

**XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE**  
23 y 24 de Junio 2022

---

**Modelado de controladores de Yacyretá/Itaipú/HVDC Furnas en PSSE/ANATEM para estudios de Interconexión del Sistema Eléctrico Paraguayo-Argentino-Brasileño**

**Ing. MSc. Wilder Mereles, Ing. Rodrigo Frigola**

**Entidad Binacional Yacyretá**

**Paraguay**

**RESUMEN**

La entrada en servicio de la nueva línea de 500 kV Ayolas-Villa Hayes permite la posibilidad de operar las centrales hidroeléctricas de Yacyretá e Itaipú en una misma red mediante la interconexión en 500 kV. Para analizar el comportamiento dinámico de la interconexión eléctrica de los sistemas paraguayo, argentino y brasileño se realizan estudios eléctricos en los programas *Power System Simulator for Engineering* (PSSE) y *Análise de Transitorios Eletromecânicos* (ANATEM), en este sentido el Sistema Argentino de Interconexión (SADI) junto con la Central Hidroeléctrica Yacyretá (CHY) ya se encuentran modelados en el programa PSSE, por otro lado, la Central Hidroeléctrica Itaipú (CHI) y Acaray (CHA) junto con los Compensadores Estáticos de Reactivos (CER) de Limpio, Guarambaré, Horqueta y enlace *High Voltage Direct Current* (HVDC) de Furnas ya se encuentran modelados en el programa ANATEM.

El objetivo del presente trabajo es el desarrollo de los modelos de los controladores de Yacyretá para su integración con la base de datos existente en ANATEM y de las Centrales de Itaipú, Acaray junto con los compensadores estáticos y enlace HVDC de Furnas para su integración con la base de datos existente en PSSE. De manera a compatibilizar las bases de datos dinámicas existentes en ambos programas para ser utilizados en los estudios de la interconexión.

El PSSE cuenta con modelos de biblioteca para realizar el análisis dinámico, estos modelos son insuficientes para reemplazar con suficiente fidelidad los modelos de regulador de tensión, estabilizador de sistemas de potencia y regulador de velocidad de las máquinas de 50 Hz de Itaipú. De esta forma se confeccionan modelos escritos por usuario en PSSE para modelar dichos controladores.

En cuanto a los controladores del enlace HVDC se desarrolla un modelo escrito por usuario en PSSE basado en modelos de librería para línea de corriente continua (CDCABT) y de señal auxiliar (CHAAUT).

Realizar un modelo escrito por usuario en PSSE implica en identificar las variables de estado asociadas a las ecuaciones diferenciales y algébricas del diagrama de bloques de cada controlador, crear vectores de constantes y variables de estado para finalmente escribirlo en el lenguaje FORTRAN FLECS.

Por su parte el ANATEM cuenta con una herramienta denominada CDUEdit para realizar de forma gráfica la edición y visualización de controladores definidos por el usuario a partir de los diagramas de bloques de los controladores. De esta forma se confeccionan modelos definidos por el usuario en ANATEM para representar el regulador de tensión, estabilizador de sistemas de potencia y regulador de velocidad de las máquinas de Yacyretá. Se realizan ensayos típicos en los programas ANATEM/PSSE para validar los controladores confeccionados, las salidas de ambos programas son contrastadas y se muestran los resultados más representativos.

**PALABRAS CLAVES**

**MODELO ESCRITO POR USUARIO, PSSE, ANATEM, REGULADOR DE TENSION, REGULADOR DE VELOCIDAD, ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTENCIA, HVDC, FORTRAN, FLECS.**

#### XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO – CIGRE 23 y 24 de Junio 2022

---

### 1. INTRODUCCIÓN

Para analizar el comportamiento dinámico de la interconexión eléctrica de los sistemas paraguayo, argentino y brasilero se realizan estudios eléctricos en los programas PSSE y ANATEM. La base de datos existente en el programa PSSE representa detalladamente al SADI y la Central Hidroeléctrica Yacyretá, por otro lado, la base de datos existente en el programa ANATEM representa con detalles las Centrales Hidroeléctricas de Itaipú y Acaray junto con el enlace HVDC de Furnas y compensadores estáticos de reactivos del Sistema Interconectado Nacional Paraguayo (SINP).

En este trabajo se presentan los resultados de validación y comprobación de los modelos de los controladores de los elementos dinámicos más importantes del SINP realizadas dentro del ámbito del Grupo de Estudios para la Interconexión, conformado por la Administración Nacional de Electricidad (ANDE), la Entidad Binacional Yacyretá (EBY) y la Itaipú Binacional (ITAIPU). De manera a compatibilizar las bases de datos dinámicas existentes en ambos programas para ser utilizados en los estudios de la interconexión.

La comprobación consiste en simulaciones realizadas en circuitos de pruebas mediante la utilización de los programas ANATEM y PSSE. Los resultados de ambas simulaciones de los controladores fueron comparados y analizados detalladamente.

