

## **Estudio de la interconexión provisoria de la CHY-ANDE a través de la LP2**

**Wilder M. Mereles D., Dionicio González T.**

**Entidad Binacional Yacyretá**

**Paraguay**

### **RESUMEN**

El presente trabajo tiene como objetivo analizar la operación del sistema de interconexión provisoria de la Central Hidroeléctrica Yacyretá (CHY) con la Administración Nacional de Electricidad (ANDE), considerando la operación de la Línea Paraguaya N° 2 (LP2), como único vínculo de suministro de energía, durante la ejecución de los trabajos de adecuación de la Línea Paraguaya N°1 (LP1), para el cambio del nivel de tensión de salida de 220 a 500 KV.

Para esta situación será estudiado el comportamiento de la LP2 y del Autotransformador Paraguayo N°2 (ATP2) de 250 MVA, ante dos escenarios propuestos de suministro a la ANDE a través de la S.E. Ayolas. Los dos escenarios propuestos son: operación en régimen normal y operación en régimen de emergencia.

En el primer caso se analiza los efectos de una falla y posterior pérdida de carga con una potencia de 250 MVA y para la segunda, un caso en que la potencia de suministro hipotético es de 280 MVA a la SE Ayolas, considerando también el mismo tipo de falla.

Para ambos escenarios, se presentan los efectos de la falla sobre la operación normal de la Central, pudiendo observarse el comportamiento de la tensión en las barras y la distribución de los flujos entre los sistemas asociados CHY así como los demás parámetros asociados.

### **PALABRAS CLAVES**

\*Central Hidroeléctrica Yacyretá, Administración Nacional de Electricidad, Línea Paraguaya N° 1 y 2, Sistema Eléctrico, Operación en Régimen Normal y de Emergencia.

### **1. INTRODUCCIÓN**

Dentro del marco de interconexión en 500 KV entre la CHY y ANDE, existen numerosos trabajos emprendidos a fin de que la misma sea ejecutada dentro del programa establecido.

Este estudio analiza el comportamiento en régimen de estado estable y dinámico para la configuración prevista del sistema eléctrico de potencia durante la ejecución de los trabajos en la salida de la LP1 de la CHY, la cual considera que la interconexión entre la ANDE-CHY, será únicamente a través de la LP2, quedando la LP1 desconectada hasta tanto culmine la adecuación.

Para la elaboración de estos estudios fueron utilizados los datos disponibles en la CHY, aplicando el mismo criterio técnico de estudios anteriores [4] e implementado través de modelos de computacionales [6] para distintos escenarios de simulación.

### **2. LA INTERCONEXIÓN ACTUAL ANDE-CHY.**

Antes de encarar los análisis, es importante conocer las principales características de la interconexión ANDE-CHY, que de acuerdo al Instructivo de la ANDE [1], la principal configuración utilizada para la interconexión de ambos sistemas es una alimentación radial exclusiva desde la CHY.

Según la Instrucción Operativa de la Interconexión ANDE-CHY, esta configuración presenta las siguientes características técnicas en cuanto a la Capacidad de la Interconexión [1]:

## 2.1 Autotransformadores

### 2.1.1 Operación en Régimen Normal:

En condiciones normales de operación los autotransformadores ATP1 y ATP2 (512,5 / 231kV) tienen una capacidad de:

AUTOTRANSFORMADORES	CAPACIDAD [ MVA ]	LÍMITE OPERATIVO NORMAL en 220 kV [ A ]
ATP1	250 (1)	625
ATP2	250 (1)	625

#### Observaciones:

- (1). En carga del autotransformador de hasta 250 MVA se permite la operación del autotransformador con 4 enfriadores en servicio.
- De acuerdo al fabricante [2], en carga, hasta 269 MVA se permite la operación del autotransformador con 5 enfriadores en servicio. El estado térmico de los arrollamientos, en estas condiciones, no sobrepasa al calculado para 250MVA con 4 enfriadores en servicio. De acuerdo a los registros de operación [2], el ATP1 ya ha operado con potencias superiores a la nominal.

