

**Comité de Estudio C4 - Desempeño Técnico del Sistema**

**MODELO A GRAN ESCALA DEL SADI PARA FENOMENOS TRANSITORIOS  
RAPIDOS Y LENTOS**

**L. D. BELLOMO\***  
**Tranelsa S.A.**  
**Univ. Tecnológica Nacional**  
**Argentina**

**A. ALBANESE**  
**Univ. Tecnológica Nacional**  
**Argentina**

**H.O. PASCUAL**  
**Univ. Tecnológica Nacional**  
**Argentina**

***Resumen** – Con el incremento de la velocidad de cómputo es posible incrementar el rango de frecuencias incluidas en una simulación. Esto redundará en una mejora del modelado, lo cual tiene una consecuencia directa sobre la precisión de los resultados.*

*Consideremos la red del SADI modelada trifásicamente, teniendo en cuenta desbalances y alinealidades del equipamiento, y dotémoslo de los sistemas de control y protección y de los modelos dinámicos de máquinas. Un modelo así concebido sería una herramienta única, capaz de incrementar el nivel de detalle en estudios en donde hoy se utilizan dos herramientas diferentes, una para transitorios electromecánicos y otra para electromagnéticos.*

*Esta publicación presenta la realización y desafíos de una red a gran escala del SADI en una aplicación tipo EMTP basada en la actual base de datos desarrollada por CAMMESA para el programa PSS/E [1].*

**Palabras clave:** Estabilidad – TEM – PSS/E – EMTP – SADI

## **1 INTRODUCCIÓN**

Con el incremento de la velocidad de cómputo es posible incrementar el rango de frecuencias incluidas en una simulación. Esto redundará en una mejora del modelado, lo cual tiene una consecuencia directa sobre la precisión de los resultados.

Consideremos la red del SADI modelada trifásicamente, teniendo en cuenta desbalances y alinealidades del equipamiento, y dotémoslo de los sistemas de control y protección y de los modelos dinámicos de máquinas. Un modelo así concebido sería una herramienta única, capaz de incrementar el nivel de detalle en estudios en donde hoy se utilizan dos herramientas diferentes, una para transitorios electromecánicos y otra para electromagnéticos. Este único modelo permitiría la realización de estudios tales como:

- Estudios de estabilidad de fenómenos transitorios electromecánicos,
- Estudios de coordinación de aislamiento,
- Formación de islas eléctricas,
- Estudios de extinción del arco secundario,
- Estudios de coordinación de protecciones,
- Modelado detallado de dispositivos de electrónica de potencia,
- Análisis armónico para instalaciones industriales, etc.

La creación de una red en gran escala del Sistema Argentino de Interconexión (SADI) con la posibilidad de simular flujos de carga, estabilidad transitoria y transitorios electromagnéticos (TEM) en un único ambiente de simulación tiene varias ventajas:

---

\* lbellomo@frlp.utn.edu.ar

- Proveer un único y validado conjunto de datos de la red,
- Realizar una mayor variedad de estudios con la misma herramienta,
- Realizar diferentes tipos de análisis en diferentes puntos de la red, sin necesidad de desarrollar redes equivalentes.

El tiempo de cómputo total, asociado a la simulación de una red a gran escala, es la barrera al grado de detalle utilizado. La determinación de este límite será uno de los aspectos a desarrollar en este trabajo. Esta publicación presenta la realización, desafíos y validación con PSS/E [1], de una red a gran escala del SADI en una aplicación tipo EMTP.

## **2. ENTRADA DE DATOS DE LA RED**

CAMMESA desde su formación en 1992 hasta la actualidad viene desarrollando, manteniendo y actualizando una base de datos del SADI en formato PSS/E destinada a estudios estáticos y dinámicos. Esta base de datos es la principal fuente de información para nuestro desarrollo.

El software utilizado en esta publicación es el programa EMTP-RV y su interface grafica EMTPWorks [2]. La elección de este software para la representación del SADI está fundada en experiencias previas del autor en el ensamblado y simulación de redes representadas a gran escala. Ejemplo de ellos fue el modelado de los parques eólicos Canadienses Gros Morne y Mont Louis con motivos de reproducir eventos de fallas internas.