### 2. CONVERSIÓN DE LAS BASES DE DATOS ESTÁTICAS

En una etapa anterior al desarrollo de los modelos dinámicos para la integración de las Bases de Datos Dinámicas fue realizada la conversión de las Base de Datos Estática del SADI en el programa PSSE para el *Programa de Análise de Redes* (ANAREDE). Así como la conversión en sentido opuesto, es decir, la conversión de la Base de Datos Estática del SINP desde el programa ANAREDE al programa PSSE.

En este sentido fueron desarrollados algoritmos que realizan la lectura de los datos estáticos en forma tabular del PSSE y ANAREDE. El algoritmo crea una nueva base de datos en el formato seleccionado PSSE o ANATEM, los datos de entrada son clasificados y tratados de tal forma a obtener como salida un archivo en el cual los parámetros están organizados de tal forma que puedan ser utilizados por los programas PSSE y ANATEM.

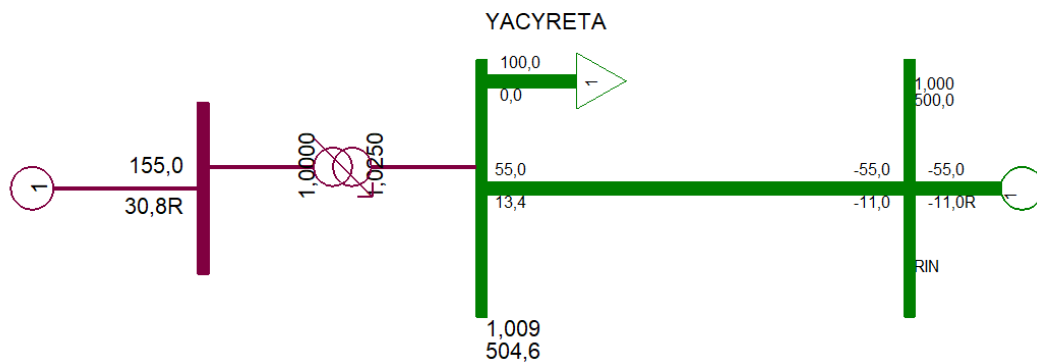
Las Bases de Datos Estáticas obtenidas para el SADI en ANAREDE y del SINP en PSSE son validadas por medio de la comparación de los resultados de los flujos de potencia, fueron contrastadas magnitudes como tensión y ángulo de barra, así como los flujos de potencia activa y reactiva en todo el sistema eléctrico convertido.

### 3. CONTROLADORES DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA YACYRETÁ

Las unidades generadoras de Yacyretá y sus sistemas de control se encuentran modelados en la Base de Datos de Estudios Eléctricos de la Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico SA (CAMMESA) en el programa PSSE. Los modelos de sistemas de control de Yacyretá en PSSE como el regulador de velocidad (RAVYA3), regulador de tensión (ABBSP2) y estabilizador de sistemas de potencia (PWX5P4) son modelados con la herramienta CDUEdit [1].

**XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE**  
23 y 24 de Junio 2022

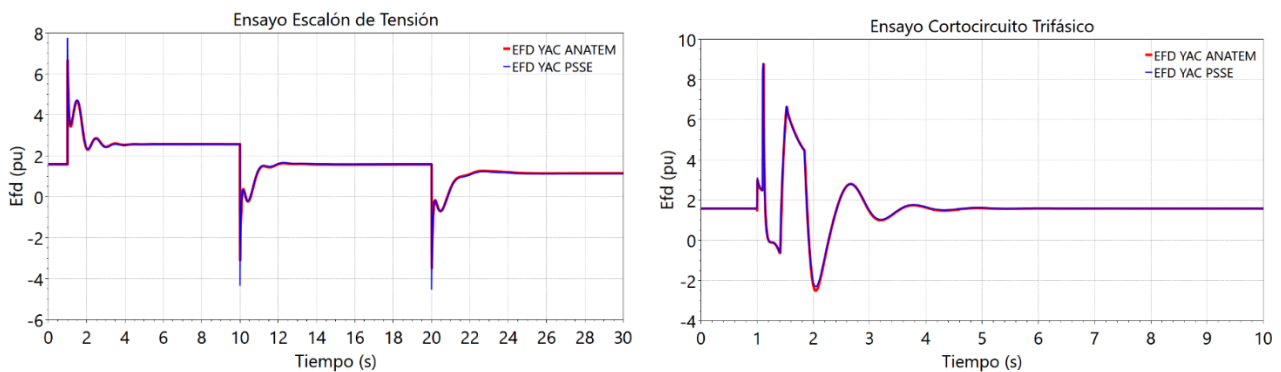
La validación de los mismos se realiza por medio de simulaciones máquina barra infinita, en las cuales el generador y su transformador elevador se conectan a una barra con carga, que por su vez se conecta a una barra infinita por medio de una línea de transmisión con impedancia de 7,5 % como ilustrado en la Figura 1.



