



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Facultad de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Título Profesional mediante Tesis

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Electricista

Tema

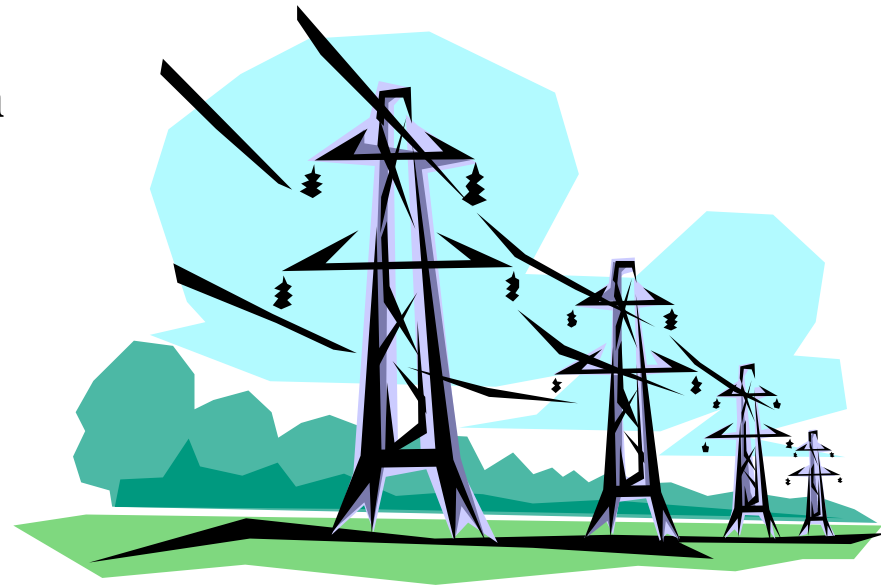
**Análisis de la Estabilidad Transitoria Electromecánica
mediante el Método de la Función de Energía Transitoria –
Aplicación al Sistema Interconectado Nacional Peruano**

Presentado por

Manfred Fritz Bedriñana Aronés

- Tópicos -

1. Introducción.
2. Estabilidad Transitoria de Sistemas de Potencia.
3. Método Directo basado en la Función de Energía.
4. Implementación y Resultados.
5. Conclusiones.



1. Introducción

1.1 Antecedentes

- ❖ El ingeniero de planeamiento necesita estudiar la estabilidad del sistema para un conjunto de disturbios seleccionados desde el peor, tal como la falla trifásica a tierra (cuya probabilidad de ocurrencia es pequeña), hasta las fallas monofásicas (las cuales constituyen cerca del 70% de los disturbios).
 - ✓ Existen actualmente una buena producción de programas profesionales, los cuales simulan el comportamiento del sistema en el tiempo frente a tales disturbios.
 - ✓ Hay literalmente miles de variables que pueden ser monitoreados inclusive en grandes sistemas.
- ❖ El ingeniero de planeamiento requiere ver si la falla fue eliminada apropiadamente verificando que el sistema no pierda el sincronismo.
 - ✓ Un sistema permanece en sincronismo para un cierta falla si las variables del sistema permanecen a valores de estado estacionario cuando $t \rightarrow \infty$.
- ❖ Estos estudios de simulación son llamados estudios de estabilidad transitoria.
 - ✓ Un típico estudio de estabilidad transitoria con modelo detallado puede llevar hasta una hora para un sistema de 500 barras y 100 generadores.
 - ✓ De aquí que el ingeniero de planeamiento se limita a evaluar pocos escenarios de ocurrencias de fallas.

1.1 Antecedentes

- ❖ En la operación actual, el sistema afronta condiciones y parámetros que pueden ser muy diferentes a los asumidos en la etapa de planeamiento.
 - ✓ Para garantizar la seguridad del sistema de potencia frente a posibles condiciones anormales (contingencias), el operador debe simular las contingencias por adelantado, evaluar los resultados, y tomar alguna acción de control necesaria.
 - ✓ Este proceso es llamado de “Evaluación de la Seguridad Dinámica (ESD)”
 - ✓ Una técnica similar existe alrededor de la evaluación de seguridad estática, los centros de control modernos tienen software llevando en cuenta estas funciones.
- ❖ Muy poco progreso ha sido hecho en la ESD y el control preventivo.
 - ✓ La razón es simplemente porque para conducir una simulación transitoria en el tiempo, para contingencia simple, este análisis compromete mucho tiempo de procesamiento.
 - ✓ Incluso considerando generadores con modelos simplificados, el operador tiene que observar detenidamente los diagramas generados para el ángulo del rotor y la velocidad de diversas máquinas para tomar una decisión acerca de la estabilidad del sistema.
- ❖ En la búsqueda de metodologías alternativas a los métodos de simulación en el dominio del tiempo fueron propuestos diversos métodos como los directos e híbridos.
 - ✓ Dentro de ellos, los métodos directos basados en las funciones de Lyapunov, o funciones de energía transitoria, son las que vienen ofreciendo las mejores soluciones en el análisis de estabilidad transitoria de sistemas de potencia reales.

1.1 Antecedentes

- ❖ Los métodos directos se caracterizan por tomar un camino directo de decisión de estabilidad/inestabilidad por medio de la computación de un número simple tal como un índice de estabilidad transitoria (IET).
 - ✓ El IET puede indicar cualitativamente si el sistema es estable o no y, si es estable, medir cuantitativamente el margen de estabilidad.
 - ✓ En el método directo basado en las funciones de energía, comúnmente el IET es definido como la energía crítica del sistema.
- ❖ De acuerdo con el estado del arte, las funciones de energía transitoria presentan diversas ventajas de orden práctico en la determinación del IET para el análisis eficiente y directo de la estabilidad transitoria de sistemas de potencia.
 - ✓ Este método directo (basado en funciones de energía transitoria) posee actualmente fundamentos teóricos bien sustentados, pero algunos aspectos todavía están en discusión.
 - ✓ Del lado de aplicación han sido hechos extensivas pruebas en el método de Athay con modificaciones por Fouad sobre sistemas reales de grande porte.
 - ✓ Por lo tanto, uno puede argumentar que el método, después de cuatro décadas de investigación, permanece como una promesa para la ESD.

1.1 Antecedentes

- ❖ Dentro de las técnicas actuales relacionadas con el método directo basado en funciones de energía transitoria tenemos:
 - ✓ Método de la Superficie Frontera de Energía Potencial (PEBS: *Potential Energy Boundary Surface*) propuesto por Kakimoto.
 - ✓ Método del UEP de Control. Aquí existen tres principales variantes: El primer método propuesto fue propuesto por Athay, se caracteriza por calcular los UEP asociados a la falla, computacionalmente es inviable en sistemas reales. El segundo método es llamado BCU (*Boundary of stability region based Controlling UEP*) fue propuesto por Chiang, actualmente viene siendo discutido y se tiene demostrado que aun presenta ciertas incongruencias. El tercero es llamado método de sombreamiento (*shadowing*), presenta resultados aceptables con respecto al BCU.

1.2 Objetivos

- ❖ Se presenta y desarrolla una metodología de análisis de la estabilidad transitoria del SEIN (Sistema Eléctrico Interconectado Nacional) mediante el método directo basado en la función de energía transitoria. Se utilizan los conceptos mas recientes involucrados con este método.
- ❖ El análisis de estabilidad transitoria lleva en cuenta las condiciones más desfavorables, por ese motivo se uso fallas trifásicas como perturbaciones.
- ❖ La metodología incluye técnicas actuales de modelamiento computacional eficiente de sistemas eléctricos de potencia basado en el manejo de matrices dispersas de gran dimensión y se implemento una plataforma computacional integrada.

2. Estabilidad Transitoria de Sistemas de Potencia

2.1 Definición Estabilidad de Sistemas de Potencia

- Definición clásica:

- ❖ *Es el término aplicado a sistemas de potencia de corriente eléctrica alternada, denotando una condición en la cual varias maquinas síncronas del sistema permanecen en “sincronismo” o “en paso” con las otras.*

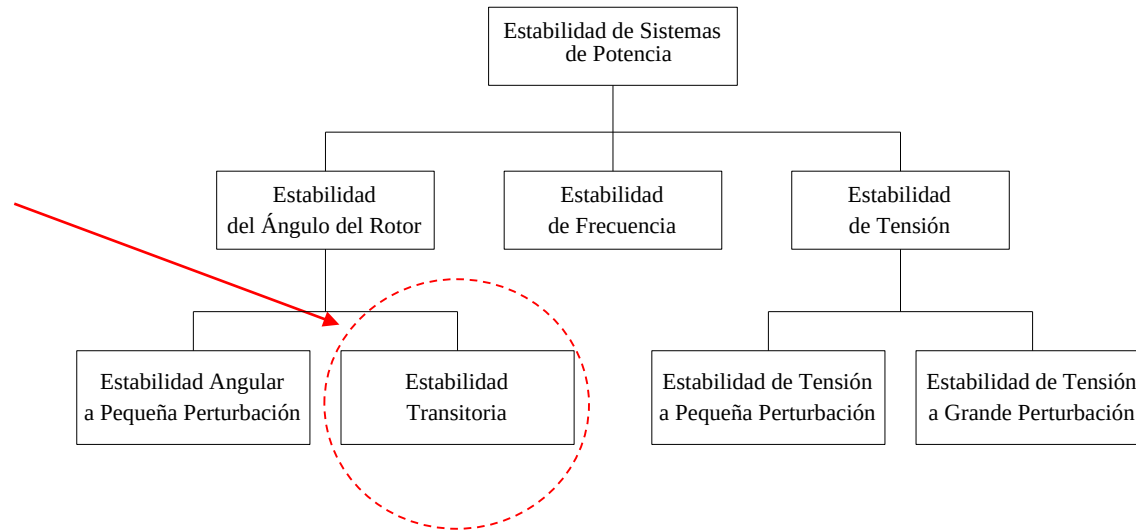
- ✓ [15] E. W. Kimbark, **Power System Stability, Vol.I: Elements of Stability Calculations**, John Wiley and Sons Inc., 1948.

- Definición actual:

- ❖ *Es la habilidad del sistema eléctrico para una dada condición de operación inicial, retornar al estado de operación de equilibrio después de ser sometido a una perturbación física, con la mayoría de las variables del sistema limitadas, siendo así, el sistema entero permanece prácticamente intacto.*

- ✓ [14] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, Goran Andersson, A. Bose, C. Cañizares, Nikos Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, Thierry Van Cutsem, V. Vittal, **“Definition and classification of power system stability”**, IEEE Trans. on Power Systems, Volume 19, page 1387-1401 – 2004.

2.2 Tipos de Estabilidad en Sistemas de Potencia



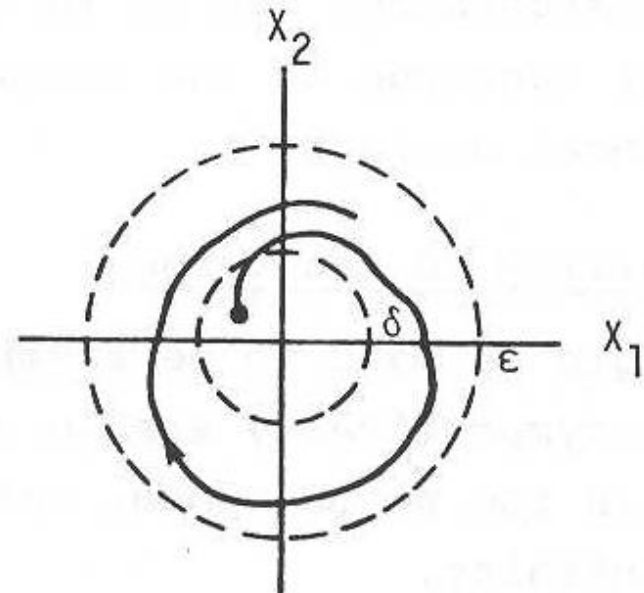
- El fenómeno de estabilidad angular esta relacionado con las oscilaciones de potencia activa/ángulo del rotor debido al desequilibrio entre el torque electromagnético y torque electromecánico en cada máquina síncrona.
- En cambio el fenómeno de estabilidad de tensión se relaciona con las variaciones de potencia reactiva/tensión debido al desequilibrio entre la demanda de la carga y el suministro de potencia de parte del sistema.

2.3 Estabilidad Angular de Sistemas de Potencia

- ❖ La pérdida del sincronismo puede ocurrir entre una máquina y el resto del sistema, o entre un grupo de máquinas.
- ❖ El cambio del torque electromagnético de una máquina sincrónica puede ser apreciado en dos componentes
 - ✓ Torque sincronizante, en fase con el cambio del ángulo del rotor.
 - ✓ Torque de amortiguamiento, en fase con el cambio de la velocidad del rotor.
- ❖ La estabilidad del sistema depende de la existencia del par de componentes de torque en cada una de las máquinas sincrónicas.
 - ✓ El pobre o insuficiente torque sincronizante resulta en “inestabilidad aperiódica” o “inestabilidad no oscilatoria” (también llamado por varios autores como “inestabilidad monotónica”)
 - ✓ Un pobre torque de amortiguamiento resulta en “inestabilidad oscilatoria”.

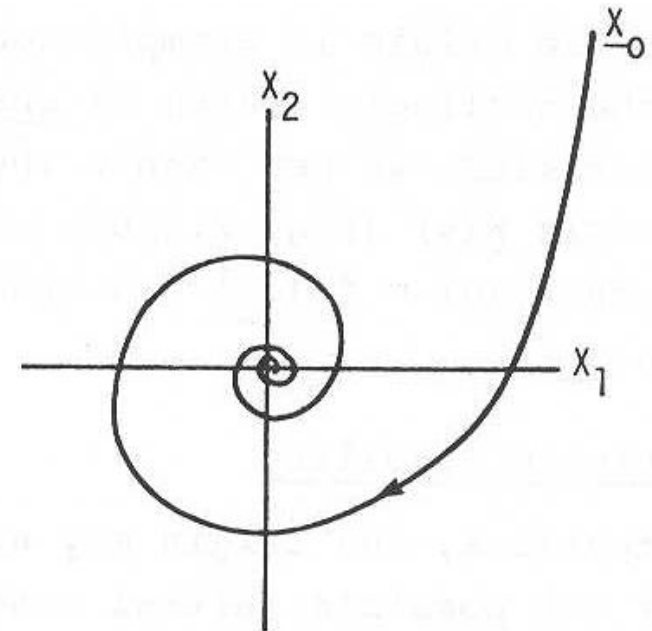
2.3 Estabilidad Angular de Sistemas de Potencia

- Estabilidad a pequeña perturbación:
 - ❖ Concentra el estudio a la estabilidad **local** del sistema
 - ❖ Trata de determinar **cuan estable** es un punto de equilibrio estable (punto de operación)
 - ❖ **Pequeñas perturbaciones:** Variaciones pequeñas en la carga
 - ❖ **Técnicas:** Control lineal (autovalores y autovectores)



2.3 Estabilidad Angular de Sistemas de Potencia

- Estabilidad a grande perturbación (**Estabilidad Transitoria**)
 - ❖ Concentra el estudio de la estabilidad **global** del sistema
 - ❖ Trata de determinar **el tamaño de la región de estabilidad** asociada a un punto de equilibrio estable
 - ❖ **Grandes perturbaciones:** Fallas en líneas de transmisión
 - ❖ **Técnicas:** Control no lineal (simulación dominio del tiempo, otros)



2.4 Formulación Matemática de la Estabilidad Transitoria

- Sistemas ODE (Ordinary Differential Equations):

- ❖ El comportamiento de un sistema dinámico, tal como un sistema de potencia, puede ser descrito por un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{y})$$

- ✓ $\mathbf{x}$: Vector de variables de estado (contiene a los ángulos asociados a los generadores síncronos con sus respectivos controladores e otros dispositivos dinámicos da red eléctrica)
- ✓ $\mathbf{u}$: Vector de entrada (tensiones de barra, tensiones de campo e de estator dos generadores, e la potencia mecánica de cada máquina en el sistema)
- ✓ $\mathbf{y}$: Vector de salida (por ejemplo: contiene a las tensiones en las cargas).

- ❖ **Sistema autónomo:** No depende del tiempo

- Sistemas DAE (Differential-Algebraic Equation):

- ❖ Frecuentemente es formulada de esta manera:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{y})$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{y})$$

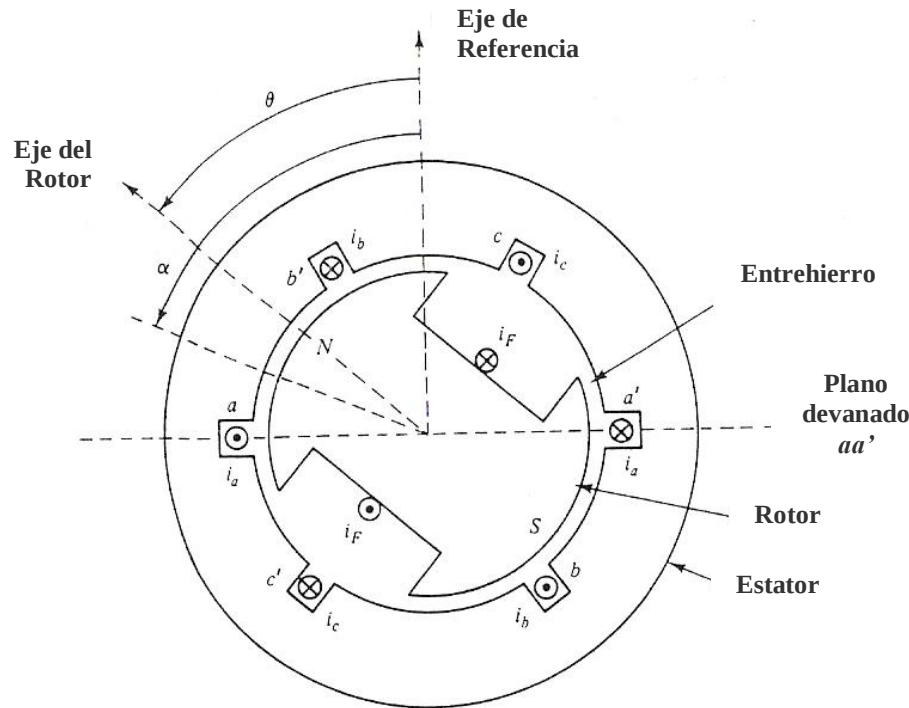
- ✓ $\mathbf{g}$: Vector de funciones no lineales

2.5 Métodos para Análisis de la Estabilidad Transitoria

- Métodos Indirectos:
 - ❖ Simulación en el Dominio del Tiempo
 - ✓ Ventajas: Análisis exacto de componentes de control
 - ✓ Desventajas: Simulación computacionalmente lento (no apropiado para aplicaciones on-line)
- Métodos Directos:
 - ❖ Funciones de Energía (Funciones Tipo Lyapunov)
 - ✓ Ventajas: Son técnicas rápidas (uso para aplicaciones on-line)
 - ✓ Desventajas: Dificultad de obtener la función de Lyapunov para dispositivos de control.
- Métodos Híbridos:
 - ❖ Combinación de los anteriores

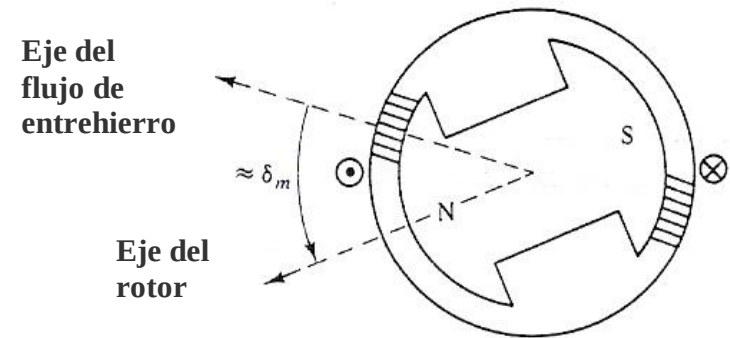
2.6 Modelo de Máquina Síncrona

- Máquina síncrona
 - ❖ Referencia angular



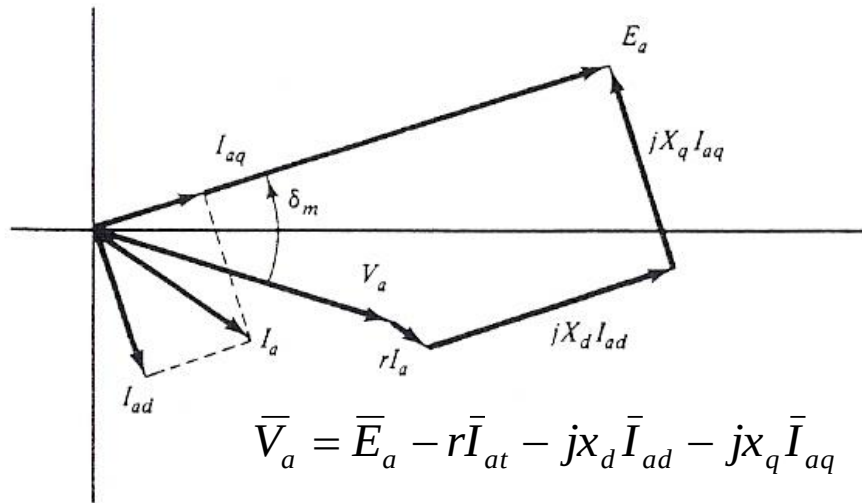
$$\theta = \omega t + \delta_m + \frac{\pi}{2}$$

- ✓ θ : Angulo eje directo del rotor y eje magnético fase A.
- ✓ δ_m : Desplazamiento del eje de cuadratura respecto al eje de referencia rotativa síncrona

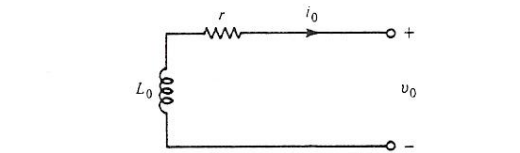
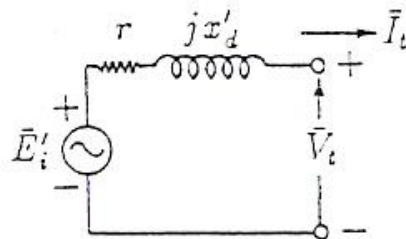


2.6 Modelo de Máquina Síncrona

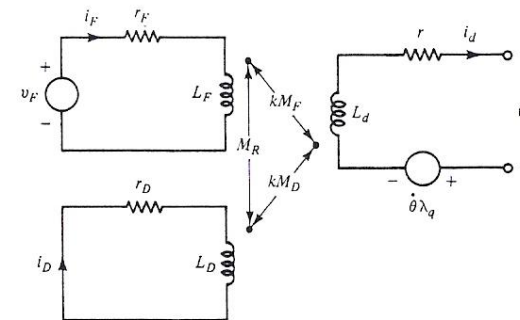
- Máquina síncrona
 - ❖ Modelo en Régimen Permanente
 - ❖ Modelo en Régimen Transitorio



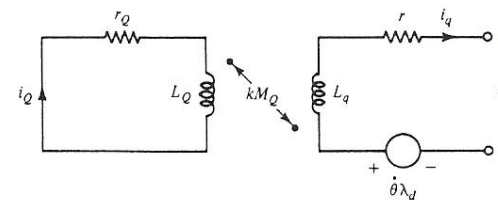
Modelo
Clásico



Secuencia Cero



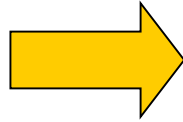
Eje Directo



Eje de Cuadratura

2.6 Modelo de Máquina Síncrona

- Ecuación de Oscilación



$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_g - D \frac{d\delta}{dt}$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s$$

P_m : Es la potencia mecánica de entrada (substrayendo las pérdidas rotacionales).

P_g : Es la potencia eléctrica P_e menos las pérdidas eléctricas.

P_e : Es la potencia eléctrica obtenida en el entrehierro. Normalmente se desprecian las pérdidas.

P_D : Es la potencia de amortiguamiento equivalente proporcional a la velocidad angular. Todas las potencias están en p.u.

M : Es el momento de inercia igual a $I\omega_m$, en p.u-s²/rad. $M = \frac{2H}{\omega_s}$

H : Es la constante de inercia de la máquina, en segundos. Generalmente para máquinas típicas este valor está entre 1 – 10 segundos.

2.7 Método de Integración Numérica

- Técnicas de Integración Numérica:
 - ❖ Se usa para resolver el siguiente problema

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t)$$

x : Es la variable de estado.

t : Es la variable independiente que representa al tiempo.

- ❖ Runge Kutta de 4to Orden

$$w_0 = x_0$$

$$K_1 = hf(t_i, w_i),$$

$$K_2 = hf\left(t_i + \frac{h}{2}, w_i + \frac{h}{2}K_1\right),$$

$$K_3 = hf\left(t_i + \frac{h}{2}, w_i + \frac{h}{2}K_2\right),$$

$$K_4 = hf(t_{i+1}, w_i + K_3),$$

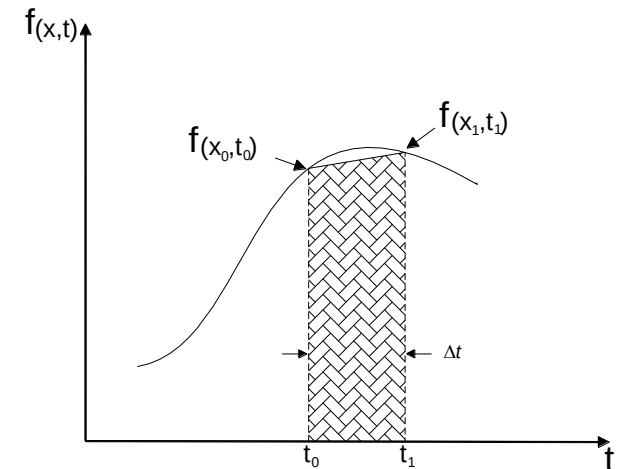
$$w_{i+1} = w_i + \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4),$$

$$w_0 = x_0$$

$$w_{i+1} = w_i + \frac{h}{2} [f(t_{i+1}, w_{i+1}) + f(t_i, w_i)] \quad 0 \leq i \leq N-1$$

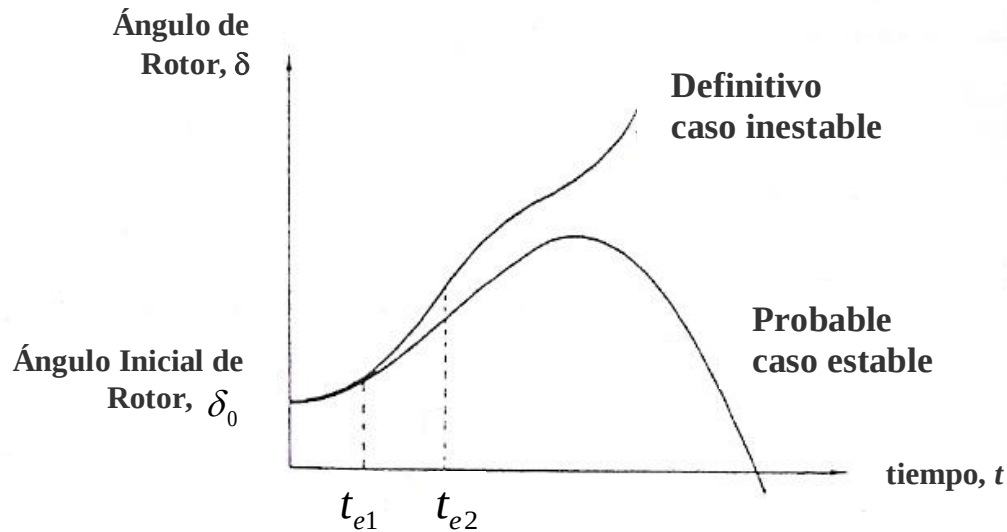
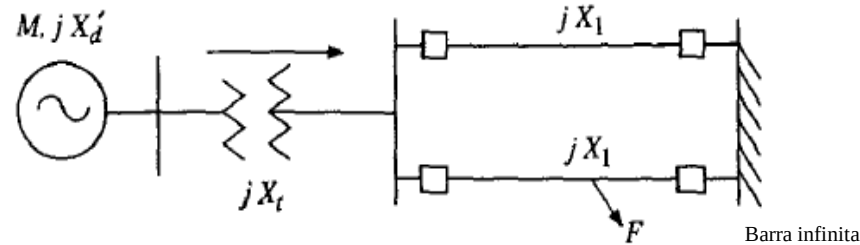
- ❖ Trapecio Implícito

✓ Usado para sistemas rígidos



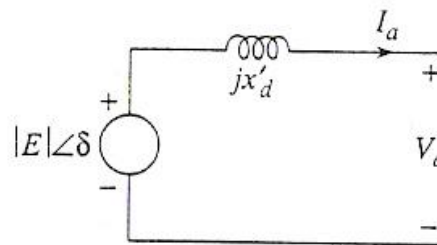
2.7 Método de Integración Numérica

- Determinación de la Estabilidad
 - ❖ Sistema Máquina Barra Infinita



2.8 Análisis de Estabilidad Transitoria por Simulación en el Dominio del Tiempo

- Sistema Multimáquina con Modelo Clásico de Generadores
 - ❖ Suposiciones
 - ✓ La potencia mecánica de entrada de cada máquina síncrona es constante.
 - ✓ El amortiguamiento (acción de la potencia asíncrona) es despreciado.
 - ✓ Las máquinas síncronas están representadas eléctricamente, por el modelo de fuente de tensión detrás de una reactancia transitoria.
 - ✓ El movimiento del rotor de cada máquina síncrona (relativa a una referencia rotatoria síncrona) es fijado en un ángulo relativo al ángulo de la tensión detrás de la reactancia.
 - ✓ Las cargas son representadas por impedancias constantes.