### 2.1.2 Operación en Régimen de Emergencia:

En condiciones de operación de emergencia los autotransformadores ATP1 y ATP2 (512,5 / 231kV) tienen una capacidad de:

AUTOTRANSFORMADORES	CAPACIDAD [ MVA ]	CAPACIDAD en 220 kV [ A ]	LÍMITE DE EMERGENCIA [ A ]
ATP1	285 (1)	712	712
ATP2	285 (1)	712	712

#### Observación:

(1) En cargas de 269MVA a 285MVA se permite la operación del autotransformador con 6 enfriadores en servicio (sin enfriador en reserva, todos en servicio).

## 2.2 Líneas de Interconexión

### 2.2.1 Operación en Régimen Normal:

El límite operativo normal de las líneas está determinado para evitar el accionamiento del Esquema de Control de Emergencia (ECE) de la interconexión. El límite es inferior a la capacidad de transmisión real de las líneas y en condiciones normales de operación las líneas de interconexión tienen una capacidad de:

LÍNEAS	CAPACIDAD AD [ MVA ]	CAPACIDAD en 220 kV [ A ]	LÍMITE OPERATIVO NORMAL en 220 kV [ A ]
LI-220 kV AYO-YAC II o LP2	250	656	636 (1)

LI-220 kV AYO-YAC I (LT 500 kV) o <b>LP1</b>	320 (2)	800 (2)	675 (3)
--	---------	---------	---------

**Observaciones:**

- (1) **Limitada a 636A.** Se adopta este valor para evitar entrar en zona de riesgo de posibles errores en la precisión de las mediciones (criterio adoptado  $\pm 3 \%$ ), de accionamiento del ECE ajustado en 656A en esta línea.
- (2) Los conductores de esta línea permiten transmitir en condiciones normales hasta **720 MVA de potencia o 1890 A de corriente, en 220 kV.** En la práctica está limitado a 800 A (320 MVA) por límite de la capacidad operativa de las trampas de onda.
- (3) **Limitada a 675A.** Se adopta este valor para evitar entrar en zona de riesgo de posibles errores en la precisión de las mediciones (criterio adoptado  $\pm 3 \%$ ), de accionamiento del ECE ajustado en 696A en esta línea.

**2.2.2 Operación en Régimen de Emergencia:**

El límite operativo de emergencia de las líneas está determinado para evitar la actuación de la protección de sobrecarga de los autotransformadores (ajuste del relé de sobre corriente lado 500kV 20 % en un tiempo de 1,2 segundos). El límite es inferior a la capacidad de transmisión real de las líneas y en condición de emergencia las líneas de interconexión tienen una capacidad de:

LÍNEAS	CAPACIDAD [ MVA ]	CAPACIDAD en 220 kV [ A ]	LÍMITE DE EMERGENCIA POR ACCIONAMIENTO E.C.E. [ 0,9 SEGUNDOS ] [ A ]
LI-220 kV AYO-YAC II o <b>LP2</b>	280	735	656 (1)
LI-220 kV AYO-YAC I (LT 500 kV) o <b>LP1</b>	320 (2)	800 (2)	696 (3)

**Observaciones:**

- (1) **Limitada a 656A,** en 220kV por el ECE o Desconexión Automática de Demanda (DAD), con corte de demanda pre-determinada luego de mantenerse la corriente en la línea por 0,9 segundos o 900 milisegundos en el valor de ajuste.
- (2) Los conductores de esta línea permiten transmitir en condiciones normales hasta **800MVA de potencia o 2099A de corriente, en 220kV.** En la práctica está limitado a 800A (320MVA) por límite de la capacidad operativa de las trampas de onda.
- (3) **Limitada a 696A,** en 220kV por el ECE con corte de demanda pre-determinada DAD, por un tiempo de 0,9 segundos o 900 milisegundos.

