

MODELADO Y SIMULACIÓN DE UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO Y UNA VÁLVULA DE ALÍVIO MEDIANTE BOND GRAPHS

Miguel Huerga ^a, Adair Martins ^b, Geraldo Lúcio Tiago Filho ^c y Roberto Laurent ^a

^a *Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, Neuquén, Argentina, mahuerta@argentina.com, roberto_laurent@yahoo.com.ar*

^b *Departamento de Computación Aplicada, Facultad de Informática, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, Neuquén, Argentina, adair_martins@yahoo.com.br*

^c *Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá
Av. BPS 1303, Pinheirinho, Itajubá, Brasil, tiago_unifei@hotmail.com*

Palabras clave: Chimenea de equilibrio, Válvula de alivio, Bond Graphs, Simulación, Centrales hidroeléctricas.

Resumen: Existen en la práctica dos elementos fundamentales que son utilizados en casos extremos para limitar las sobrepresiones que ocurren en la tubería de una pequeña central hidroeléctrica (PCH) ante un rechazo total de carga, son los denominados chimenea de equilibrio y válvula de alivio. En trabajos anteriores se ha presentado el modelado y simulación de centrales hidroeléctricas con la metodología de Bond Graphs, pero sin estos componentes. En este artículo se discute el agregado de los mismos al modelo básico de una PCH. En la metodología de Bond Graphs los componentes son modelados utilizando analogías eléctricas, particularmente la chimenea de equilibrio puede considerarse análoga a un capacitor y la válvula de alivio análoga a una resistencia no lineal y dependiente del tiempo con su dinámica asociada a la respuesta del sistema de regulación de velocidad. Los resultados del modelado y la simulación de un rechazo total de carga fueron validados con registros de campo disponibles de un estudio de la Usina Suiça, Brasil, dentro de una cooperación entre el “Centro Nacional de Referências em Pequenas Centrais Hidrelétricas” (CERPCH) de la Universidad Federal de Itajubá (UNIFEI), Brasil, y la Universidad Nacional del Comahue, Argentina.

1 INTRODUCCIÓN

En los fenómenos transitorios en sistemas hidráulicos pueden causar serios problemas en los equipos y tuberías. El golpe de ariete es fundamentalmente el fenómeno transitorio de elevación de la presión provocado por el cierre rápido del mecanismo de control (válvula, inyector, distribuidor, etc.) de caudal en una tubería forzada. El conocimiento de este fenómeno transitorio es fundamental para dimensionar adecuadamente los sistemas hidráulicos en PCHs (Wylie, Streeter y Suo, 1993; Souza, Santos y Bortoni, 1999).

En el caso de una central hidroeléctrica además de la variación de presión interesa la variación de velocidad del grupo turbina y generador, especialmente cuando ocurre un rechazo total de carga. Un rechazo total de carga significa abrir el interruptor principal del generador, lo que separa el generador de la red, por lo que la potencia mecánica de la turbina resulta en un aumento de velocidad de la unidad. El regulador de velocidad en este caso debe cerrar el distribuidor controlando el aumento de velocidad en el nivel garantizado y de ajuste de protecciones, pero la velocidad de cierre debe estar limitada para evitar que el aumento de presión supere también el nivel garantizado. Se hace necesario optimizar el transitorio hidromecánico mediante una solución de compromiso entre la velocidad máxima del conjunto turbina generador y el nivel de sobrepresión del sistema de conducción. Existen dos elementos fundamentales en la práctica para la absorción de estas sobrepresiones, para grandes y pequeños transitorios que las provoquen. Estos elementos son la chimenea de equilibrio y la válvula de alivio.

Uno de los métodos más utilizados para la simulación de transitorios hidráulicos es el denominado método de las características, introducido en la década de 1960 por V. Streeter (Wylie, Streeter y Suo (1993)). Las ecuaciones diferenciales parciales fundamentales de la cantidad de movimiento y de la continuidad que modelan una tubería, son expresadas en forma de diferencias finitas e integradas numéricamente. Los programas computacionales basados en este método resultan pocos flexibles y tienen la desventaja de estar limitados a casos particulares y de presentar dificultades para modelar la interacción entre los diferentes dominios de energía, por ejemplo: hidráulico, mecánico, eléctrico, etc., en una central hidroeléctrica.

Un método mucho más flexible que viene siendo utilizado en forma creciente en los últimos años para este fin es la técnica denominada en inglés Bond Graphs (BG) (Karnopp, Margolis y Rosenberg, 2000; Tiago Filho, 1994; Martins et al, 2007; Tiago Filho et al, 2002; Martins, Tiago Filho y Laurent, 2004; Martins, 2004; Martins et al, 2008; De Carvalho, 1995; Huerga, 2010; Huerga et al, 2011).

Esta técnica de modelado y simulación de carácter universal se basa en el concepto de analogías entre sistemas de distinta naturaleza física con los sistemas eléctricos. Proporciona una visualización gráfica de las interacciones entre los distintos componentes del sistema y suministra implícita y sistemáticamente el modelado matemático del sistema en forma de variables de estado, facilitando el uso de recursos computacionales para la simulación, que se realiza directamente de esta representación gráfica.

