

Influencia de la línea de 500 kV en el comportamiento de la carga del SIN-PY

Manuel L. Sosa Ríos, Pablo E. Vera Agüero

ITAIPU Binacional, Facultad Politécnica – Universidad Nacional del Este

Paraguay

RESUMEN

Este trabajo presenta un estudio del comportamiento de la carga del Sistema Interconectado Nacional Paraguayo (SIN-PY), considerando la influencia de la línea de transmisión de 500kV (LI 500kV MD-VHA), recientemente comisionada en octubre de 2013, que interconecta las Subestaciones Margen Derecha (SE-MD) y Villa Hayes (ES-VHA). Para lograr este objetivo, se realiza el cálculo de los parámetros de los modelos de carga polinomial y exponencial, considerando registros con y sin la LI 500kV MD-VHA en operación. Los parámetros calculados son los coeficientes del modelo polinomial y el exponente del modelo exponencial.

El procedimiento de cálculo de los parámetros de los modelos de carga utiliza variaciones de potencia y de tensión, registradas en los conjuntos transformador/regulador de tensión y en la barra del patio de 220kV de la SE-MD. Estas variaciones son obtenidas por registradores dinámicos (RDs) de larga duración, considerando diferentes niveles de intercambio de potencia entre la SE-MD y el SIN-PY. Los registros utilizados para el estudio son aquéllos obtenidos en el momento en que se realizan maniobras de cambios de *tap* en los reguladores, que realizan el control de tensión a nivel de transmisión. Este procedimiento busca obtener variaciones de potencia en función a variaciones de tensión, lo que permite la utilización de los modelos de carga mencionados. Por lo tanto, este trabajo propone una nueva metodología, que utiliza variaciones de potencia y tensión obtenidas por RDs, procedimiento que permite evitar las fluctuaciones naturales de potencia, correspondientes a cargas que se conectan o desconectan del sistema analizado, lo que a su vez posibilita el cálculo de los parámetros de los modelos de carga, que permiten obtener variaciones de potencia únicamente en función a variaciones de tensión. De esta manera, son calculados los parámetros de los modelos de carga, de acuerdo al nivel de intercambio de potencia entre la SE-MD y el SIN-PY, considerando la influencia de la operación de la LI 500kV MD-VHA, lo que permite caracterizar el comportamiento de la demanda del SIN-PY.

El cálculo de los parámetros de los modelos de carga es realizado mediante la formulación de un problema de optimización mono-objetivo, que busca minimizar la diferencia relativa media entre los valores de potencia medidos y calculados. Este problema es resuelto utilizando el método de Gradientes Reducidos Generalizados. Con los parámetros de los modelos de carga obtenidos, valores de potencia son estimados satisfactoriamente, considerando sus correspondientes variaciones de tensión. Este procedimiento permite validar los parámetros de los modelos calculados y verificar la eficiencia de la metodología propuesta.

PALABRAS CLAVES

Modelo de carga polinomial, Modelo de carga exponencial, Régimen permanente, Registrador dinámico, Optimización mono-objetivo.

1 INTRODUCCIÓN

La operación estable de un sistema eléctrico de potencia (SEP) depende de su capacidad de igualar continuamente la generación de las unidades a la carga eléctrica del sistema. Consecuentemente, las características de la carga ejercen una influencia importante en la estabilidad del sistema. El modelamiento de cargas es considerado complejo, debido a que una barra de carga típica, representada en estudios de estabilidad, está compuesta por un gran número de dispositivos. Por lo tanto, la composición exacta de la carga es difícil de estimar. Además, los cambios en su composición dependen de muchos factores, que incluyen tiempo (hora, mes, estación del año), condiciones climáticas y estado de la economía [1].

A pesar de conocerse cómo se comporta individualmente cada elemento de la carga, no se tiene una noción precisa de su composición final. Esto ocurre debido a la gran diversidad de equipos que componen a la carga, a su forma aleatoria y a su constante variación en el tiempo [2]. Aún si la composición de la carga es conocida con exactitud, no sería práctico representar cada componente individual, porque generalmente existen millones de tales componentes en la carga total atendida por un SEP. Por lo tanto, la representación de cargas en estudios de eléctricos está basada en un número considerable de simplificaciones [1].

En este sentido, han sido utilizadas dos metodologías para la representación de cargas. La primera es denominada *Método de Composición de Carga*, que se basa en el conocimiento de componentes individuales, mientras que la segunda se refiere al *Método de Medición Directa* que, por su vez, no requiere el conocimiento de las características físicas de la carga [3]. Este método se apoya en las medidas obtenidas de la respuesta de la carga cuando ella es sometida a variaciones de tensión, generalmente causadas por conmutación de *taps* de transformadores [4].