**3. ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN PREVISTA PARA LA LP2.**

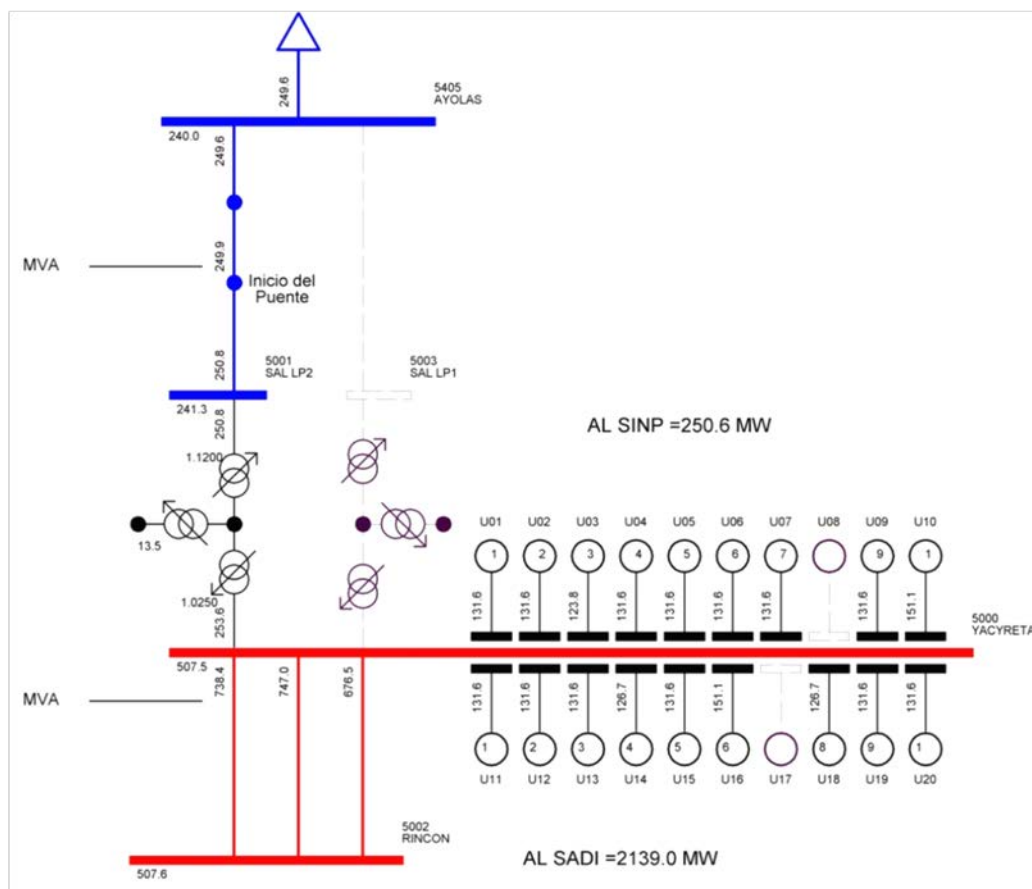
**3.1. Introducción**

A fin de conocer el comportamiento de la configuración del sistema eléctrico considerado para la continuidad del suministro de energía a la interconexión CHY-ANDE, en este apartado serán presentados

los resultados del comportamiento en estado estable de dicha operación. Para el efecto se ha elaborado un modelo de la interconexión de la CHY con los escenarios propuestos.

### 3.2. La operación en régimen normal.

Durante los trabajos de adecuación de la interconexión en 500 KV, un posible escenario de operación será como la observada en la figura 1, donde se puede apreciar que la LP2 es el único vínculo entre la CHY y la SE Ayolas. Para este escenario se analiza el suministro de flujo de potencia considerando el régimen normal de operación de la línea, es decir 250 MVA. En la figura 1, se puede observar que una potencia de 249,9 MVA son suministrados por la Central a la SE Ayolas.