2.8 Análisis de Estabilidad Transitoria por Simulación en el Dominio del Tiempo

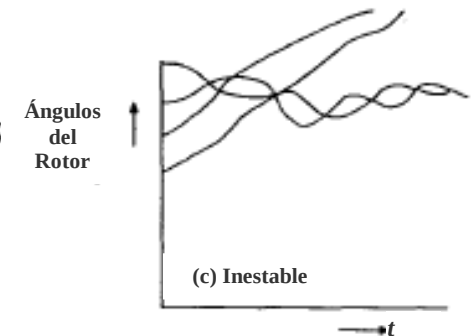
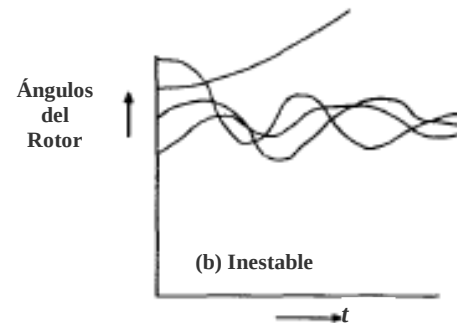
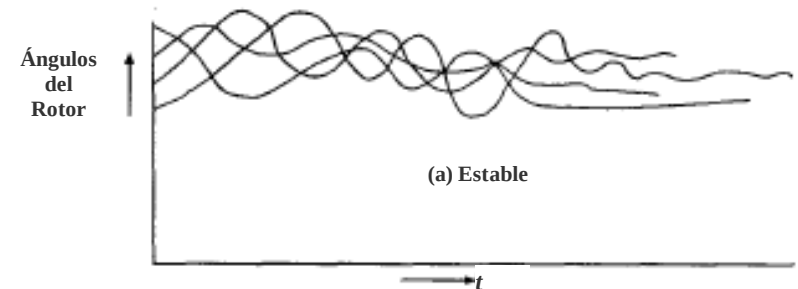
- Determinación de la Estabilidad
 - ❖ Sistema Multimáquina

Puede ser considerada dentro de 3 categorías [1]:

- ✓ Primera oscilación
- ✓ Corto plazo con 5–10 segundos
- ✓ Largo plazo con un periodo de varios minutos

Adicionalmente puede ser basada en:

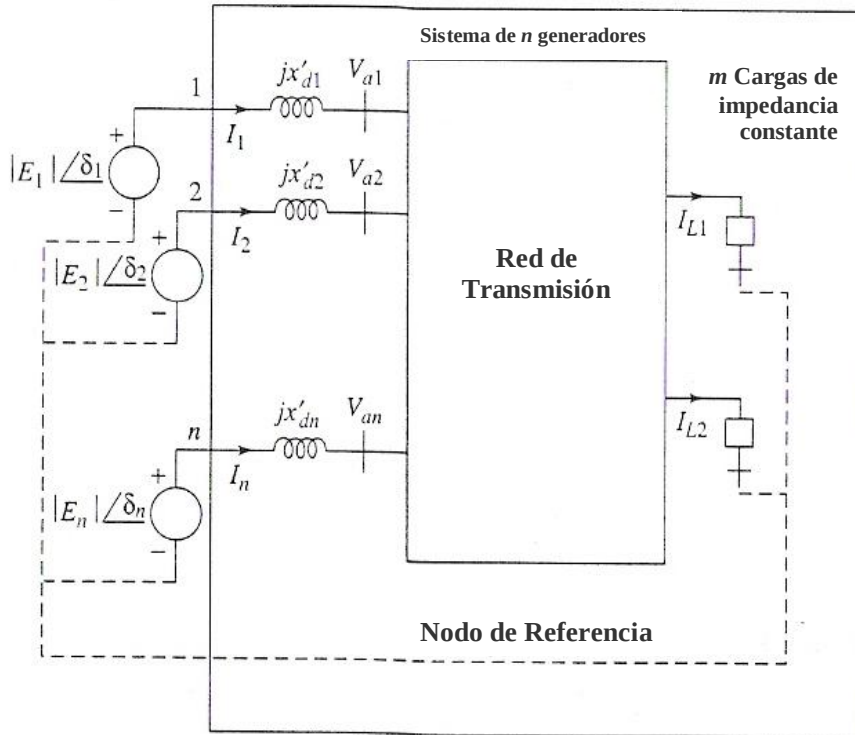
- ✓ Oscilaciones en “modo local” o “planta”:
 - ✓ Unidades en una subestación de generación oscilan con respecto al resto del sistema de potencia
 - ✓ Rango de frecuencias desde 0.8 a 2.5 Hz.
- ✓ Oscilaciones en “modo inter-área”:
 - ✓ Varias máquinas en una parte del sistema oscilen con respecto a otras máquinas
 - ✓ Rango frecuencias desde 0.1 a 0.7 Hz.



2.8 Análisis de Estabilidad Transitoria por Simulación en el Dominio del Tiempo

- Sistema Multimáquina con Modelo Clásico de Generadores

❖ Representación



$$y_{Li} = \frac{\bar{I}_{Li}}{\bar{V}_{Li}} = \frac{\bar{S}_{Li}^*}{|\bar{V}_{Li}|^2} = \frac{P_{Li} - jQ_{Li}}{|\bar{V}_{Li}|^2}$$

$$E_i \angle \delta_i' = V_{ai} + j \frac{x'_{di} \bar{S}_{Gi}^*}{V_{ai}} = V_{ai} + j \frac{x'_{di} (P_{Gi} - jQ_{Gi})}{V_{ai}}$$

$$= \left(V_{ai} + \frac{x'_{di} Q_{Gi}}{V_{ai}} \right) + j \frac{x'_{di} P_{Gi}}{V_{ai}}$$

❖ Reducción de numero de nodos

$$\mathbf{Y}_{barra} = \begin{bmatrix} n & n_b - n \\ \mathbf{Y}_1 & \mathbf{Y}_2 \\ \mathbf{Y}_3 & \mathbf{Y}_4 \end{bmatrix} \begin{matrix} n \\ n_b - n \end{matrix}$$

$$\hat{\mathbf{Y}}_{barra} = \begin{bmatrix} n & n & n_b - n \\ \mathbf{y} & -\mathbf{y} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{y} & \mathbf{y} + \mathbf{Y}_1 + \mathbf{y}_{Lg} & \mathbf{Y}_2 \\ \mathbf{0} & \mathbf{Y}_3 & \mathbf{Y}_4 + \mathbf{y}_{LL} \end{bmatrix} \begin{matrix} n \\ n \\ n_b - n \end{matrix}$$

$$\hat{\mathbf{Y}}_{barra} = \begin{bmatrix} n & n_b \\ \mathbf{Y}_A & \mathbf{Y}_B \\ \mathbf{Y}_C & \mathbf{Y}_D \end{bmatrix} \begin{matrix} n \\ n_b \end{matrix}$$

$$\mathbf{I}_A = (\mathbf{Y}_A - \mathbf{Y}_B \mathbf{Y}_D^{-1} \mathbf{Y}_C) \mathbf{E}_A$$

$$= \mathbf{Y}_{red} \mathbf{E}_A$$

2.8 Análisis de Estabilidad Transitoria por Simulación en el Dominio del Tiempo

- Sistema Multimáquina con Modelo Clásico de Generadores
 - ❖ Sistema de Ecuaciones Diferenciales

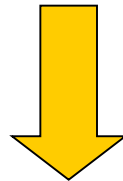
$$\bar{I}_i = \sum_{j=1}^n Y_{red\ ij} \bar{E}_j$$

$$P_{gi} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij})$$

$$C_{ij} = E_i E_j B_{ij}$$

$$D_{ij} = E_i E_j G_{ij}$$

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$$



$$M_i \frac{d\omega_i}{dt} = P_{mi} - D_i \frac{d\delta_i}{dt} - \left\{ E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij}) \right\}$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_s \quad i = 1, 2, \dots, n$$

3. Método Directo de la Función de Energía Transitoria

3.1 Método Directo de Lyapunov

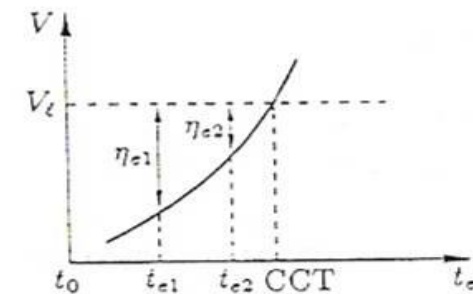
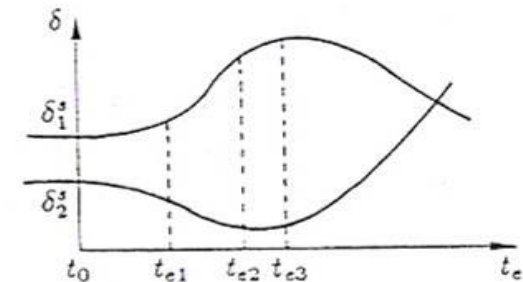
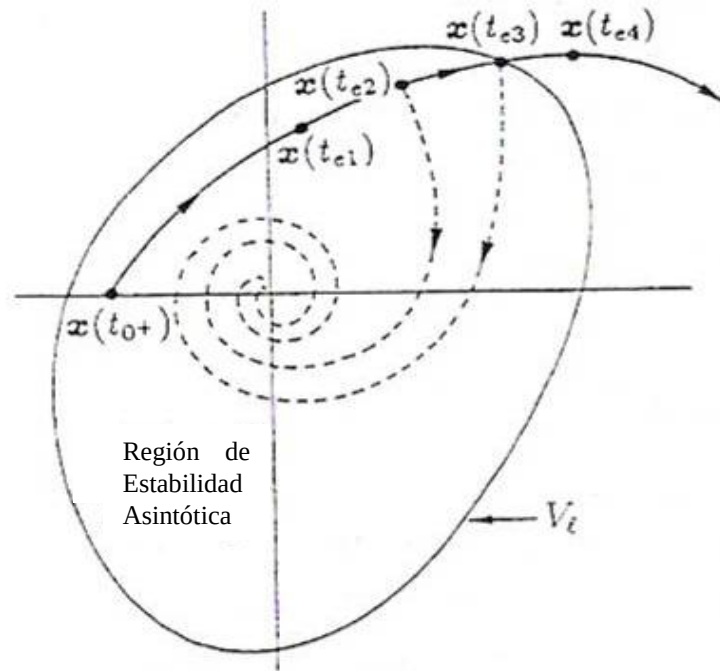
- Antecedentes:
 - ❖ En 1892, A. M. Lyapunov, en su famosa disertación de doctorado propone métodos para análisis de la estabilidad de sistemas dinámicos.
 - ❖ El segundo método de Lyapunov (o directo) es usado para sistemas a grandes perturbaciones.
 - ✓ [25] A.M. Lyapunov, **The General Problem of the Stability of Motion**, (first published in 1892) translated and edited by A.T. Fuller and published by Taylor & Francis, 1992.
- Consecuencias:
 - ❖ La estabilidad de un punto de equilibrio de un sistema dinámico no lineal y autónomo puede ser determinado sin integración numérica.
 - ❖ Es asociado al sistema una función escalar $V(x)$ la cual es llamada **Función de Lyapunov**.
 - ❖ Si existe $V(x)$ definida positiva en torno a x_s , entonces el punto de equilibrio x_s es **asintóticamente estable**.

3.1 Método Directo de Lyapunov

- Definiciones:
 - ❖ Una función escalar $V(x)$ es llamada definida positiva en Ω (alrededor del punto de equilibrio x_s) si:
 - ✓ Tiene derivadas parciales de primer orden continuas con referencia a x , con $dV(x)/dt < 0$, para todo $x \in \Omega$.
 - ✓ $V(x) > 0$, para todo $x \in \Omega$.
 - ❖ Una función escalar $V(x)$ es llamada semi definida positiva en Ω si:
 - ✓ Substituimos $dV(x)/dt < 0$ por $dV(x)/dt \leq 0$.
 - ❖ Ejemplos: $V(x) = x_1^2 + x_2^2$ $V(x) = Dx_2^2 \quad (D > 0)$

3.1 Método Directo de Lyapunov

- Región de Atracción del Punto de Equilibrio Estable post-falla
 - Es caracterizado por la inecuación $V(x) < V_{cr}$



- ✓ V_{cr} : Es la energía crítica del sistema
- ✓ CCT : *Critical Clearing Time*

3.2 Formulación de la Función de Energía Transitoria

- Las Funciones de Lyapunov pueden ser generadas mediante las primeras integrales de energía (Funciones de energía)
 - ❖ Son funciones **tipo Lyapunov** debido que cumplen solo algunas las definiciones.
 - ❖ Generalmente son la suma de la Energía Potencial y Cinética

$$V(x) = VKE + VPE$$

- ✓ VKE : Energía cinética
- ✓ VPE : Energía potencial
- ❖ Las funciones de energía mas confiables usan el modelo clásico de los generadores.
- ❖ En la actualidad existen otras funciones de energía mas sofisticadas de acuerdo al nivel de detalle de los controladores.

3.2 Formulación de la Función de Energía Transitoria

- Sistemas Multimáquina con Modelo Clásico de Generadores
 - ❖ Ecuaciones de oscilación resultantes del modelo reducido al numero de nodos de generación:

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + D_i \frac{d\delta_i}{dt} = P_i - P_{ei}(\delta_i \dots \delta_m), \quad i = 1, \dots, m$$

- ❖ Donde

$$P_i \equiv P_{mi} - E_i^2 G_{ii} \quad C_{ij} = E_i E_j B_{ij} \quad ; \quad D_{ij} = E_i E_j G_{ij} \quad P_{ei} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n_g} (C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij})$$

- Centro de Inercia (COI: *Center of Inertia*)
 - ❖ Variables de estado formuladas como centro de inercia:

$$\delta_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^m M_i \delta_i \quad \omega_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^m M_i \omega_i$$

- ❖ Definimos:

$$\theta_o = \delta_i - \delta_o \quad ; \quad \tilde{\omega}_i = \omega_i - \omega_o$$

$$M_T = \sum_{i=1}^{n_g} M_i$$

3.2 Formulación de la Función de Energía Transitoria

- Ecuaciones de Oscilación en el COI

$$M_i \frac{d^2 \theta_i}{dt^2} = P_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (C_{ij} \sin \theta_{ij} + D_{ij} \cos \theta_{ij}) - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}$$

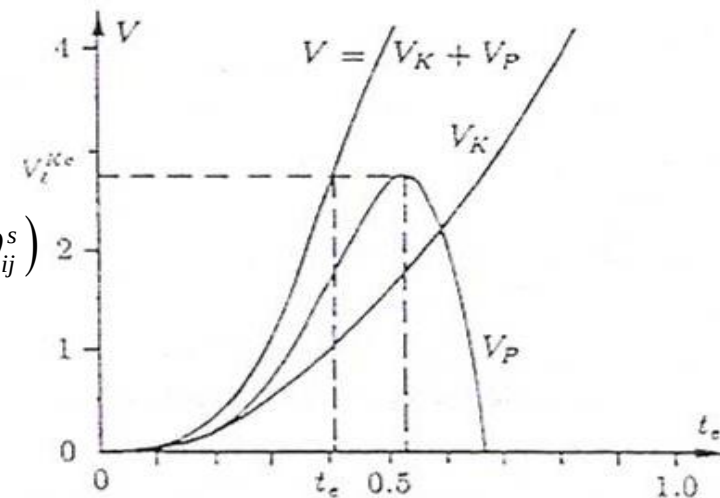
$$\equiv f_i(\boldsymbol{\theta}) \quad i = 1, \dots, m$$

❖ Donde

$$P_i = P_{mi} - E_i^2 G_{ij}; \quad P_{COI} = \sum_{i=1}^m P_i - 2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m D_{ij} \cos \theta_{ij}$$

- Función de Energía

$$\begin{aligned} V(\boldsymbol{\theta}, \tilde{\boldsymbol{\omega}}) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m M_i \tilde{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^m \int_{\theta_i^s}^{\theta_i} f_i(\boldsymbol{\theta}) d\theta_i \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m M_i \tilde{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^m P_i (\theta_i - \theta_i^s) - \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m \left[C_{ij} (\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^s) \right. \\ &\quad \left. - \int_{\theta_i^s + \theta_j^s}^{\theta_i + \theta_j} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) \right] \\ &= V_{KE}(\tilde{\boldsymbol{\omega}}) + V_{PE}(\boldsymbol{\theta}) \end{aligned}$$



3.3 Técnicas para Calcular la V_{CR}

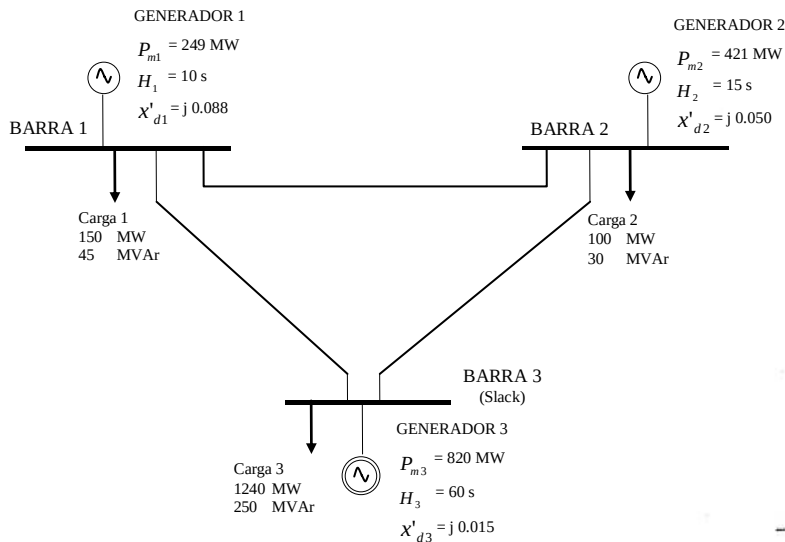
- Método del UEP de menor energía
 - ❖ Buscamos UEPs (Puntos de Equilibrio Inestables) del sistema y elegimos el de menor energía, esa energía es V_{cr} .
 - ❖ Requiere mucho trabajo computacional, es difícil encontrar todos los UEPs
 - ✓ [23] A. H. Abiad and K. Nagappan, **Transient Stability Region of Multimachine Power Systems**, IEEE Trans. Power Appar. and Systems, PAS-85, vol 2, pp.169-178, Feb 1966.
- Método de la Superficie Frontera de Energía Potencial (PEBS)
 - ❖ El V_{cr} es la componente de energía potencial máxima a lo largo de la trayectoria de falla
 - ✓ [5] N. Kakimoto and Hayashi, **Transient stability analysis of multimachine power systems by Lyapunov's direct method**, Proc. of the 20th IEEE Conf. on Decision and Control, San Diego, vol.1, pp.464-470, Dez. 1981.

3.3 Métodos para Calcular la V_{CR}

- Método del UEP de Control o BCU
 - ❖ El V_{cr} es la energía total en el UEP de control.
 - ❖ El UEP de control es determinado mediante el cruce de la trayectoria de la falla en el PEBS y luego es usado el sistema gradiente para deslizarnos hasta el primer UEP encontrado.
- ✓ [6] H. D. Chiang, F. F. Wu, and P. P. Varaiya, **Foundations of Direct Methods for Power Systems Transient Stability Analysis**, IEEE Trans. Circuits Systems, CAS-34, pp.160-173, Feb 1987.

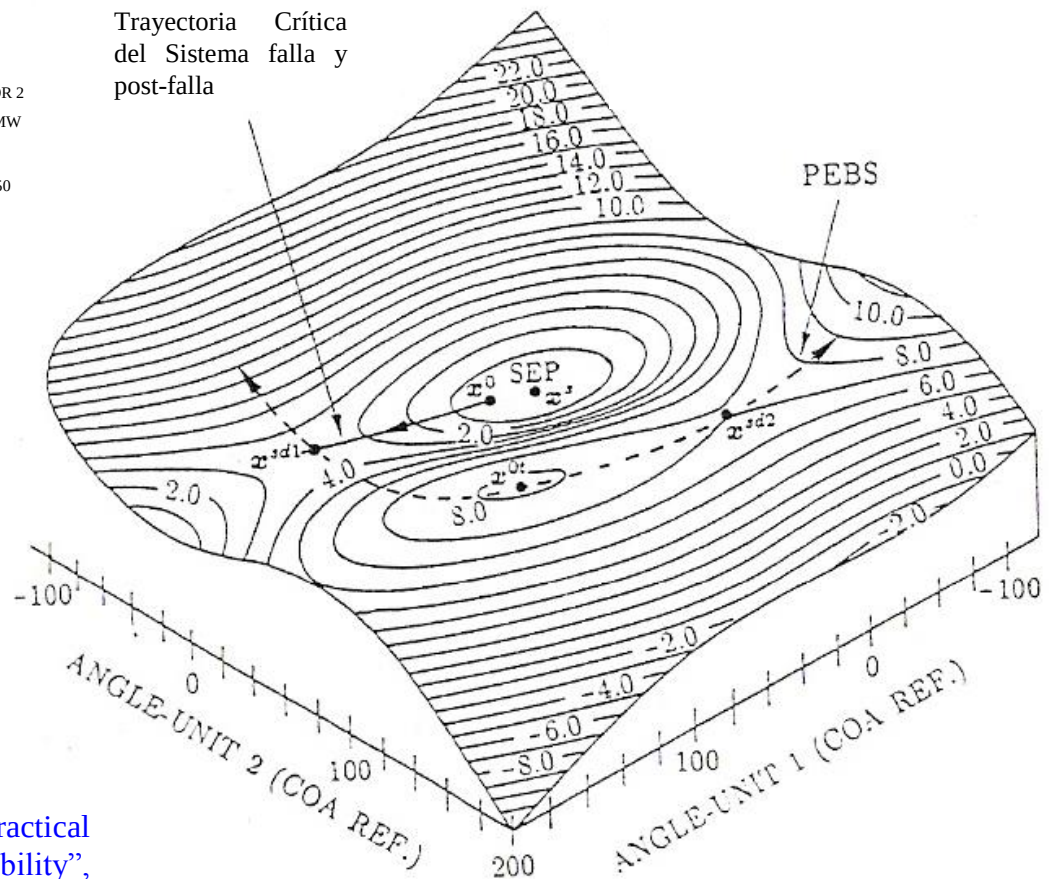
3.4 Método PEBS

- Región del PEBS
 - Referencia



Sistema ATHAY3
(3 generadores)

- [3] T. Athay, R. Podmore and S. Virmani, "A practical method for the direct analysis of transient stability", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol.98, no.2, pp.573-584, Mar./Apr. 1979.



3.4 Método PEBS

Algoritmo para cálculo de Tiempo Crítico

1. Calcular el SEP post-falla θ^s , resolviendo (ver Anexo B)

$$f_i(\theta) = 0, \quad i = 1, \dots, m$$

2. Calcular la trayectoria de falla dado por (3.23).

$$M_i \frac{d\tilde{\omega}_i}{dt} = f_i^F(\theta) \quad 0 < t \leq t_d$$

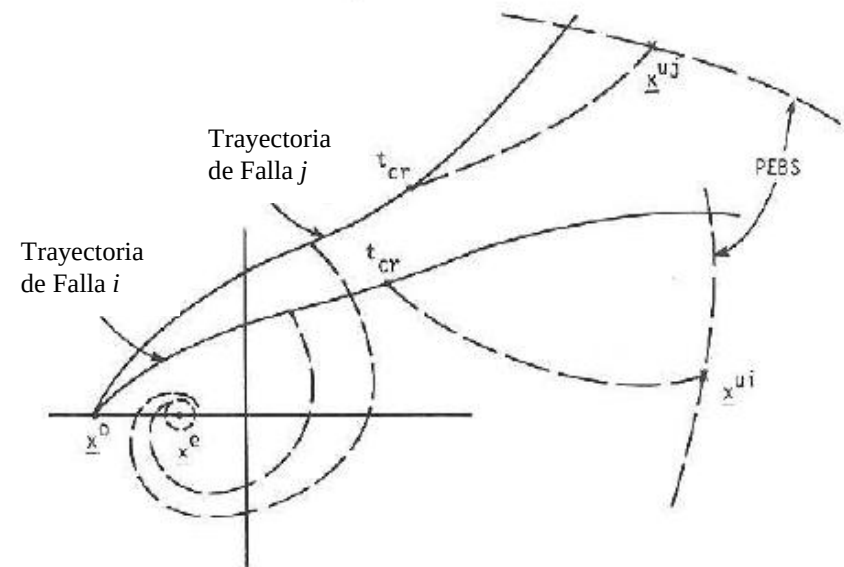
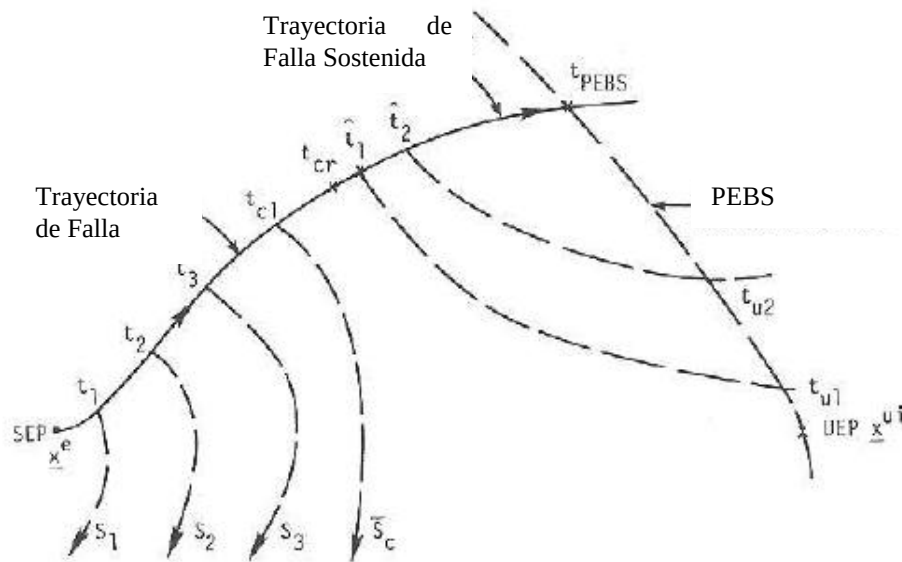
$$\frac{d\theta_i}{dt} = \tilde{\omega}_i, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

3. Supervisar $f^T(\theta) \cdot \hat{\theta}$ y $V_{PE}(\theta)$ en cada paso de tiempo. Los parámetros en $f(\theta)$ y $V_{PE}(\theta)$ pertenecen a la configuración post-falla.
4. Dentro del pozo potencial $f^T(\theta) \cdot \hat{\theta} < 0$. Continuar los pasos 2 y 3 hasta que $V_{PE}^{\max}(\theta)$. Este es el cruce del PEBS($t^*, \theta^*, \tilde{\omega}^*$). Esta es una buena estimación de V_{cr} .
5. Encontrar cuando $V(\theta, \tilde{\omega}) = V_{cr}$ en la trayectoria de falla. Esto da una buena estimación de t_{cr} .