Actualmente existen en el mercado varios programas computacionales que se basan en esta técnica. En este trabajo se optó por el programa 20-SIM, desarrollado por la Universidad de Twente, Holanda, por su facilidad de uso, e interfaz gráfica muy amigable (Controlab Products, 2001).

El objetivo fundamental de este trabajo fue profundizar en la investigación de la aplicación de la técnica de Bond Graphs (BG) en el modelado y simulación de Centrales Hidroeléctricas incorporando en el modelo chimeneas de equilibrio y válvulas de alivio. El artículo resume un trabajo final de la carrera de ingeniería eléctrica en la Universidad

Nacional del Comahue (Huerga, 2010). El modelado fue validado con registros de campo disponibles de la Usina Suiça (Brasil) (Huerga et al, 2011; Tiago Filho, Bourdon y Bortoni, 1994), dentro de una cooperación entre el “Centro Nacional de Referências de Pequenas Centrais Hidrelétricas” (CERPCH) de la Universidad Federal de Itajubá (Brasil) y la Universidad Nacional del Comahue (Argentina). En la Figura 1 se muestran vistas fotográficas de la Usina Suiça, en la Figura 2 un esquema de la misma con dimensiones y cotas relevantes y en la Figura 3 varias fotografías de los ensayos realizados.



Fuente: [Joelis Schwambach](#)/Google Earth

Figura 1: Vistas de la Usina Suiça

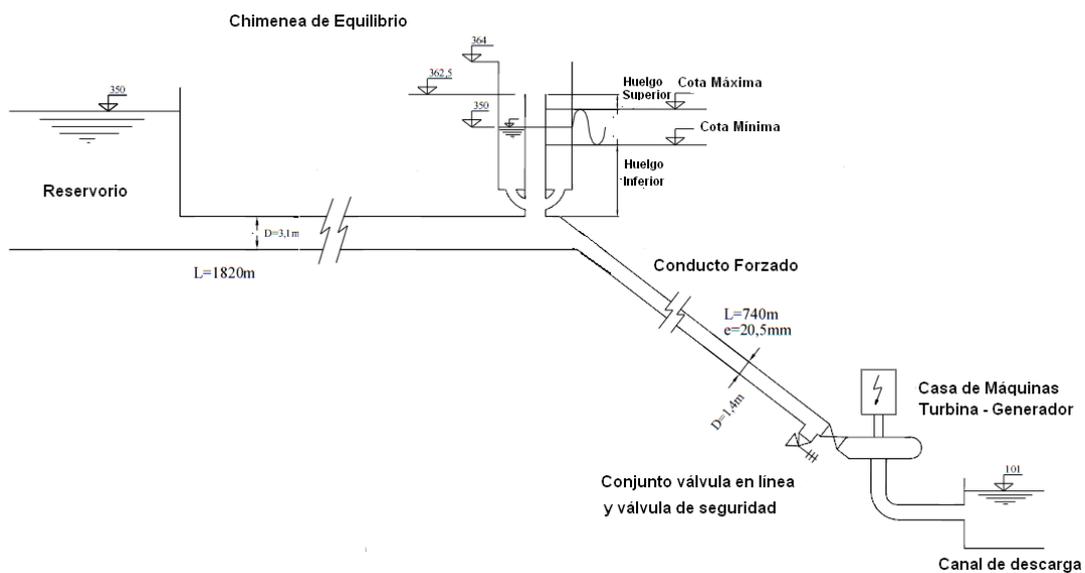


Figura 2: Esquema de la Usina Suiça con dimensiones y cotas relevantes



Fuente: Tiago Filho, G., Bourdon, C. y Bordoni, E., "Estudo e ensaio de campo no sistema adutor da U.H. Suíça sobre regime transitório", UNIFEI/FUPAI.

Figura 3: Ensayos en la Usina Suíça

2 METODOLOGIA: BOND GRAPHS

Bond Graphs es una metodología de modelado y simulación de sistemas dinámicos que consiste básicamente en la conexión de distintos sistemas y subsistemas mediante símbolos propios de la técnica, representando de esta forma el modelo físico de los mismos. La ventaja destacable es la conexión e interacción de los sistemas de distinta naturaleza física con el sustento de las analogías de estos con los sistemas eléctricos (Karnopp, Margolis y Rosenberg, 2000). Mediante la representación gráfica de los componentes del sistema, se obtienen en forma implícita las variables de estado que gobiernan la dinámica; lo cual es aprovechado por las herramientas computacionales para realizar la simulación directamente de la representación gráfica del sistema.

Un modelo construido con la metodología de BG, está formado por componentes o subsistemas conectados por enlaces o conexiones que representan el flujo de potencia entre ellos. El sentido de circulación se indica mediante una media flecha y la relación causa – efecto mediante una barra vertical. La potencia instantánea $p(t)$ resulta ser el producto de dos variables: esfuerzo $e(t)$ y flujo $f(t)$.