**Figura 1: Diagrama unifilar para la validación de los controladores de la CHY en ANATEM**

3.1 Metodología utilizada para la validación del regulador de tensión y estabilizador sistemas de potencia de Yacyretá

Para la validación de los modelos del regulador de tensión (RT) y estabilizador de sistemas de potencia (PSS) se realizan ensayos típicos en los programas PSSE y ANATEM, en los mismos se consideran los modelos dinámicos de los generadores de Yacyretá con sus controladores desarrollados y de la barra infinita. El primer ensayo consiste en la aplicación de escalones en la referencia de tensión de  $\pm 10\%$ . El segundo ensayo consiste en aplicar un cortocircuito trifásico de 100 ms de duración con desaparición espontáneo, los resultados se ilustran en la Figura 2. Es verificado un comportamiento idéntico de la tensión de campo del modelo desarrollado para el ANATEM cuando comparado con el modelo oficial en PSSE.

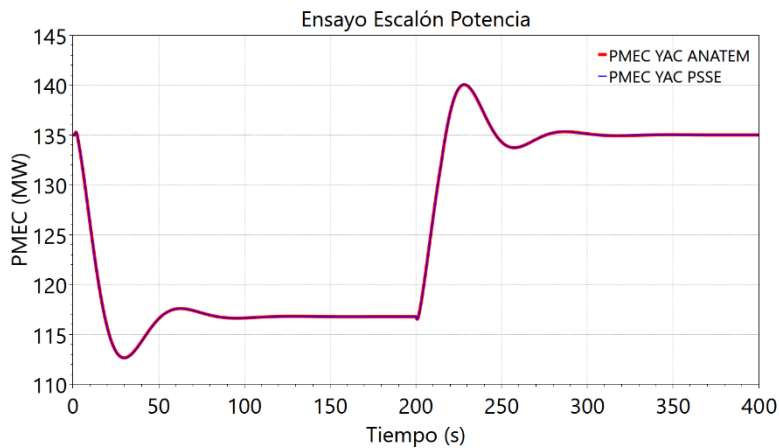


**Figura 2: Tensión de campo para Ensayos de escalones en la referencia de tensión y de cortocircuito trifásico**

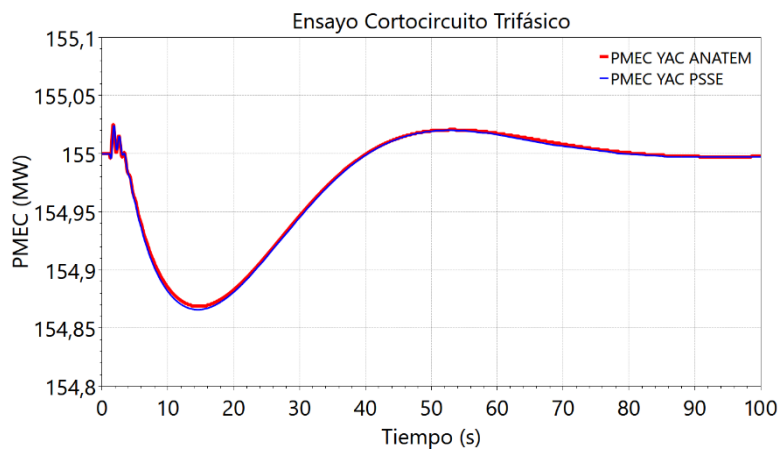
**XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE**  
**23 y 24 de Junio 2022**

3.2 Metodología utilizada para la validación del regulador de velocidad de Yacyretá

La validación del modelo de regulador de velocidad (RV) consiste en la realización de ensayos típicos en los programas PSSE y ANATEM, en los mismos se consideran los modelos dinámicos de los generadores de Yacyretá con el modelo desarrollado de RV y de la barra infinita. El primer ensayo consiste en la aplicación de escalones en la referencia de potencia de  $\pm 20$  MW (Figura 3) y el segundo consiste en aplicar un cortocircuito trifásico de 100 ms de duración con desaparacimiento espontaneo (Figura 4). Es observado un comportamiento idéntico de la potencia mecánica del modelo en ANATEM al compararse con el modelo oficial en PSSE durante los mencionados ensayos.



**Figura 3: Potencia mecánica para Ensayo de escalones en la referencia de potencia**



**Figura 4: Potencia mecánica para Ensayo de cortocircuito trifásico**

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE  
23 y 24 de Junio 2022

#### 4. CONTROLADORES DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ITAIPÚ

Las unidades generadoras de Itaipú y sus sistemas de control se encuentran modelados en forma detallada en la Base de Datos para el programa ANATEM. La utilización de modelos de biblioteca para su representación en el programa PSSE resultaron insuficientes para retranscribir con suficiente fidelidad los controladores dinámicos de las máquinas de 50 Hz de Itaipú. De esta forma se desarrolla detalladamente el regulador de velocidad (RVIPU), regulador de tensión (RTIPU), limitador de sobreexcitación (OELIPU), limitador de subexcitación (UELIPU) y estabilizador de sistemas de potencia (PSSIPU) de las unidades generadoras de Itaipú por medio de modelos escritos por usuario en PSSE.