### **2.1 Construyendo la red, consideraciones sobre la interface grafica:**

La entrada de datos y el mantenimiento de la red se realizan accediendo al nivel más alto de la interface grafica. Estas operaciones constituyen el primer paso en la construcción de la red y es allí mismo donde se consume la mayor parte del tiempo de montaje.

Permitiendo el EMTP RV una representación polifásica de la red, el esquema eléctrico no sigue esta lógica. En esta punto es necesario dibujar el esquema utilizando el enfoque de diagrama unifilar y conectarlo por separado las fases. Para ello, el usuario debe introducir solamente los datos y la conectividad del equipamiento que ingresa. De esta manera, el enfoque en este trabajo evita el uso de entradas de tipo archivo ASCII y maximiza el uso de interfaz gráfica y la visualización.

En el desarrollo del esquema eléctrico utilizando la interface grafica existen cuatro métodos de diseño que serán tenidos en cuenta. Estos son la jerarquía, las capas, el scripting y los atributos de dispositivos. A continuación se dan detalles de cada uno.

### **3.2 Jerarquía:**

El diseño jerárquico implica diseñar con subredes. Este concepto se ilustra en la Fig. 1. El nivel superior de diseño de la red contiene a las subredes numeradas de 0 a 5. Las subredes 0 y 5 se encuentran en el segundo nivel jerárquico y subredes 1 a 4 están contenidas en el tercer nivel. Este concepto de diseño también está relacionado con el desarrollo orientado a objetos, su ocultamiento y encapsulación.

En respecto al grado de detalles de los componentes, estos deben ser minimizados en el nivel jerárquico mas elevado y moverse hacia las subredes.

En el diagrama de la Fig. 2 aparece el nivel superior de un dispositivo que represente un compensador estático, construido con varios niveles de subred conteniendo en su interior circuitos internos y controles, pero aparece como un pequeño símbolo, el cual posee una máscara para el establecimiento de parámetros de ajuste. El mismo enfoque se muestra en la en la Fig. 2 para la representación de una central. El bloque que representa el regulador de tensión contiene varios subcircuitos encapsulados.

Algunas subredes pueden utilizarse muchas veces en diferentes subcircuitos, al producirse una modificación en la subred un mecanismo de actualización está habilitado para realizar los cambios en todos los subcircuitos en que la misma subred está contenida.

Este mecanismo orientado a objetos se llama definición de tipo único. Si dos subcircuitos son del mismo tipo, entonces cualquier cambio (de datos o circuito) en uno de los subcircuitos se refleja automáticamente en todos los demás subcircuitos. Así, un solo cambio en una definición de tipo se propaga automáticamente a todas las instancias del mismo tipo.

En la Fig. 1 la subred 2 se utiliza en dos lugares diferentes, pero mantiene la misma definición de tipo. Una definición de tipo única puede mantenerse para los contenidos, pero variar los datos contenido en la máscara del dispositivo.