La metodología permite la construcción de modelos complejos con los siguientes nueve elementos básicos:

- Fuentes de potencia: de esfuerzo Se (tensión, presión, torque) y de flujo Sf (corriente, caudal, velocidad angular o lineal, etc.)
- Disipadores de potencia: R (Resistencia eléctrica, resistencia de fluido, fricción viscosa, etc.)
- Acumuladores de energía: Capacitancia C (Capacidad eléctrica, capacitancia de fluido, momento de inercia, etc.) e Inertancia I (Inductancia eléctrica, inertancia de fluido, etc.)
- Transductores: Transformadores TF (transformador eléctrico, pistón hidráulico, etc.), Girador GY (Generador, motor eléctrico, etc.).
- Vínculos o nodos: Unión "0", de esfuerzo común y generalización de la ley de corrientes de Kirchoff y Unión "1", de flujo común y generalización de la ley de tensiones de Kirchoff.

Los distintos componentes pueden ser modificados automáticamente durante la simulación para representar funciones del tiempo o no linealidades, en este caso se habla de componentes modulados. Por ejemplo: fuente modulada *MSe*, resistencia modulada *MR* y transformador modulado *MTF*.

3 MODELADO DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS CON BOND GRAPHS

En la Figura 4 se muestra una representación simplificada de una central hidroeléctrica incluyendo las tuberías, turbina, regulador de velocidad, carga eléctrica, chimenea de equilibrio y válvula de alivio mediante BG en “palabras” y en la Figura 5 un modelo detallado de la misma con el programa 20-SIM. El detalle de los modelos individuales de los distintos componentes es discutido a continuación. En primer lugar se discute brevemente el modelado de la tubería, turbina, regulador de velocidad y carga eléctrica, un análisis más profundo de los mismos puede encontrarse en un capítulo del libro: “Modelización Aplicada a la Ingeniería” (Martins et al, 2007). Luego se incorporan los nuevos modelos de chimenea de equilibrio y válvula de alivio (Huerga, 2010; Huerga et al, 2011).



Figura 4: Representación de la central hidroeléctrica simplificada con BG en “palabras”

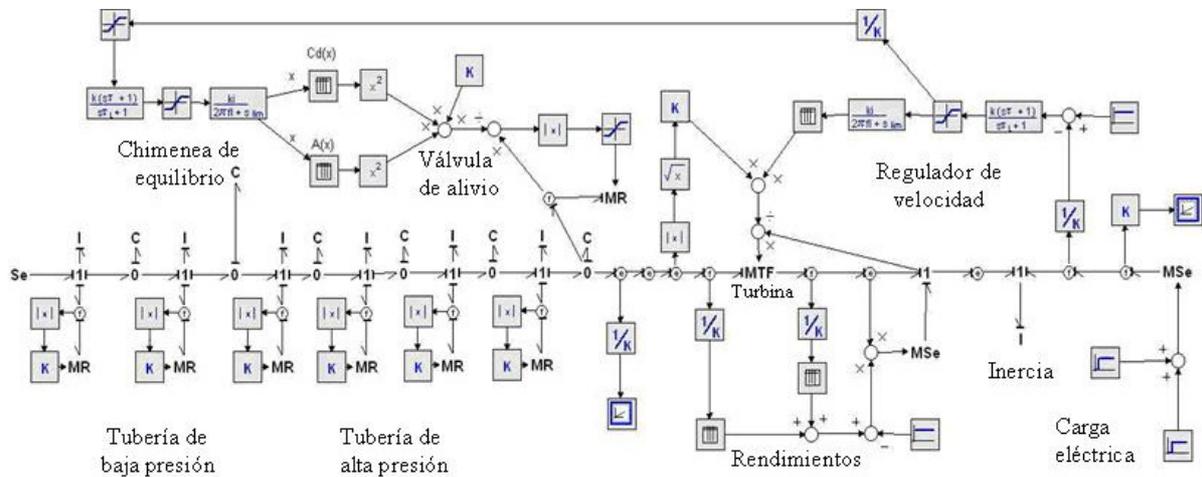


Figura 5: Modelado de la central hidroeléctrica con BG y el programa 20-SIM

3.1 Tubería

Las dos ecuaciones fundamentales, de movimiento y de continuidad, que gobiernan un transitorio hidráulico en una tubería, son análogas a las ecuaciones que modelan una línea de transmisión eléctrica monofásica. El método de Bond Graphs trabaja con parámetros concentrados, por lo que es necesario “concentrar” los diferentes efectos físicos distribuidos en uno o más tramos equivalentes “ π ” (Dommel,1996); Grainger y Stevenson,1996). Para la aplicación del método de Bond Graphs es conveniente la utilización del Sistema Internacional de Unidades expresando la presión en Pascales y utilizando caudal en vez de velocidad

(Karnopp, Margolis y Rosenberg, 2000). Para un tramo de tubería de longitud L se pueden definir los valores totales de inercancia, capacitancia y resistencia análogos a la inductancia, capacitancia y resistencia de una línea eléctrica:

$$\text{Inercancia: } I = \frac{\rho L}{A}, \quad (1)$$

$$\text{Capacitancia: } C = \frac{AL}{\rho a^2}, \quad (2)$$

$$\text{Resistencia: } R = \frac{\rho f L |Q|}{2 DA^2}, \quad (3)$$

donde A es la sección de la tubería, ρ la densidad del agua, a es la celeridad, f es el factor de fricción, Q el caudal y D el diámetro. La parte constante de la Ec.(3) puede ser denominada resistencia por unidad de caudal $R_{/Q}$, correspondiéndole la siguiente ecuación:

$$R_{/Q} = \frac{\rho f L}{2 DA^2}. \quad (4)$$

A la izquierda del esquema de la Figura 5 se observa la fuente de presión Se y a continuación las tuberías de baja y alta presión discretizadas con circuitos equivalentes de parámetros concentrados. La resistencia está modulada con el valor absoluto del caudal, " $|x|$ ", para modelar su no linealidad, la constante " K " corresponde a $R_{/Q}$, Ec.(4).