A diferencia de la forma gráfica para el desarrollo de controladores en ANATEM, la realización de un modelo escrito por usuario en PSSE implica en identificar las variables de estado asociadas a las ecuaciones diferenciales y algébricas del diagrama de bloques de cada controlador, crear vectores de constantes y variables de estado para finalmente escribirlo en el lenguaje FORTRAN FLECS [2].

Los controladores dinámicos como los reguladores de velocidad y tensión de Itaipú consisten en decenas de bloques los cuales son analizados de forma aislada y se asocian a sus respectivas ecuaciones diferenciales, como ejemplo se ilustra en la Figura 5 un fragmento de código en lenguaje FORTRAN FLECS del regulador de velocidad desarrollado de Itaipú (RVIPU).

```
C  MODE = 2 - CALCULATE DERIVATIVES
C
  IF (MODE.EQ.2)
    . Pe1=(PELEC (I) /8.236/1)
    . X3=CON (J) /CON (J+1) *Pe1
    . DSTATE (K) =(X3-STATE (K) ) /CON (J+2)
    . DSTATE (K+1) =(STATE (K) -STATE (K+1) ) /CON (J+2)
    . DSTATE (K+2) =(STATE (K+1) -STATE (K+2) ) /CON (J+2)
    . DSTATE (K+3) =(STATE (K+2) -STATE (K+3) ) /CON (J+3)
    . DSTATE (K+4) =(STATE (K+3) -STATE (K+4) ) /CON (J+3)
    . DSTATE (K+5) =(STATE (K+4) -STATE (K+5) ) /CON (J+3)
    . X10=STATE (K+5)
    . X4=CON (J) /CON (J+1) *VAR (L)
    . DPe=X10-X4
    . X15=CON (J+4) *DPe
    . DSTATE (K+6) =(SPEED (I) -STATE (K+6) ) /CON (J+5)
```

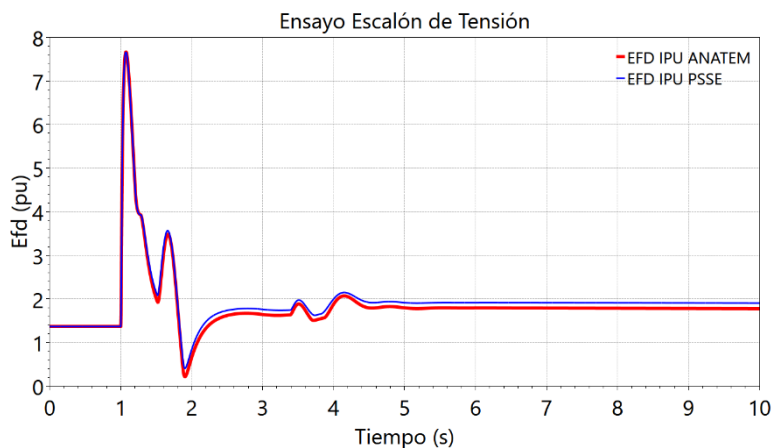
**Figura 5: Fragmento del código en FORTRAN FLECS del modelo del regulador de velocidad de Itaipú**

La validación de los controladores de Itaipú confeccionados en PSSE se realiza a través de simulaciones máquina barra infinita, en las cuales el generador y su transformador elevador se conectan a una barra con carga, que por su vez se conecta a una barra infinita por medio de una línea de transmisión con impedancia de 7,5 %.

**XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE**  
**23 y 24 de Junio 2022**

**4.1 Metodología utilizada para la validación del regulador de tensión y estabilizador de sistemas de potencia de Itaipú**