3.4 Método PEBS

Observaciones

- ❖ Trayectoria de Falla Sostenida en el PEBS
- ❖ Dos tipos de fallas distintas

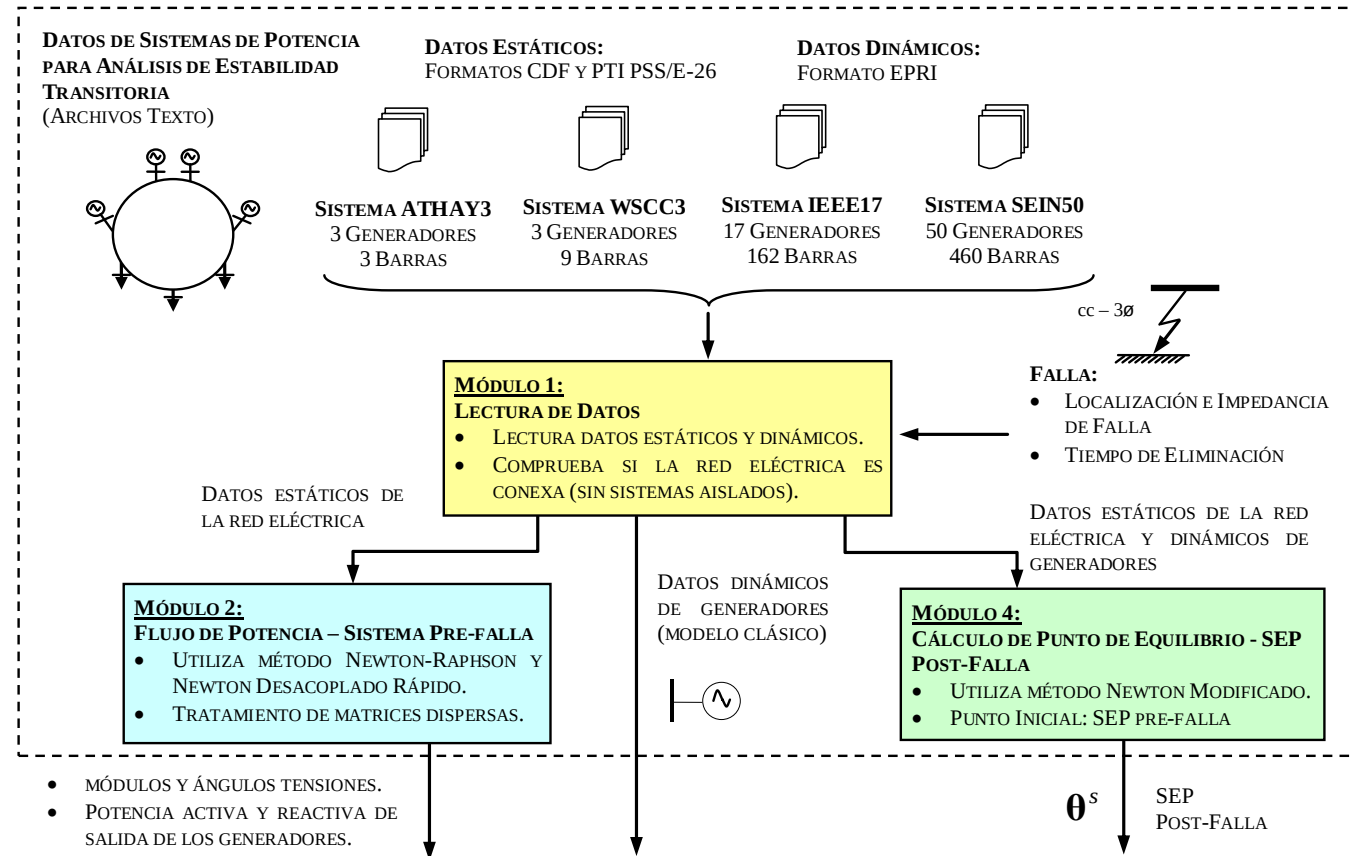


4. Implementación y Resultados

4.1 Implementación de la Metodología

ETAPA INICIAL:

PREPARACIÓN DE DATOS



4.1 Implementación de la Metodología

ANÁLISIS 1:

ESTABILIDAD TRANSITORIA MEDIANTE SIMULACIÓN EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

a) Sistema EDO

$$\dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_s$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} (P_i - P_{ei}(\delta_1, \dots, \delta_m) - D_i(\omega_i - \omega_s)) \quad i = 1, \dots, m$$

donde la potencia eléctrica es:

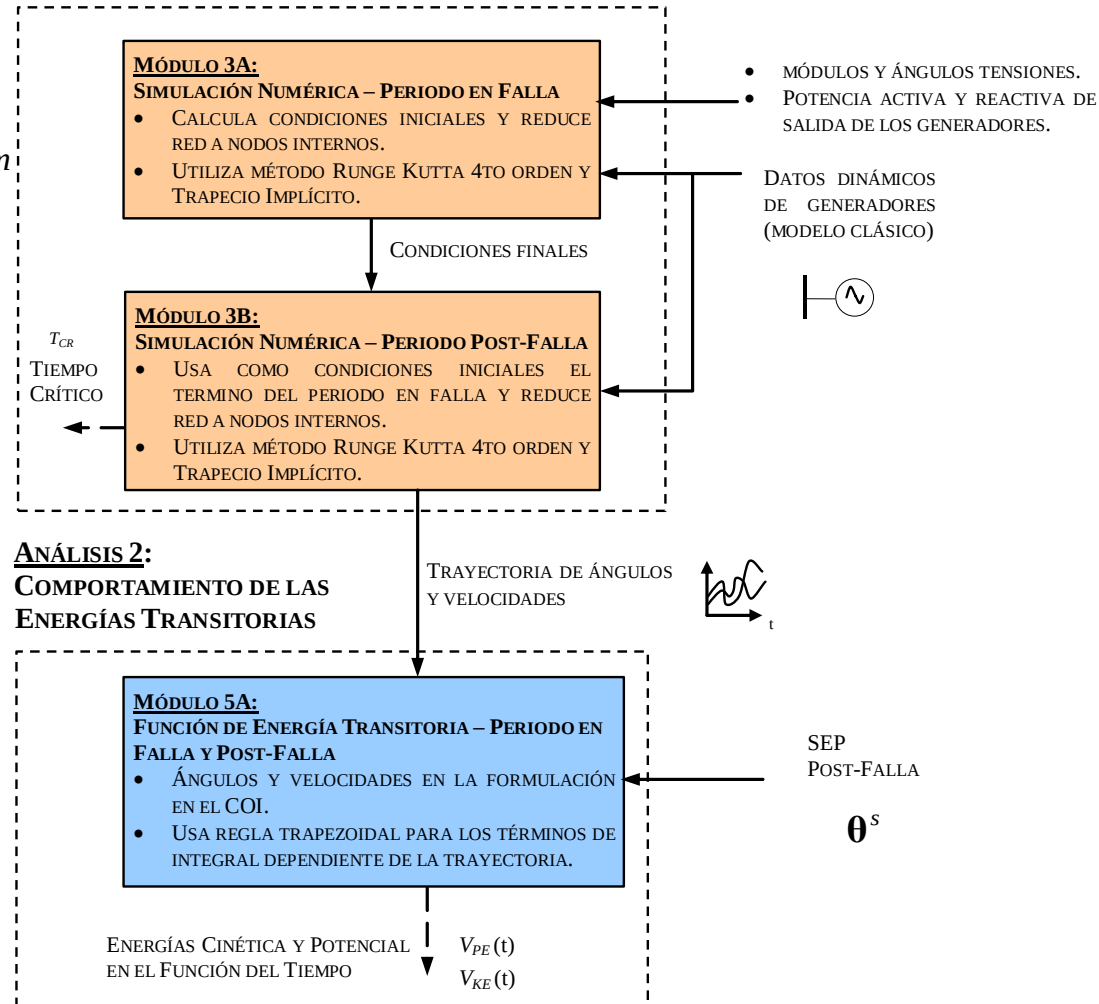
$$P_{ei} = E_i^2 G_{ij} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m (C_{ij} \sin \delta_{ij} + D_{ij} \cos \delta_{ij})$$

b) Función de Energía Transitoria

$$\begin{aligned} V(\theta, \tilde{\omega}) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m M_i \tilde{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^m \int_{\theta_i^s}^{\theta_i} f_i(\theta) d\theta_i \\ &= V_{KE}(\tilde{\omega}) + V_{PE}(\theta) \end{aligned}$$

ANÁLISIS 2:

COMPORTAMIENTO DE LAS ENERGÍAS TRANSITORIAS



4.1 Implementación de la Metodología

ANÁLISIS 3:

ESTABILIDAD TRANSITORIA MEDIANTE MÉTODOS DIRECTOS BASADOS EN FET

- MÓDULOS Y ÁNGULOS TENSIONES.
- POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA DE SALIDA DE LOS GENERADORES.

DATOS DINÁMICOS
DE GENERADORES
(MODELO CLÁSICO)

SEP
POST-FALLA
 θ^s

MÓDULO 3C: SIMULACIÓN NUMÉRICA – PERIODO FALLA SOSTENIDA

- CALCULA CONDICIONES INICIALES Y REDUCE RED A NODOS INTERNOS.
- UTILIZA MÉTODO RUNGE KUTTA 4TO ORDEN Y TRAPECIO IMPLÍCITO.

TRAYECTORIA DE ÁNGULOS
Y VELOCIDADES



MÓDULO 5B: FUNCIÓN DE ENERGÍA TRANSITORIA – PERIODO FALLA SOSTENIDA

- ÁNGULOS Y VELOCIDADES EN LA FORMULACIÓN EN EL COI.
- USA REGLA TRAPEZOIDAL PARA LOS TÉRMINOS DE INTEGRAL DEPENDIENTE DE LA TRAYECTORIA.

ENERGÍA POTENCIAL EN
FUNCIÓN DEL TIEMPO $V_{PE}(t)$

MÓDULO 6: MÉTODO PEBS

- MONITOREA LA ENERGÍA POTENCIAL HASTA ALCANZAR SU MÁXIMO VALOR (ENERGÍA CRÍTICA).
- EN BASE A LA INTEGRACIÓN NUMÉRICA ALMACENADA CALCULA EL TIEMPO CRÍTICO.
- CALCULA LA ENERGÍA EN EL INSTANTE DE ELIMINACIÓN DE LA FALLA (PARA MÁRGENES DE ENERGÍA).

- ENERGÍA CRÍTICA
- TIEMPO CRÍTICO
- MÁRGENES DE ENERGÍA

V_{CR}
 T_{CR}
 ΔMET

c) Margen de Energía Transitoria

$$\Delta MET = V_{cr-PEBS} - V_{cl}$$

$$= V_{cr-PEBS} - V(\theta^{cl})$$

$V_{cr-PEBS}$: Es la energía crítica aproximada obtenida por el método PEBS, en p.u.

V_{cl} : Es la energía en el punto θ^{cl} , en p.u.

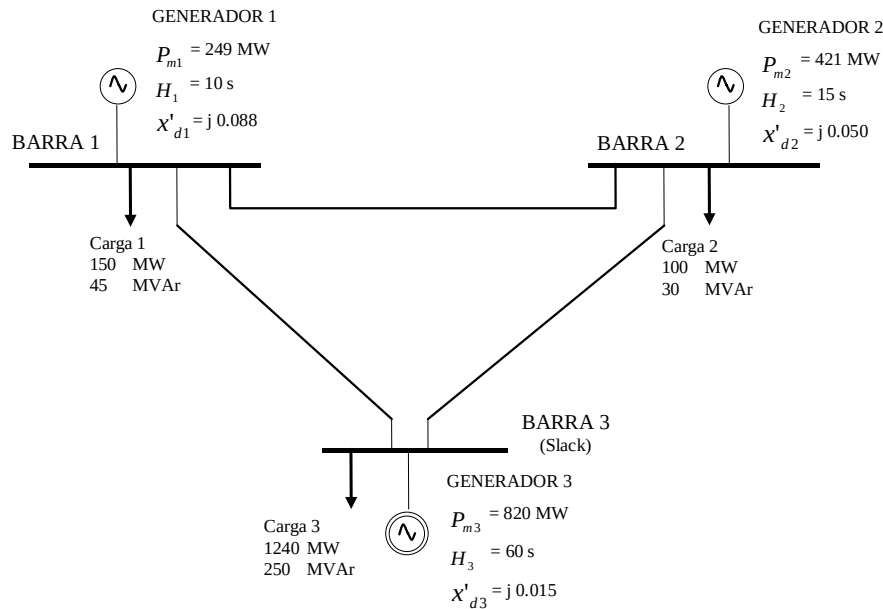
θ^{cl} : Es el punto asociado al tiempo de eliminación de la falla t_{cl}

$$V_{cr-PEBS} = V_{PE}^{\max}$$

4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.1 Sistema ATHAY3

3 Generadores, 3 Barras, 3 Ramos



a) Preparación de datos y Cálculos Preliminares

Flujo de Carga pre-falla

		MW		MVar					
		Total Pérdidas :		0.00		110.40			
Identificación de Barra			Tensión en Barra		Generación (+)		Shunt (+)	Carga (-)	
#	Nombre	Tipo	Módulo (p.u.)	Ángulo (deg)	P (MW)	Q (MVar)	Q (MVar)	P (MW)	Q (p.u.)
1	BUS 1	PV	1.0000	14.942	249.00	58.00	0	150.00	45.00
2	BUS 2	PV	1.0000	14.986	421.00	72.20	0	100.00	30.00
3	BUS 3	Slack	1.0000	0.000	820.00	305.20	0	1240.00	250.00
Total :					1490.00	435.40	0.00	1490.00	325.00

Condiciones Iniciales de Generadores

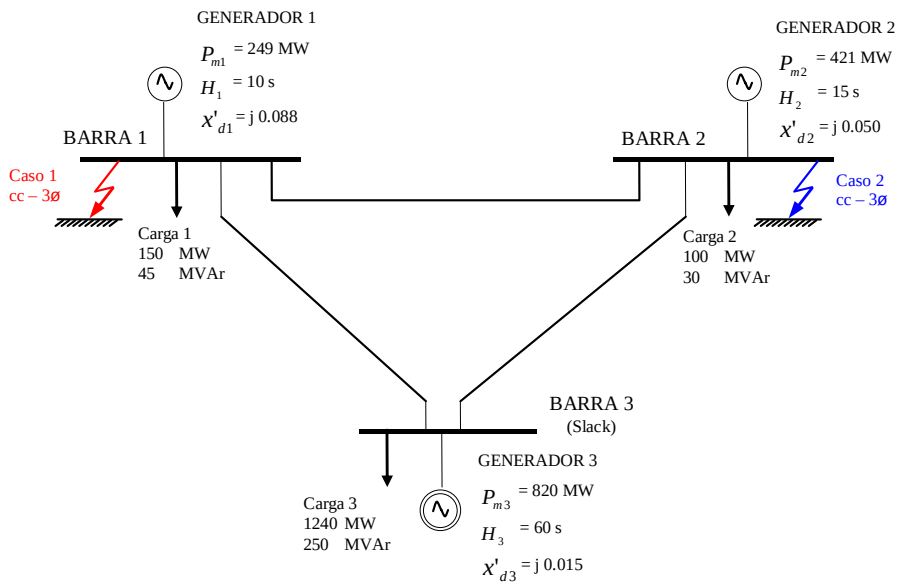
Identificación de Generador			Tensión Interna Transitoria $E_t \angle \delta_i^0$			Potencia Mecánica P_{mi}
i	# Barra	Nombre	Módulo (p.u.)	Ángulo (deg)	Ángulo (rad)	(p.u.)
1	1	BUS 1	1.0736	26.72	0.4663	2.490
2	2	BUS 2	1.0573	26.47	0.4620	4.210
3	3	BUS 3	1.0530	6.71	0.1171	8.200
Total :						14.900

- [3] T. Athay, R. Podmore and S. Virmani, "A practical method for the direct analysis of transient stability", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol.98, no.2, pp.573-584, Mar./Apr. 1979.

4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.1 Sistema ATHAY3

** Casos **



b) Simulación en el Dominio del Tiempo

Descripción de Casos

Caso 1

- Evento 1 en $t = 0$: Cortocircuito trifásico solidó en Barra 1
- Evento 2 en $t = t_{cl}$: Eliminación de falla de Barra 1

Caso 2

- Evento 1 en $t = 0$: Cortocircuito trifásico solidó en Barra 2
- Evento 2 en $t = t_{cl}$: Eliminación de falla de Barra 2

Matrices de Admitancia de Barra Reducidas a Nodos Internos

$$\mathbf{Y}_{\text{red pre-falla}} = \mathbf{Y}_{\text{red post-falla}} = \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} & \begin{bmatrix} 0.6512 - j4.0176 & 0.1651 + j1.0533 & 0.5951 + j2.3641 \\ 0.1651 + j1.0533 & 0.4916 - j7.7883 & 1.1559 + j6.0228 \\ 0.5951 + j2.3641 & 1.1559 + j6.0228 & 8.6026 - j12.3444 \end{bmatrix} \end{array} \end{array}$$

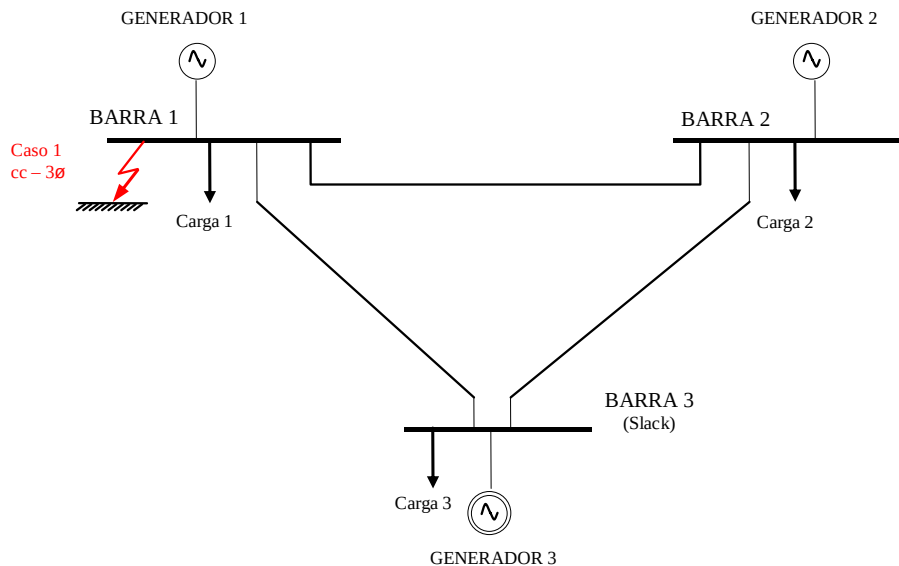
$$\mathbf{Y}_{\text{red en falla (caso 1)}} = \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} & \begin{bmatrix} 0.0000 - j11.3636 & 0.0000 - j0.0000 & 0.0000 - j0.0000 \\ 0.0000 - j0.0000 & 0.4575 - j7.9386 & 1.0472 + j5.6876 \\ 0.0000 - j0.0000 & 1.0472 + j5.6876 & 8.2852 - j13.0851 \end{bmatrix} \end{array} \end{array}$$

$$\mathbf{Y}_{\text{red en falla (caso 2)}} = \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} & \begin{bmatrix} 0.6263 - j4.1073 & 0.0000 - j0.0000 & 0.4345 + j1.8537 \\ 0.0000 - j0.0000 & 0.0000 - j20.0000 & 0.0000 - j0.0000 \\ 0.4345 + j1.8537 & 0.0000 - j0.0000 & 7.5792 - j15.2466 \end{bmatrix} \end{array} \end{array}$$

4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

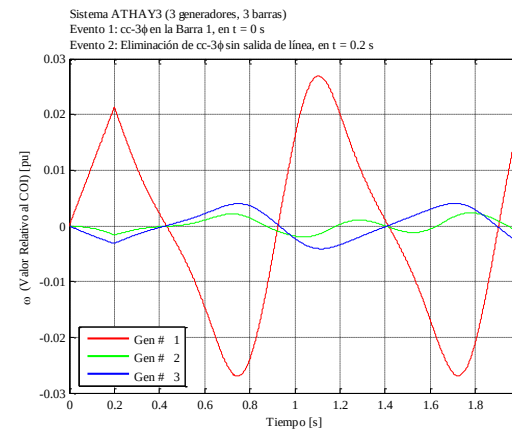
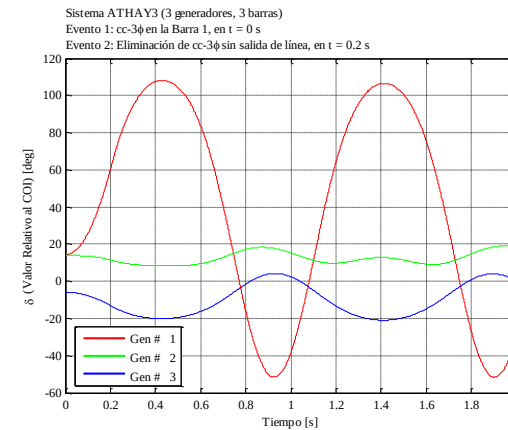
4.2.1 Sistema ATHAY3

**** Caso 1 ****



b) Simulación en el Dominio del Tiempo

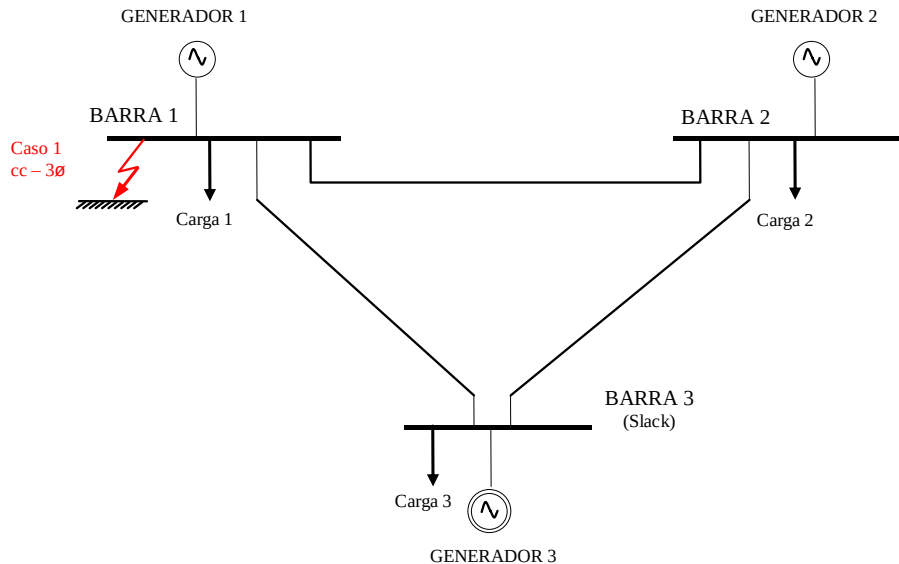
Tiempo de Eliminación $t_{cl1} = 0.20$ s.



4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

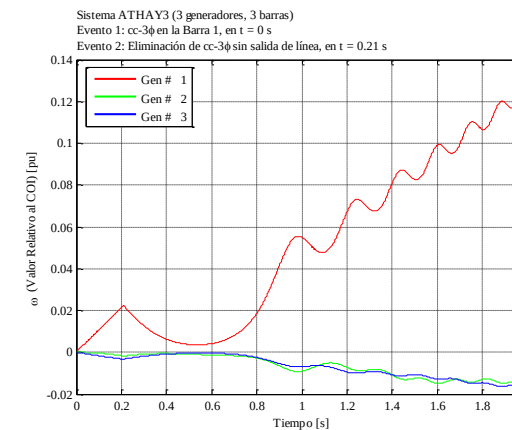
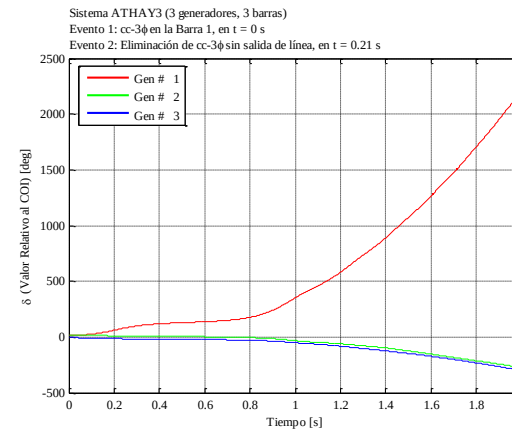
4.2.1 Sistema ATHAY3

**** Caso 1 ****



b) Simulación en el Dominio del Tiempo

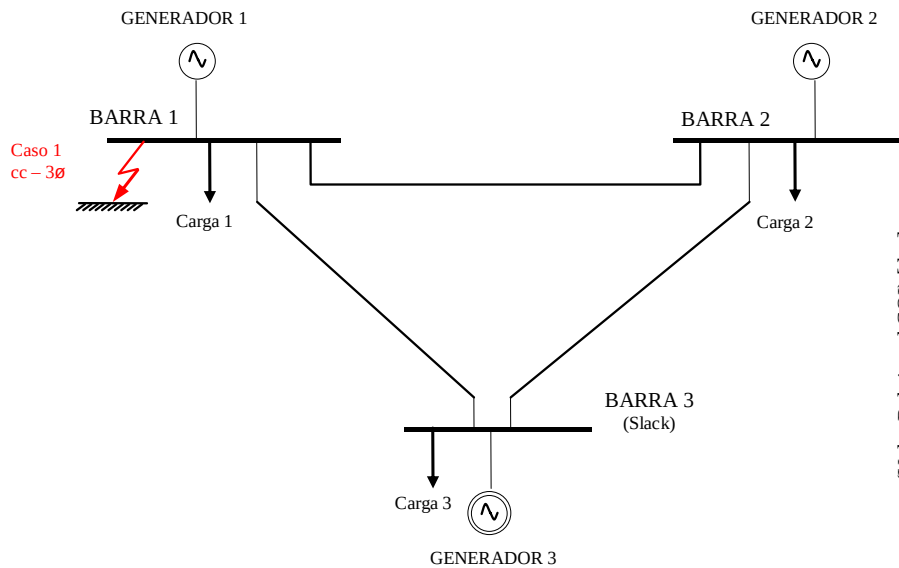
Tiempo de Eliminación $t_{cl2} = 0.21$ s.