3.2 Turbina

En la metodología de los Bond Graphs una turbina hidráulica es un transductor o conversor de potencia entre dos dominios de energía, entre el hidráulico y el mecánico en este caso. Como se indicó anteriormente los transductores pueden ser de dos tipos: giradores o transformadores, y se caracterizan por ser ideales, o sea, su rendimiento es 100% y no almacenan energía. Las ecuaciones para el transformador son:

$$e_1 = m e_2, \quad m f_1 = f_2, \quad (5)$$

verificándose la conservación de la potencia $p(t)$ en todo instante de tiempo, o sea:

$$p(t) = e_1 f_1 = e_2 f_2. \quad (6)$$

La ecuación de la turbina ideal, correspondiente a la Ec. (7), resulta:

$$T \omega = P Q \quad \text{con} \quad Q = k \cdot y \cdot \sqrt{P}, \quad (7)$$

donde T es el torque en [N.m], ω es la velocidad angular en [rad/s], P es la presión en [Pa] y K es una constante de proporcionalidad.

De las ecuaciones 5, 6 y 7 el módulo del transformador " m " resulta:

$$m = \frac{\omega}{k \cdot y \cdot \sqrt{P}} \quad (8)$$

El modelo de la turbina como transformador modulado, *MTF*, puede observarse en el centro de la Figura 5. Para una gran perturbación, como un rechazo total de carga, es necesario considerar la variación del rendimiento con el caudal y la velocidad. En la Figura 5 se muestra el modelado de las pérdidas mediante una fuente inversa de torque modulado con el caudal y la velocidad y las funciones representadas en forma de tablas. El sensor “f” cumple la misma función para los efectos de medición que un vínculo “1”, o sea mide flujo que en el sensor de la izquierda es caudal y en el de la derecha velocidad, y el sensor “e” mide torque. Finalmente el modelo del grupo turbina-generador se completa con la inclusión inercia conjunta *I* (la notación convencional es *J*) por medio de un vínculo “1”.

3.3 Regulador de velocidad

En la parte superior derecha de la Figura 5 puede observarse el modelado del regulador de velocidad mediante un diagrama de bloques. Además, la figura incluye los limitadores de velocidad y posición, y una tabla para considerar la no linealidad del regulador (Undrill y Woodward, 1967; De Mello et al, 1992). El limitador de posición debe incluir por razones matemáticas el efecto antitensión (*anti reset windup*) para evitar señales fuera de los límites, ya que el servomotor es modelado como un integrador.

3.4 Carga Eléctrica

Con BG la representación natural de la carga del sistema eléctrico es como torque, que eventualmente se puede modular para tener en cuenta la dependencia con la frecuencia. Para simular rechazos o aceptaciones de carga basta una fuente inversa de torque *MSe* modulada por combinaciones de escalones como se muestra en la parte derecha de la Figura 5.

4 CHIMENEA DE EQUILIBRIO

Uno de los modelos de chimenea de equilibrio más empleado en la práctica es la denominada como Modelo Jhonson, cuya principal característica es su formación con un doble conducto concéntrico, comunicado por orificios de sección inferior a la del conducto principal, denominados orificios diferenciales. El efecto resultante es una amortiguación más rápida de las oscilaciones comparado al modelo de simple conducto.

Para abordar el modelado en BG, se puede considerar que las pérdidas por fricción del fluido en el ingreso y egreso de la chimenea son despreciables frente a las pérdidas análogas consideradas en la tubería. De esta manera podemos pensar a la chimenea, en su funcionamiento normal, como el problema clásico del llenado de un tanque de un volumen V_{CH} dado por un área A_{CH} multiplicada por su altura h :

$$V_{CH} = \frac{A_{CH}}{\rho \cdot g} \cdot (h \cdot \rho \cdot g) \quad (9)$$

Observando la expresión (9) y considerando que el término entre paréntesis es presión, variable de esfuerzo análoga a tensión eléctrica, y que el volumen V_{CH} es análogo a carga eléctrica, se deduce que el factor que las relaciona es la capacitancia de la chimenea dada por la expresión (10) (Huerga, 2010; Huerga et al, 2011).

$$C_{CH} = \frac{A_{CH}}{\rho \cdot g} \quad (10)$$

En Figura 5 puede observarse la representación de la chimenea de equilibrio entre las tuberías de baja y alta presión conectada mediante un vínculo "0".