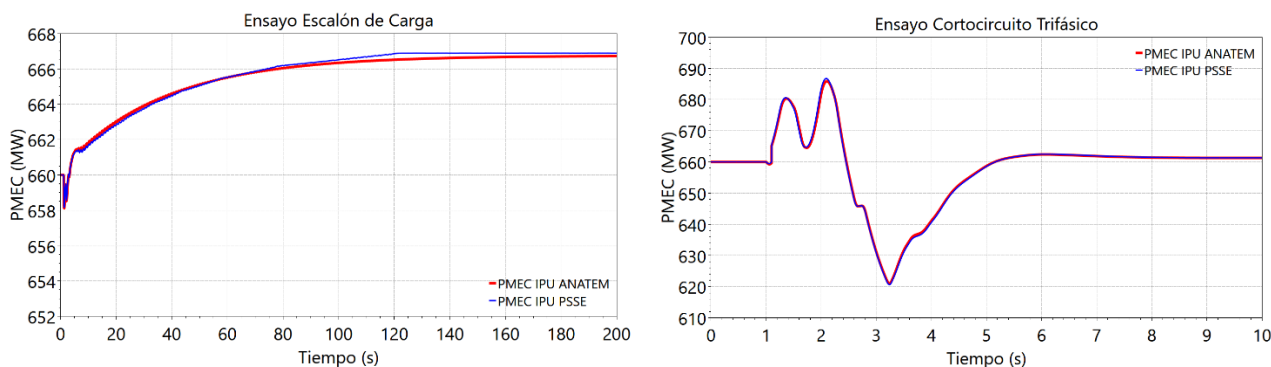
Para la validación de los modelos del RT y PSS se realizan ensayos en los programas PSSE y ANATEM, en los mismos se consideran los modelos dinámicos de los generadores de Itaipú con sus controladores desarrollados y de la barra infinita. El ensayo consiste en la aplicación de un escalón en la referencia de tensión de +10 %. Se observa en la Figura 6 un comportamiento similar de la tensión de campo del modelo desarrollado para el PSSE cuando contrastado con el modelo oficial en ANATEM.



**Figura 6: Tensión de campo para Ensayo de escalón en la referencia de tensión**

**4.2 Metodología utilizada para la validación del regulador de velocidad de Itaipú**

La validación del modelo del RV consiste en la realización de ensayos en los programas PSSE y ANATEM, en los mismos se consideran los modelos dinámicos de los generadores de Itaipú con el modelo desarrollado de RV y de la barra infinita. El primer ensayo consiste en la conexión de una carga de 20 MW en la barra de generación y el segundo consiste en aplicar un cortocircuito trifásico de 100 ms de duración con desaparición espontánea. En la Figura 7 se puede observar un comportamiento semejante de la potencia mecánica del modelo en PSSE al contrastarse con el modelo oficial en ANATEM durante los mencionados ensayos.



**Figura 7: Potencia mecánica para Ensayos de conexión de carga y de cortocircuito trifásico**

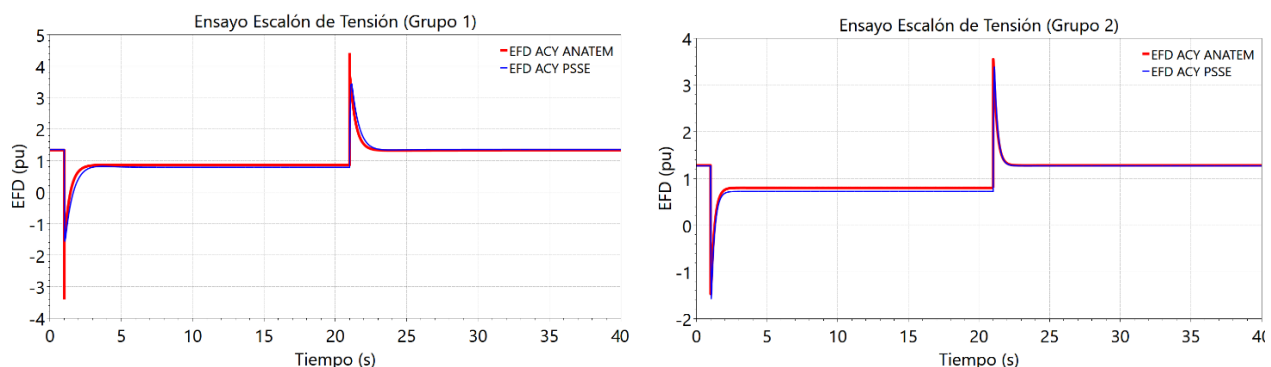
#### XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO – CIGRE 23 y 24 de Junio 2022

### 5. CONTROLADORES DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ACARAY

La Central Hidroeléctrica Acaray posee cuatro unidades generadoras, las primeras dos unidades conforman el Grupo 1 y las dos últimas conforman el Grupo 2, en el cual cada unidad generadora posee su sistema de control modelado en forma detallada en la Base de Datos para el programa ANATEM. En el programa PSSE resultó suficiente considerar modelos iguales de RT y RV para ambos grupos de generadores.

Para la representación de los modelos de regulador de tensión fue utilizado el modelo de biblioteca EXST1 y para el regulador de velocidad fue utilizado el modelo de biblioteca HYG0V, considerando un estatismo de 6%. La validación de los mismos se da por medio de simulaciones máquina barra infinita [3].

Para la validación de los modelos del RT se realizan ensayos en los programas PSSE y ANATEM, en los mismos se consideran los modelos dinámicos de los generadores de Acaray con el modelo de RT y de la barra infinita. El ensayo consiste en la aplicación de un escalón en la referencia de tensión de  $\pm 5\%$ . Se observa en la Figura 8 un comportamiento similar de la tensión de campo del modelo desarrollado para el PSSE cuando contrastado con el modelo oficial en ANATEM para ambos grupos de unidades generadoras.