4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

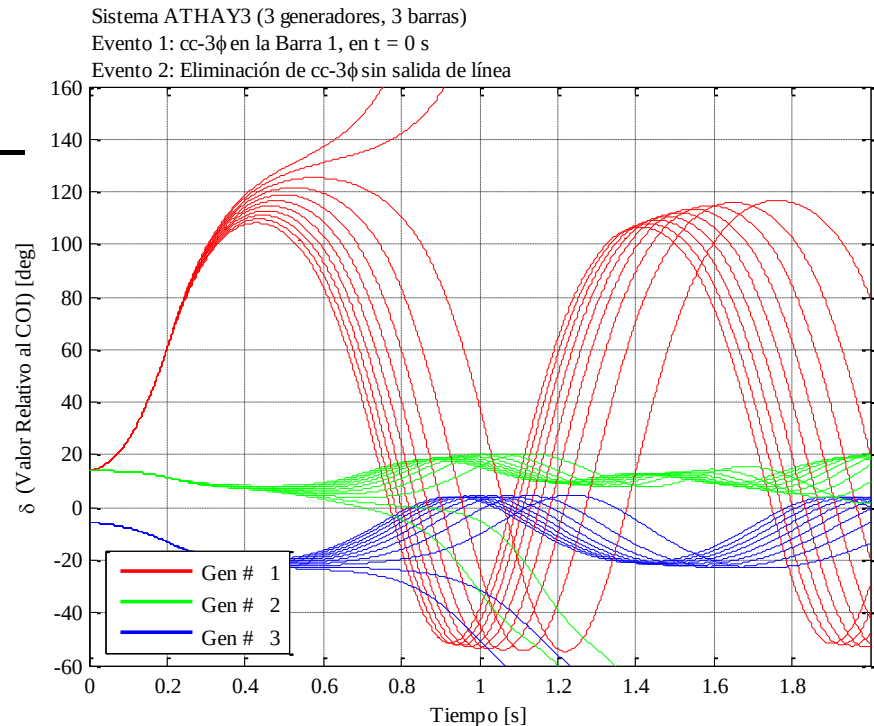
4.2.1 Sistema ATHAY3

** Caso 1 **



b) Simulación en el Dominio del Tiempo

Cálculo de Tiempo Crítico

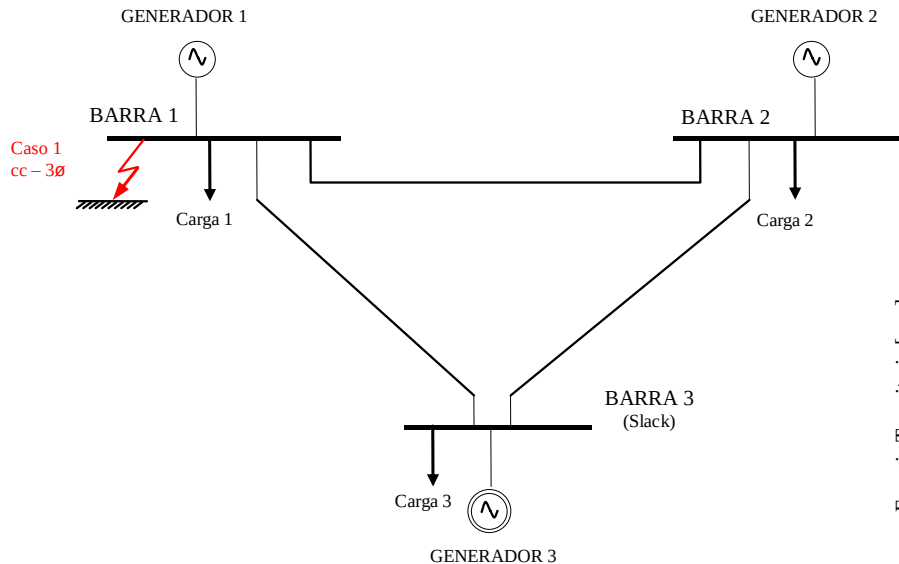


t_{cr} está entre 0.208 (estable) – 0.209 (inestable).

4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.1 Sistema ATHAY3

** Caso 1 **



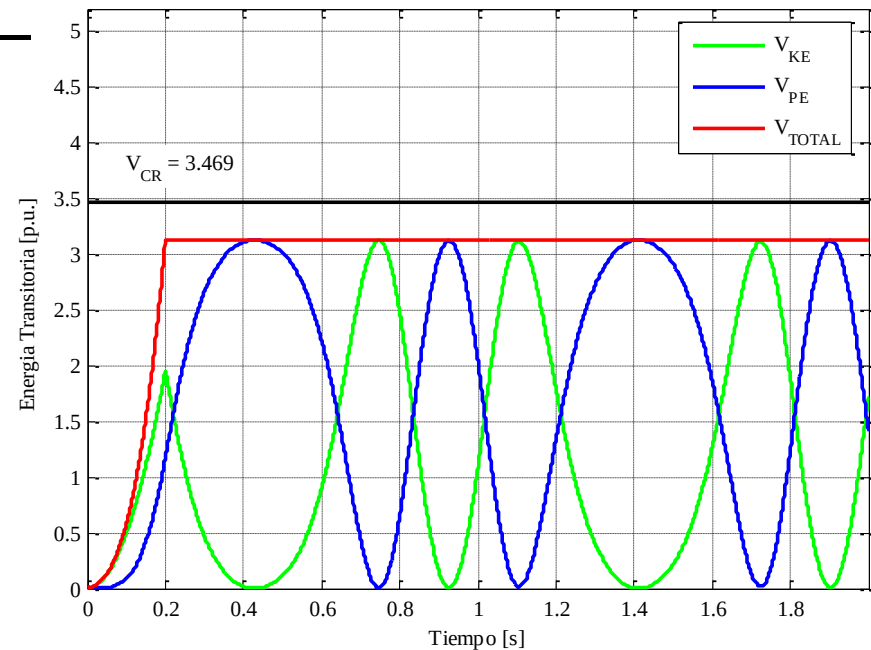
c) Funciones de Energía Transitoria

Tiempo de Eliminación $t_{cl1} = 0.20$ s.

Sistema ATHAY3 (3 generadores, 3 barras)

Evento 1: cc-3 ϕ en la Barra 1, en $t = 0$ s

Evento 2: Eliminación de cc-3 ϕ sin salida de línea, en $t = 0.2$ s



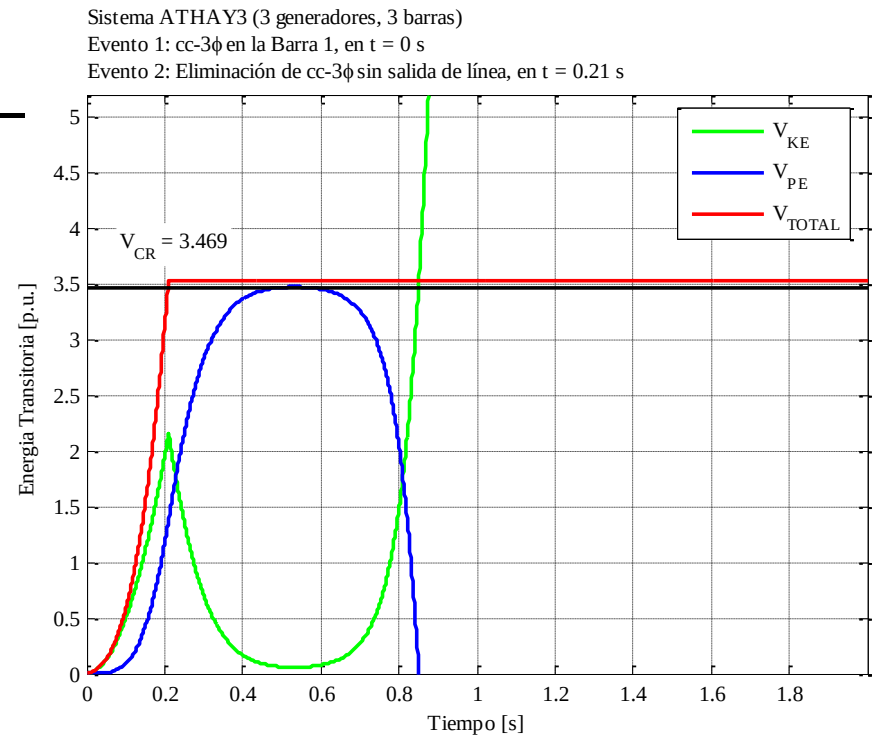
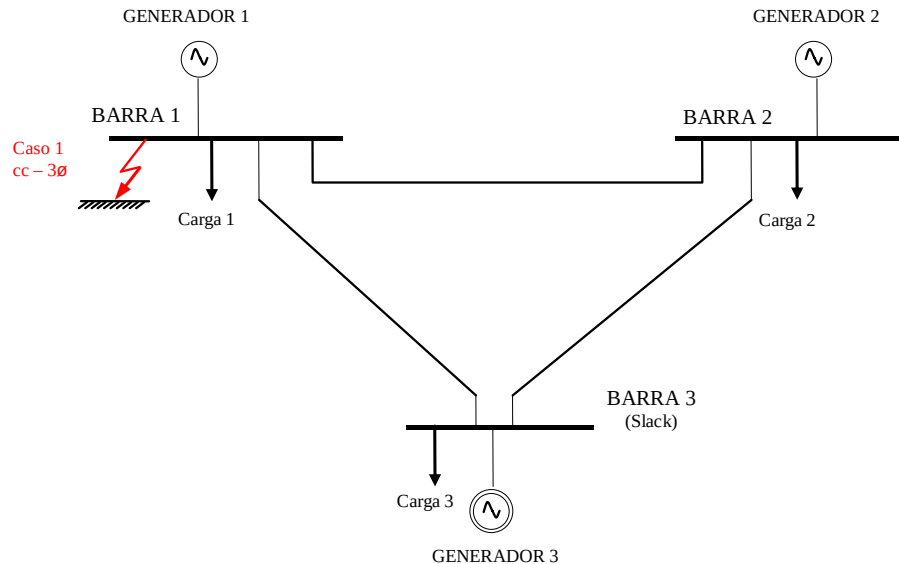
4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.1 Sistema ATHAY3

** Caso 1 **

c) Funciones de Energía Transitoria

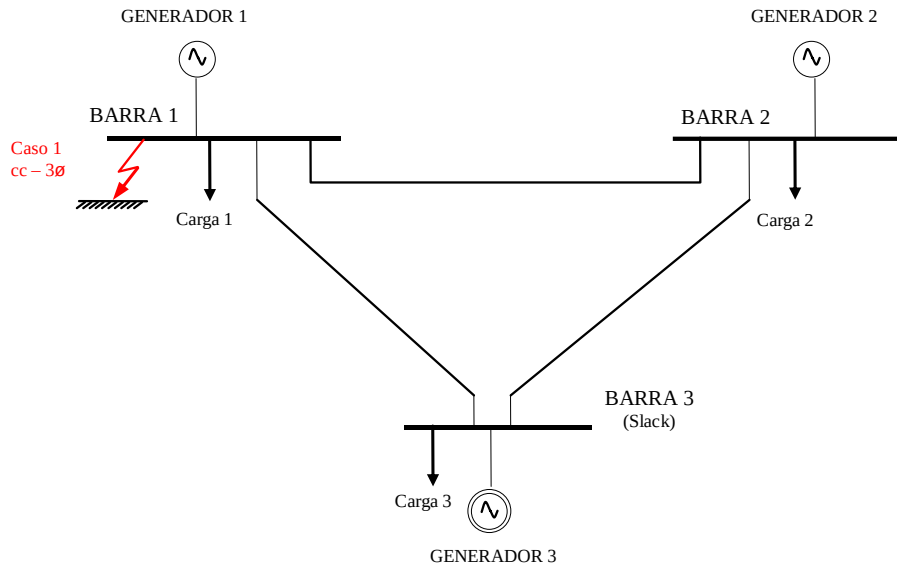
Tiempo de Eliminación $t_{cl2} = 0.21$ s.



4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.1 Sistema ATHAY3

** Caso 1 **



Márgenes de Energía Transitoria

Identificación de Generador	# Barra	$t_{cl} = 0.20$		$t_{cl} = 0.21$		$t_{ex} = 0.32$	
		θ_i^{cl} (rad)	θ_i^{cl} (deg)	θ_i^{cl} (rad)	θ_i^{cl} (deg)	θ_i^{ex} (rad)	θ_i^{ex} (deg)
1	1	1.0520	60.27	1.1340	65.00	2.3180	132.83
2	2	0.2020	11.56	0.1950	11.18	0.0680	3.91
3	3	-0.2260	-12.94	-0.2380	-13.63	-0.4030	-23.12

$V(\theta) =$	3.128 p.u.	3.532 p.u.	3.469 p.u.
$\Delta MET =$	0.342 p.u.	-0.063 p.u.	

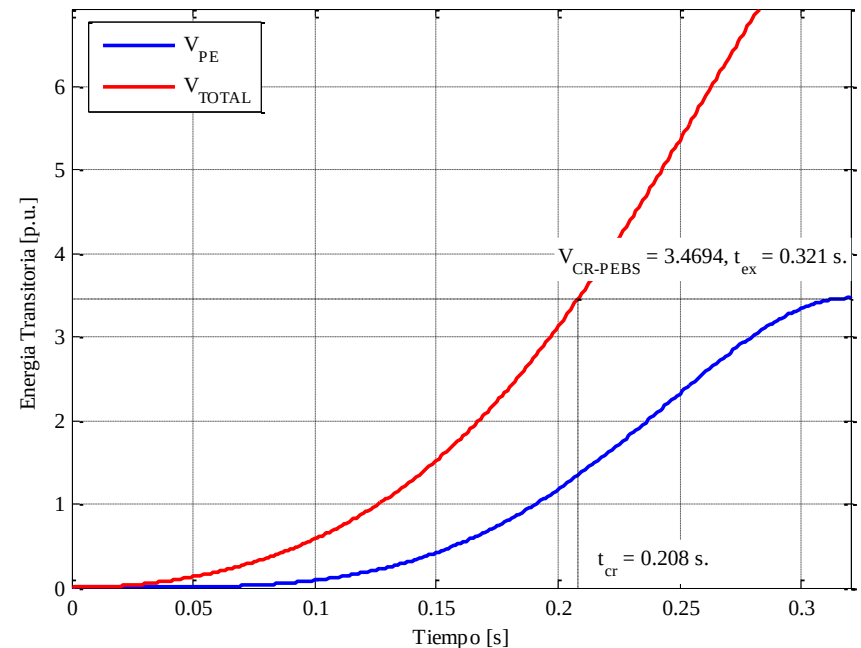
d) Método Directo basado en FET

Método PEBS

Sistema ATHAY3 (3 generadores, 3 barras)

Evento 1: cc-3  en la Barra 1, en $t = 0$ s

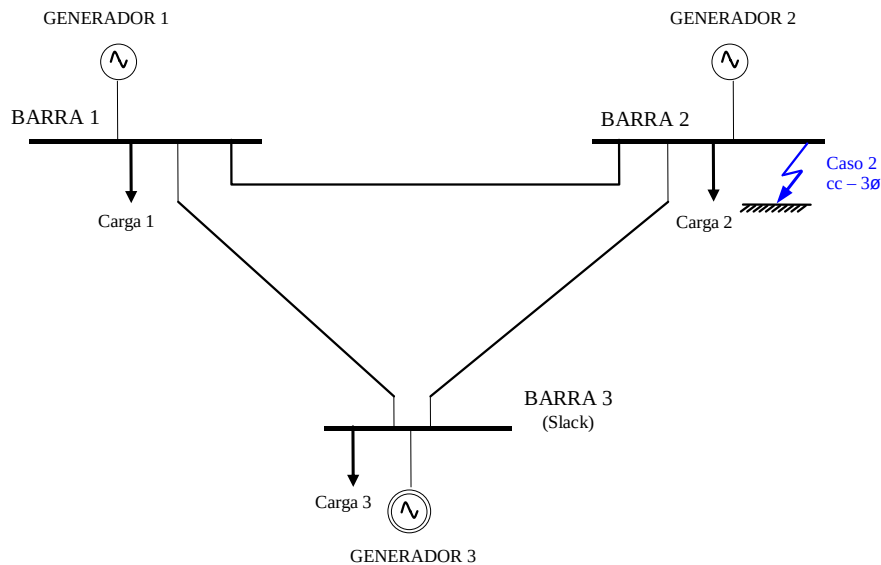
Evento 2: Eliminación de cc-3  sin salida de línea



4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

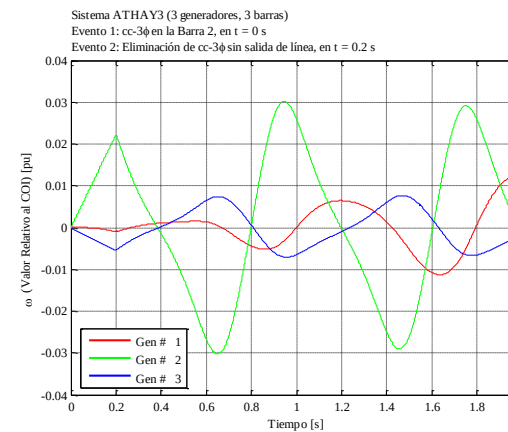
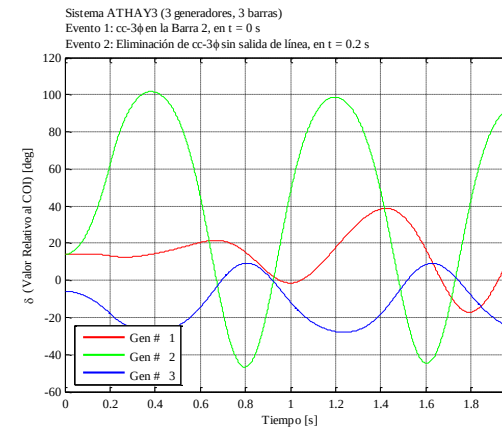
4.2.1 Sistema ATHAY3

**** Caso 2 ****



b) Simulación en el Dominio del Tiempo

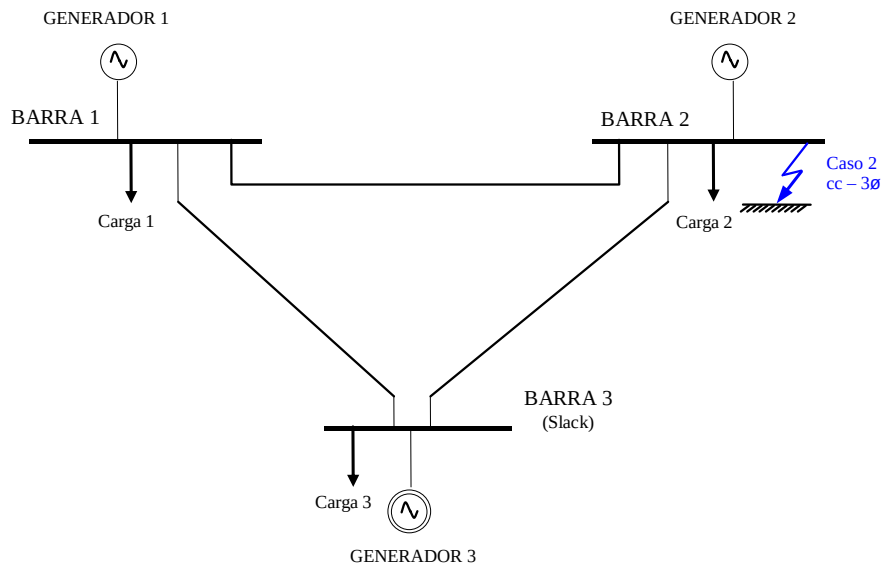
Tiempo de Eliminación $t_{cl1} = 0.20$ s.



4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

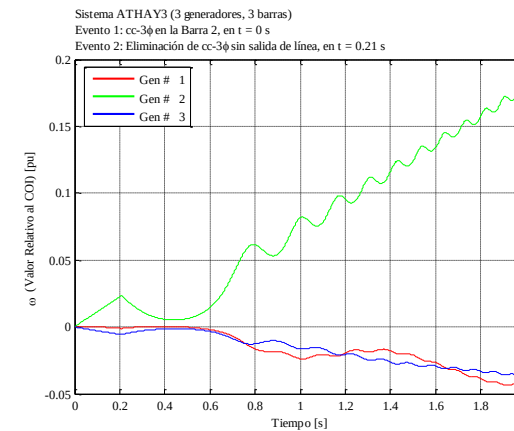
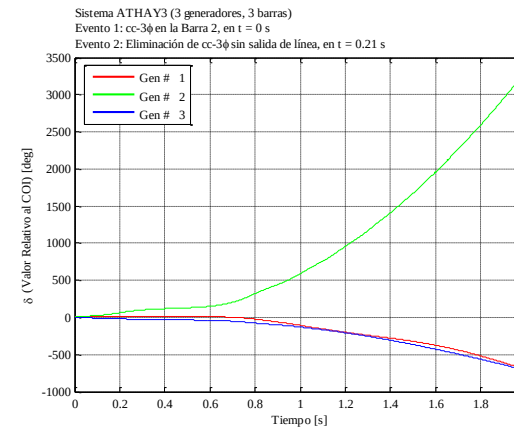
4.2.1 Sistema ATHAY3

** Caso 2 **



b) Simulación en el Dominio del Tiempo

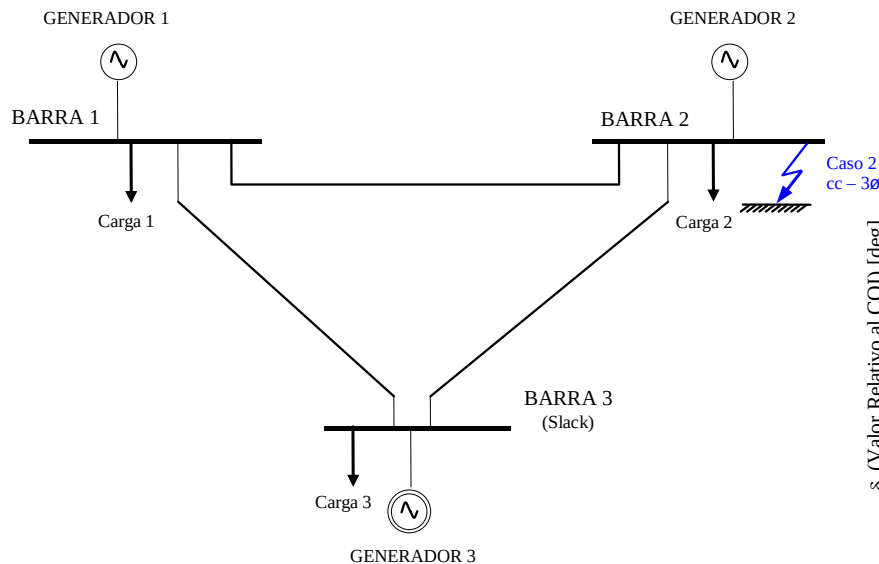
Tiempo de Eliminación $t_{cl2} = 0.21 \text{ s}$.



4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

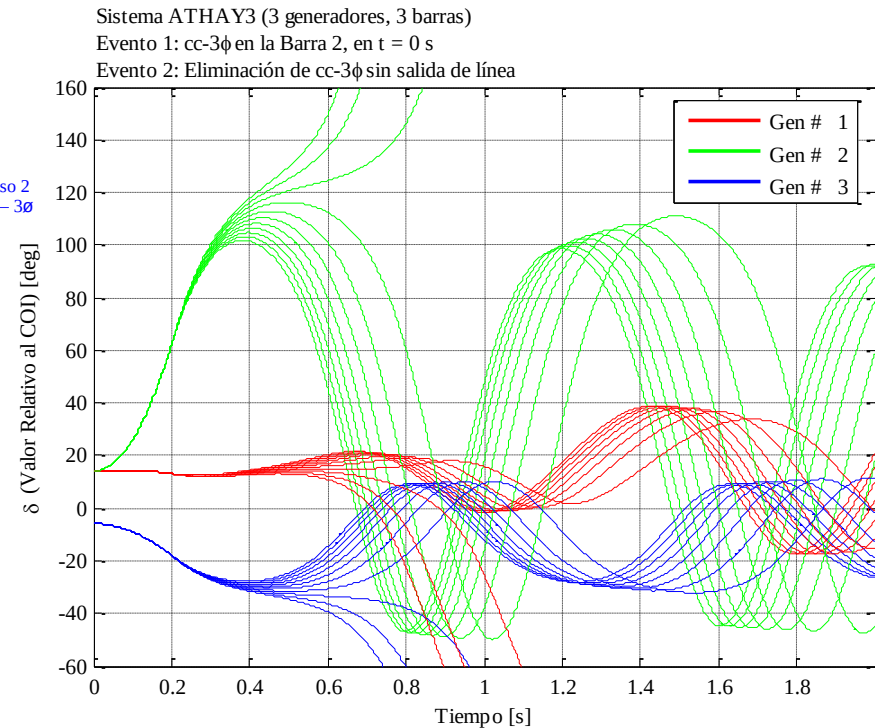
4.2.1 Sistema ATHAY3

** Caso 2 **



b) Simulación en el Dominio del Tiempo

Cálculo de Tiempo Crítico

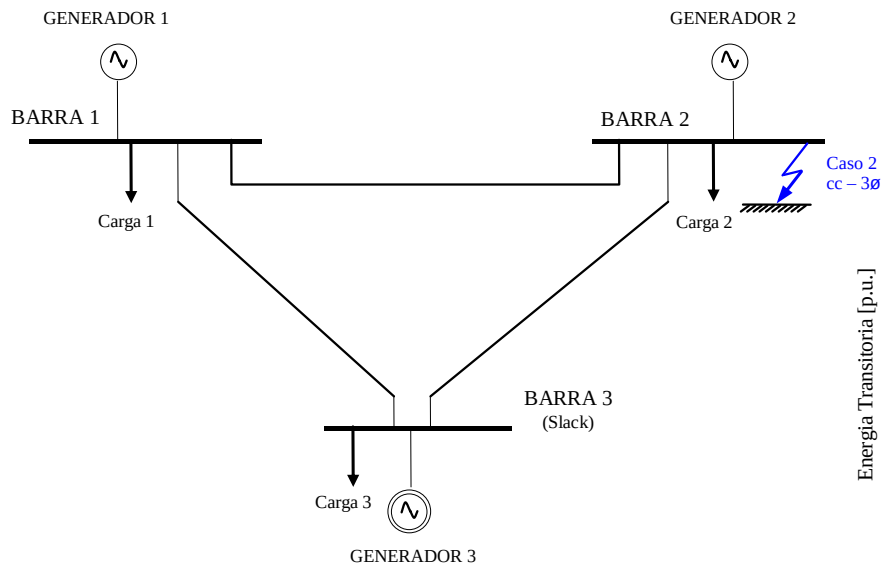


t_{cr} está entre 0.207 (estable) – 0.208 (inestable).

4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.1 Sistema ATHAY3

** Caso 2 **



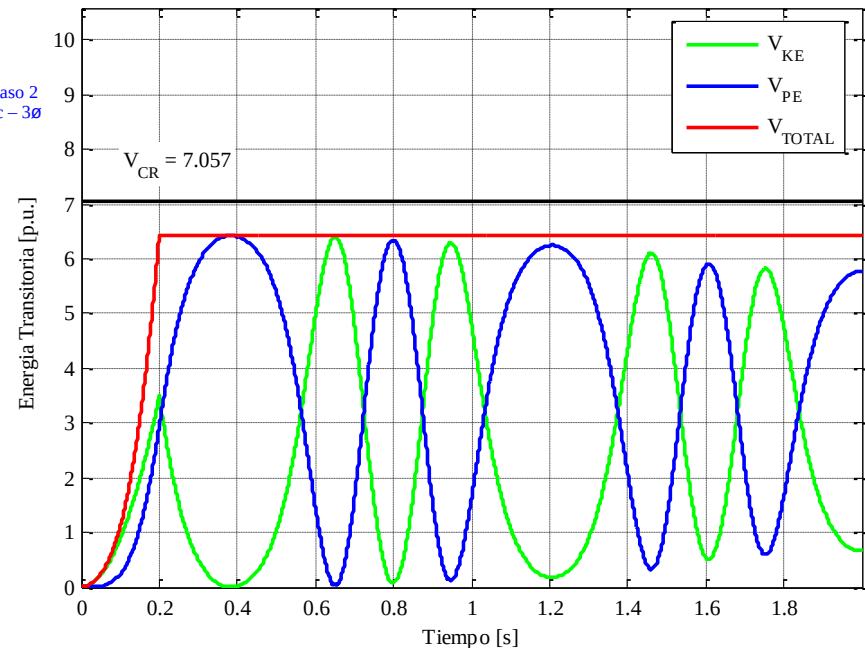
c) Funciones de Energía Transitoria

Tiempo de Eliminación $t_{cl1} = 0.20$ s.