5 VÁLVULA DE ALIVIO

En centrales hidroeléctricas las válvulas de alivio son normalmente de acción indirecta, y controladas por el sistema de regulación de velocidad. Puede asumirse que la caída de presión P en la válvula, sigue la ley general de proporcionalidad con el cuadrado del caudal, de acuerdo a la Ec.(11), donde ρ es la densidad del agua, $Cd(x)$ el coeficiente de descarga, $A(x)$ el área de apertura de la válvula y x la posición de la válvula (Wylie, Streeter y Suo, 1993).

$$P = \frac{\rho}{2 \cdot Cd^2(x) \cdot A^2(x)} \cdot |Q| \cdot Q, \quad (11)$$

Trabajando la expresión (11) es posible obtener la resistencia por unidad de caudal, la cual se representa en la expresión (12), relación comúnmente denominada coeficiente de la válvula.

$$R_{V/Q} = \frac{\rho}{2 \cdot Cd^2(x) \cdot A^2(x)} \quad (12)$$

En la parte superior izquierda de la Figura 5 se muestra el modelado de la válvula de alivio de acción indirecta, modelada como una resistencia variable concordante con la Ec.(12). El gobierno de la misma es a partir de la medición de velocidad de cierre del distribuidor. La primera constante y limitador verifican la actuación por encima de un valor de velocidad del distribuidor prefijado. La dinámica de la válvula, análogamente a lo visto para el regulador de velocidad, se modela con un regulador matemático y un integrador para la obtención de la posición (Huerga, 2010; Huerga et al., 2011).

6 MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA USINA SUIÇA

A efectos de validar el modelo de la Figura 5 se utilizaron registros de campo obtenidos en la Usina Suiça. Esta PCH pertenece a la empresa ESCELSA (Espírito Santo Centrais Elétricas S.A., Brasil) y posee una potencia nominal de 30 MW. El objetivo original de ese estudio fue obtener datos de campo en diversos estados de funcionamiento de la central y validar los mismos mediante simulaciones llevadas a cabo con un programa basado en el método de las características, con el fin de analizar la posibilidad de ampliación de la capacidad de generación. Sin embargo, las simulaciones no fueron totalmente satisfactorias, lo cual motivó la realización del presente trabajo basado en la metodología de BG.

La central es del tipo de desvío y está construida sobre en el río Santa María, en el municipio de Santa Leopoldina. Está constituida de una represa de hormigón, un conducto forzado tipo túnel, formado por una excavación en roca de 1820 m de largo, con secciones de aproximadamente 7,5 m². Al final del conducto se emplaza la chimenea de equilibrio diferencial tipo Johnson, también construida de hormigón. Los ductos interno y externo de la misma tienen un diámetro de 2,7 y 10 m respectivamente. En la salida del túnel se ubica una casa de válvulas del tipo mariposa, con un diámetro de 1,9 m. Desde aquí comienza una

tubería forzada, también del mismo diámetro, de 740 m de longitud. El material de la tubería es de acero al carbono, con un espesor de 20,5 mm. Al final de la tubería existe una bifurcación de modo que el agua pueda ser conducida a los dos grupos generadores de eje vertical de 15 MW cada uno.

A través de un sistema complejo de adquisición de datos e instrumentación de campo, fue posible mediante el desacople de la energía de red, provocando un rechazo total de carga, la medición de niveles en la chimenea de equilibrio, caudal en la válvula principal, apertura de la válvula de alivio, velocidad del conjunto turbina generador y carga en la turbina (Tiago Filho, Bourdon y Bortoni, 1994).

La tubería de baja presión (túnel) fue modelada con dos tramos “ π ”, mientras que la tubería de alta presión se modeló con 4 tramos “ π ”, y la chimenea mediante una capacitancia de acuerdo a sus características constructivas.

La turbina se modeló como elemento ideal y se incorporaron los rendimientos y pérdidas conforme a lo desarrollado anteriormente. Las curvas de rendimiento en función del caudal y de la velocidad fueron obtenidas de valores típicos para este tipo de turbina a partir de la información contenida en el diagrama de colina, y la relación entre la abertura teórica y real del distribuidor mediante ensayos. Las tres curvas se muestran en la Figura 6. Luego de la turbina se incorporaron la inercia del sistema y los bloques de carga eléctrica como torque constante mediante fuentes de esfuerzo negativas.

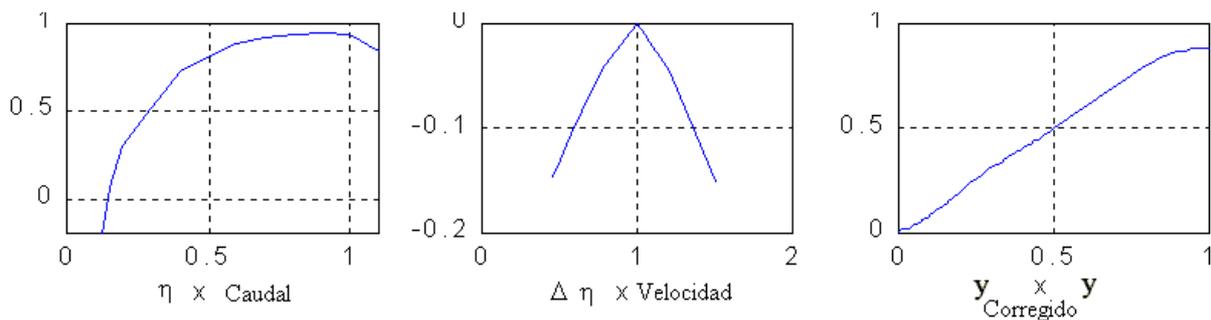


Figura 6: Rendimientos en función del caudal y la velocidad, y apertura del distribuidor corregida

Una dificultad que se presentó en el desarrollo del estudio fue la escasa información disponible sobre el tipo válvula de alivio utilizada. El dato de partida con el que se contaba era que la obturación de la válvula era del tipo aguja. A partir de los valores de campo, en particular las curvas de carga en la entrada a la turbina, coincidente con la carga en la válvula de alivio, el caudal en la turbina y la apertura de la válvula se dedujo que la misma era de acción indirecta, gobernada por la velocidad de cierre del distribuidor (E.S.H.A., 2004; Cruz Lessa, 2000). Luego del rechazo de carga la válvula abre en un determinado tiempo y luego cierra en un tiempo mayor siempre a velocidad prácticamente constante.