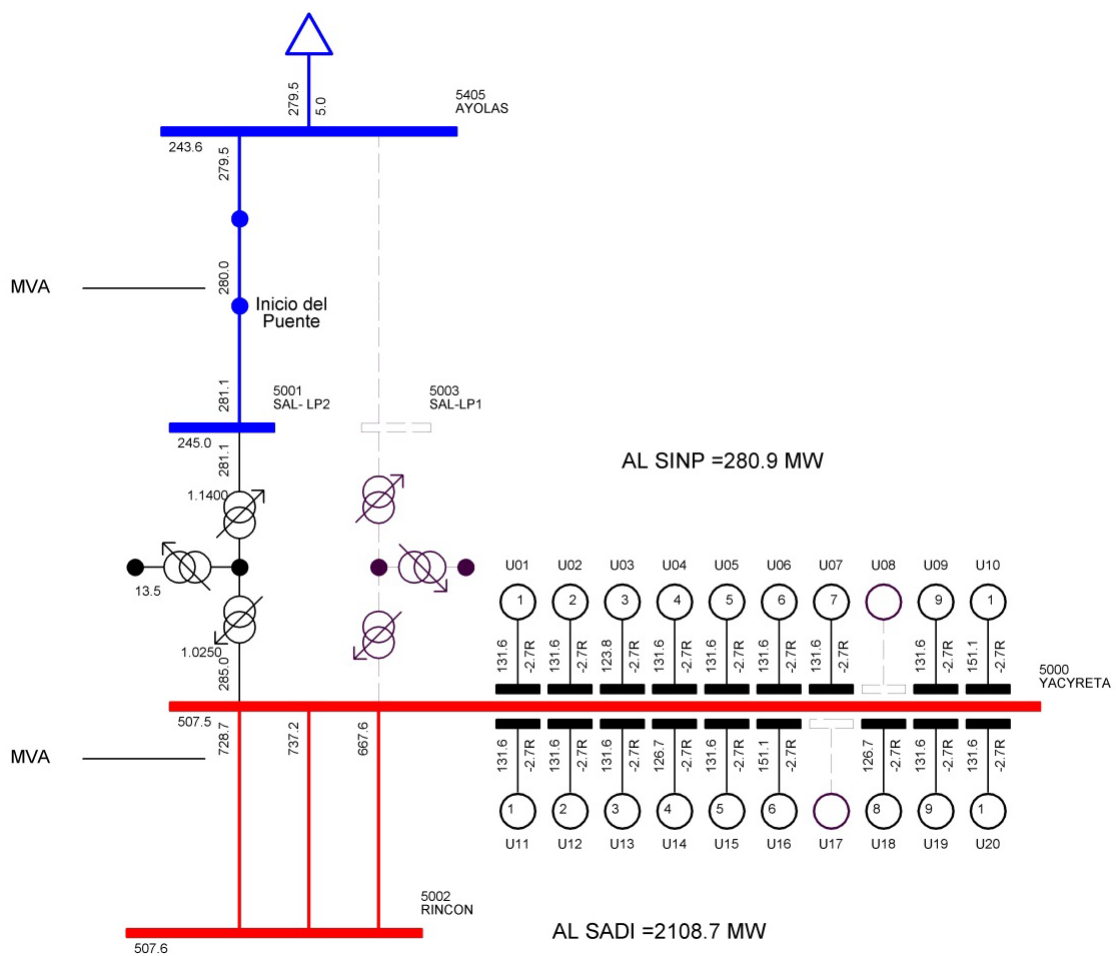
**Fig. 1. Diagrama unifilar simplificado, de la operación de la LP2 en régimen normal.**

En este diagrama también se ha considerado las particularidades de la LP2, tal como su configuración especial en el paso sobre el Puente Aña Cuá y los cambios de impedancias y capacitancias que eso implica, esto es a fin de tener una mejor precisión de los resultados.

En cuanto a la generación se puede observar que las limitaciones actuales de las máquinas fueron consideradas en este estudio así como el fuera de servicio de las unidades U08 y U17. El flujo de potencia activa desde CHY a SE Ayolas es de 250,6 MW, mientras que 2.139 MW son suministrados al SADI, totalizando aproximadamente 2.390 MW.

### 3.3. La operación en régimen de emergencia.

Para este escenario se analiza el suministro de potencia considerando el régimen de operación de emergencia de la línea, es decir 280 MVA. Como en el caso anterior en este análisis también son consideradas las características mencionadas de la LP2, siendo este el principal punto de consideración. De acuerdo a la ANDE, el principal aspecto a considerar es la potencia máxima en el paso del puente, por ende se puede observar en la fig. 2, que la potencia máxima de 280 MVA se registra en el tramo del paso Aña Cuá.



**Fig. 2. Diagrama unifilar simplificado, de la operación de la LP2 en régimen de emergencia.**

Para que este escenario ocurra, la Central debe suministrar aproximadamente a la ANDE 280,9 MW y los restantes 2.108,7 MW al SADI. Un resumen comparativo de los principales parámetros eléctricos de la operación en régimen normal y de emergencia será presentado en el próximo apartado.