Sistema ATHAY3 (3 generadores, 3 barras)

Evento 1: cc-3φ en la Barra 2, en $t = 0$ s

Evento 2: Eliminación de cc-3φ sin salida de línea, en $t = 0.2$ s



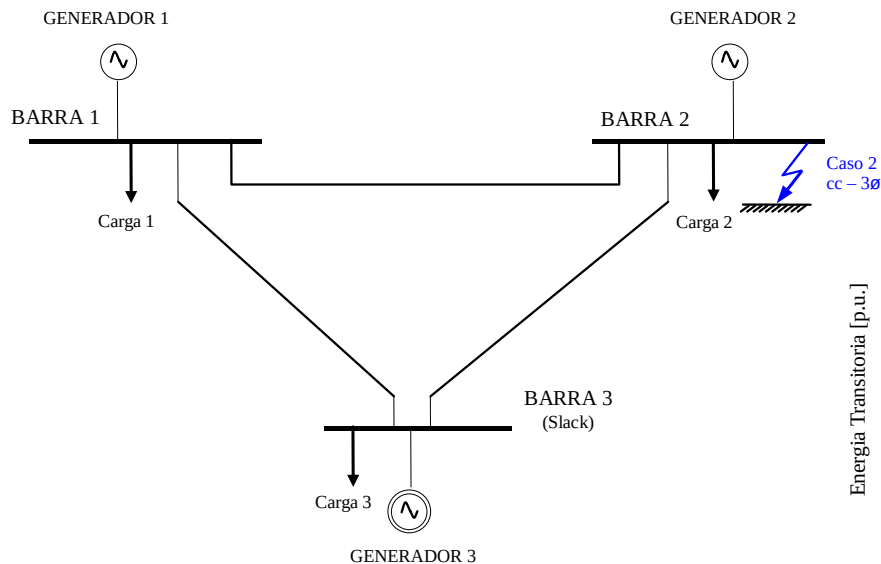
4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.1 Sistema ATHAY3

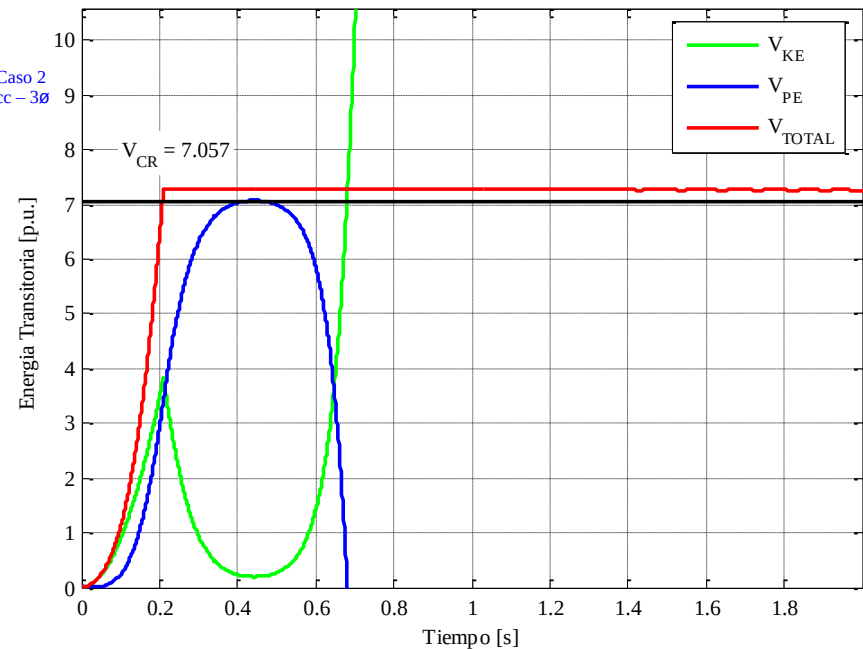
** Caso 2 **

c) Funciones de Energía Transitoria

Tiempo de Eliminación $t_{cl2} = 0.21 \text{ s}$.



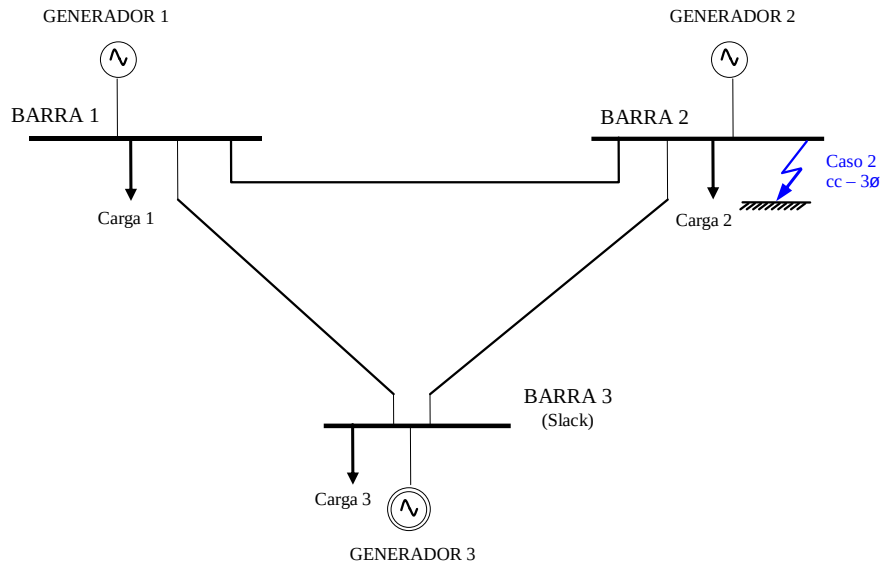
Sistema ATHAY3 (3 generadores, 3 barras)
 Evento 1: cc-3φ en la Barra 2, en t = 0 s
 Evento 2: Eliminación de cc-3φ sin salida de línea, en t = 0.21 s



4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.1 Sistema ATHAY3

** Caso 2 **



Márgenes de Energía Transitoria

Identificación de Generador		$t_{cl} = 0.20$		$t_{cl} = 0.21$		$t_{ex} = 0.30$	
		θ_i^{cl}	θ_i^{cl}	θ_i^{cl}	θ_i^{cl}	θ_i^{ex}	θ_i^{ex}
i	# Barra	(rad)	(deg)	(rad)	(deg)	(rad)	(deg)
1	1	0.2310	13.23	0.2270	12.99	0.1530	8.75
2	2	1.0850	62.19	1.1720	67.13	2.1620	123.87
3	3	-0.3100	-17.75	-0.3310	-18.95	-0.5660	-32.43
$V(\mathbf{0}) =$		6.425 p.u.		7.267 p.u.		7.057 p.u.	
$\Delta MET =$		0.632 p.u.		-0.210 p.u.			

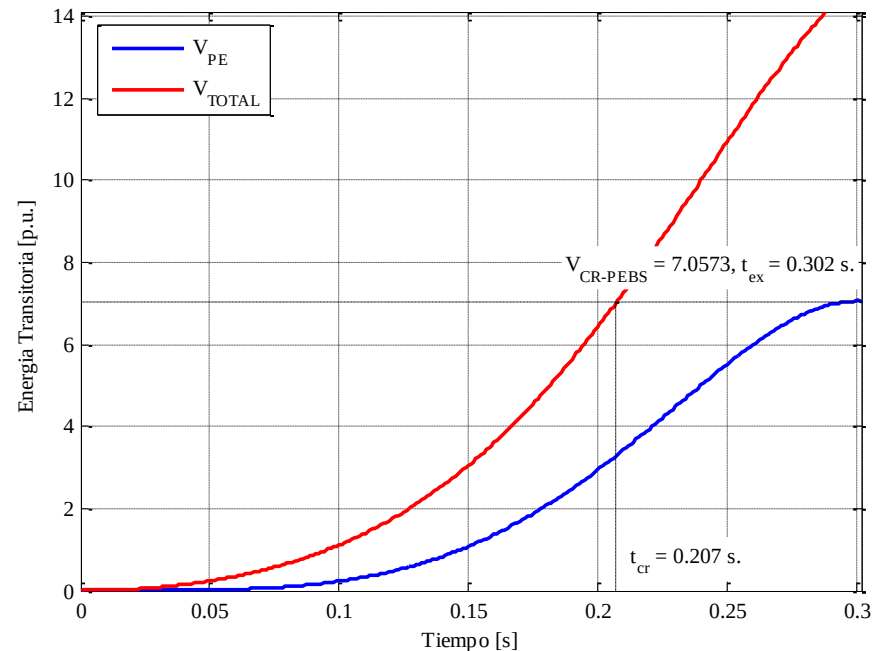
d) Método Directo basado en FET

Método PEBS

Sistema ATHAY3 (3 generadores, 3 barras)

Evento 1: cc-3φ en la Barra 2, en $t = 0$ s

Evento 2: Eliminación de cc-3φ sin salida de línea



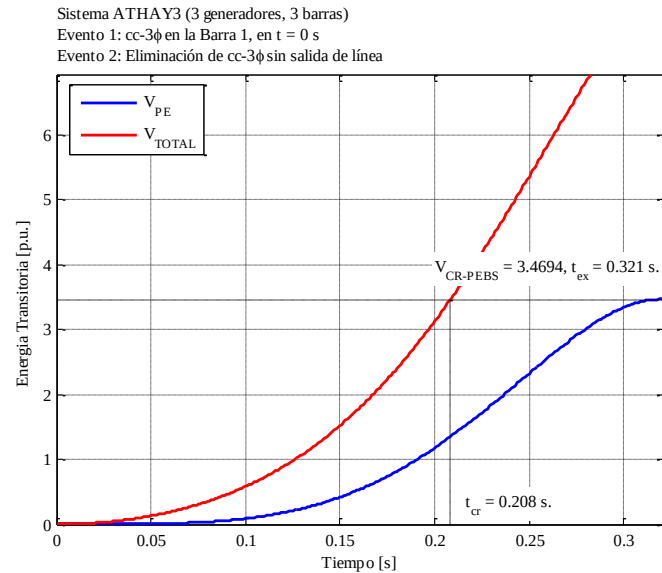
4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.1 Sistema ATHAY3

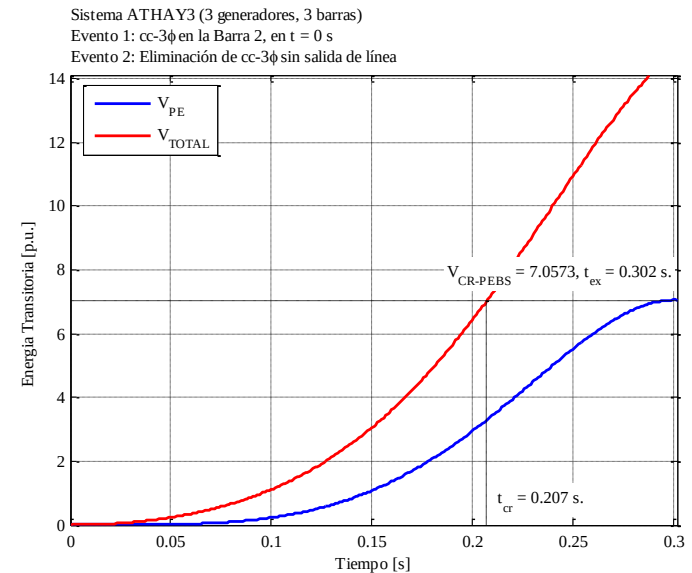
d) Método Directo basado en FET

Comparación de Energías Críticas

Caso 1



Caso 2



Márgenes de Energía Transitoria

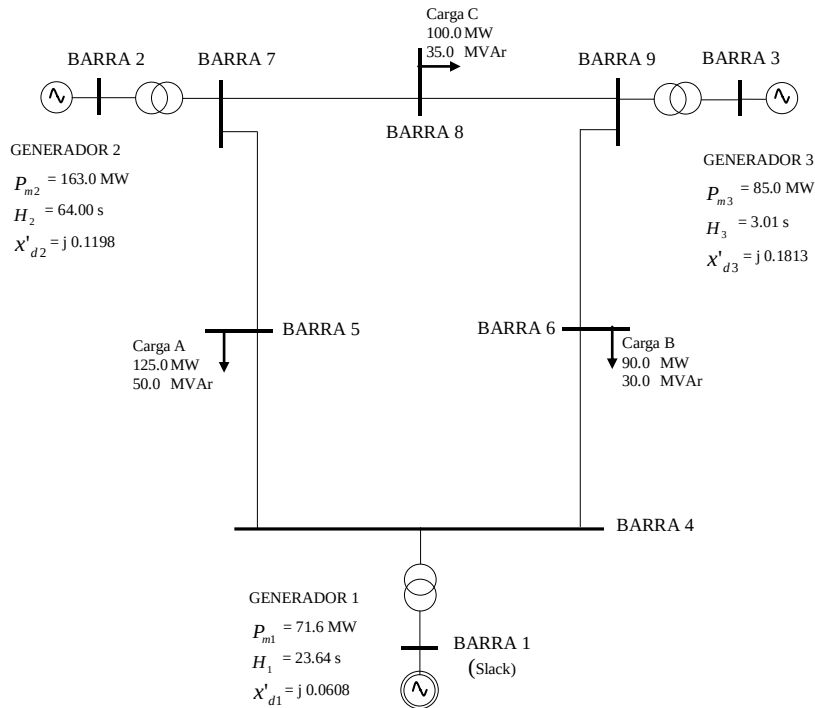
Identificación de Generador		$t_{cl} = 0.20$		$t_{cl} = 0.21$		$t_{ex} = 0.32$	
		θ_i^{cl}		θ_i^{cl}		θ_i^{ex}	
i	# Barra	(rad)	(deg)	(rad)	(deg)	(rad)	(deg)
1	1	1.0520	60.27	1.1340	65.00	2.3180	132.83
2	2	0.2020	11.56	0.1950	11.18	0.0680	3.91
3	3	-0.2260	-12.94	-0.2380	-13.63	-0.4030	-23.12
$V(\theta) =$		3.128 p.u.		3.532 p.u.		3.469 p.u.	
$\Delta MET =$		0.342 p.u.		-0.063 p.u.			

Identificación de Generador		$t_{cl} = 0.20$		$t_{cl} = 0.21$		$t_{ex} = 0.30$	
		θ_i^{cl}		θ_i^{cl}		θ_i^{ex}	
i	# Barra	(rad)	(deg)	(rad)	(deg)	(rad)	(deg)
1	1	0.2310	13.23	0.2270	12.99	0.1530	8.75
2	2	1.0850	62.19	1.1720	67.13	2.1620	123.87
3	3	-0.3100	-17.75	-0.3310	-18.95	-0.5660	-32.43
$V(\theta) =$		6.425 p.u.		7.267 p.u.		7.057 p.u.	
$\Delta MET =$		0.632 p.u.		-0.210 p.u.			

4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.2 Sistema WSCC3

3 Generadores, 9 Barras, 9 Ramos



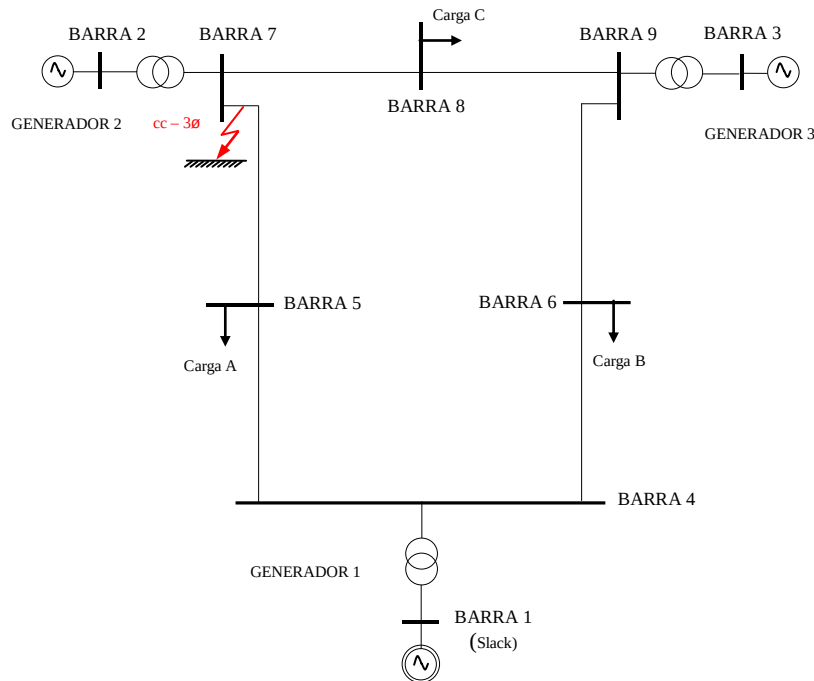
a) Preparación de datos y Cálculos Preliminares

Flujo de Carga pre-falla

				MW		MVAr			
Total Pérdidas :				4.64		-92.16			
Identificación de Barra			Tensión en Barra		Generación (+)		Shunt (+)	Carga (-)	
			Módulo (p.u.)	Ángulo (deg)	P (MW)	Q (MVAr)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (p.u.)
#	Nombre	Tipo							
1	BUS 1	SL	1.0400	0.00	71.64	27.05	0	0.00	0.00
2	BUS 2	PV	1.0250	9.28	163.00	6.65	0	0.00	0.00
3	BUS 3	PV	1.0250	4.67	85.00	-10.86	0	0.00	0.00
4	BUS 4	PQ	1.0258	-2.22	0.00	0.00	0	0.00	0.00
5	BUS 5	PQ	0.9956	-3.99	0.00	0.00	0	125.00	50.00
6	BUS 6	PQ	1.0127	-3.69	0.00	0.00	0	90.00	30.00
7	BUS 7	PQ	1.0258	3.72	0.00	0.00	0	0.00	0.00
8	BUS 8	PQ	1.0159	0.73	0.00	0.00	0	100.00	35.00
9	BUS 9	PQ	1.0324	1.97	0.00	0.00	0	0.00	0.00
Total :					319.64	22.84	0.00	315.00	115.00

4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.2 Sistema WSCC3



b) Simulación en el Dominio del Tiempo

Descripción de Casos

Caso

- Evento 1 en $t = 0$: Cortocircuito trifásico en la línea 5-7 próximo a Barra 7
- Evento 2 en $t = t_{cl}$: Eliminación de falla al abrir línea 5-7 en $t_{cl} = 0.0833$ s. (5 ciclos)

Matrices de Admitancia de Barra

Reducidas a Nodos Internos

$$Y_{\text{red pre-falla}} = \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} & \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0.8455 - j2.9883 & 0.2871 + j1.5129 & 0.2096 + j1.2256 \\ \hline 0.2871 + j1.5129 & 0.4200 - j2.7239 & 0.2133 + j1.0879 \\ \hline 0.2096 + j1.2256 & 0.2133 + j1.0879 & 0.2770 - j2.3681 \\ \hline \end{array} \end{array} \end{array}$$

$$Y_{\text{red en falla}} = \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} & \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0.6568 - j3.8160 & 0.0000 - j0.0000 & 0.0701 + j0.6306 \\ \hline 0.0000 - j0.0000 & 0.0000 - j5.4855 & 0.0000 - j0.0000 \\ \hline 0.0701 + j0.6306 & 0.0000 - j0.0000 & 0.1740 - j2.7959 \\ \hline \end{array} \end{array} \end{array}$$

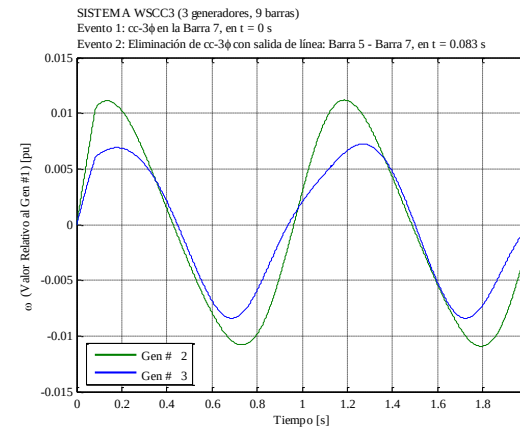
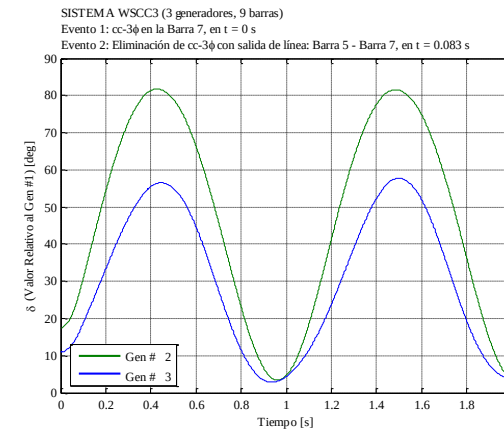
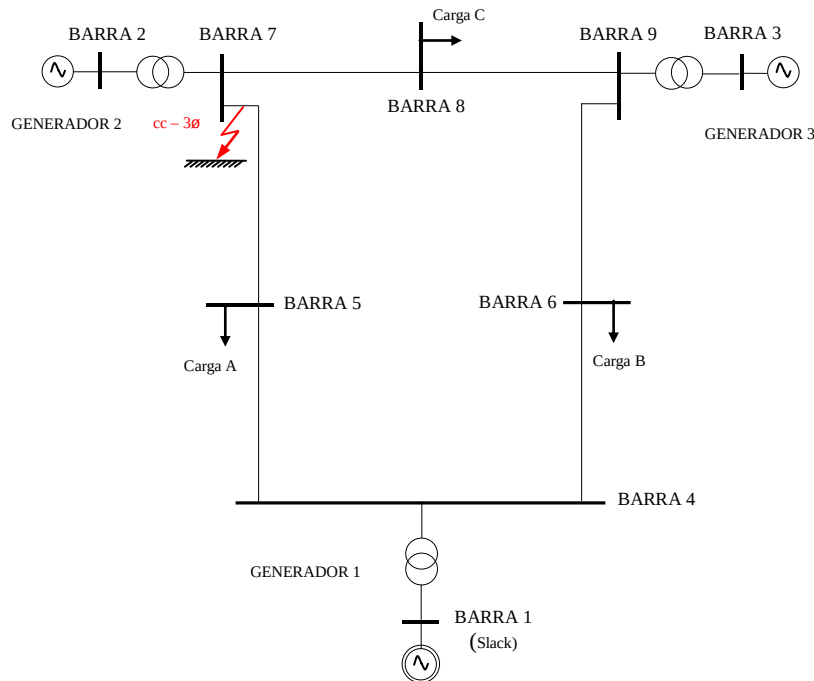
$$Y_{\text{red post-falla}} = \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} & \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1.1814 - j2.2288 & 0.1376 + j0.7264 & 0.1910 + j1.0794 \\ \hline 0.1376 + j0.7264 & 0.3886 - j1.9526 & 0.1988 + j1.2293 \\ \hline 0.1910 + j1.0794 & 0.1988 + j1.2293 & 0.2727 - j2.3423 \\ \hline \end{array} \end{array} \end{array}$$

4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.2 Sistema WSCC3

b) Simulación en el Dominio del Tiempo

Tiempo de Eliminación $t_{cl} = 0.0833$ s. (5 ciclos)

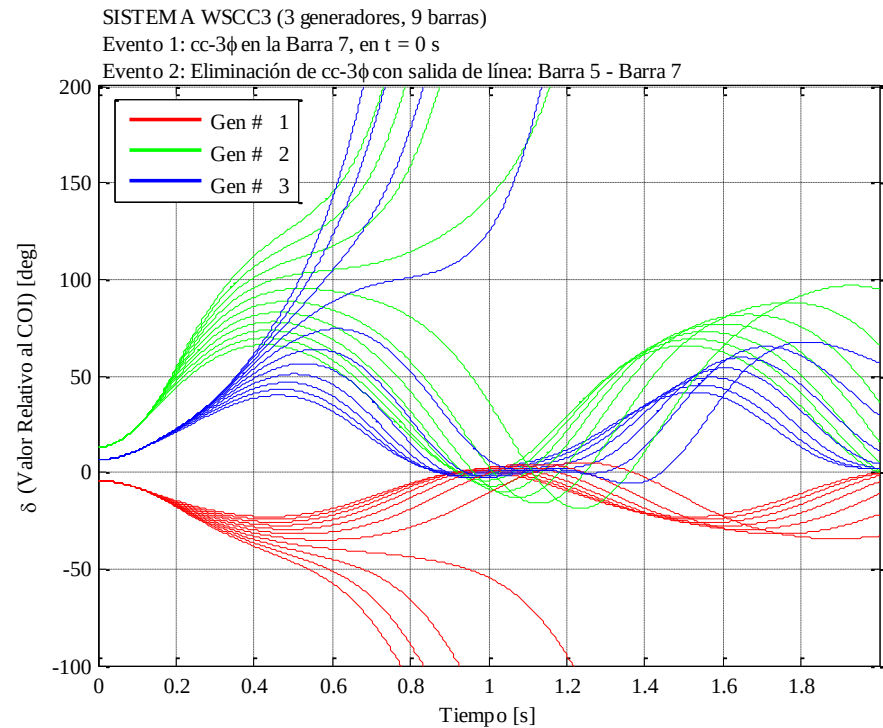
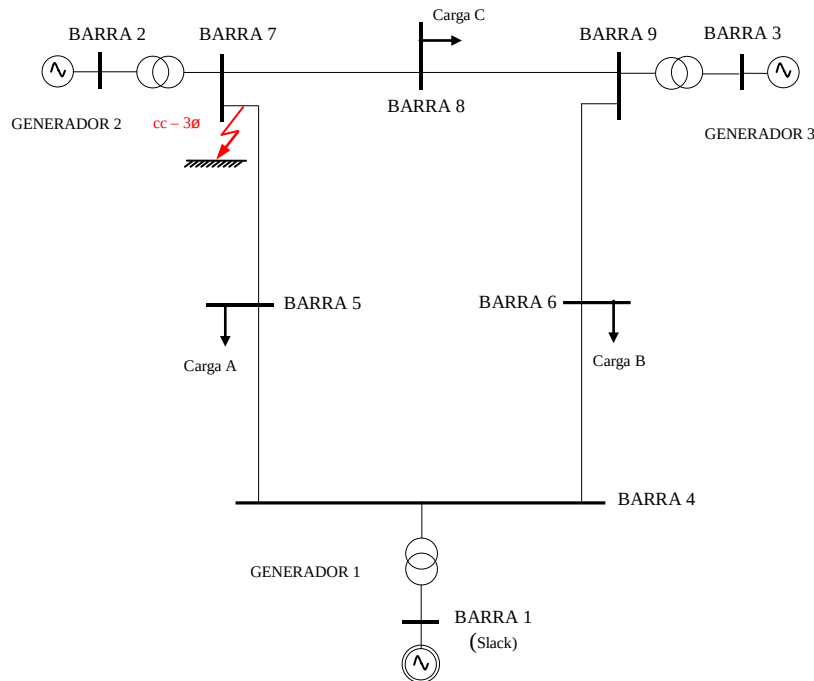


4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.2 Sistema WSCC3

b) Simulación en el Dominio del Tiempo

Cálculo de Tiempo Crítico



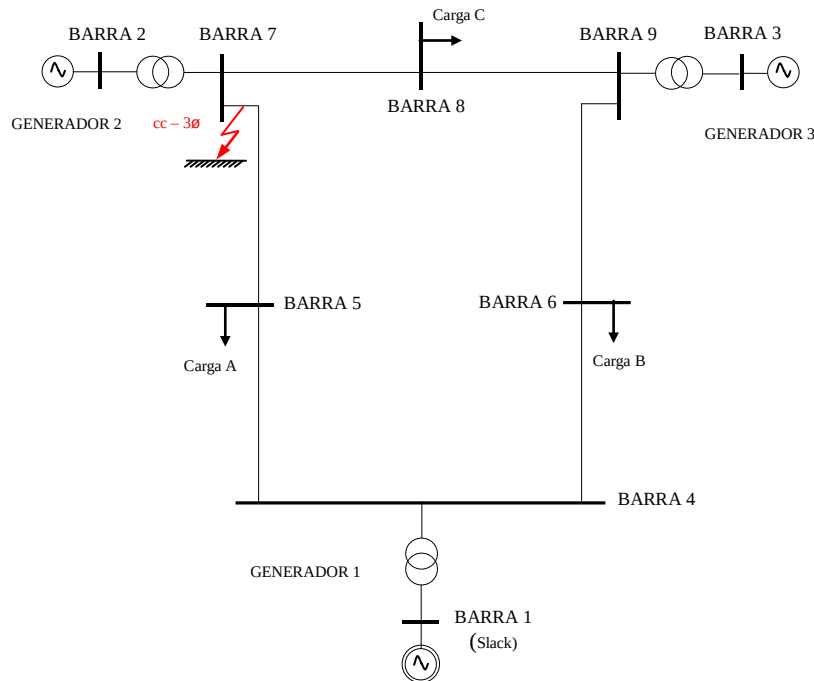
t_{cr} está entre 0.16 (estable) – 0.17 (inestable).