Para el estudio de la válvula, resultaba importante obtener el caudal conducido por la válvula de alivio, lo que ayudaría a entender la ley de caída de presión. Como la carga sobre la turbina, coincidente con la carga sobre la válvula de alivio y el caudal conducido por la turbina son datos, se puede considerar el siguiente escenario. Si se modela el sistema desde el reservorio, con el túnel de conducción de agua, chimenea de equilibrio y conducto forzado, y luego se modela a la turbina con dos fuentes moduladas, una de esfuerzo que representa la carga en la válvula y otra de flujo que represente el caudal también dato, entonces la variable flujo por la fuente de esfuerzo resulta ser el caudal en la válvula de alivio durante el rechazo de carga y transitorio posterior (Huerga, 2010; Huerga et al, 2011). El esquema para la obtención del caudal en la válvula de alivio se muestra en la Figura 7.

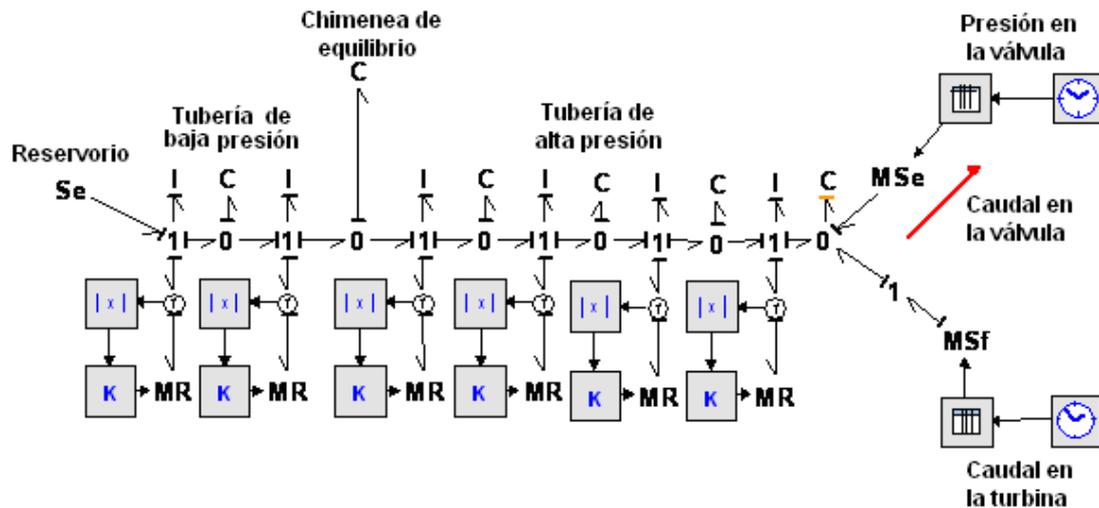


Figura 7: Esquema para la obtención del caudal en la válvula de alivio

Con el valor del caudal obtenido mediante la simulación y la presión dato, se calculó punto a punto el coeficiente de la válvula de alivio durante la operación. Se aproximó la característica de la válvula a polinomios de distintos órdenes, y se verificó que la caída de presión en la válvula seguía la ley general de proporcionalidad con el cuadrado del caudal.

Debido a una alta sensibilidad de la respuesta a algunas variables, para obtener las simulaciones finales y contrastarlas con los registros de campo y las simulaciones realizadas durante el mismo estudio, fue necesario la sintonización de todos los parámetros, dinámicas de las respuestas e instantes de inserción al sistema de todos los componentes para obtener un resultado satisfactorio (Huerga, 2010; Huerga et al, 2011).

Los parámetros sobre los que trabajó, durante esta coordinación, fueron fundamentalmente los relacionados al modelo matemático del regulador de velocidad y el instante del comienzo de apertura de la válvula de alivio. Es importante destacar que estas modificaciones están dentro de los rangos posibles de respuesta de los elementos mecánicos reales a los cuales se está modelando.

En las Figuras 8 a 13 se muestran los resultados de la simulación del rechazo total de carga. En la Figura 8 está representada la variación del nivel de carga eléctrica del sistema durante el rechazo. En la Figura 9 se observa la sobrepresión sobre una de las turbinas, los oscilogramas de la simulación son bastante semejantes y los máximos prácticamente coinciden. También se observan resultados más realistas en la simulación con Bond Graphs en relación al estudio realizado con otro programa. La Figura 10 muestra el nivel del agua en la chimenea de equilibrio y la Figura 11 el caudal conducido por las dos turbinas, se observa que las simulaciones y los registros están bastante próximos.