**Figura 8: Tensión de campo para Ensayo de escalón en la referencia de tensión**

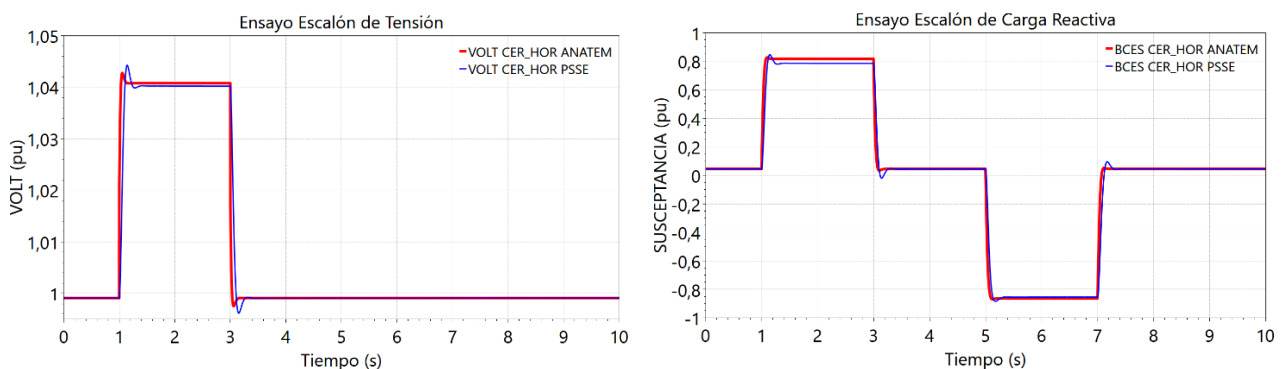
### 6. CONTROLADORES DE COMPENSADORES ESTÁTICOS DE REACTIVOS DEL SINP

Los CER de Limpio, Horqueta y Guarambaré del SINP se encuentran modelados en forma detallada en la Base de Datos para el programa ANATEM, para su implementación en el programa PSSE resultó suficiente adoptar el modelo de biblioteca denominado CSSCST. La validación de los mismos se realiza a través de simulaciones CER Máquina Infinita, en las cuales el CER se conecta a una barra infinita por medio de una línea de transmisión, la impedancia de esta última se corresponde al nivel de cortocircuito del sistema en el punto de conexión del compensador estático analizado.



**XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE**  
**23 y 24 de Junio 2022**

La validación del modelo adoptado CSSCST para los controladores de los CER se realiza por medio de ensayos en los programas PSSE y ANATEM, el primer ensayo consiste en la aplicación de escalones en la referencia de tensión de  $\pm 5\%$ , el segundo en la conexión de una carga reactiva con la finalidad de exigir que el CER recorra todo su rango de operación. En la Figura 9 están ilustrados los resultados de los ensayos de escalón en la referencia de tensión de  $\pm 5\%$  y de la conexión de una carga reactiva de  $\pm 100$  MVAR realizados en el CER de Horqueta.



**Figura 9: Tensión lado 220 kV para un escalón de  $\pm 5\%$  en la referencia de tensión y Susceptancia para un escalón de carga reactiva de  $\pm 100$  MVAR.**

## 7. CONTROLADORES DEL HVDC FURNAS

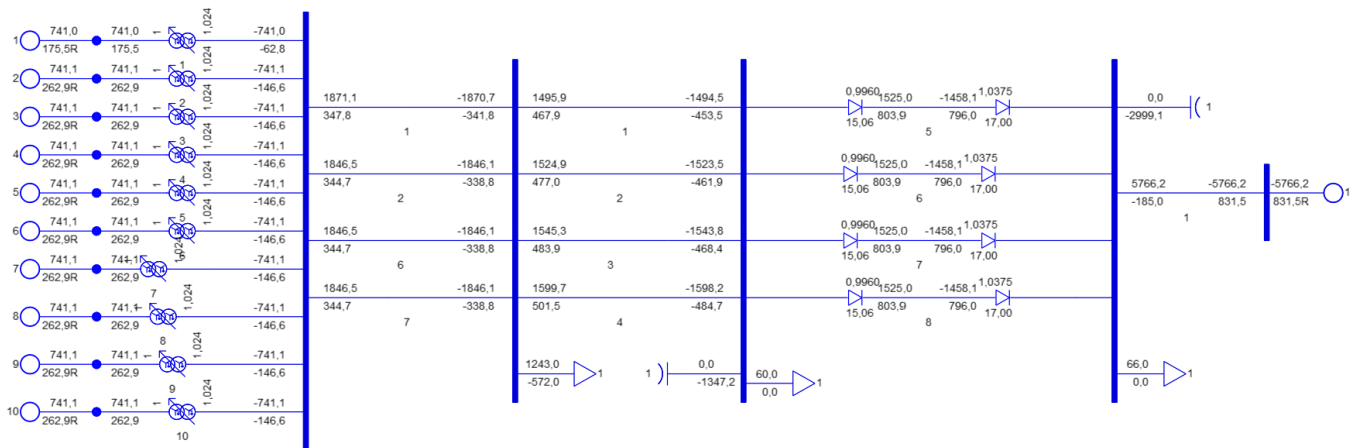
El enlace de corriente continua de FURNAS y su sistema de control se encuentra modelado detalladamente en la Base de Datos para el programa ANATEM. Para su implementación en el programa PSSE fue contratada una empresa especializada, que utiliza la estructura del modelo de biblioteca CDCABT para desarrollar un modelo escrito por usuario denominado CDCAIT [4].