Siguiendo esta línea de investigación, el presente trabajo considera mediciones realizadas por RDs de larga duración. Estas mediciones corresponden a los flujos de potencia de las líneas de transmisión, que alimentan al sistema ANDE desde la SE-MD, y a la tensión de barra del patio de 220kV de esa subestación. Las mediciones adquiridas corresponden a variaciones de tensión, realizadas mediante conmutaciones de *taps* de los reguladores. Este procedimiento tiene como objetivo definir de manera más precisa la dependencia de la carga con la tensión, reduciendo la variación natural de la carga [5]. Estas variaciones se refieren a las cargas que se agregan y/o desagregan al/del sistema analizado y deben ser minimizadas cuando se pretende obtener un modelo de carga dependiente de la tensión [6]. De esta manera, para calcular los coeficientes de los modelos de carga polinomial (impedancia constante, corriente constante y potencia constante) y exponencial, se ha formulado un problema de optimización mono-objetivo, que minimiza la diferencia relativa media entre los valores de potencia activa medidos y calculados. Los valores de potencia calculados, obtenidos por estos modelos de carga, están en función a mediciones de tensión en la barra de 220kV de la SE-MD.

Son considerados registros de potencia en que se realizaron maniobras de cambios de *tap*, con el objetivo de obtener variaciones de potencia en función a las alteraciones en el nivel de tensión. Esta propuesta de trabajo merece otras investigaciones, debido a que se encuentra en su fase inicial y los resultados son preliminares.

2 MODELOS MATEMÁTICOS DE CARGAS

En esta sección serán detallados los modelos matemáticos de carga polinomial y exponencial, juntamente con sus parámetros, que serán calculados en este trabajo.

2.1 Modelo Polinomial

El modelo de carga polinomial consiste en una suma ponderada de cargas, representadas como impedancia constante (el consumo de potencia y de corriente aumentan de la misma manera que aumenta la tensión en los terminales de la carga), corriente constante (en caso de variaciones en la tensión de alimentación, la corriente permanece inalterada) y potencia constante (el consumo de corriente disminuye con el aumento de

la tensión). Este modelo expresa la potencia activa en función a la tensión que está sometida la carga, como se muestra en (1)

$$P(V) = P_0^{pol} \cdot \left[a_p + b_p \cdot \frac{V}{V_0^{pol}} + c_p \cdot \left(\frac{V}{V_0^{pol}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

donde los coeficientes a_p , b_p , y c_p indican los porcentajes de la carga representados por potencia, corriente e impedancia constantes, respectivamente. P_0^{pol} es el valor de referencia de la potencia activa y V_0^{pol} corresponde a la tensión de referencia.

Los coeficientes a_p , b_p y c_p deben ser mayores o iguales a cero y menores o iguales a la unidad, esto es, $0 \leq a_p \leq 1$, $0 \leq b_p \leq 1$, $0 \leq c_p \leq 1$. La suma de estos coeficientes debe ser igual a la unidad, es decir, $a_p + b_p + c_p = 1$.

2.2 Modelo Exponencial

Este modelo representa la relación de potencia y tensión como una ecuación exponencial, generalmente de la siguiente forma:

$$P(V) = P_0^{exp} \cdot \left(\frac{V}{V_0^{exp}} \right)^{\alpha_p} \quad (3)$$

También pueden ser incluidos dos o más términos con diferentes exponentes en (3). Los parámetros P_0^{exp} , V_0^{exp} y α_p , indican los valores de potencia de referencia, tensión de referencia y exponente, relativos a la potencia activa, respectivamente. Dando los valores 0, 1 o 2 al exponente α_p , la carga puede ser representada por los modelos de potencia, corriente o impedancia constantes, respectivamente. Otros valores de exponentes pueden ser utilizados para representar el efecto agregado de los diferentes componentes de carga. Exponentes mayores a 2 y menores a 0 pueden ser apropiados para algunos tipos de carga [3]. El exponente toma valores en el intervalo $\alpha_p \geq 0$.

3 METODOLOGÍA PARA CÁLCULO DE MODELOS DE CARGAS

La metodología aplicada está basada en la utilización de registros dinámicos de larga duración. Los registros consisten en valores de potencia activa y de tensión. La tensión es alterada mediante maniobras de variaciones de *tap* de reguladores, que realizan el control de tensión a nivel de transmisión. En el instante en que se realiza el control de tensión (alteración en la posición del *tap*), son registradas las variaciones de potencia activa y de tensión, cuyos valores son utilizados para el cálculo de los parámetros de los modelos de carga. De esta manera, se busca obtener variaciones de potencia debidos a cambios de tensión, lo que permitirá una representación adecuada de la carga por los modelos matemáticos descritos en la sección 2.