### 3.4. Análisis de los escenarios de operación en estado estacionario.

Las simulaciones para la configuración temporal de la interconexión ANDE-CHY, fueron realizadas aplicando software de simulación de sistemas eléctricos de potencia [4,6]. Para ambos escenarios fueron considerados la configuración de interconexión de la CHY presentados en las fig.1 y 2.

A fin de comparar los resultados de las operaciones del régimen normal y de emergencia se presenta la Tabla N° 1, donde se puede ver los principales resultados obtenidos de las simulaciones realizadas.

**Tabla 1. Resumen de la operación en régimen normal y de emergencia.**

OPERACIÓN	ATP2						LP2
	LADO 500 kV			LADO 220 kV			Puente
	<i>kV</i>	<i>MVA</i>	<i>A</i>	<i>kV</i>	<i>MVA</i>	<i>A</i>	<i>MVA</i>
NORMAL	507,5	253,6	288,5	241,3	250,8	600,3	249,9
EMERGENCIA	507,5	285,0	324,2	245,0	281,1	662,5	280,0

Como primer punto se observa la tensión en el lado de 500 kV del ATP2, para ambos casos es de aproximadamente 507 kV. Ya para el lado de 220 kV, la operación normal presenta aproximadamente 241 kV y en la de emergencia 245 kV [3]. Como se ha explicado anteriormente el punto más crítico se registra en el paso del Puente Aña Cuá, obteniendo aproximadamente 250 MVA en régimen normal y 280 MVA en régimen de emergencia.

De todos estos valores, se toma con especial importancia lo obtenido en cuanto a la corriente necesaria para cada caso:

- Para el régimen normal se puede observar que para una potencia transmitida por la LP2 próxima de 250 MVA y a una tensión en la salida del autotransformador de 241 kV serán necesarios unos 600 A. Del apartado 2.2.1, se tiene que la capacidad de la línea es 656 A y limitada por protecciones a 636 A, es decir operaría a 94,33 % de su capacidad de transmisión permitida.
- Para el régimen de emergencia, se puede apreciar que para una potencia transmitida por la LP2 próxima a 280 MVA y a una tensión en la salida del autotransformador de 245 kV, la corriente circulante estimada es de 662 A. Del apartado 2.1.1 y 2.2.2, se tiene que la línea está limitada por protecciones a 656 A (con un tiempo de 0,9 de actuación), es decir operaría a 101 % de su capacidad de transmisión permitida y 106 % del límite normal permitido del ATP2. Además de exigir que el ATP2 opere a una potencia próxima a los 285 MVA, es decir a 14 % de sobrecarga.

De estas dos situaciones se puede destacar que para una operación con valores de potencia de suministro por encima de las nominales requieren una especial atención a los ajustes de protecciones actuales y que para el autotransformador ATP2 una operación en estado de sobrecarga por encima de 250 MVA requiere del funcionamiento de 5 enfriadores (1 reserva) y para una sobrecarga por encima del 7 % requiere de 6 enfriadores en funcionamiento (sin reserva).

Por lo expuesto se puede precisar que la configuración estudiada no tiene margen de error para su operación debido a que solo se contará con una línea y si la operación requiere de sobrecargas en el ATP2 el mismo también podría estar condicionado al número de enfriadores disponibles.

## 4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD.

### 4.1. Introducción

Según la definición de IEEE, un sistema de potencia es estable del punto de vista de estabilidad transitoria, si después de ocurrido una gran perturbación en el sistema, este es capaz de alcanzar una condición de operación aceptable.

La potencia eléctrica suministrada por un generador depende del ángulo eléctrico relativo al resto de generadores y nudos del sistema. Cuando se produce un transitorio electromecánico, la variación de la velocidad del rotor se traduce en una variación del ángulo. Esta variación modifica los valores de potencia y contribuye a la evolución del transitorio. Si el sistema es estable todos los generadores llegaran a un régimen con un nuevo ángulo constante [5].

Sobre este punto, en este apartado serán presentados los resultados de las simulaciones dinámicas de la operación en régimen normal y de emergencia de la interconexión de la CHY- ANDE a través de la LP2.