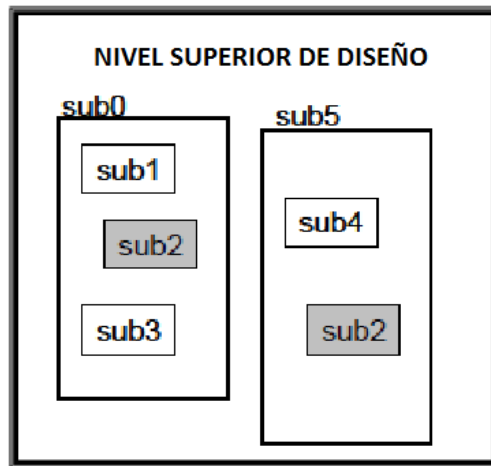


Fig. 1: Diseño jerárquico de la red

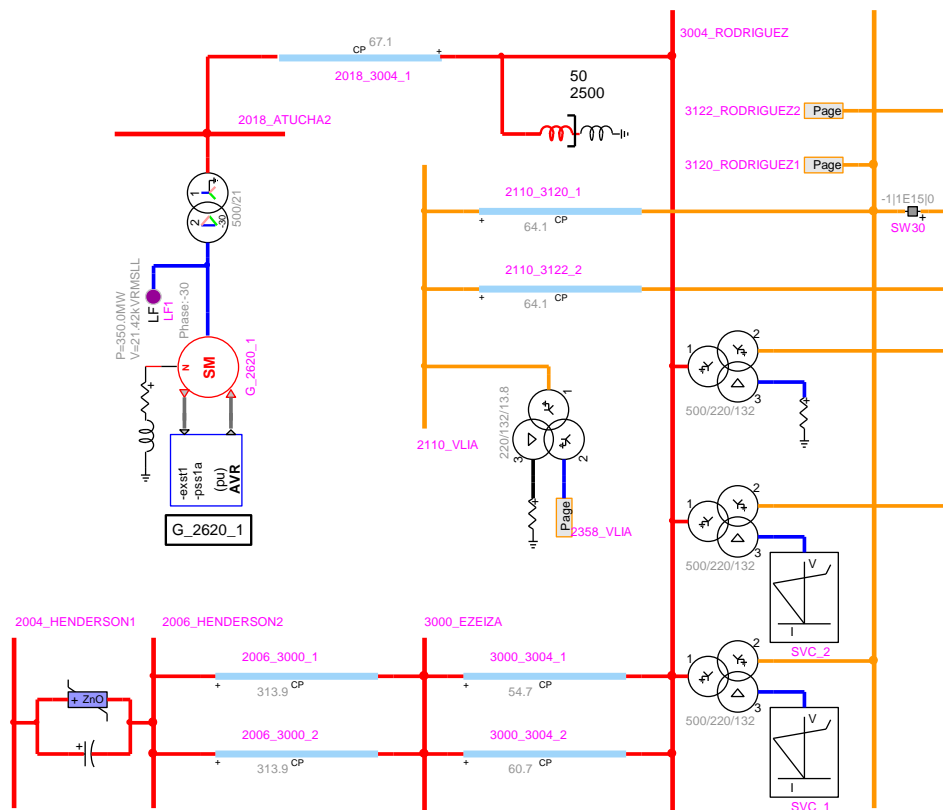


Fig. 2: Modelado de la red del SADI.

En la Fig. 2 se presenta un muestra del aspecto general que tendrá la red del SADI. Se visualiza una porción del SADI localizada en las cercanías de la ET Rodriguez, esta porción muestra los símbolos adoptada para representar la compensación serie, el descargador de sobretensiones, el reactor de línea, la compensación estática, el interruptor, los transformadores de dos y tres arrollamiento, la generación y las líneas de 500 y 220 kV. Además, se incluye las vinculaciones entre la página del sistema de 500 kV con las páginas que contienen los regionales de BA y GBA.

### 3.3 Capas:

Dado que el objetivo final es desarrollar una red de referencia para los distintos tipos de estudio, se ha encontrado que las capas que proporciona para el diseño de la red la interfaz gráfica brindan una rápida solución para el desarrollo de estudios con distintos niveles de precisión. Esto se logra aprovechando la capa que poseen los dispositivos que les permite ser excluidos o incluidos en el diseño con solo un comando de selección de capa. Por ejemplo, si el objetivo es llevar a cabo una simulación de estabilidad transitoria consumiendo menor tiempo de CPU sería entonces excluir todos los dispositivos no lineales, tales como descargadores de sobretensión y ramas de magnetización de transformadores.

Las capas están disponibles en todos los niveles jerárquicos del diseño. En la Fig. 2 los dispositivos de flujo de carga (LF) están activos en la capa de solución de flujo de carga, pero transmiten datos a las máquinas síncronas adyacentes para la solución de estado estacionario correspondiente, antes de la inicialización de la simulación en el dominio del tiempo.

### **3.4 Scripting y atributos:**

El uso de una interface grafica con solo las funciones de mouse no es una solución viable para el mantenimiento e ingreso de datos para la construcción de una red a gran escala. Operaciones tales como la introducción de datos, realizar cambios de datos en una gran cantidad de dispositivos y la búsqueda de dispositivos puede ser realizadas eficientemente a través del scripting. En EMTPWorks el lenguaje de scripting es el JavaScript.