Para el cálculo de los parámetros de los modelos de carga polinomial y exponencial, es formulado un problema de optimización mono-objetivo que busca minimizar la diferencia relativa media entre los valores de potencia activa medidos y calculados. Los valores medidos de potencia activa y de tensión, son obtenidos en los transformadores/reguladores y en la barra de 220kV de la SE-MD.

3.1 Formulación del Problema de Optimización

El siguiente problema, representado en (4), es formulado para calcular los valores de los parámetros de los modelos de carga. Este cálculo está basado en las variaciones de potencia que resultan de las alteraciones de *tap*, ejecutadas con el objetivo de realizar el control de tensión.

$$\text{Min } F(\mathbf{x}) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left| \frac{P_i^{med} - P_i^{cal}}{P_i^{med}} \right| \quad (4)$$

Donde \mathbf{x} representa el vector conteniendo los parámetros P_0 , a_p , b_p , c_p y α_p de los modelos polinomial y exponencial, relativos a la potencia activa; P_i^{med} representa el i -ésimo valor medido de potencia activa; P_i^{cal} indica el i -ésimo valor de potencia activa, calculado por los modelos de carga; N indica la cantidad de valores medidos contenidos en el registro dinámico analizado. El problema de optimización mostrado en (4), está sujeto a las restricciones de los modelos de carga descritos en la sección 2.

4 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CÁLCULO

4.1 Sistema de Potencia

El esquema del SEP analizado, mostrado en la Figura 1, representa el sector de 50Hz de ITAIPU Binacional. La generación es realizada en 18kV, elevada a 500kV en la subestación de ITAIPU (SE-IPU) y transmitida por cuatro líneas de transmisión. Dos de estas líneas suministran energía directamente desde la SE-IPU al sistema de corriente continua (HVDC), que provee potencia al sistema interconectado brasilero (SIN-BR). Estas dos líneas están siendo seccionadas actualmente en la SE-MD 500kV. Las restantes dos líneas alimentan la SE-MD en 500kV. También se muestra la línea LI 500kV MD-VHA (en línea de trazos), recientemente comisionada en octubre de 2013.

En el patio de 500kV de la SE-MD, la tensión es reducida a 220kV por seis conjuntos transformador/regulador (6 x TR), que alimentan cuatro líneas de transmisión. Estas líneas suministran energía al SIN-PY. El control de tensión es realizado por los seis reguladores, que consisten en transformadores con *tap* variable bajo carga. El RD está instalado en la barra de 220kV de la SE-MD.

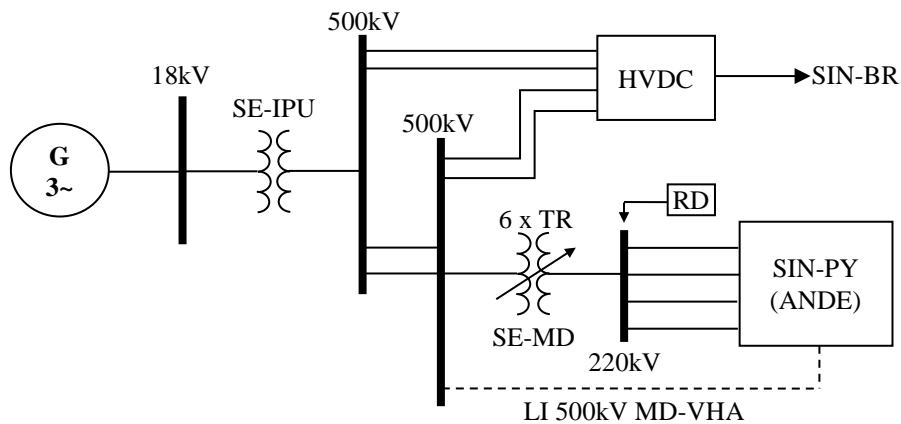


Figura 1: Esquema del sector de 50Hz de la ITAIPU Binacional

El RD de larga duración posee un ajuste, de tal manera que es sensibilizado cuando es registrado algún cambio en la posición del tap de los reguladores de la SE-MD, realizando el registro de las variaciones de tensión en la barra de 220kV y de los flujos de potencia de cuatro transformadores de la SE-MD. De esta manera, son utilizadas variaciones de potencia y de tensión, registradas en el momento en que son realizadas maniobras de cambios de tap de los reguladores.