El modelo escrito por usuario CDCAIT se combina con el modelo de biblioteca de señal auxiliar CHAAUT, para representar la función STAB50, esta inyecta una señal de estabilización de frecuencia al HVDC. Para la regulación de la referencia de potencia en forma de rampa, emulando la función STOL del HVDC, se debe recurrir al comando RUNBKT [5].

La validación de los controladores en PSSE realiza a través de simulaciones máquina-HVDC-barra infinita, las mismas consisten en la Central Itaipú alimentando al HVDC en su extremo rectificador y en una barra infinita en el extremo inversor como representado en la Figura 10. En las simulaciones dinámicas se consideran los modelos dinámicos de los controladores de Itaipú y del HVDC.



**XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE  
23 y 24 de Junio 2022**



**Figura 10: Diagrama unifilar para validación HVDC FURNAS**

En la Figura 11 es ilustrada la interfaz gráfica para ingreso de datos estáticos de una línea HVDC en el PSSE, en este caso se pueden observar los parámetros estáticos correspondientes al Polo N° 1 del HVDC de Furnas. Estos datos son idénticos a los existentes en la Base de Datos del programa ANAREDE/ANATEM.

Two Terminal DC Line Data Record

**Power Flow**

Line Data  
Line Name:

Metered on Rectifier end     Blocked by Solution

Control Mode	Vschedule (kV)	Rcomp-Ohm (ohms)	Vmode (kV)	CCC Itmax
Power	600.0	10.470	558.0	100
Setval (MW)	Rdc-Ohm (ohms)	Delti (pu)	Dcmin (kV)	CCC Accel
1525.0	10.470	0.1000	0,0	1,0

**Rectifier Data**

Bus Number	Bus Name	Measuring Bus	CCC X (ohms)
85	FOZ-500-50HZ500.00	0	0,00000
Primary Base Voltage	Bridges in Series	Trans Ratio (pu)	AC Tx From Bus
500.0	4	0,2546	0
Max Firing Angle (deg)	Commutating R	Tap Setting (pu)	Max Tap Setting (pu)
17,500	0,000	0,99600	1,25000
Min Firing Angle (deg)	Commutating X	Tap Step (pu)	Min Tap Setting (pu)
12,500	6,134	0,01250	0,92500

**Inverter Data**

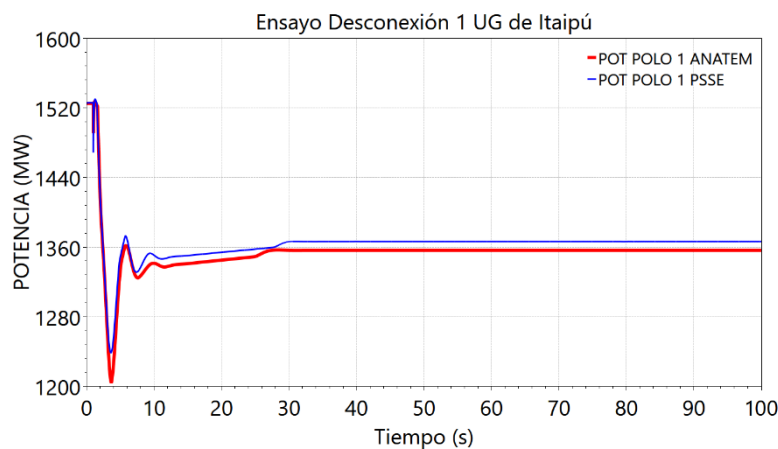
Bus Number	Bus Name	Measuring Bus	CCC X (ohms)
86	IBIUNA--345345.00	0	0,00000
Primary Base Voltage	Bridges in Series	Trans Ratio (pu)	AC Tx From Bus
345,0	4	0,3536	0
Max Firing Angle (deg)	Commutating R	Tap Setting (pu)	Max Tap Setting (pu)
17,000	0,000	1,03750	1,30500
Min Firing Angle (deg)	Commutating X	Tap Step (pu)	Min Tap Setting (pu)
17,000	5,689	0,01250	0,96600