El scripting permite atrapar un objeto del circuito principal y acceder a todos los atributos del dispositivo. Cada dispositivo es un objeto con atributos y métodos. Los atributos contienen los datos eléctricos, datos del dibujo del símbolo del dispositivo y los datos de su posición.

De esta manera, el scripting se utiliza, por ejemplo, para ingresar datos o corregir datos en cientos de líneas de transmisión sin tocar manualmente las líneas sobre la interfaz gráfica.

Finalmente diremos que el scripting es esencial para la creación y mantenimiento de redes de gran tamaño, la navegación a través de la red y la localización de dispositivos.

## **4. LA RED**

### **4.1 La primera red:**

La primera red, denominado en lo sucesivo Red Detallada, constituye una referencia para la obtención de los equivalentes de la red para diversos fines de estudio. Es también el entorno unificado discutido previamente para el mantenimiento y la extracción de datos para diversas aplicaciones. La primera capa de datos está relacionada con las restricciones (LF) de la solución de flujo de carga. El motor de cálculo utiliza una transición automática a partir de una solución de flujo de carga trifásico a las soluciones de estado estacionario y en el dominio del tiempo.

El modelo de equivalente de estado estacionario de cada dispositivo se utiliza para inicializar la simulación en el dominio del tiempo en  $t=0$ .

De esta manera, cada dispositivo de flujo de carga está asociado con un modelo equivalente de estado estacionario. Esta asociación entre la maquina sincrónica G\_2620\_1 y la restricción LF1, se muestra en la Fig. 2. El dispositivo de flujo de carga proporciona todos los fasores necesarios para la inicialización del modelo de estado estacionario del generador.

La red completa del SADI está organizada en 9 páginas. La primera página contiene el sistema de 500 kV y las restantes contienen los regionales en que está dividido el SADI. La red desarrollada contiene en esta versión los niveles entre 500kV y 132kV.

El listado de los dispositivos principales de nivel superior es:

- 1147 líneas de transmisión,
- 303 transformadores trifásicos con distintos tipos de conexión,
- 545 Cargas representadas,
- 2 Compensadores estáticos,
- 11 Capacitores serie
- 11 Descargadores para la protección de capacitores serie

- 303 inductancias no lineales para el modelado de la de saturación de transformadores.
- 227 máquinas síncronas (SM) con controles asociados.
- 62 Reactores de línea y de neutro para la compensación de LEAT

Las líneas de transmisión se modelan mediante el modelo de parámetro constante (CP), que tiene en cuenta el retardo de tiempo de propagación. En caso de realizar estudios en donde se involucren fenómenos con un elevado contenido frecuencial es posible seleccionar un modelo de línea dependiente de la frecuencia.

## **4. CONTROLES DE LAS MAQUINAS SINCRONICAS E INICIALIZACION**

### **4.1 Controles de las maquinas sincrónicas:**

La incorporación de todos los controles de las maquinas sincrónicas del SADI es la mayor desafío que se nos presenta. Tras 22 años de trabajo continuo sobre la base dinámica del SADI, CAMMESA ha introducido una gran variedad de sistemas de excitación, señales estabilizantes y gobernadores de velocidad para maquinas sincrónicas. En la actual etapa de desarrollo del proyecto se disponen de un reducido grupo de reguladores.

Los excitadores son:

- EXST1,
- IEEET5,
- SEX,
- IEEEX1.

Los modelos estabilizadoras son:

- PSS1A,
- PSS2A.

Estos dispositivos se organizan de nuevo en bloques jerárquicos con un bloque de nivel superior que proporciona una máscara para la modificación de los parámetros del regulador. Dado que los datos dinámicos de la red completa del SADI está disponible en un archivo PSS/E, el esfuerzo de traducción a través del uso de la interfaz gráfica sería significativo. La solución a este problema se encontró escribiendo scripts de traducción, capaces de tomar los datos dinámicos de PSS/E y enviarlos directamente a la máscara de entrada de datos del regulador.