Antes de la entrada de la LI 500kV MD-VHA, el RD medía todo el intercambio entre ITAIPU y el Subsistema 1 de la ANDE (correspondiente a la parte del sistema ANDE alimentado por ITAIPU), que correspondía a aproximadamente 90% de la carga. Aunque el sistema es constituido por diversas líneas y la carga distribuida en varias subestaciones, puede ser calculado un equivalente del sistema por medio de una alimentación radial a una carga equivalente, concentrada, como muestra la Figura 2. Esta simplificación permite que las medidas del RD estimen el modelo de carga de la ANDE. Por tratarse de un trabajo investigativo, esta premisa será adoptada y verificada su validez.

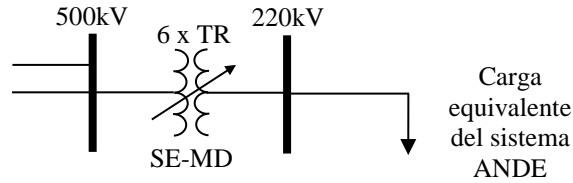


Figura 2: Equivalente del sistema ANDE

4.2 Estudio de Casos

En los casos estudiados, fueron consideradas variaciones de tensión en la barra de 220kV de la SE-MD y de flujos de potencia en cuatro transformadores de esta subestación, antes de la entrada en operación de la LI 500kV MD-VHA. Los parámetros calculados P_0^{pol} , P_0^{exp} , V_0^{pol} , V_0^{exp} , a_p , b_p , c_p y α_p , son mostrados en la Tabla I, corresponden a un periodo de carga media. Estos valores fueron utilizados para calcular los modelos polinomial P_{zip} y exponencial P_{exp} , que se ajustaron adecuadamente a los valores de potencia medidos P_{med} , atendiendo sus respectivas restricciones, y que se muestran en la Figura 3, donde la variación de tensión fue de 1kV, reduciéndose de 229,5kV a 229kV, hasta llegar a 228,5kV.

Tabla I: Parámetros de los modelos de carga para periodo de carga media

I_{ANDE} [MW]	P_0^{pol} [MW]	P_0^{exp} [MW]	a_p	b_p	c_p	α_p	$F(x)$	
							Pol.	Exp.
796	599,8	581,1	0,3468	0	0,6541	2,1328	0,0013754	0,00113565

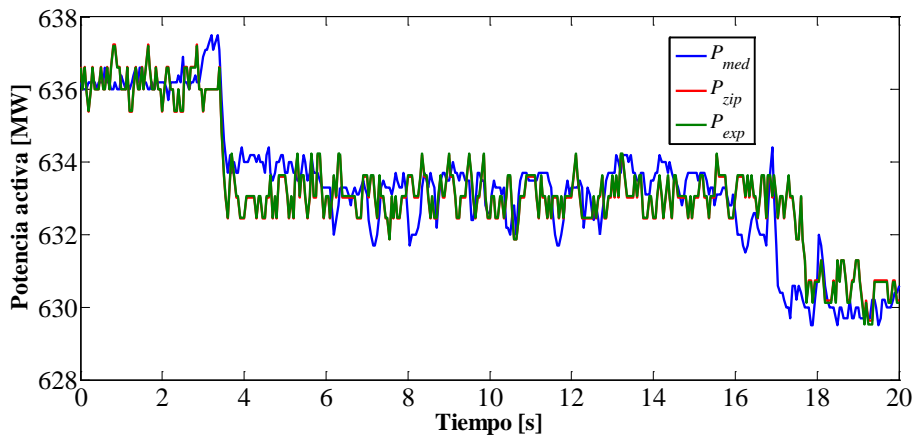


Figura 3: Potencia activa medida y calculada en periodo de carga media

Los parámetros indicados en la Tabla I, fueron utilizados para estimar los periodos de carga pesada y máxima, mostrados en la Figura 4.

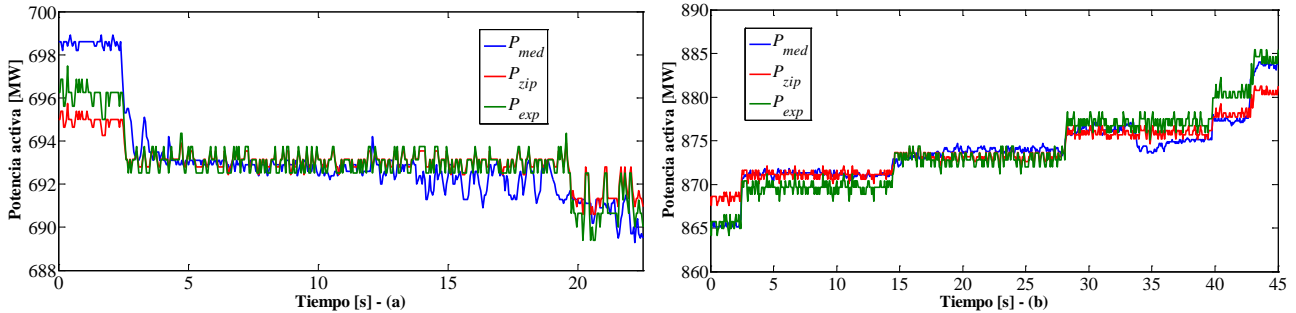


Figura 4: Potencia activa medida y estimada para los periodos de carga: (a) Máxima y (b) Pesada