4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.2 Sistema WSCC3

c) Funciones de Energía Transitoria

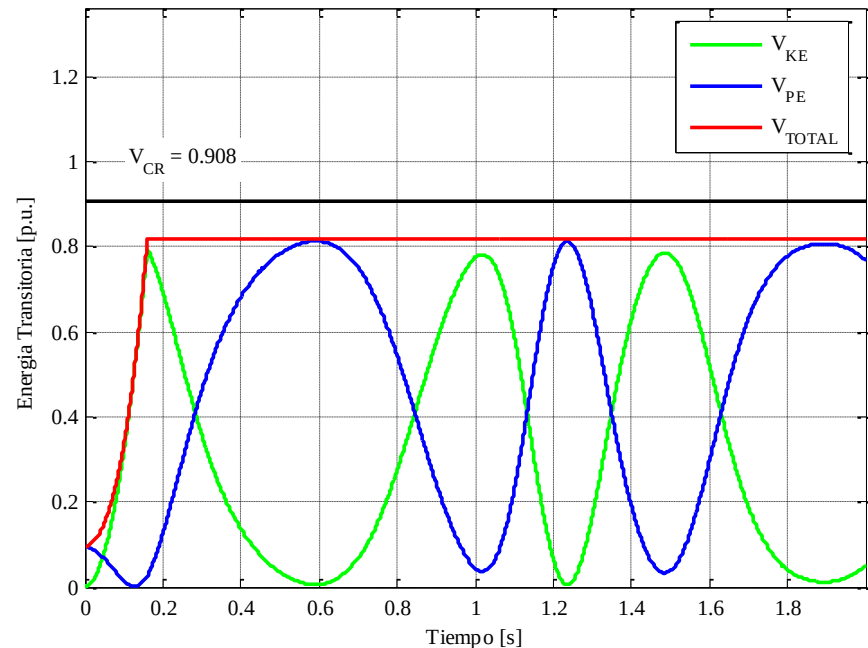
Tiempo de Eliminación $t_{cl1} = 0.16 \text{ s.}$ y $D'_i = 0 \text{ p.u.}$



SISTEMA WSCC3 (3 generadores, 9 barras)

Evento 1: cc-3φ en la Barra 7, en $t = 0 \text{ s}$

Evento 2: Eliminación de cc-3φ con salida de línea: Barra 5 - Barra 7, en $t = 0.16 \text{ s}$

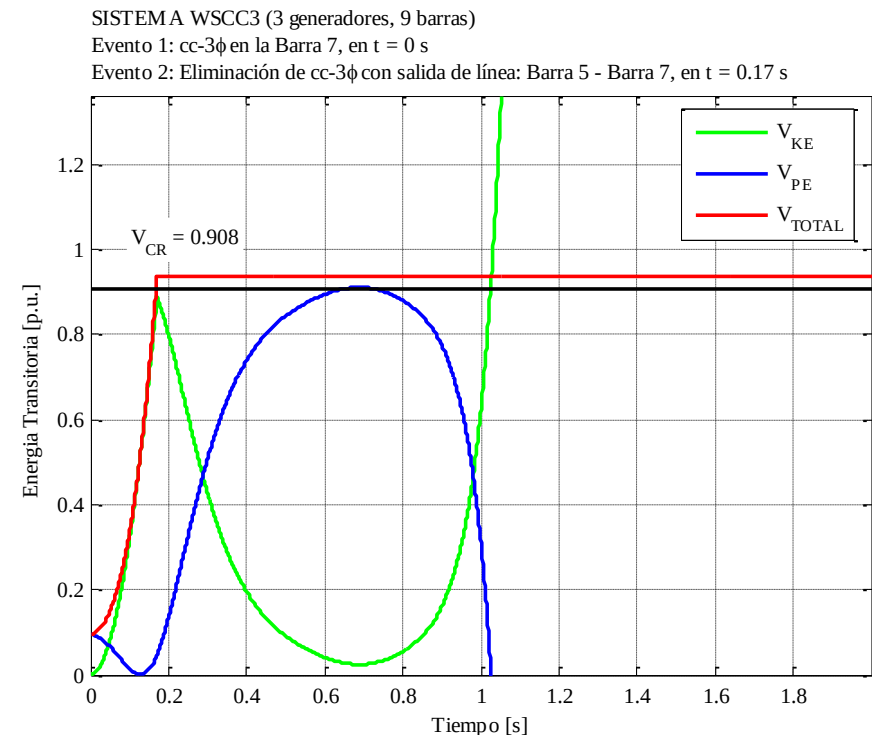
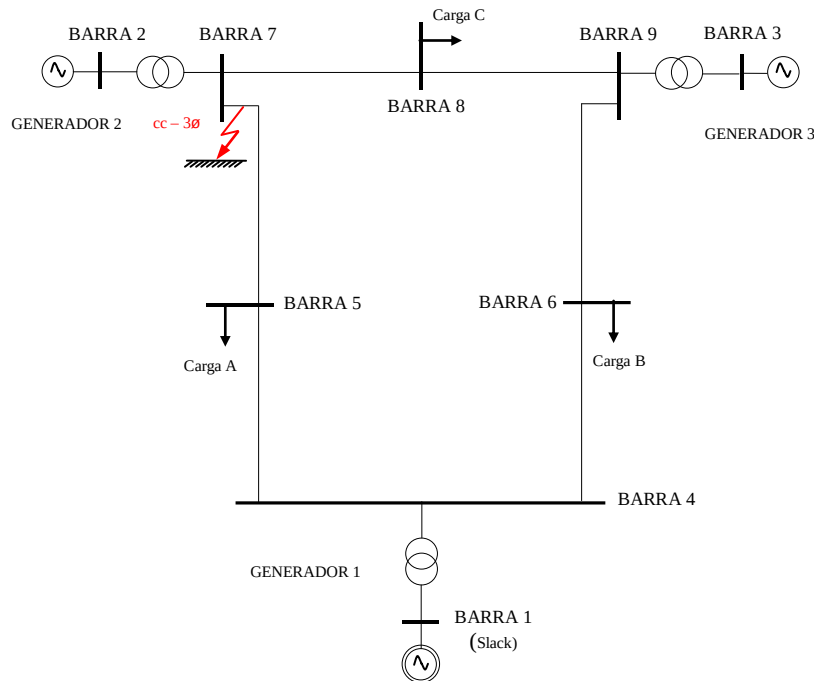


4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.2 Sistema WSCC3

c) Funciones de Energía Transitoria

Tiempo de Eliminación $t_{cl2} = 0.17$ s. y $D'_i = 0$ p.u.

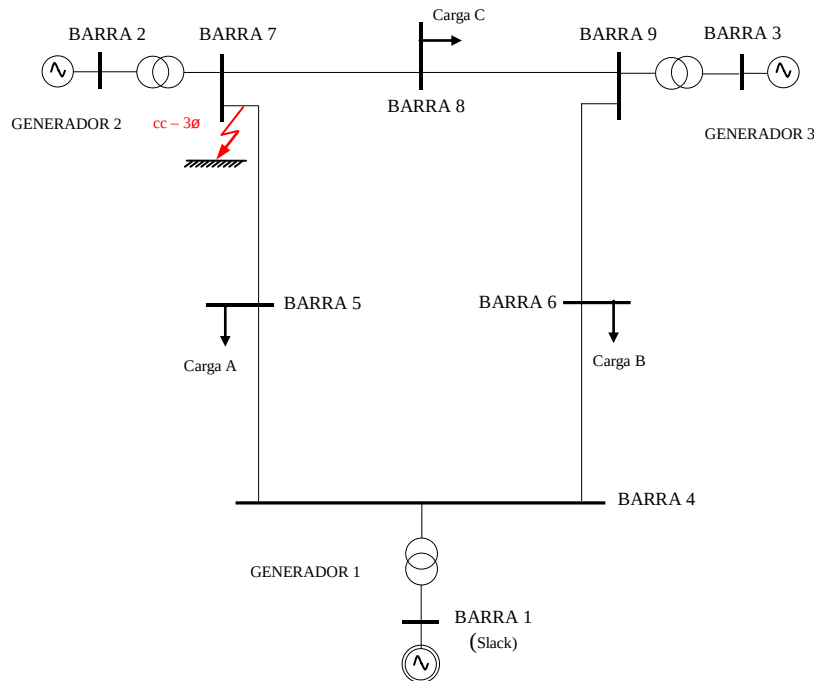


4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.2 Sistema WSCC3

c) Funciones de Energía Transitoria

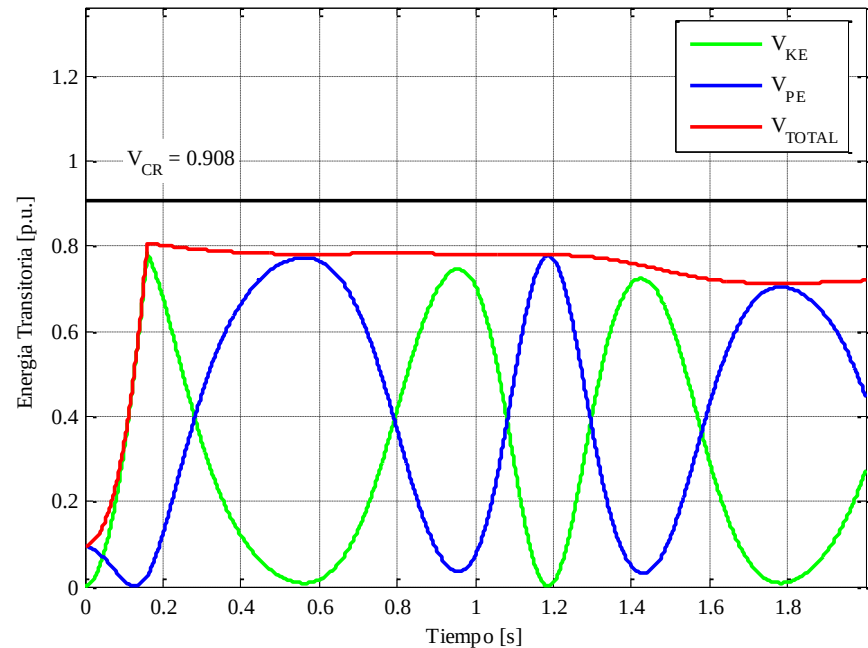
Tiempo de Eliminación $t_{cl1} = 0.16 \text{ s.}$ y $D'_i = 1 \text{ p.u.}$



SISTEMA WSCC3 (3 generadores, 9 barras)

Evento 1: cc-3φ en la Barra 7, en $t = 0 \text{ s}$

Evento 2: Eliminación de cc-3φ con salida de línea: Barra 5 - Barra 7, en $t = 0.16 \text{ s}$

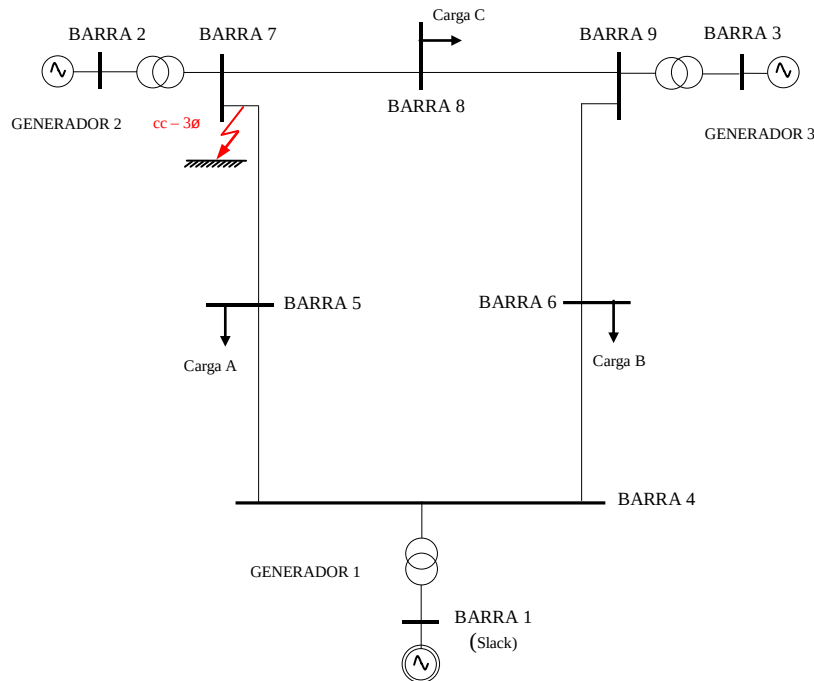


4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.2 Sistema WSCC3

c) Funciones de Energía Transitoria

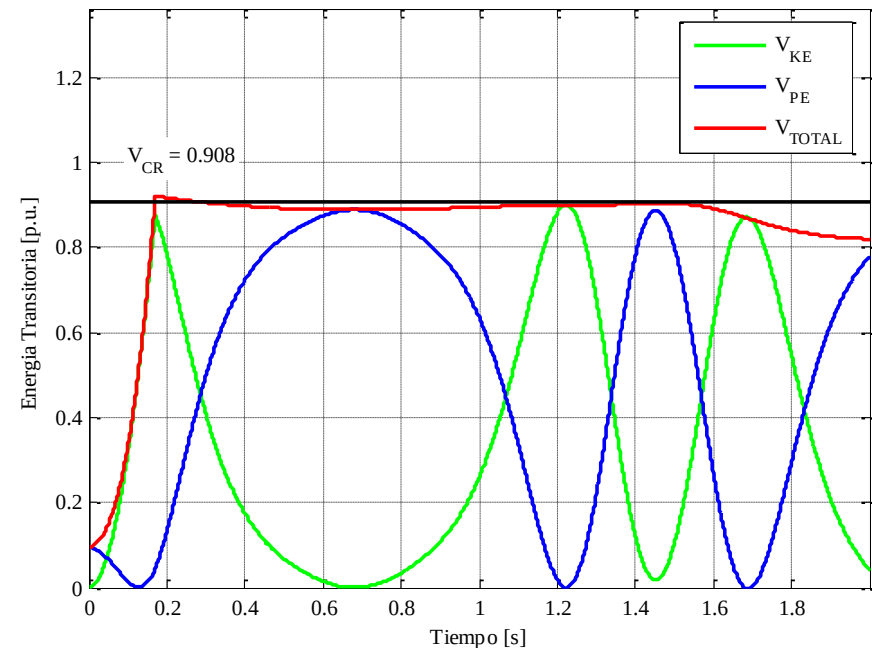
Tiempo de Eliminación $t_{cl2} = 0.17 \text{ s.}$ y $D'_i = 1 \text{ p.u.}$



SISTEMA WSCC3 (3 generadores, 9 barras)

Evento 1: cc-3φ en la Barra 7, en $t = 0 \text{ s}$

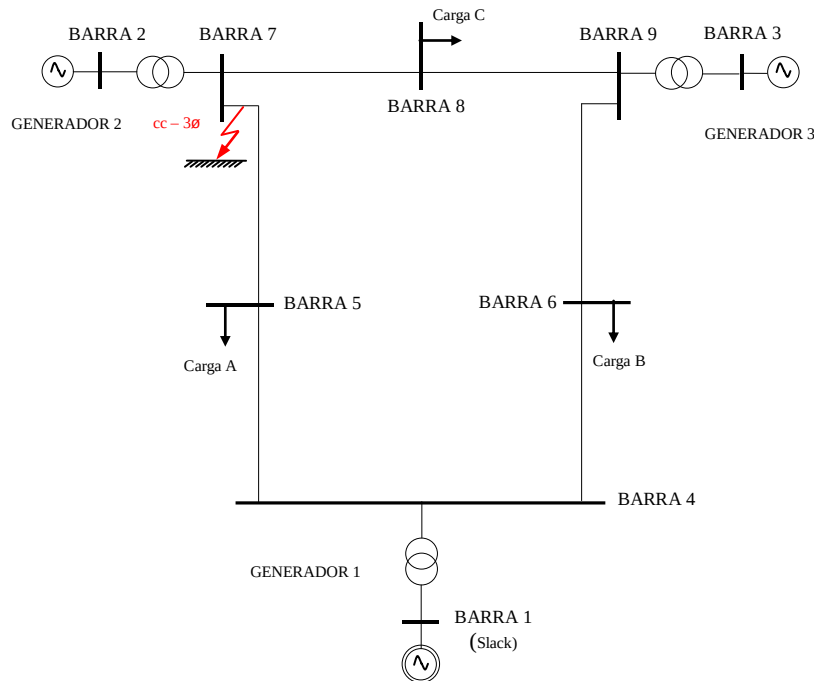
Evento 2: Eliminación de cc-3φ con salida de línea: Barra 5 - Barra 7, en $t = 0.17 \text{ s}$



4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.2 Sistema WSCC3

d) Método Directo basado en FET

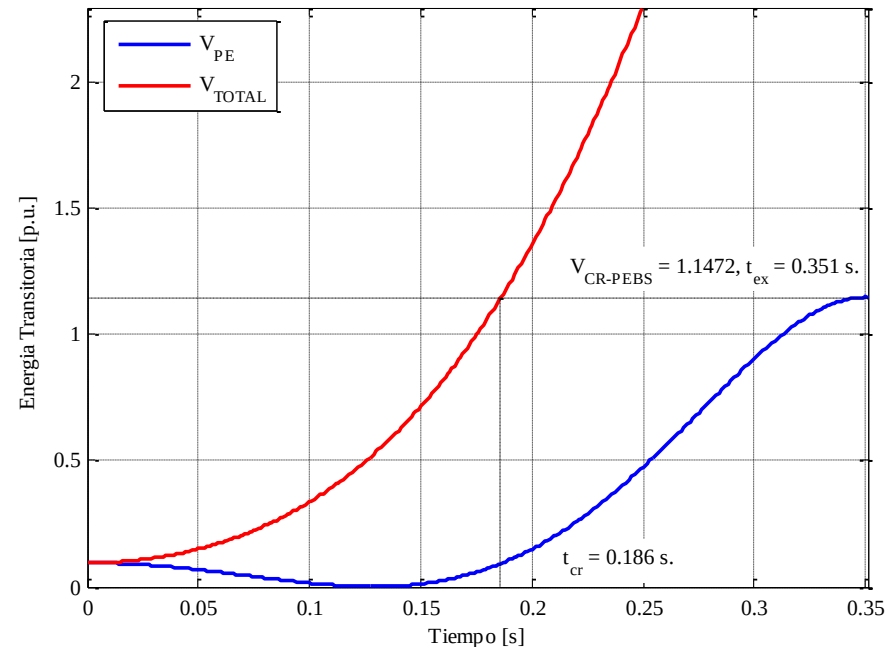


Método PEBS

SISTEMA WSCC3 (3 generadores, 9 barras)

Evento 1: cc-3φ en la Barra 7, en $t = 0$ s

Evento 2: Eliminación de cc-3φ con salida de línea: Barra 5 - Barra 7



4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.2 Sistema WSCC3

d) Método Directo basado en FET

Márgenes de Energía Transitoria

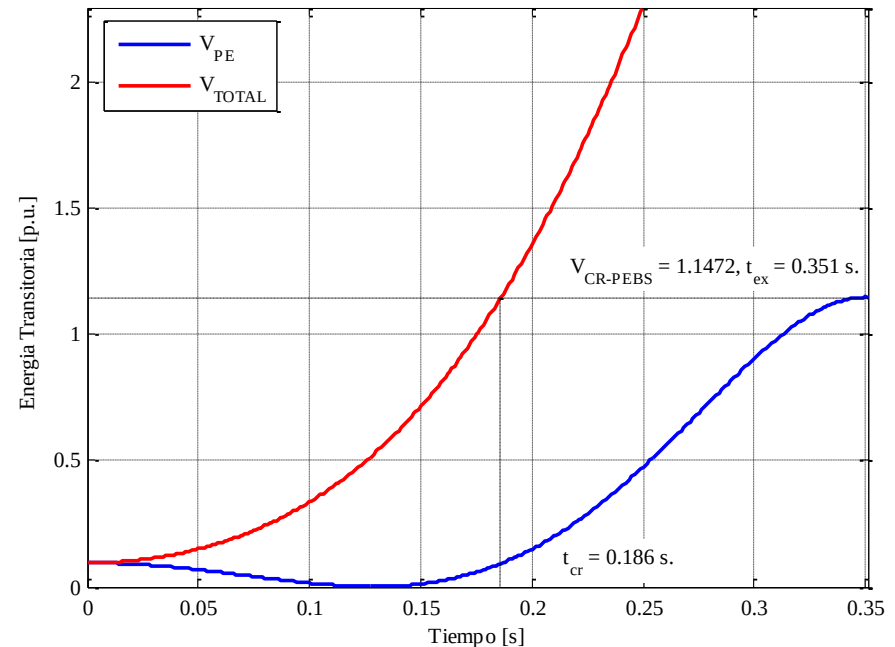
Identificación de Generador		$t_{cl} = 0.16$		$t_{cl} = 0.17$		$t_{ex} = 0.35$	
		θ_i^{cl}		θ_i^{cl}		θ_i^{ex}	
i	# Barra	(rad)	(deg)	(rad)	(deg)	(rad)	(deg)
1	1	-0.2240	-12.86	-0.2430	-13.93	-0.7370	-42.23
2	2	0.6870	39.35	0.7460	42.74	2.4300	139.22
3	3	0.3030	17.34	0.3230	18.50	0.6230	35.67
PEBS $V(\theta) =$		0.819 p.u.		0.935 p.u.		1.147 p.u.	
$\Delta MET =$		0.328 p.u.		0.212 p.u.			
Exacto $V(\theta) =$		0.819 p.u.		0.935 p.u.		0.908 p.u.	
$\Delta MET =$		0.089 p.u.		-0.027 p.u.			

Método PEBS

SISTEMA WSCC3 (3 generadores, 9 barras)

Evento 1: cc-3 ϕ en la Barra 7, en $t = 0$ s

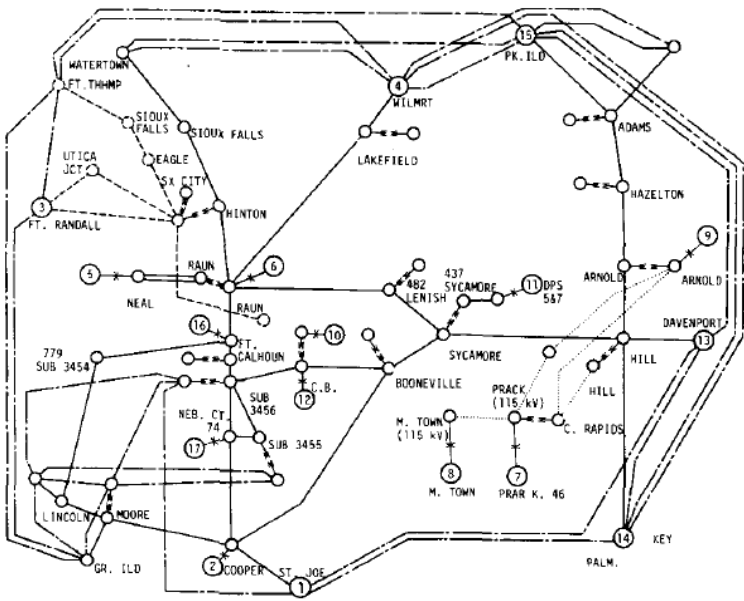
Evento 2: Eliminación de cc-3 ϕ con salida de línea: Barra 5 - Barra 7



4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.3 Sistema IEEE17

17 Generadores, 162 Barras, 284 Ramos



a) Preparación de datos y Cálculos Preliminares

Flujo de Carga pre-falla

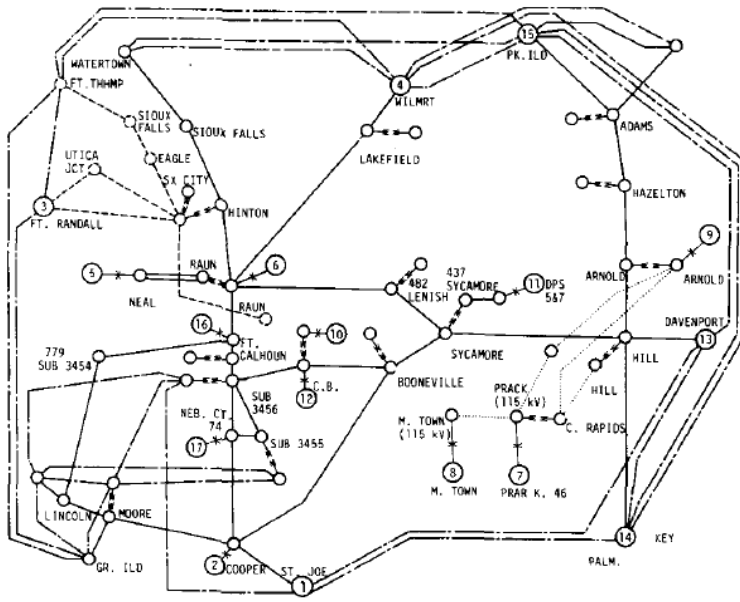
						MW		MVA	
						Total Pérdidas :			
						162.96		-440.65	
Identificación de Barra			Tensión en Barra		Generación (+)		Shunt (+)	Carga (-)	
#	Nombre	Tipo	Módulo (p.u.)	Ángulo (deg)	P (MW)	Q (MVA)	Q (MVA)	P (MW)	Q (p.u.)
3	STJO712 161	PQ	0.9999	-32.49	2000	0	0	2370	96.9
6	6R1G 22	PV	1.0000	-19.15	794	180.87	0	0	0
15	FTRAD 4 230	PQ	1.0185	-24.52	1500	5.9	0	1420	0
27	WILMRT3 345	PQ	0.9978	-30.39	1500	0	0	1824	57.9
73	NEAL12G 20	PV	1.0000	-18.46	447	85.94	0	0	0
76	NEAL34G 24	PV	1.0000	-16.49	1055	136.18	0	0	0
99	PRARK4G 18	PV	1.0000	-31.41	130.9	5.47	0	0	0
101	MTOW 3G 14	PV	1.0000	-40.09	82	30.4	0	0	0
108	AROL 1G 22	SL	1.0000	-27.69	551.12	155.62	0	0	0
114	C.BL12G 14	PV	1.0000	-23.68	131	22.33	0	0	0
118	DPS 57G 14	PV	1.0000	-34.03	173	59.81	0	0	0
121	C.BL 3G 24	PV	1.0000	-20.10	620	151.03	0	0	0
124	DVNPT 3 345	PQ	1.0089	-31.03	2571	0	0	2000	90.9
125	PALM710 345	PV	1.0200	-29.35	2388	-23.01	0	2000	0
126	PR ILD3 345	PQ	1.0109	-26.59	2467	63.8	0	2000	0
130	FT.CL1G 22	PV	1.0300	-19.35	455	123.24	0	0	0
131	NEBCY1G 18	PV	1.0180	-20.43	575	94.31	0	0	0
Total Sistema:					15550.32	928.05	-194.08	15387.36	1174.62

[33] IEEE Committee Report, “Transient stability test systems for direct stability methods”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.7, no.1, pp.37-43, Feb. 1992.