### **4.2 Inicialización:**

La inicialización de la red es un factor clave para la solución de redes de gran tamaño en el dominio del tiempo. Con el tamaño de las redes estudiadas, el gran número de máquinas sincrónicas y funciones de control, la red debe inicializarse tan cerca como sea posible a sus condiciones de estado estable de operación. La manera de resolver este problema es encontrar una solución de flujo de carga trifásico y que precede a los cálculos en el dominio del tiempo. Este proceso emplea tres pasos, los cuales se muestran aplicados al caso de las maquinas sincrónicas:

1. La solución de flujo de carga calcula los fasores de la tensión en bornes de cada máquina síncrona,
2. La solución de estado estacionario con su modelo interno de la máquina permite inicializar todas las variables mecánicas y eléctricas a partir del conocimiento de los fasores de tensión en bornes de la maquina,
3. La señal de tensión de campo de estado estacionario (Efd\_ic) se vuelve disponible y con ello se pueden inicializar todas las variables del diagrama de control de la maquina, mostradas en la Fig. 3

## **5. CORTO CIRCUITO**

Las corrientes de falla calculadas utilizando el EMTP muestran fenómenos eléctricos no contemplados por el programa PSS/E, el cual basa su cálculo en el valor de la reactancia subtransitoria,  $X''d$ .

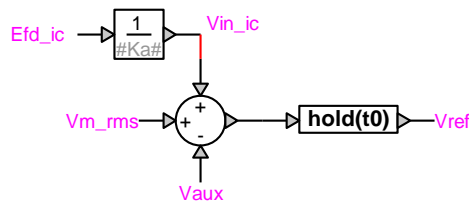
El EMTP considera la presencia de,

- la componente asimétrica de la corriente de falla de 50 Hz.
- frecuencias en el rango de las subsíncronas (25 a 30 Hz), especialmente cuando la falla ocurre en cercanías a uno de los bancos de capacitores de la red de alta tensión con compensación serie.
- cambio en la reactancia de la maquina síncrona, desde  $X''_d$  hacia  $X'_d$ . Este efecto se acentúa cuando la falla ocurre en cercanías a una central.

Por los motivos expuestos una comparación de corrientes de falla entre ambos programas debería basarse en la amplitud promedio de la corriente fundamental capturada entre 20 y 80 mseg. después de la falla.

La Fig. 4 muestra la evolución de corriente de falla trifásica en la ET Mercedes 500 kV y la comparación entre su valor promedio de 5.74 kA con el valor de referencia de 5.77 kA obtenido con el PSS/E.