En la Figura 4 se muestran los modelos de carga polinomial P_{zip} y exponencial P_{exp} , para los periodos de carga máxima (Figura 4a) y pesada (Figura 4b), obtenidos con los parámetros mostrados en la Tabla I, que corresponden a un periodo de carga media. En la Figura 4a (carga máxima) la variación de tensión fue de 1kV, reduciéndose de 238kV, pasando por 237,5kV, hasta llegar a 237kV. En la Figura 4b (carga pesada) la variación de tensión fue de 3kV, aumentando de 235kV, pasando por 236kV, 236,5kV, 237kV, 237,5kV, hasta alcanzar 238kV. Los modelos de carga obtenidos se ajustan a los valores de potencia medida P_{med} en ambos casos, lo que verifica los parámetros obtenidos en el periodo de carga media.

En la optimización del modelo de potencia reactiva no fueron obtenidos valores consistentes, cuando aplicado a toda la muestra de registros, o sea, la simplificación adoptada no puede ser aplicada en cualquier condición del sistema. Se cree que estos resultados no fueron satisfactorios en todos los periodos en función de los controles existentes en el sistema ANDE, que son más exigidos o no en función de las condiciones y configuración del sistema. Sin embargo, fue realizado un análisis con un registro específico, considerando un periodo de carga leve, obteniéndose los parámetros del modelo de carga polinomial $a_q = 0,1$, $b_q = 0$ y $c_q = 0,9$, considerados aceptables. El registro considerado se muestra en la Figura 5.

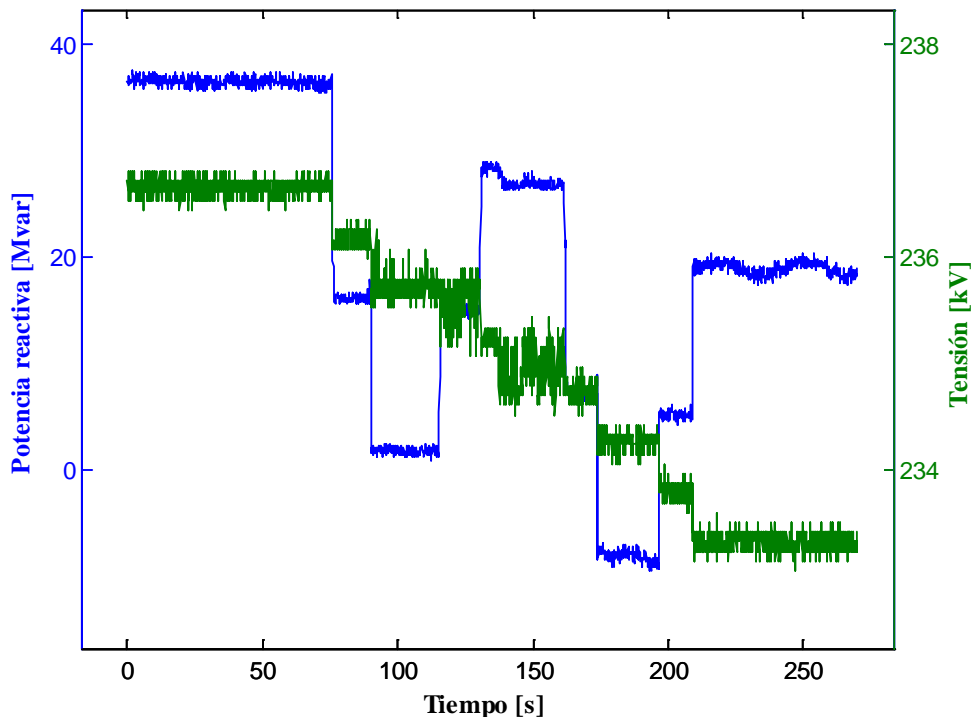


Figura 5: Registro considerado para el ajuste del modelo de potencia reactiva. Carga leve

Para verificar los parámetros de los modelos de carga obtenidos, mostrados en la Tabla I, fue considerada la desconexión de la interconexión en 220kV entre el sector de 50Hz de la ITAIPU y el SIN-PY. Esta perturbación sucedió en el día 7/06/2014 [7]. Las variaciones reales de tensión en la SE-MD y en la ES-VHA en 500kV, durante la perturbación, se muestran en la Figura 6.