### 4.3. Presentación de casos

Dando continuidad al estudio del comportamiento del sistema eléctrico para la operación normal y de emergencia considerado en el análisis de flujo de carga de las figuras 1 y 2, se ha realizado el análisis dinámico de dichos escenarios estudiados, los cuales se han renombrado como: caso 1, y caso 2, según se detalla en la tabla 2, a fin de facilitar su seguimiento. El objetivo de estos casos es determinar la influencia de la falla considerada (falla severa, 4 ciclos de duración) sobre la estabilidad de la CHY.

**Tabla 2. Resumen de los pasos, para los casos estudiados**

t(s)	Caso 1 (Operación Normal)	Caso 2 (Operación de Emergencia)
0,00	Inicio de la simulación	Inicio de la simulación
0,10	Falla 3 $\phi$ en la barra de SE Ayolas 220 kV.	Falla 3 $\phi$ en la barra de SE Ayolas 220 kV.
0,18	Extinción de la falla y apertura de la LP2	Extinción de la falla y apertura de la LP2
30,00	Fin de la simulación	Fin de la simulación

Por lo tanto, analizando los transitorios sobre un mismo caso base, se puede realizar un análisis comparativo entre los distintos escenarios probados. De esto se obtiene importantes informaciones que ayudan a predecir el comportamiento estable o no de la CHY para la configuración temporal de la interconexión con la ANDE.

### 4.4. Resultados

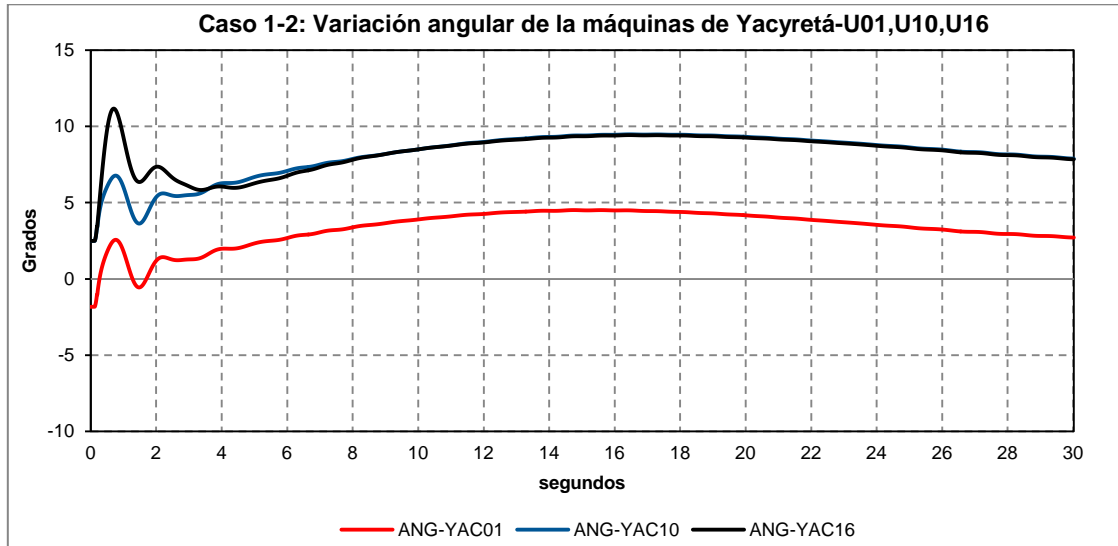
Para todos los casos analizados fue considerado el flujo de carga presentado en la figuras 1 y 2, en la misma se observa que en ambos casos la CHY entrega aproximadamente 2.390 MW. La variación de potencia suministrada al SADI y al SINP, no son reflejadas a las unidades generadoras dado que la potencia total de suministro se mantiene invariable. En este apartado será presentado un resumen del comportamiento de los principales parámetros eléctricos [4] afectados por dicho estudio.

Teniendo esta situación como condición inicial para los casos a estudiar, se estima que el ángulo permanece constante en el tiempo mientras no se alteren los valores de los pares motores o resistentes.

Una vez aplicada las fallas establecidas para cada caso en la tabla 2, esta provocará una perturbación brusca, asociada a su vez con una modificación súbita de la excitación y del par motor. El rotor de la máquina



se desplaza momentáneamente de su posición de equilibrio y puede alcanzar o no un nuevo punto de equilibrio después de una serie de oscilaciones del ángulo.