4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.3 Sistema IEEE17

17 Generadores, 162 Barras, 284 Ramos



a) Preparación de datos y Cálculos Preliminares

Condiciones Iniciales de Generadores

Identificación de Generador			Tensión Interna Transitoria $E_i \angle \delta_i^0$			Potencia
			Módulo	Ángulo		Mecánica P_{mi}
i	# Barra	Nombre	(p.u.)	(deg)	(rad)	(p.u.)
1	3	STJO712 161	1.0031	-27.92	-0.4872	20.000
2	6	6R1G 22	1.1335	-1.33	-0.0231	7.940
3	15	FTRAD 4 230	1.0297	-16.30	-0.2844	15.000
4	27	WILMRT3 345	1.0006	-26.09	-0.4553	15.000
5	73	NEAL12G 20	1.0679	-6.21	-0.1084	4.470
6	76	NEAL34G 24	1.0508	-4.55	-0.0795	10.550
7	99	PRARK4G 18	1.0170	-23.04	-0.4022	1.309
8	101	MTOW 3G 14	1.1241	-26.96	-0.4705	0.820
9	108	AROL 1G 22	1.1227	-12.46	-0.2175	5.511
10	114	C.BL12G 14	1.0651	-11.10	-0.1938	1.310
11	118	DPS 57G 14	1.0781	-24.34	-0.4248	1.730
12	121	C.BL 3G 24	1.0610	-10.10	-0.1764	6.200
13	124	DVNPT 3 345	1.0102	-28.13	-0.4910	25.710
14	125	PALM710 345	1.0206	-26.72	-0.4663	23.880
15	126	PR ILD3 345	1.0181	-21.09	-0.3681	24.670
16	130	FT.CL1G 22	1.1243	-6.66	-0.1163	4.550
17	131	NEBCY1G 18	1.1117	-4.38	-0.0765	5.750
Total :						174.400

4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

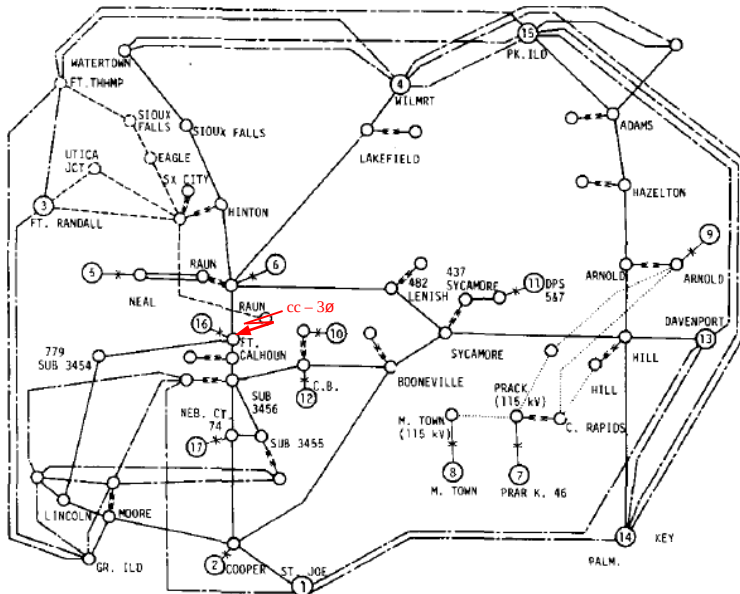
4.2.3 Sistema IEEE17

b) Simulación en el Dominio del Tiempo

Descripción de Casos

Caso

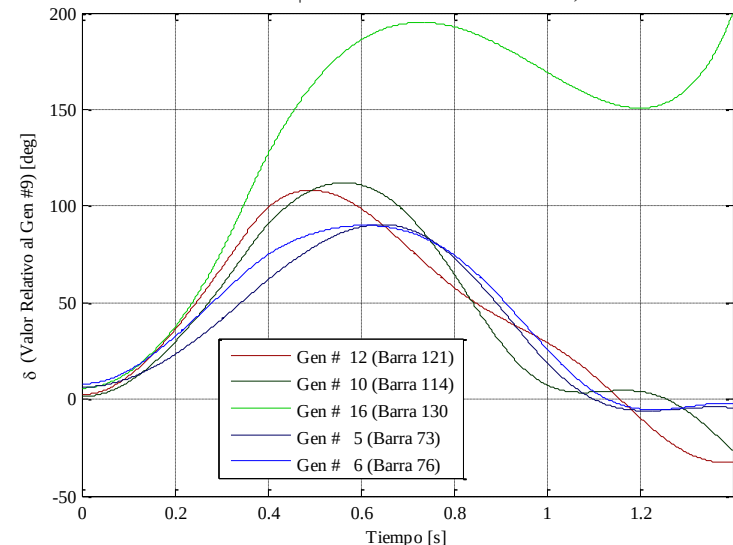
- Evento 1 en $t = 0$: Cortocircuito trifásico en la línea 75-9 próximo a Barra 75.
- Barra 75: "FT.CL 3 345"
- Barra 9: "94 3 345"
- Evento 2 en $t = t_{cl}$: Eliminación de falla al abrir línea 75-9 en $t_{cl} = 0.354$ s.



SISTEMA IEEE17 (17 generadores, 162 barras)

Evento 1: cc-3φ en la Barra 75, en $t = 0$ s

Evento 2: Eliminación de cc-3φ con salida de línea: Barra 75 - Barra 9, en $t = 0.354$ s

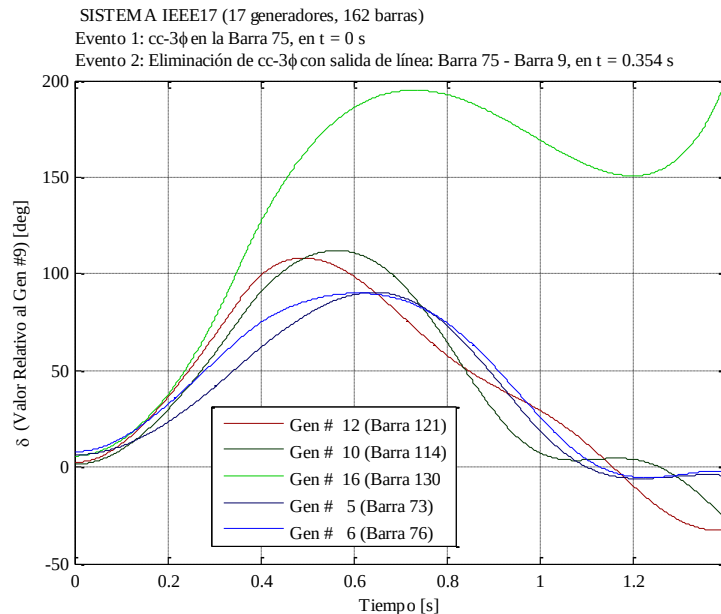


4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

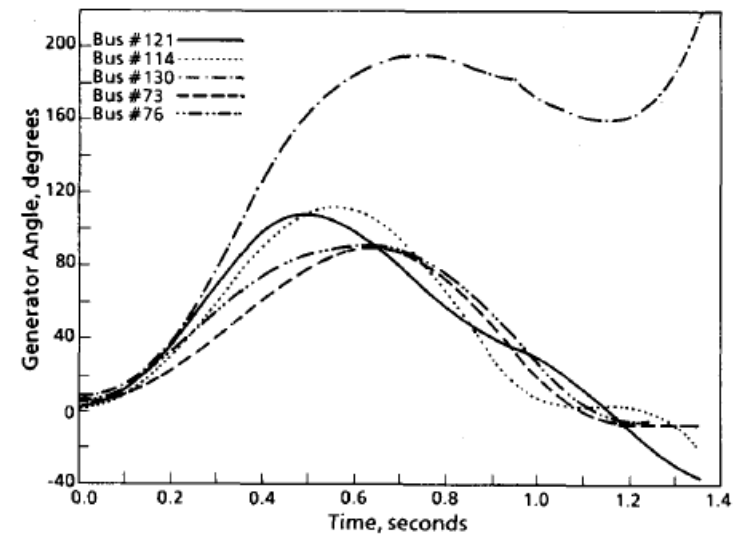
4.2.3 Sistema IEEE17

b) Simulación en el Dominio del Tiempo

Validación de Resultados Obtenidos



Programa Computacional



Referencia [33]

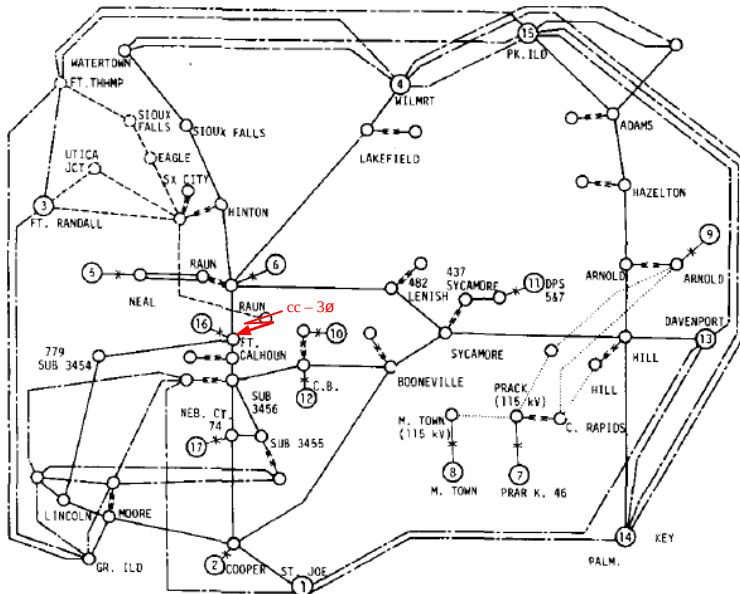
- [33] IEEE Committee Report, "Transient stability test systems for direct stability methods", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.7, no.1, pp.37-43, Feb. 1992.

4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.3 Sistema IEEE17

b) Simulación en el Dominio del Tiempo

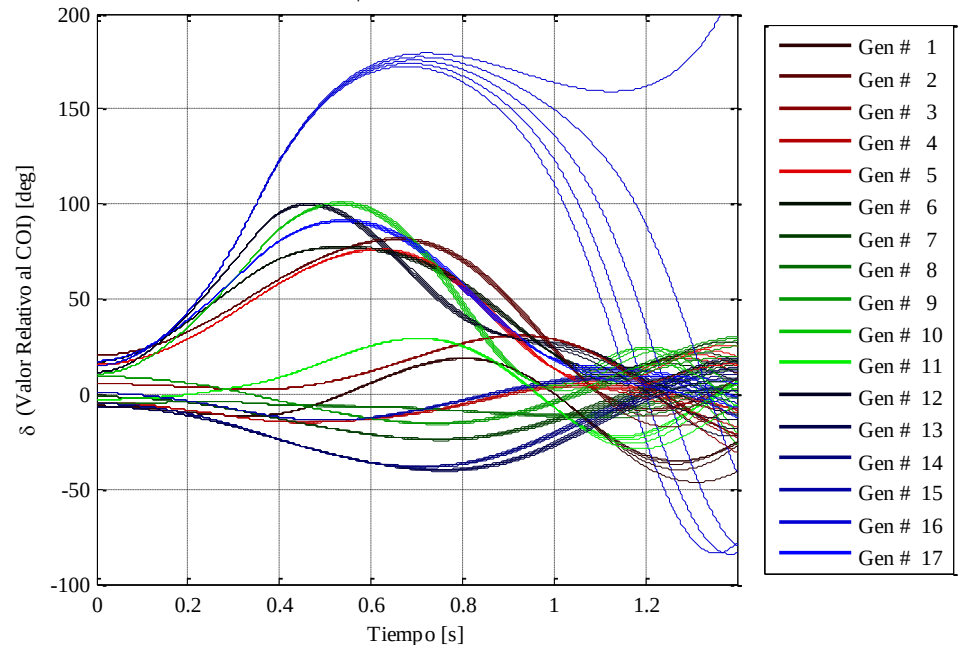
Cálculo de Tiempo Crítico



SISTEMA IEEE17 (17 generadores, 162 barras)

Evento 1: cc-3 ϕ en la Barra 75, en $t = 0$ s

Evento 2: Eliminación de cc-3 ϕ con salida de línea: Barra 75 - Barra 9



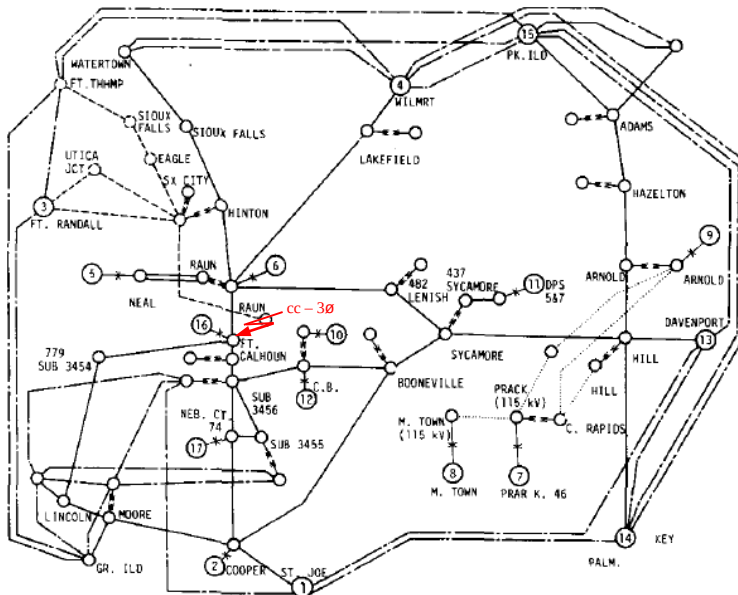
t_{cr} está entre 0.353 (estable) – 0.354 (inestable).

4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.3 Sistema IEEE17

c) Funciones de Energía Transitoria

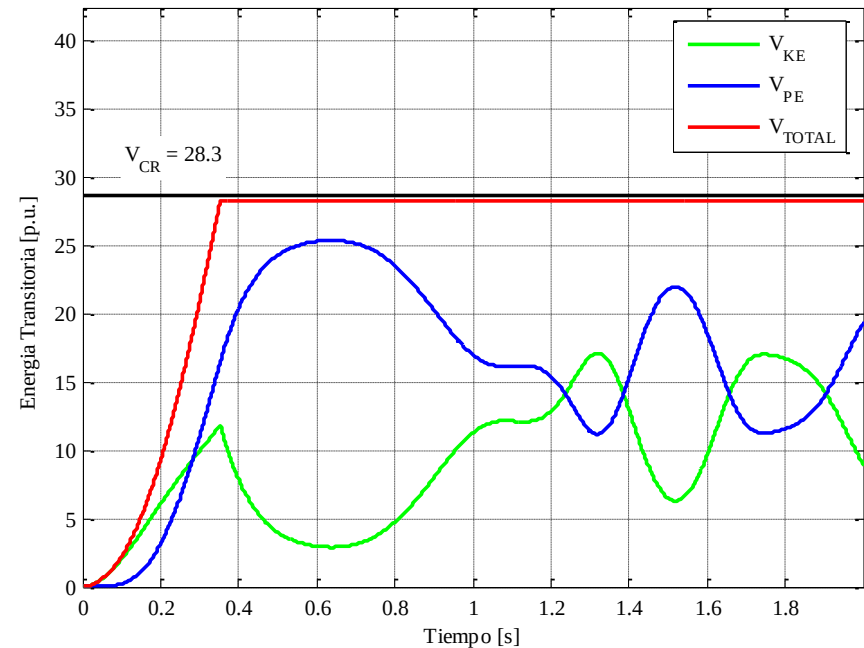
Tiempo de Eliminación $t_{cl1} = 0.353$ s. y $D'_i = 0$ p.u.



SISTEMA IEEE17 (17 generadores, 162 barras)

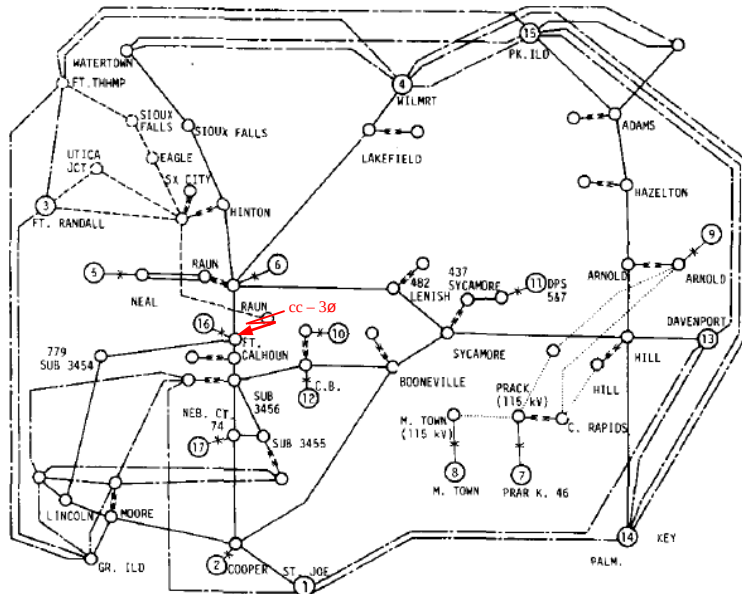
Evento 1: cc-3φ en la Barra 75, en $t = 0$ s

Evento 2: Eliminación de cc-3φ con salida de línea: Barra 75 - Barra 9, en $t = 0.353$ s



4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.3 Sistema IEEE17



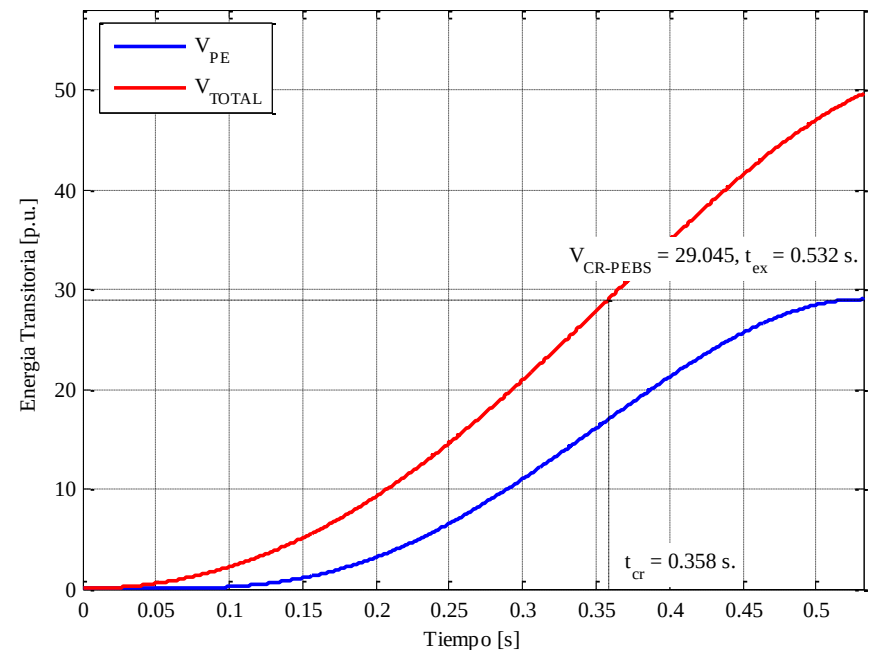
d) Método Directo basado en FET

Método PEBS

SISTEMA IEEE17 (17 generadores, 162 barras)

Evento 1: cc-3φ en la Barra 75, en $t = 0$ s

Evento 2: Eliminación de cc-3φ con salida de línea: Barra 75 - Barra 9



4.2 Resultados en Sistemas de Prueba

4.2.3 Sistema IEEE17

d) Método Directo basado en FET

Márgenes de Energía Transitoria

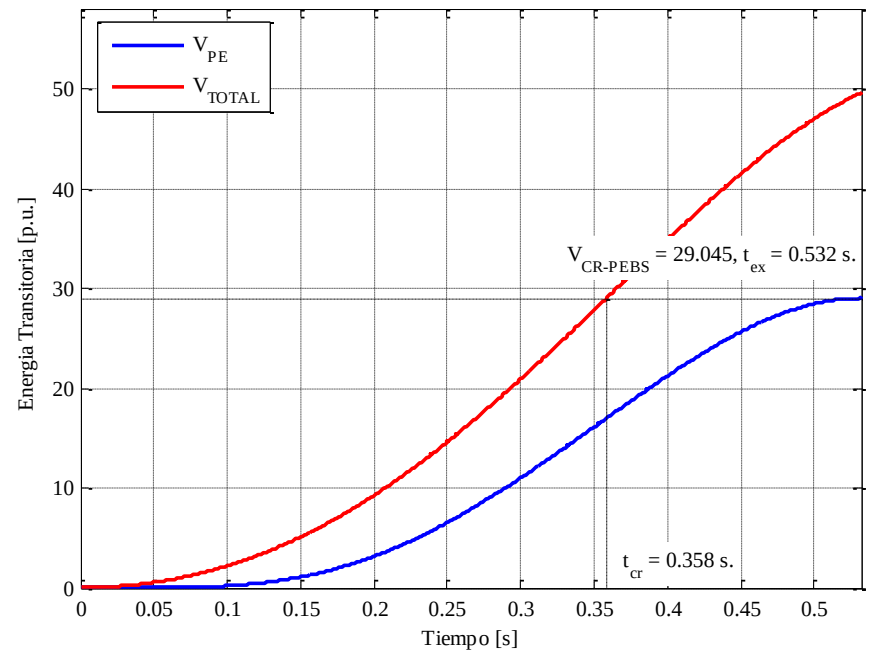
Identificación de Generador		$t_{cr} = 0.35$		$t_{ex} = 0.53$	
		θ_i^{cl}		θ_i^{ex}	
i	# Barra	(rad)	(deg)	(rad)	(deg)
1	3	-0.1990	-11.39	-0.1760	-10.08
2	6	0.9350	53.59	1.4530	83.24
3	15	0.0440	2.50	0.0550	3.13
4	27	-0.2350	-13.46	-0.3480	-19.96
5	73	0.8930	51.16	1.3520	77.49
6	76	1.1320	64.88	1.5690	89.89
7	99	-0.1870	-10.74	-0.3990	-22.86
8	101	-0.0870	-4.97	-0.2120	-12.13
9	108	-0.0170	-1.00	-0.2310	-13.25
10	114	1.3130	75.24	2.2950	131.47
11	118	0.1010	5.79	0.2380	13.61
12	121	1.4860	85.12	2.4470	140.22
13	124	-0.3620	-20.73	-0.6260	-35.84
14	125	-0.3540	-20.26	-0.6240	-35.75
15	126	-0.1800	-10.29	-0.3090	-17.72
16	130	1.7890	102.49	3.6670	210.12
17	131	1.2520	71.71	1.9670	112.68
PEBS $V(\theta) =$		28.426 p.u.		29.045 p.u.	
$\Delta MET =$		0.619 p.u.			
Exacto $V(\theta) =$		28.426 p.u.		28.300 p.u.	
$\Delta MET =$		-0.126 p.u.			

Método PEBS

SISTEMA IEEE17 (17 generadores, 162 barras)

Evento 1: cc-3 ϕ en la Barra 75, en $t = 0$ s

Evento 2: Eliminación de cc-3 ϕ con salida de línea: Barra 75 - Barra 9



4.3 Resultados en Sistema SEIN50

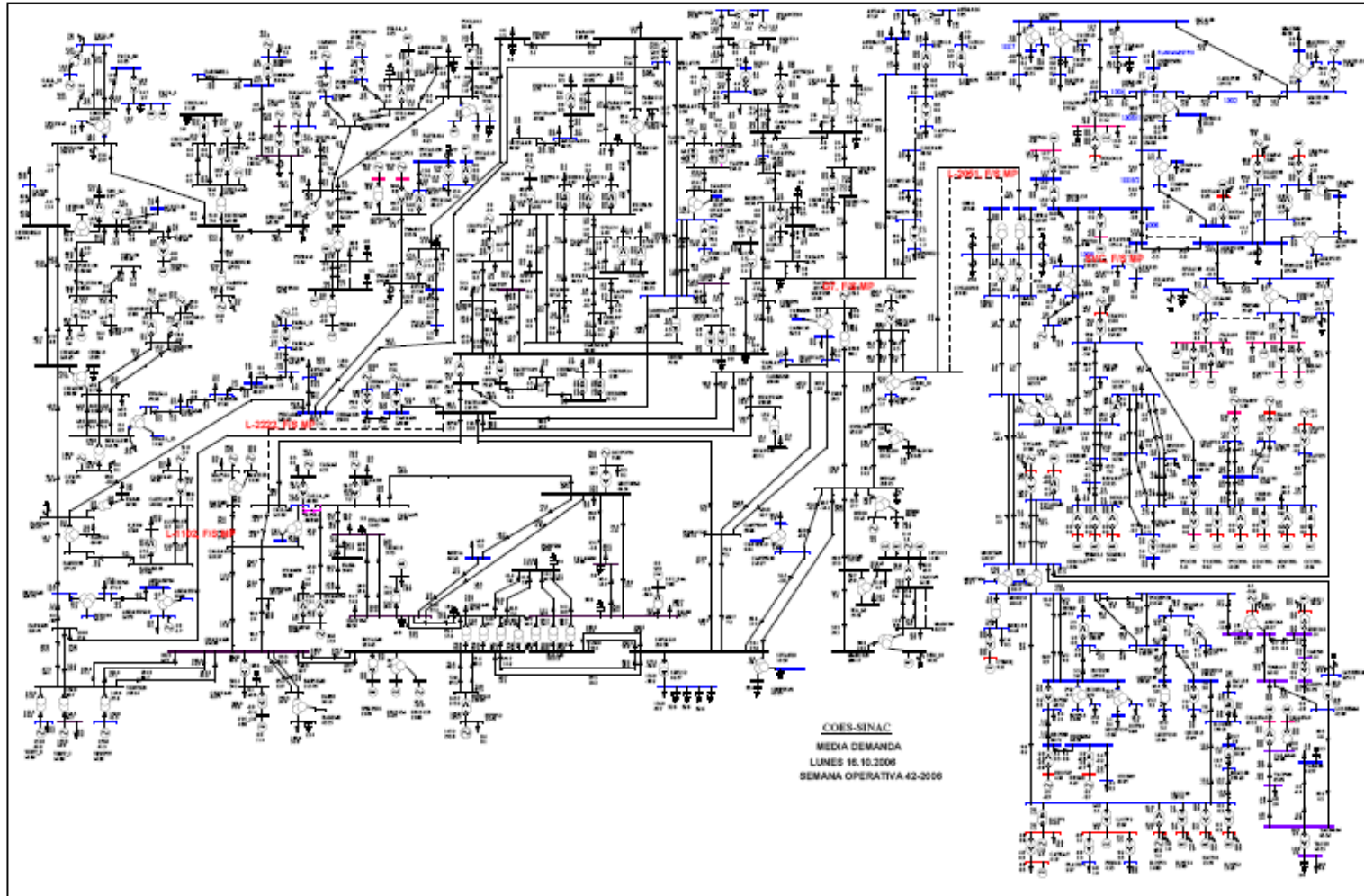
4.3.1 Descripción del Sistema

- El SEIN (Sistema Eléctrico Interconectado Nacional) es el sistema eléctrico de potencia interconectado que une casi todos los centros de consumo del Perú, con excepción de algunos sistemas aislados.
- Posee un nivel máximo de tensión de 220 kV a 60 Hz. Se selecciona la configuración y operación del sistema en la semana operativa 42 del 2006 (Lunes 16/10/2006), para el bloque horario de media demanda (8 – 18 h.).
- Este sistema está conformado por 50 generadores en servicio (55 fuera de servicio), 460 barras (37 nodos ficticios), 542 ramos en servicio: (14 fuera de servicio: 2 transformadores y 12 líneas de transmisión) y 204 cargas en servicio (1 fuera de servicio) que totalizan 2959.61 MW y 1033.32 MVar de potencia activa y reactiva, respectivamente.