La sección mostrada dentro del cuadro (en línea de trazos), en la Figura 6, fue simulada de forma dinámica, con el modelo de carga utilizado en estudios eléctricos de la Comisión Mixta de Operación (CMO) y con el modelo propuesto en este trabajo. Los resultados de esta simulación dinámica se muestran en la Figura 7, donde se verifica una mayor caída de tensión en la ES-VHA con el modelo propuesto que con el modelo utilizado actualmente en los estudios de la CMO. La caída de tensión obtenida con el modelo propuesto, presenta mayor similitud a la caída de tensión registrada en la perturbación, indicada en la Figura 6.

También fueron realizadas simulaciones en régimen permanente, para comparar el modelo de carga utilizado actualmente, que consiste en el modelo de potencia constante P_{cte} , con el modelo de carga propuesto en este trabajo. En estas simulaciones fue alterada la tensión en la SE-MD 220kV mediante cambios de *tap* y fueron verificadas las correspondientes variaciones de flujo de potencia en cinco transformadores/reguladores de la subestación. Los resultados de estas simulaciones se muestran en la Tabla II.

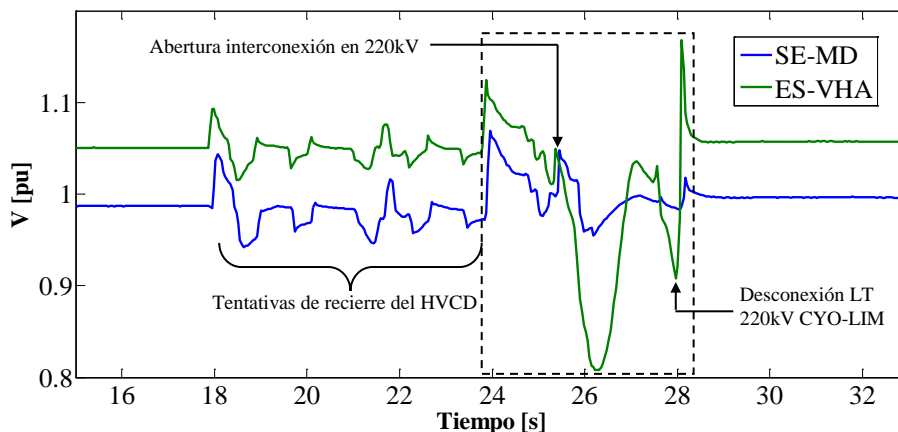


Figura 6: Variaciones de tensión en la SE-MD y en ES-VHA en 500kV durante perturbación

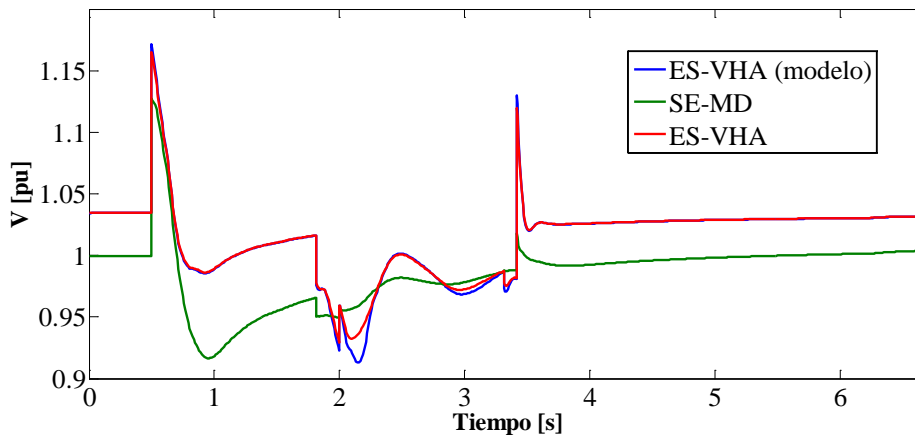


Figura 7: Simulación dinámica de la abertura de la interconexión en 220kV

En la Tabla II se observa que con un aumento de tensión en la SE-MD 220kV hay una reducción en el flujo de potencia en los transformadores/reguladores con el modelo P_{cte} . Sin embargo, con el modelo propuesto sucedió lo contrario; con un aumento de tensión se registra un aumento en el flujo de potencia de los

transformadores/reguladores. Este último comportamiento es coherente con las Figuras 3 y 4. En la Tabla II se muestran valores sin la LI 500kV MD-VHA en operación.

