápido que el control de presión, de forma tal que la máquina pueda aportar RPF ante variación rápidas de frecuencia de red, y luego restablecer el valor de presión en la admisión.

## 8 REFERENCIAS

- [1] Kundur P (1994) Power System Stability and Control. McGraw-Hill
- [2] IEEE committee report, "Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol.PAS-92, No.6, 1973
- [3] Procedimiento Técnico N° 9 "Participación de Generadores en el servicio de Regulación de Frecuencia del MEM" CAMMESA