**Fig. 3. Oscilación angular de las máquinas de la CHY.**

En la figura 3 se observa que, la ocurrencia de la falla da lugar a una oscilación de la condición angular de los generadores de la Central, el fenómeno electromagnético asociado a este evento provoca un salto de la condición inicial de operación de las máquinas, pero una vez que la falla se extingue, dichos ángulos tienden rápidamente a una condición de equilibrio. Es importante aclarar que la diferencia entre las curvas representadas entre la YAC01 y YAC10 es principalmente por las potencias en la que cada máquina se encuentra operando.

A pesar de la severidad del caso, ha resultado en una condición estable del sistema, dado que en aproximadamente 4 segundos después de ocurrida la falla ya han desaparecido las oscilaciones y con esto llevando al sistema a una condición estable.

Tanto para el caso 1 y 2, estos gráficos resultan idénticos dado que no se modifican los valores totales de generación.

Por su parte la fig. 4, presenta los mismos generadores previamente mencionados y su reacción ante la aparición de la falla trifásica. La diferencia existente entre las curvas de YAC10 y YAC16, se deben principalmente a las diferencias de las características de sus sistemas de excitación. Sin embargo para las tres máquinas, es coincidente el tiempo de 3 segundos para la recuperación de su estado estable.



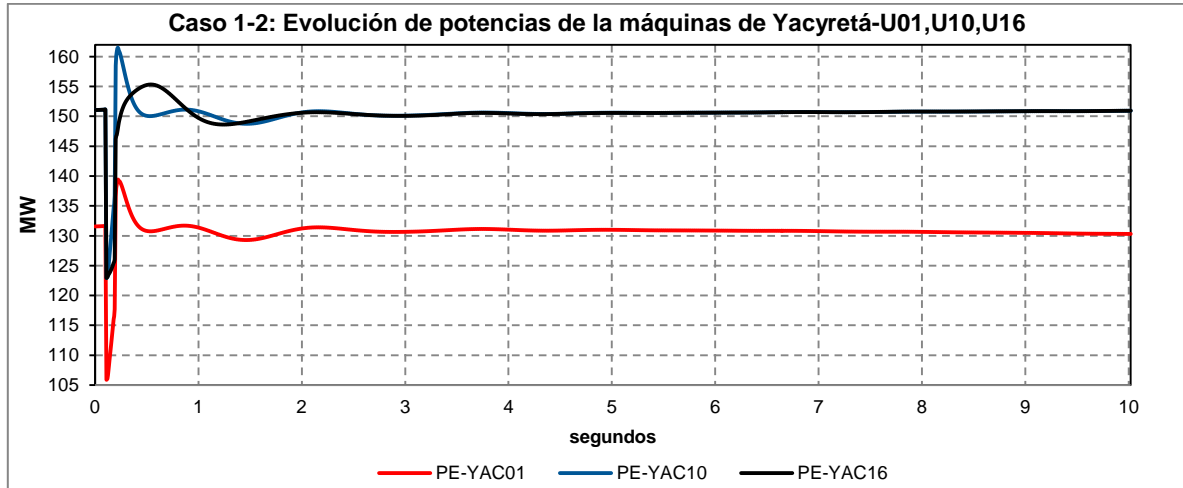


Fig. 4. Potencia eléctrica de las máquinas de la CHY.

Durante estas oscilaciones, la velocidad angular instantánea deja de ser constante, variando en torno a la velocidad síncrona media impuesta por la frecuencia de la red, que sigue siendo constante. Dicha variación de la velocidad síncrona media a su vez trae asociado consigo una variación de la frecuencia de generación.

Estas variaciones de frecuencias dependiendo de la amplitud de las mismas pueden ocasionar importantes perturbaciones al sistema eléctrico de potencia. A fin de tener una idea de la variación de frecuencia asociada a la perturbación, se presenta la figura 5, donde se puede apreciar que las oscilaciones y variaciones de la velocidad media síncrona han modificado la frecuencia original de 50 Hz, llegando hasta un máximo aproximado de 50,11 Hz para el caso 1 y 50,13 Hz para el caso 2. Dichos valores representan como máximo 0,26 % de variación de la frecuencia nominal y para ambos casos convergen hacia un valor final próximo a 50,03 Hz a los 30 segundos [4].