Tabla II: Resultados de flujo de potencia sin la LI 500kV MD-VHA

tap [pu]	Tensión en SE-MD 220kV [kV]	Flujo de potencia [MW]	
		P_{cte}	Modelo Propuesto
1,000	210,98	999,5	953,5
1,014	213,62	997,0	962,0
1,030	216,48	994,0	971,5

También fue considerada la LI 500kV MD-VHA en operación, con el modelo de carga propuesto. En este análisis fueron realizados cambios de tap en los reguladores de la SE-MD 220kV para verificar la influencia de la línea considerada en el comportamiento de la carga del SIN-PY. Los cambios de tap fueron realizados de 220kV a 226,6kV. En estos cambios, la variación de flujo en la LI 500kV MD-VHA con el modelo P_{cte} fue de 2,2% (pasando de 416MW a 407MW), sin embargo, con el modelo propuesto, esta variación fue de 0,84% (reduciéndose de 426,6MW a 423MW). Durante los cambios de tap, también fue verificado que el flujo de potencia por los transformadores/reguladores aumentó de 539MW a 546MW (aumento de 7MW para un incremento de 6,6kV) con el modelo P_{cte} . Sin embargo, con el modelo propuesto, esta variación fue de 546MW a 564,5MW (aumento de 18,5MW para un incremento de 6,6kV). Esta última variación de flujo de potencia es coherente con los registros dinámicos con la LI 500kV MD-VHA en operación, mostrado en la Figura 8, que indica una variación de 1kV y su correspondiente aumento de 12MW.

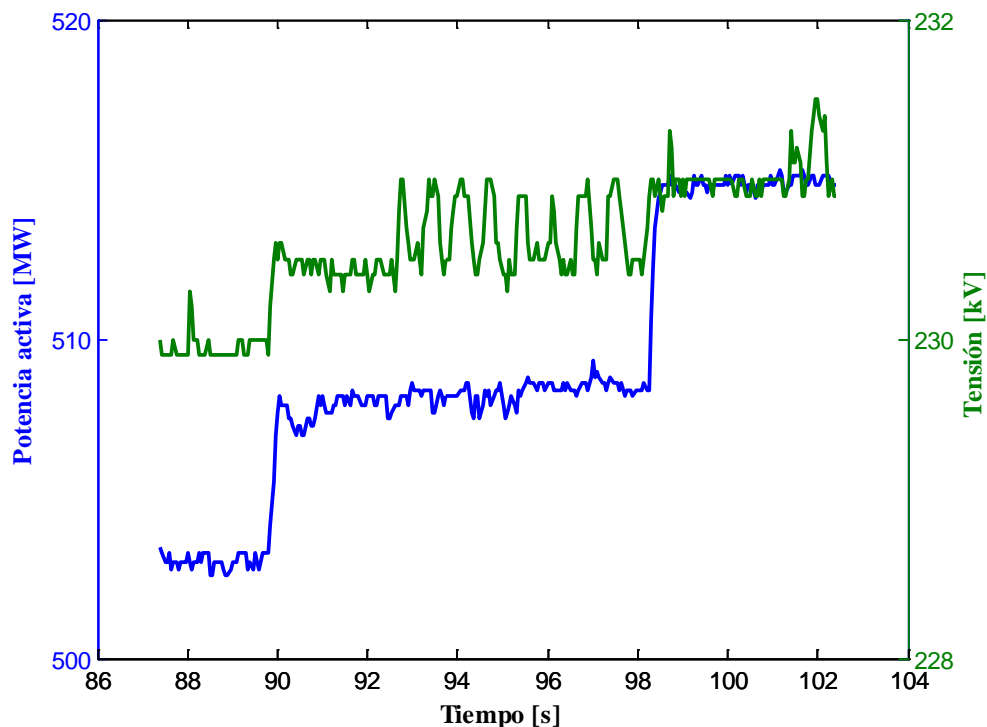


Figura 8: Registro de potencia activa y tensión en la SE-MD 220kV con la LI 500kV MD-VHA

5 CONCLUSIONES

Este trabajo presentó un estudio del comportamiento de la carga del SIN-PY, considerando la influencia de la línea LI 500kV MD-VHA, que interconecta las subestaciones SE-MD y ES-VHA. Para lograr este objetivo, fue realizado el cálculo de los parámetros de los modelos de carga polinomial y exponencial, considerando registros con y sin la LI 500kV MD-VHA en operación.