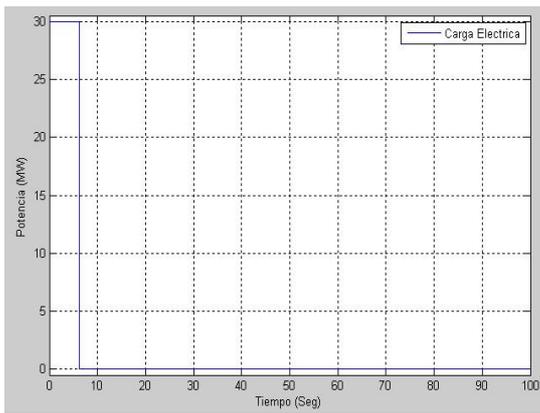


Figura 8: Carga eléctrica: rechazo de carga

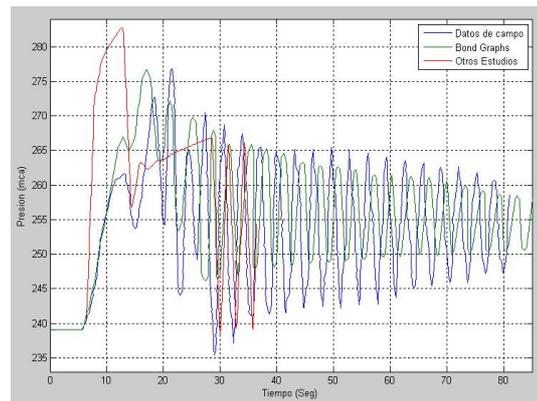


Figura 9: Sobrepresión en las turbinas

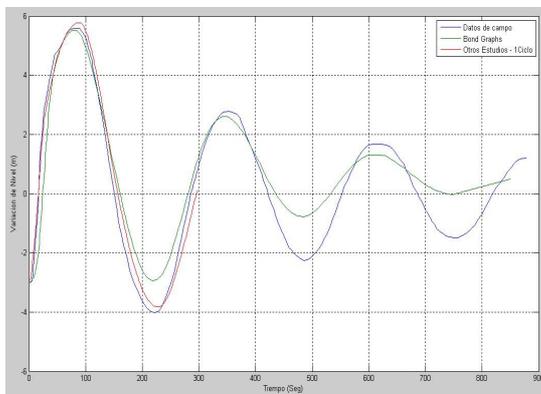


Figura 10: Nivel en la chimenea de equilibrio

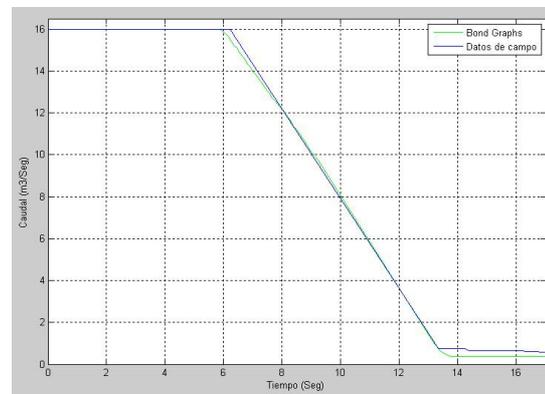


Figura 11: Caudal en la turbina

En la Figura 12 se puede observar la velocidad de rotación de una de las turbinas. Los resultados de las mediciones de campo para esta variable no son coherentes ya que antes de la acción del regulador, se debería haber registrado un aumento de la velocidad (embalaje de la máquina), obviamente se produjo un error en la medición. Este supuesto fue validado luego de la simulación, en la cual se registró el embalaje hasta valores de velocidad dentro de los parámetros, en forma porcentual, comunes para fenómenos de rechazos totales de carga. Finalmente, la Figura 13 muestra la acción de la válvula de alivio.

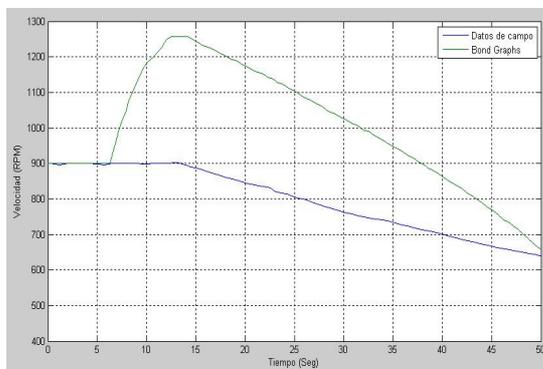


Figura 12: Velocidad de rotación de turbina

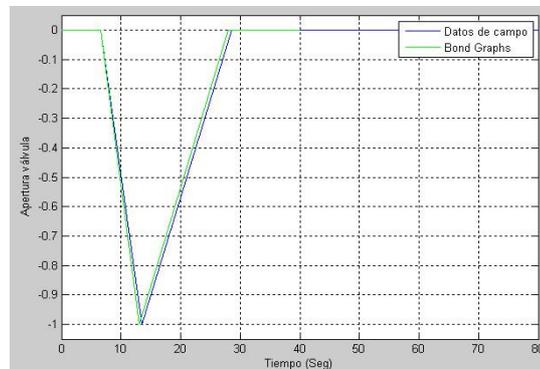


Figura 13: Apertura de válvula

7 CONCLUSIONES

Se discutió el modelado de los componentes de una PCH con la metodología de Bond Graphs incorporando chimeneas de equilibrio y válvulas de alivio para la simulación de rechazos totales de carga.