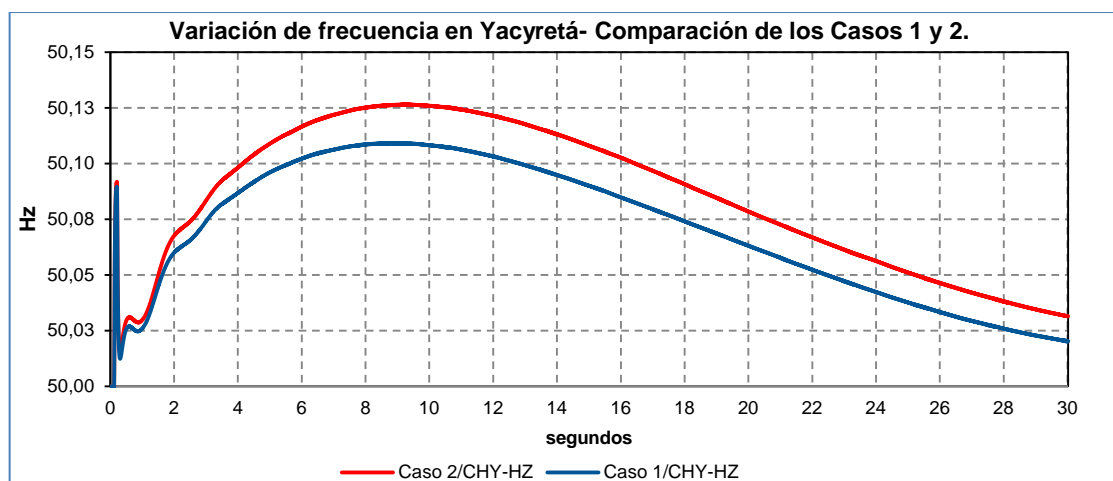


Fig. 5. Comparación entre casos de la variación de frecuencia.

## 5. Conclusiones

Considerando los resultados obtenidos de los estudios realizados se puede concluir:

- 1- Ante una operación en régimen normal no se observan limitaciones para un suministro de 250 MVA a través de la LP2 a la SE Ayolas de la ANDE. Tanto en estado permanente como en estado transitorio los resultados demuestran que cualquiera sea el caso el sistema eléctrico de potencia no sufre variaciones considerables que pongan en riesgo la operación normal de la Central.
- 2- Para una operación en régimen de emergencia y considerando que el único vínculo posible de suministro de energía a la ANDE es la LP2, hace que sea cuidadosamente analizada esta opción. Dado que para lograr esta condición en estado permanente, se deberá considerar la sobrecarga del transformador ATP2 (aprox. 14 %) y la reingeniería de los esquemas de protección prevista por la ANDE (limitada a 656 A, por ECE) y Yacyretá. Esto implicaría una serie de cambios con una posterior puesta en prueba de las protecciones y considerando que por confiabilidad la operación prevista no tiene margen de error, hace necesario un análisis minucioso a fin de definir la factibilidad de esta alternativa. Ya para su análisis en estado transitorio, no se observan resultados que impidan su operación.

## 6. Referencias

- [1]. ANDE. Instrucción de Operación de la Interconexión ANDE-YACYRETÁ N° 1. Rev. 1,2
- [2]. ZAPOROZHTRANSFORMATOR. Cálculo del estado térmico de los arrollamientos del autotransformador AT/ДІІН-250000/500/220 en su operación en potencia pasante aumentada. Evaluación de la efectividad de la instalación de un enfriador adicional.
- [3]. EBY. Sobrecarga en el Pico de los días 04, 05 y 07 de Febrero de 2010 (Autotransformador ATP1). Memorandum N° 2872/SO del 10 de febrero de 2010.
- [4]. TRANSENER. Estudios de Necesidad de Modificación de Automatismos de DAG. Escenarios para estudios de ajuste de protecciones. INFORME TÉCNICO DT/GPOR/DPR N° 09.05.1-V2/2013
- [5]. Zamora, M. I.; Mazón, A. J.; Fernández, E. Simulación de Sistemas Eléctricos. Pearson Prentice Hall. Pearson Educación S.A. 2005
- [6]. PSSEv32 Univ. Siemens PTI.2011