### inicializacion



### dinamico

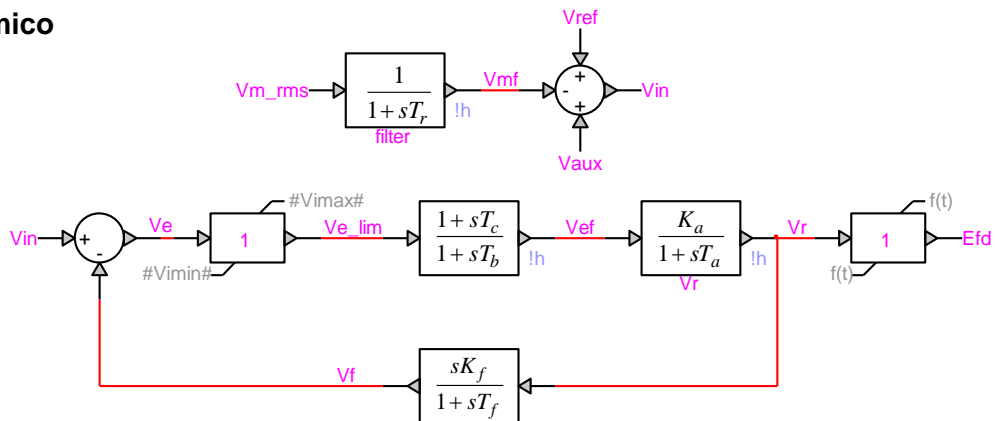


Fig. 3: Diagrama del sistema de excitación EXST1

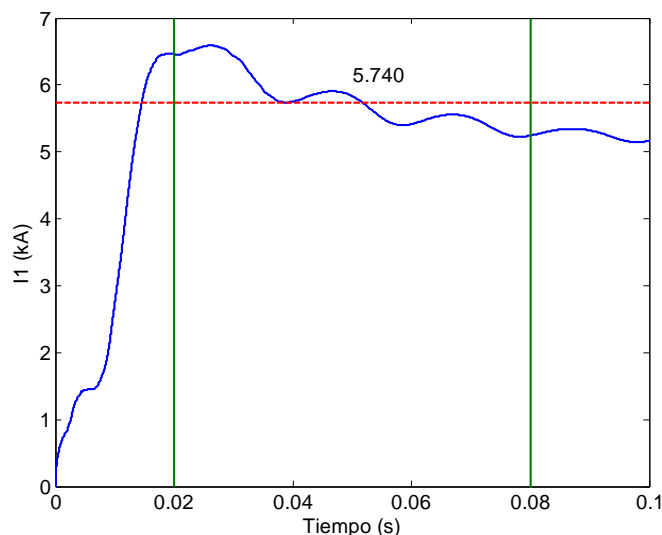


Fig. 4: Corriente de secuencia directa de cortocircito trifásico en Mercedes 500 kV.  $I_{cc\_3ph\_emtp}=5.740$  kA;  $I_{cc\_3ph\_psse}=5.771$  kA.

## 6. ESTABILIDAD TRANSITORIA

Para reproducir correctamente el comportamiento dinámico de una red de gran tamaño es necesario modelar todas las centrales con sus generadores y reguladores. Seleccionar una perturbación que produzca un impacto importante en la regulación de tensión y comparar las frecuencias de oscilación y amortiguamiento electromecánico.

Este test proporcionaría una importante validación para la nueva red. Avanzando hacia ese objetivo se continúa incorporando reguladores al modelo de red detallado de red del SADI.

## 7. TIEMPO DE CPU

Los tiempos de CPU que se presentan en la Tabla 3 se basan en un procesador para laptop Dual Core T7200 del ordenador portátil de doble núcleo (2 GHz) con 4 GB de RAM.

Tabla 3: Tiempo de CPU para flujo de carga

Tiempo de CPU	
Carga de archivos GUI	0.5616
Generación de datos	0.0156
Solución de flujo de carga	20.545 s (6 Iteraciones)
Total	22.947 s

El tiempo de *carga de archivos GUI* representa el tiempo necesario para abrir el archivo de diseño de la interfaz gráfica y mostrar la red simulada con todos sus datos. El tiempo de *generación de datos* es el tiempo requerido para generar los datos de la interfaz gráfica de usuario para el motor matemático. La *solución de flujo de carga* se lleva a cabo de forma independiente y se inicia directamente con el ingreso de las restricciones y el caso en blanco.

En el caso de estabilidad transitorio el objetivo final será conocer cuáles son los tiempos de CPU para un tiempo de simulación de 10 s considerando distintos pasos de cálculo en la simulación.

La simulación de estabilidad transitoria tiene asociada una baja frecuencia propia de las oscilaciones electromecánicas. En este contexto un gran paso de integración, entre  $100\mu s$  y  $200\mu s$ , resultara adecuado. Para la simulación de fenómenos relacionados con frecuencias más elevadas, un paso de integración menor puede ser usado.

Duplicar el paso de integración no necesariamente divide a la mitad los tiempos de simulación. Esto es debido a cambios en las propiedades de convergencia. El aumento del paso de tiempo también requiere la

sustitución de algunos modelos de la línea de parámetros constante por los modelos de sección pi más simples.

## **8. CONCLUSION**

Se ha demostrado que con la selección apropiada de métodos cálculo y de visualización, es factible montar, simular y mantener redes a gran escala en un programa de tipo EMTP.

Una versión a gran escala de la red del SADI se ha montado y simulado.

## **9. REFERENCIAS**

[1] <http://www.pti-us.com/>

[2] J. Mahseredjian and C. Dewhurst: "EMTPWorks, Graphical User Interface of EMTP-RV", 2005, V2.0.2