El procedimiento de cálculo de los parámetros de los modelos de carga utilizó variaciones de potencia y de tensión, registradas en los conjuntos transformador/regulador de tensión y en la barra del patio de 220kV de la SE-MD. Estas variaciones fueron obtenidas por RDs de larga duración, considerando diferentes niveles de intercambio de potencia entre la SE-MD y el SIN-PY. Los registros utilizados para el estudio fueron obtenidos durante maniobras de cambios de *tap* en los reguladores, que realizan el control de tensión a nivel de transmisión. Este procedimiento buscó obtener variaciones de potencia en función a variaciones de tensión para utilizar los modelos de carga mencionados. La utilización de registros dinámicos (conteniendo variaciones de potencia y tensión) permitió evitar las fluctuaciones naturales de potencia, debido a su duración de algunas decenas de segundos, lo que posibilitó el cálculo de los parámetros de los modelos de carga que, por su vez, permiten obtener variaciones de potencia en función a variaciones de tensión.

El cálculo de los parámetros de los modelos de carga fue realizado mediante la formulación de un problema de optimización mono-objetivo, que buscó minimizar la diferencia relativa media entre los valores de potencia medidos y calculados. Este problema fue resuelto utilizando el método de Gradientes Reducidos Generalizados. Con los parámetros de los modelos de carga polinomial y exponencial (P_0^{pol} , P_0^{exp} , V_0^{pol} , V_0^{exp} , a_p , b_p , c_p y a_q), obtenidos para un periodo de carga media, fue estimado el comportamiento de la carga para periodos de carga máxima y pesada de manera satisfactoria. Este procedimiento permitió verificar los parámetros de los modelos de carga obtenidos y la eficiencia de la metodología. Los parámetros utilizados para las estimaciones son: $a_p = 35\%$, $b_p = 0\%$, $c_p = 65\%$, $a_q = 10\%$, $b_q = 0\%$ y $c_q = 90\%$.

Para validar los resultados obtenidos, fue analizada una perturbación, correspondiente a la abertura de la interconexión en 220kV entre la SE-MD y el SIN-PY. Con el modelo de carga calculado, la caída de tensión durante el evento fue semejante a las oscilaciones reales, mejorando los resultados obtenidos con el modelo de carga utilizado actualmente en los estudios eléctricos de la CMO. También fueron realizadas simulaciones en régimen permanente de variaciones de tensión en la SE-MD 220kV. Con el modelo P_{cte} (actualmente utilizado en estudios eléctricos de régimen permanente), para aumentos de tensión fueron verificadas reducciones en el flujo de potencia en los transformadores/reguladores. Sin embargo, con el modelo propuesto fueron registrados aumentos en el flujo de potencia, para los mismos aumentos de tensión. Este último comportamiento es coherente con las variaciones de potencia y tensión reales, registradas en la subestación.

También fue considerada la LI 500kV MD-VHA en operación, con el modelo de carga propuesto. En este análisis fueron realizados aumentos de *tap* en los reguladores de la SE-MD 220kV para verificar la influencia de la línea considerada en el comportamiento de la carga del SIN-PY. Con los aumentos de *tap* fueron verificadas reducciones en la línea y aumentos en los transformadores/reguladores de flujos de potencia. Los aumentos de flujos de potencia en la transformación de la SE-MD 220kV, para los correspondientes incrementos de tensión, fueron coherentes con los registros dinámicos que consideran la LI 500kV MD-VHA en operación.

Con los resultados obtenidos, que son considerados preliminares, debido a que la línea de investigación se encuentra en su estado inicial, se abre la posibilidad de realizar otros tipos de estudios, que permitan obtener modelos de carga en diferentes subestaciones del SIN-PY, que posibiliten recrear las variaciones de potencia en función a alteraciones de tensión registradas en la SE-MD 220kV.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. Palo Alto, CA: McGraw Hill, Inc., 1994.
- [2] A. Maitra, A. Gaikwad, P. Pourbeik, and D. Brooks, “Load model parameter derivation using an automated algorithm and measured data”, in IEEE General Meeting, Vancouver, Julio 2008.
- [3] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. “Load Representation for Dynamic Performance Analysis”, *Trans. on Power Systems*, vol. 8, no. 2, Mayo 1993, pág. 472-482.
- [4] P. Gomes, A. P. Guarini, M. M. P. Souza, A. G. Massaud, C. Ferreira, J. M. E. Vicente, P. P. C. Mendes, A. M. C. Ribeiro, “Modelagem de carga para estudos dinâmicos”, em XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, Octubre 2007.
- [5] M. S. Neves, “Modelagem de carga em sistemas de energia elétrica: modelo matemático e sua validação com teste de campo”, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, 2008.
- [6] M. B. Amaral, “Modelagem estática de carga por meio de medição direta: proposição de uma metodologia sistemática, seus impactos e benefícios”, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, 2004.
- [7] División de Estudios Eléctricos y Normas – OPSE.DT, ITAIPU Binacional. Informe de Análisis de Perturbación (RAP 07/2014).