La chimenea de equilibrio se modeló en forma análoga a un capacitor eléctrico y la válvula de alivio a una resistencia no lineal dependiente del tiempo y controlada por el sistema de regulación de velocidad.

Los resultados del modelado y simulación de un rechazo total de carga fueron validados con registros de campo disponibles de un estudio de la Usina Suíça (Brasil) observándose una alta sensibilidad de las simulaciones a la dinámica del distribuidor y de la válvula de alivio.

La técnica permitió el modelado de elementos con respuestas no lineales de una manera flexible y con resultados satisfactorios indicando la viabilidad de la técnica de Bond Graphs para este tipo de estudios y su potencialidad para otros con mayor complejidad.

8 REFERENCIAS

- Controlab Productos B.V., 20-Sim 3.2 – *Reference manual*, Enschede, Netherland, 2001.
- Cruz Lessa, R, Comportamiento Dinámico de Válvulas de Alivio durante Transitorios Hidráulicos”, XVIII Congreso Nacional del Agua, Argentina, 2000.
- De Mello, F. „*Hydraulic turbine an turbine control models for system dynamic studies*”, IEEE, Transactions on Power Systems, Vol 7, N°1, 1992.
- De Carvalho, I.D, Avaliação da Aplicabilidade do Método dos Gráficos de Ligações no Estudo de Escoamentos Transitórios em Conduitos Forçados, Dissertação de Mestrado, EFEI, Brasil, 1995.
- Dommel, E.W., *EMTP Theory Book*, Microtran Power System Analysis Corporation, Vancouver, Canadá, 1996.
- European Small Hydropower Association (E.S.H.A), *Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant*, 2004.
- Grainger, J.,J., Stevenson Jr., W.D, *Análisis de Sistemas de Potencia*, McGrawHill, México, 1996.
- Huerga, M. A., Martins, A., Tiago Filho, G. L, Laurent, R., Simulación de Una Central Hidroeléctrica con Chimenea de Equilibrio y Válvula de Alivio Usando Bond Graphs, VII Conferencia de Centrais Hidrelétricas Mercado e Meio Ambiente, Sao Paulo, Brasil, 2011.
- Huerga, M. A., „Simulación de Una Central Hidroeléctrica con Chimenea de Equilibrio y válvula de Alivio mediante Bond Graphs”, Tesis de Grado, Universidad Nacional del Comahue, Argentina, 2010.
- Karnopp, D. C., Margolis, D.L, Rosenberg, R.C, *System Dynamics Modeling and Simulation of Mechatronic Systems*, John Wiley & Sons Inc., 2000.
- Martins, A., Tiago Filho, G.L., Huerga, M.A, Laurent, R., Modeling and Simulation of Hydraulic Turbines using the Bond Graphs Methodology, Proc. IAHR 24 Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Foz do Iguassu, Brasil, 2008.
- Martins, A., Tiago Filho, G.L., Laurent, R., Huerga, M.A., *Modelado de Centrales Hidroeléctricas para la Simulación de Transitorios Hidromecánicos Utilizando Bond Graphs*, Capítulo del libro: Modelización Aplicada a la Ingeniería, Ed. Walter Legnani et al, ISBN 978950-42-0082-6, Vol II, UTN, Buenos Aires, 2007.
- Martins, A., Tiago Filho, G.L , Laurent, R, Bond Graphs versus Mediciones de Laboratorio y el Método de las Características en la Simulación del Golpe de Ariete”, Revista PCH Notícias & SHP News, pp. 20-21, Ano 5, N° 19, Brasil, 2004.

- Martins, A, “Simulação de Transitório em Centrais Hidrelétricas Usando Grafos de Ligação”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Brasil, 2004.
- Souza, Z., Santos, A., Bortoni, E., *Centrais Hidrelétricas- Estudos para Implantação*, Eletrobrás, Brasil, 1999.
- Tiago Filho, G.L, *Aplicação do Método dos Gráficos de Ligações na Simulação de uma Válvula de Alívio, Anti-Golpe de Ariete, Auto Operada*, Tese de Doutorado, EPUSP, Brasil, 1994.
- Tiago Filho, G.L , Martins, A., Laurent, R., O Uso da Técnica dos Grafos de Ligação na Simulação de Sistemas Hidráulicos em Regime Transitório”, *Mecánica Computacional*, Vol. XXI, pp. 495-507, Santa Fé/Paraná, Argentina, 2002.
- Tiago Filho, G.; Bourdon, C.; Bortoni, E, Estudo e ensaio de campo no sistema adutor da U.H. Suíça sob regime transitorio”, Fundação de pesquisa e assessoramento a indústria (FUPAI), Brasil, 1994
- Undrill, J.M. y Woodward, J.J., (1967), “Nonlinear Hydro Governing Model and Improved Calculation for Determining Temporary Droop”, *IEEE Trans.* Vol. 4, PAS-86, 443-453.
- Wylie, E.; Streeter, V.; Suo, L, *Fluids Transients in System*, McGraw-Hill, 1993.