**Figura 11: Interfaz gráfica en PSSE de los parámetros estáticos del Polo N°1 del HVDC FURNAS**

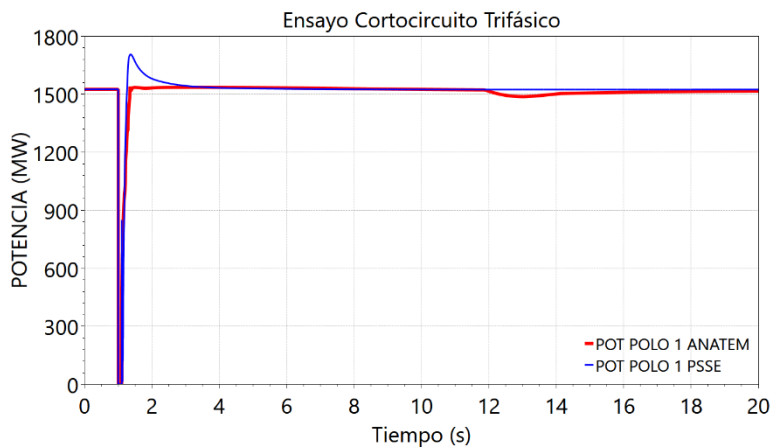
**XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE**  
**23 y 24 de Junio 2022**

7.1 Metodología utilizada para la validación de los controladores del HVDC de FURNAS

Para la validación de controladores del HVDC de FURNAS se realizan ensayos en los programas PSSE y ANATEM, en los mismos se consideran los modelos dinámicos de los generadores de Itaipú con sus controladores y de la barra infinita, además del HVDC y sus sistemas de control. El primer ensayo consiste en la desconexión de una unidad generadora de Itaipú y el segundo consiste en la aplicación un cortocircuito trifásico de 100 ms de duración con desaparimiento espontaneo en el lado rectificador del HVDC. En la Figura 12 y Figura 13 se puede observar un comportamiento similar de la potencia suministrada por el Polo N° 1 del modelo empleado en PSSE al contrastarse con el modelo oficial en ANATEM durante los mencionados ensayos.



**Figura 12: Potencia Polo N° 1 del HVDC durante el ensayo de desconexión de una unidad generadora de Itaipú**



**Figura 13: Potencia Polo N° 1 del HVDC durante el ensayo de cortocircuito trifásico**

La representación en PSSE del modelo del HVDC FURNAS mediante el modelo de usuario CDCAIT y modelos auxiliares de biblioteca arrojan resultados de simulación en banco de pruebas suficientemente similares a los eventos simulados en ANATEM.

**XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE**  
**23 y 24 de Junio 2022**

---

## 8. CONCLUSIÓN

Los recursos computacionales del programa ANATEM con su herramienta gráfica CDUEdit y del programa PSSE mediante la escritura de modelos de usuario en lenguaje FORTRAN FLECS han permitido el desarrollo de modelos de controladores para las Centrales Hidroeléctricas Yacyretá, Itaipú y Acaray, el HVDC de FURNAS, así como de los CER de Limpio, Guarambaré y Horqueta. De manera a compatibilizar las bases de datos dinámicas existentes en los programas PSSE y ANATEM para ser utilizados en los estudios de la Interconexión 500 kV de las Centrales Yacyretá e Itaipú.

Fueron realizadas simulaciones, con la intención de validar los modelos desarrollados, de las cuales fueron seleccionados los resultados que exigían a los equipos variar su punto de operación ampliamente. Las simulaciones fueron realizadas en circuitos de pruebas mediante la utilización de los programas PSSE y ANATEM.

Los resultados de las simulaciones de los controladores en ambos programas fueron comparados y analizados detalladamente. Los resultados obtenidos de las mismas han demostrado ser consistentes, estables y robustos, por lo cual los modelos implementados son satisfactorios y servirán para que la realización de estudios eléctricos precisos de la Interconexión 500 kV de los sistemas paraguayo, argentino y brasilero.

Estos modelos homologados posteriormente fueron utilizados para los Estudios de Estabilidad de la Interconexión de los sistemas paraguayo, argentino y brasilero.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] “*Análise de Transitórios Eletromecânicos 11.10.00, Manual do Usuário*”, 11.10.00, CEPTEL, 2020.
- [2] “*Program Application Guide: Volume II*”, PSSE v34.2, SIEMENS, 2017.
- [3] “*Model Library*”, PSSE v34.4, SIEMENS, 2018.
- [4] “*Informe A-Alt: Armado y verificación de la base de datos estática y dinámica de los sistemas interconectados SINP-SADI*”, TRANSENER, 2021.
- [5] “*Informe B-Alt: Estudio de flujo de carga y análisis de contingencias estático y dinámico en red completa N*”, TRANSENER, 2021.