4.3 Resultados en Sistema SEIN50

4.3.1 Descripción del Sistema

50 Generadores, 460 Barras, 542 Ramos



4.3 Resultados en Sistema SEIN50

4.3.2 Estabilidad Transitoria mediante Simulación en el Dominio del Tiempo

a) Preparación de datos y Cálculos Preliminares

Flujo de Carga pre-falla

					MW		MVar		
Total Pérdidas :					199.46		-196.81		
Identificación de Barra			Tensión en Barra		Generación (+)		Shunt (+)	Carga (-)	
			Módulo (p.u.)	Ángulo (deg)	P (MW)	Q (MVar)		Q (MVar)	P (MW)
#	Nombre	Tipo							
7	CARHU10	PV	0.9650	-13.08	24	0.7	0	0.2	0.1
24	C.PATO	PV	0.9638	-1.61	160	11.75	0	0.4	0.1
29	CAHUA10	PV	1.0000	0.79	31	8.09	0	0.2	0.1
39	MAT12A	PV	0.9760	3.55	37	23.19	0	0.3	0.1
40	MAT12B	PV	0.9760	3.59	37	23.57	0	0	0
42	HUAMP10	PV	1.0000	-5.01	24	18.82	0	0	0
43	CALL65	PV	0.9692	0.88	32	-23.83	0	0.3	0.1
44	CALLAH8	PV	0.9750	1.26	32	11.87	0	0.3	0.1
47	SROS13B	PV	1.0000	-3.79	25	-18.2	0	0	0
50	HUIN12	SL	1.0720	0.00	148.36	201.3	0	0.4	0.1
52	MOYOP10	PV	0.9200	-2.35	58	44.89	0	0.3	0.1
58	IND10	PV	1.0100	-3.11	0	6.7	0	0	0
63	SNICO13	PV	1.0290	-13.28	11	2.1	0	42	16.8
67	RESTI13	PV	1.0073	25.21	209.46	39.62	0	0	0
97	SIDNOR13	PV	1.0000	-9.93	20	6.92	0	22	10.4
98	SIDSUR13	PV	1.0000	-11.77	15	16.97	0	33	15.7
102	OROY2.3	PV	1.0435	4.83	3	0.48	0	0	0
104	MALPA6.9	PV	1.0000	9.97	43	9.53	0	0	0
116	YAU13A	PV	0.9928	33.74	65	0.36	0	0.3	0
120	MAN13B	PV	1.0072	24.19	642	162.14	0	0.6	0.2
121	PACHA23	PV	1.0000	1.18	3	2.99	0	0.3	0.2
124	YAU13B	PV	0.9928	36.71	70	2.37	0	0.5	0.2
128	TALA10	PV	1.0073	-1.54	91	22.56	0	0	0
133	VENT_C	PV	1.0375	1.45	155	55.27	0	0.5	0.2
147	GALL_10	PV	0.9714	-14.52	16	-12.8	0	0	0
149	VENT_D	PV	1.0375	1.36	152	55.11	0	0.5	0.2
150	AG13_TG2	PV	1.0145	30.72	84	18.34	0	0	0
153	MALACAS	PV	1.0000	-6.05	14	-12.06	0	13.6	9.7
162	CURM10	PV	1.0000	-13.12	4	-5.94	0	0	0
200	ZORRI10	PV	1.0000	-6.87	8	-16.31	0	12.6	5.1
206	PARIA_13	PV	1.0000	-6.73	2.1	-1.05	0	0.1	0
210	YANA10	PV	1.0300	19.06	32	14.74	0	0	0
215	CHIMA13	PV	0.9783	20.94	100	3.28	0	0	0
251	CHAVG3	PV	1.0000	23.00	74	6	0	0	0
260	HBOTIF	PV	0.9856	16.00	2.3	-0.88	0	0	0
261	HRUMI	PV	0.9856	15.91	2.3	-0.74	0	0	0
267	ARIC2	PV	1.0000	16.34	4.5	-14.81	0	0.1	0
284	CHARIV	PV	0.9905	22.00	13.77	0.13	0	0	0
285	CHA123	PV	1.0095	22.09	6.9	3.17	0	0	0
287	CHAVI	PV	0.9714	23.37	8.05	-1.75	0	0	0
294	ILOTV1	PV	1.0145	16.68	11	2.51	0	2.6	0.4
296	ILOTV3	PV	1.0145	19.15	35	3.17	0	3	1
304	SGAB10	PV	1.0000	47.01	90	8.75	0	0.1	0
308	TVCARB	PV	1.0000	25.83	136	-5.59	0	10	3.9
351	MACH13.8	PV	1.0000	48.09	86	-7.19	0	0	0
383	HUANCH10	PV	0.9500	6.83	14.2	-2.63	0	0	0
399	AG13_TG1	PV	1.0145	30.72	84	18.34	0	0	0
408	YUNC13.8	PV	1.0000	18.81	90.13	22.22	0	0	0
414	POECHOS1	PV	1.0000	-14.53	3	-0.56	0	0	0
423	VENTTV	PV	1.0125	1.47	150	51.33	0	0	0
Total Sistema:					3159.07	754.94	81.57	2959.61	1033.32

4.3 Resultados en Sistema SEIN50

4.3.2 Estabilidad Transitoria mediante Simulación en el Dominio del Tiempo

a) Preparación de datos y Cálculos Preliminares

Condiciones Iniciales de los Generadores

Identificación de Generador			Tensión Interna Transitoria		$E_i \angle \delta_i^0$	Potencia
i	# Barra	Nombre	Módulo (p.u.)	Ángulo		Mecánica P_m (p.u.)
				(deg)	(rad)	
1	7	CARHU10	1.0031	-27.92	-0.4872	0.240
2	24	C.PATO	1.1335	-1.33	-0.0231	1.600
3	29	CAHUA10	0.9903	-1.67	-0.0291	0.310
4	39	MAT12A	1.7307	50.46	0.8807	0.370
5	40	MAT12B	1.6251	39.62	0.6916	0.370
6	42	HUAMP10	1.0534	9.75	0.1702	0.240
7	43	CALL65	1.0546	9.78	0.1707	0.320
8	44	CALLAH8	1.2875	9.22	0.1609	0.320
9	47	SROS13B	0.8297	58.02	1.0127	0.250
10	50	HUIN12	1.1167	15.96	0.2786	1.484
11	52	MOYOP10	0.9282	2.84	0.0496	0.580
12	58	IND10	1.8408	16.18	0.2824	0.000
13	63	SNICO13	1.6134	23.11	0.4033	0.110
14	67	RESTI13	1.1228	-3.11	-0.0542	2.095
15	97	SIDNOR13	1.0577	-6.95	-0.1213	0.200
16	98	SIDSUR13	1.3558	57.62	1.0056	0.150
17	102	OROY2.3	1.1063	2.31	0.0403	0.030
18	104	MALPA6.9	1.2117	-3.42	-0.0598	0.430
19	116	YAU13A	1.1097	17.55	0.3063	0.650
20	120	MAN13B	1.4687	45.81	0.7995	6.420
21	121	PACHA23	1.2346	69.90	1.2200	0.030
22	124	YAU13B	2.2723	74.56	1.3013	0.700
23	128	TALA10	1.2802	12.67	0.2212	0.910
24	133	VENT_C	1.2862	74.29	1.2966	1.550
25	147	GALL_10	1.0774	9.38	0.1638	0.160
26	149	VENT_D	1.1230	11.35	0.1980	1.520
27	150	AG13_TG2	0.7889	8.20	0.1431	0.840
28	153	MALACAS	1.1222	11.07	0.1932	0.140
29	162	CURM10	1.0694	40.46	0.7061	0.040
30	200	ZORRI10	0.8964	2.40	0.0418	0.080
31	206	PARIA_13	0.8665	-6.94	-0.1211	0.021
32	210	YANA10	0.7858	1.09	0.0191	0.320
33	215	CHIMA13	0.9651	-2.24	-0.0390	1.000
34	251	CHAVG3	1.1652	30.92	0.5397	0.740
35	260	HBOTIF	1.0903	45.33	0.7912	0.023
36	261	HRUMI	1.0971	43.07	0.7517	0.023
37	267	ARIC2	0.9433	24.30	0.4241	0.045
38	284	CHARIV	0.9517	24.14	0.4213	0.138
39	285	CHA123	0.6450	26.23	0.4577	0.069
40	287	CHAVI	1.2429	58.62	1.0231	0.081
41	294	ILOTV1	1.1472	34.32	0.5990	0.110
42	296	ILOTV3	0.9501	38.07	0.6645	0.350
43	304	SGAB10	1.0379	21.48	0.3749	0.900
44	308	TVCARB	1.0302	25.23	0.4404	1.360
45	351	MACH13.8	1.1112	67.85	1.1843	0.860
46	383	HUANCH10	1.0121	37.35	0.6519	0.142
47	399	AG13_TG1	1.0972	77.60	1.3545	0.840
48	408	YUNC13.8	0.9515	28.33	0.4944	0.901
49	414	POECHOS1	1.0694	40.46	0.7061	0.030
50	423	VENTTV	1.1153	34.44	0.6011	1.500

Total p.u.: 31.592

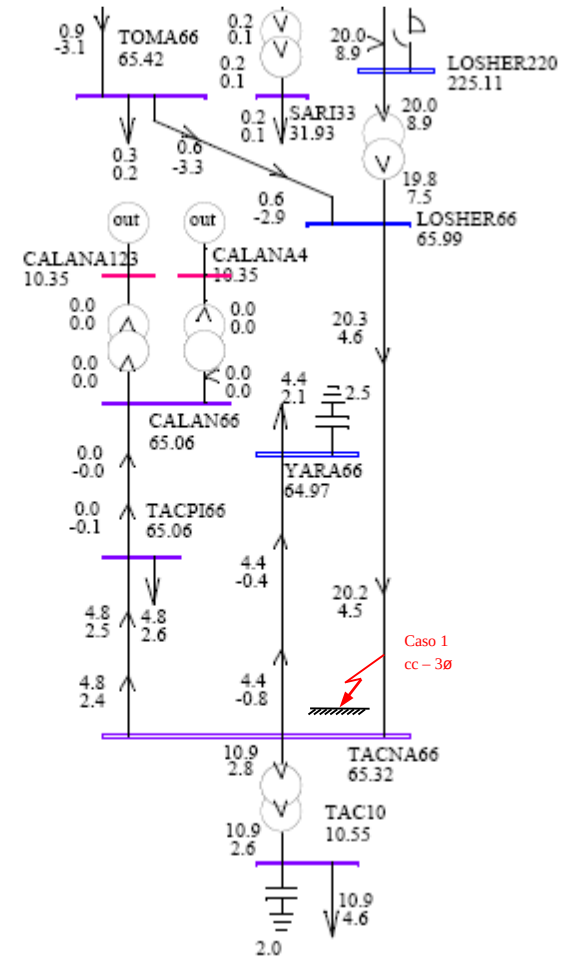
4.3 Resultados en Sistema SEIN50

4.3.2 Estabilidad Transitoria mediante Simulación en el Dominio del Tiempo

b) Descripción de Casos

Caso 1

- Evento 1 en $t = 0$: Cortocircuito trifásico en la línea L-6640 de 66 kV ubicada entre las barras 272–368, próxima a la barra 272
 - Barra 272: S.E. Tacna
 - Barra 368: S.E. Los H eros
- Evento 2 en $t = t_{cl}$: Eliminación de falla al abrir L-6640



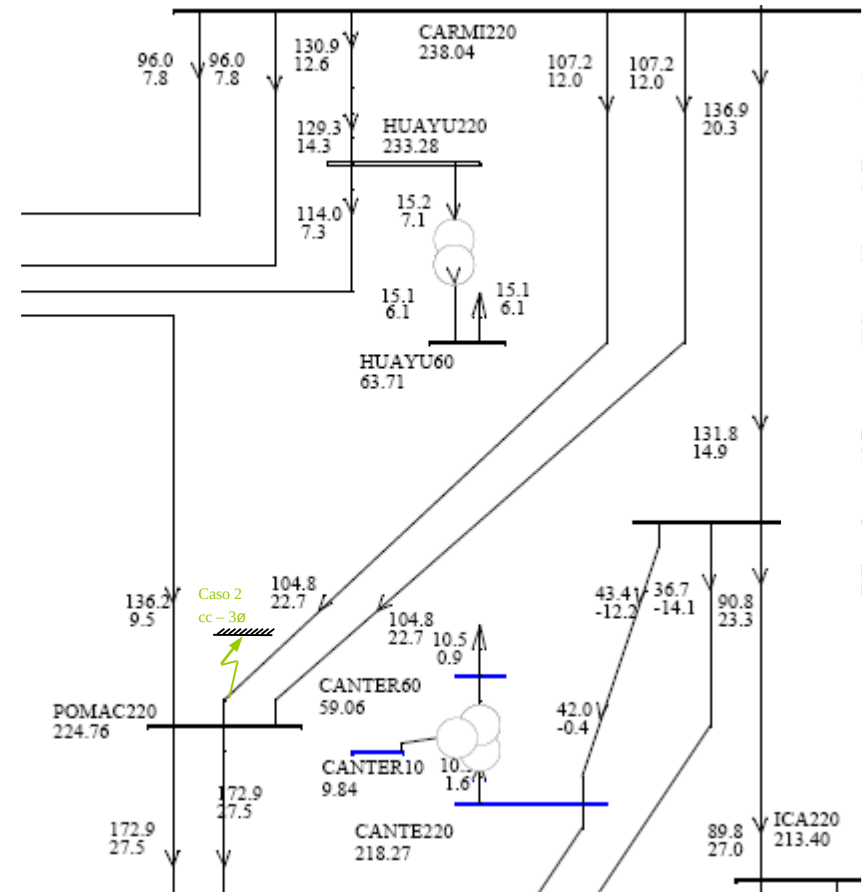
4.3 Resultados en Sistema SEIN50

4.3.2 Estabilidad Transitoria mediante Simulación en el Dominio del Tiempo

b) Descripción de Casos

Caso 2

- Evento 1 en $t = 0$: Cortocircuito trifásico en la línea L-2202 de 220 kV ubicada entre las barras 64–65, próxima a la barra 64
 - Barra 64: S.E. Pomacocha
 - Barra 65: S.E. Campo Armiño
- Evento 2 en $t = t_{cl}$: Eliminación de falla al abrir L-2202

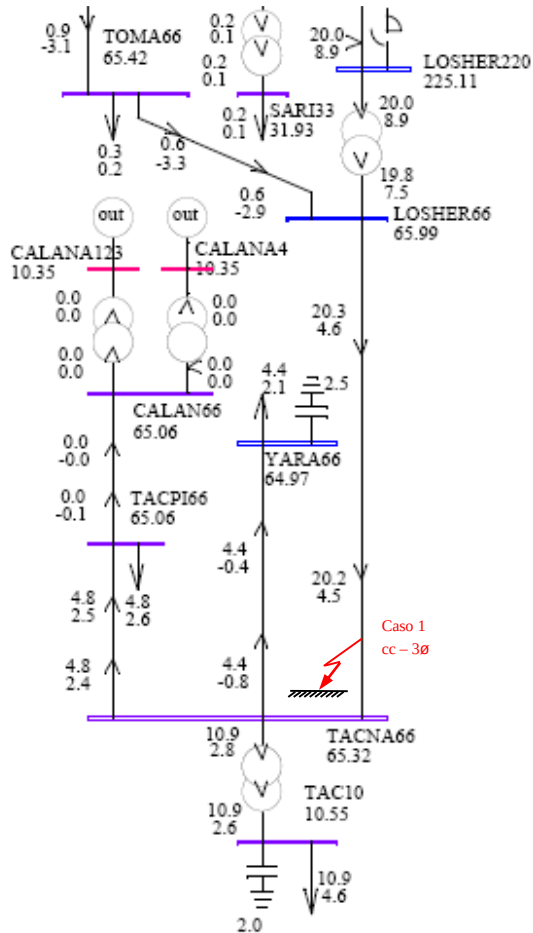


4.3 Resultados en Sistema SEIN50

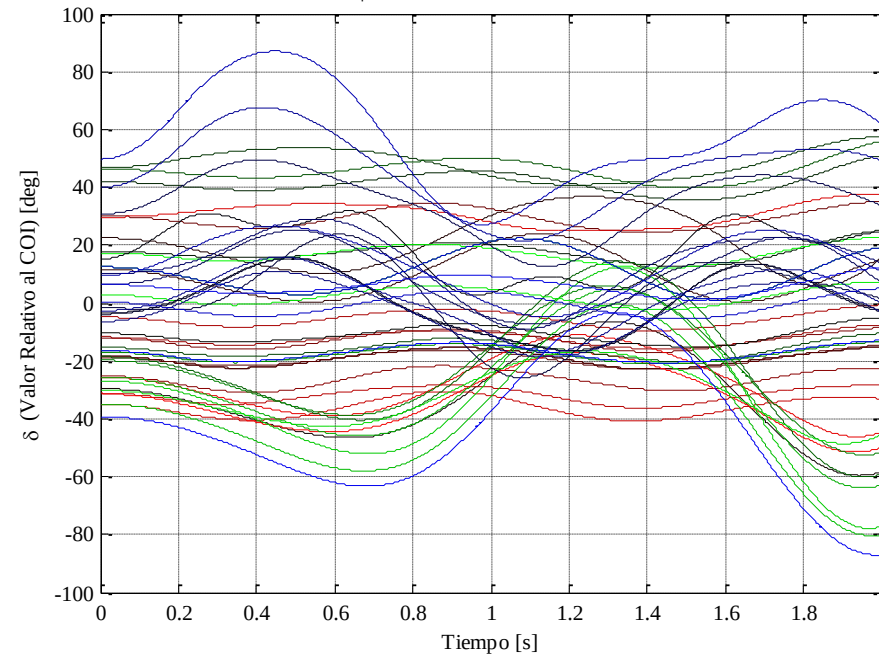
4.3.2 Estabilidad Transitoria mediante Simulación en el Dominio del Tiempo **** Caso 1 ****

c) Resultados de Integración Numérica

Tiempo de Eliminación $t_{cl1} = 0.20$ s.



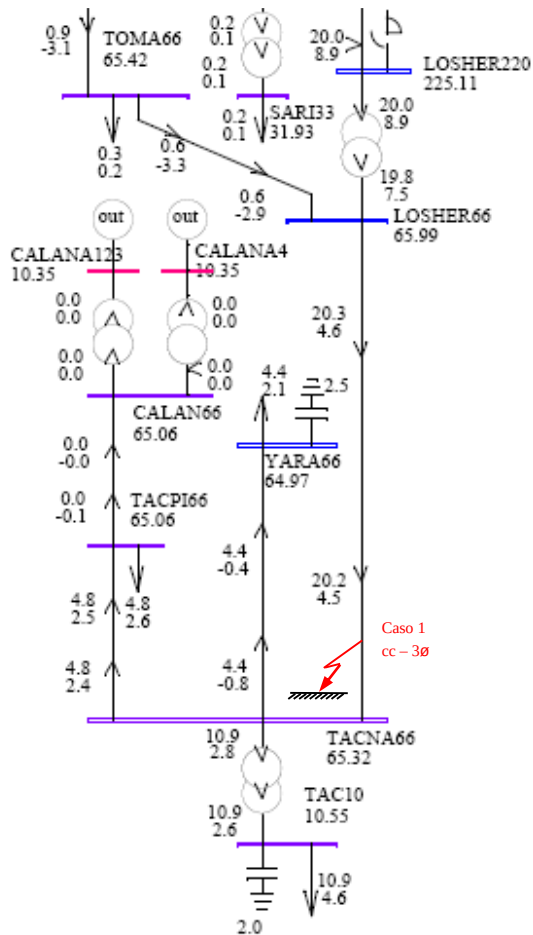
SISTEMA SEIN50 (50 generadores, 460 barras)
 Evento 1: cc-3φ en la Barra 272, en $t = 0$ s
 Evento 2: Eliminación de cc-3φ con salida de línea: Barra 272 - Barra 368, en $t = 0.2$ s



4.3 Resultados en Sistema SEIN50

4.3.3 Funciones de Energía Transitoria ** Caso 1 **

- Curvas

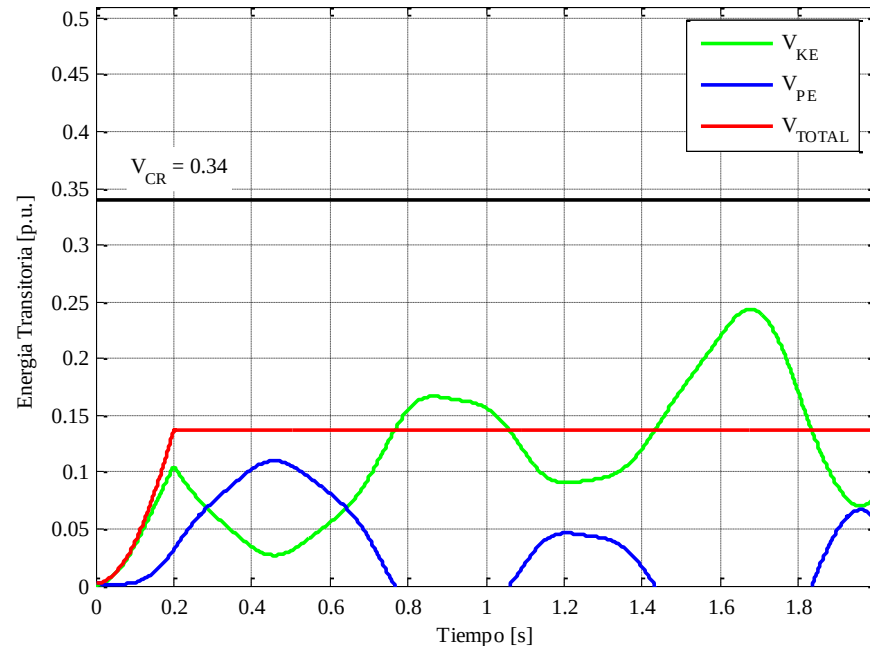


Tiempo de Eliminación $t_{cl1} = 0.20$ s.

SISTEMA SEIN50 (50 generadores, 460 barras)

Evento 1: cc-3φ en la Barra 272, en $t = 0$ s

Evento 2: Eliminación de cc-3φ con salida de línea: Barra 272 - Barra 368, en $t = 0.2$ s



4.3 Resultados en Sistema SEIN50

4.3.3 Funciones de Energía Transitoria **** Caso 1 ****

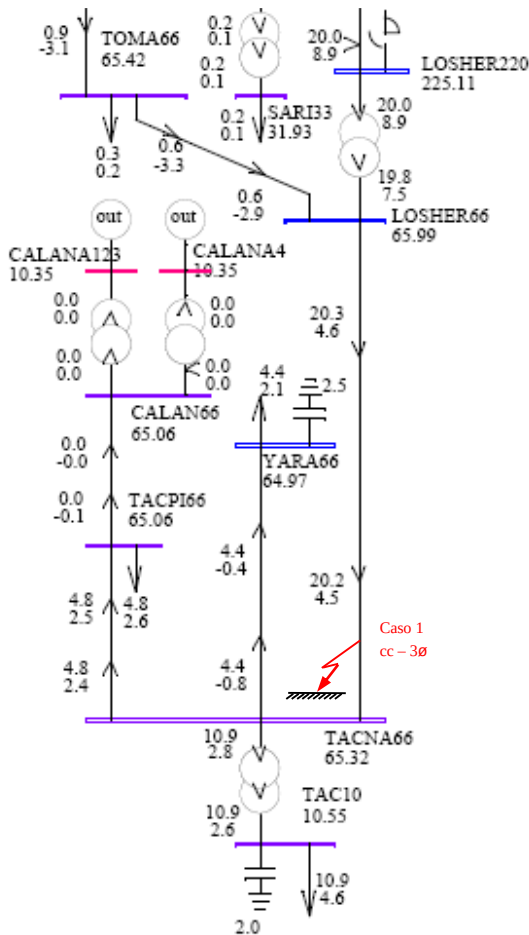
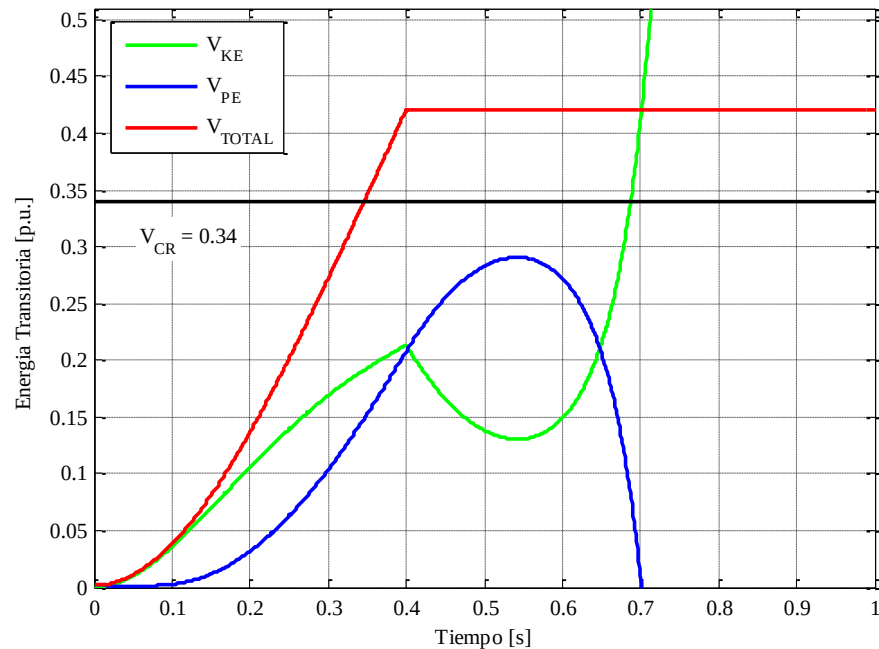
- Curvas

Tiempo de Eliminación $t_{cl2} = 0.40$ s.

SISTEMA SEIN50 (50 generadores, 460 barras)

Evento 1: cc-3 ϕ en la Barra 272, en $t = 0$ s

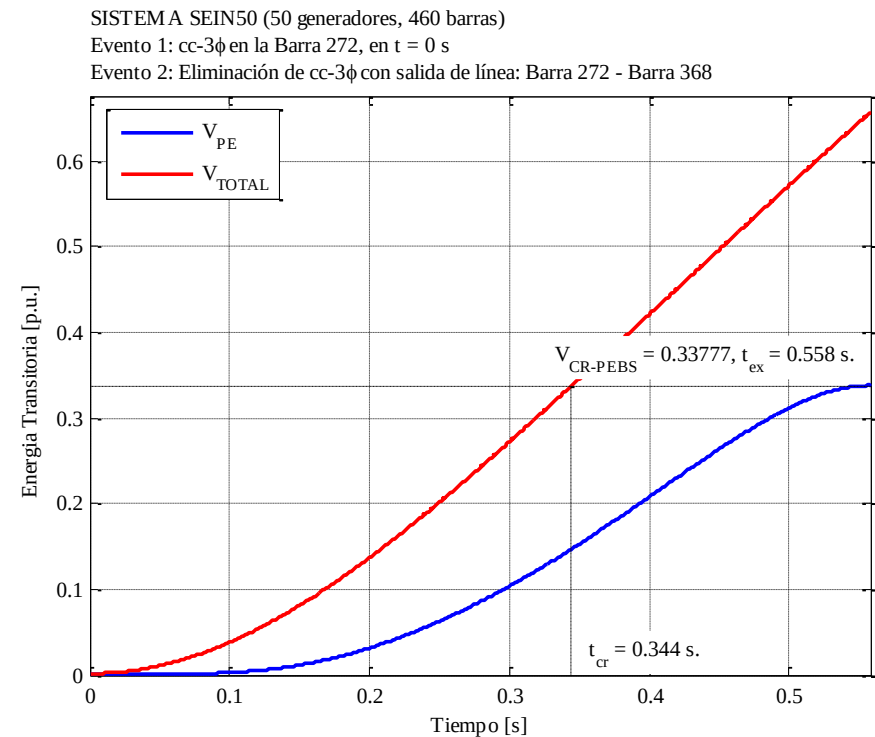
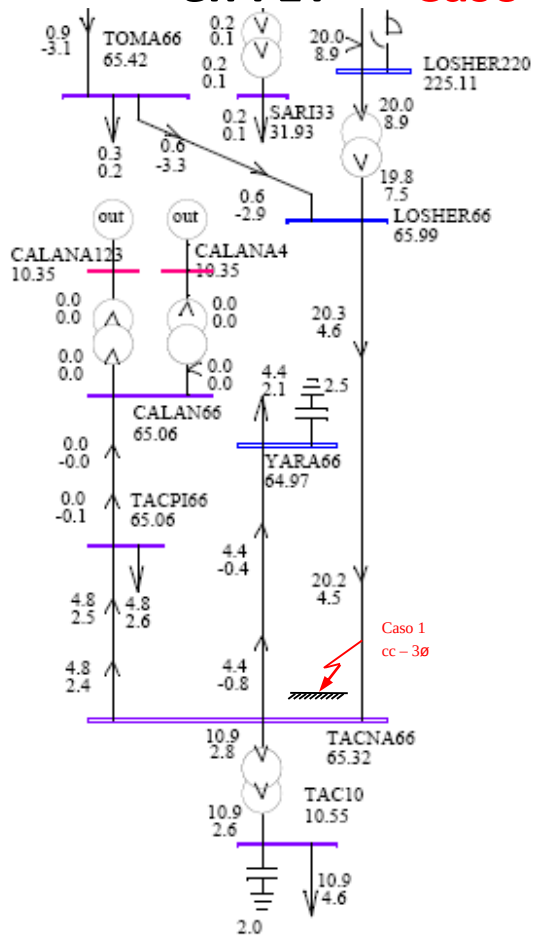
Evento 2: Eliminación de cc-3 ϕ con salida de línea: Barra 272 - Barra 368, en $t = 0.4$ s



4.3 Resultados en Sistema SEIN50

4.3.4 Estabilidad Transitoria mediante Método Directo basado en FET ** Caso 1 **

a) Método PEBS



4.3 Resultados en Sistema SEIN50

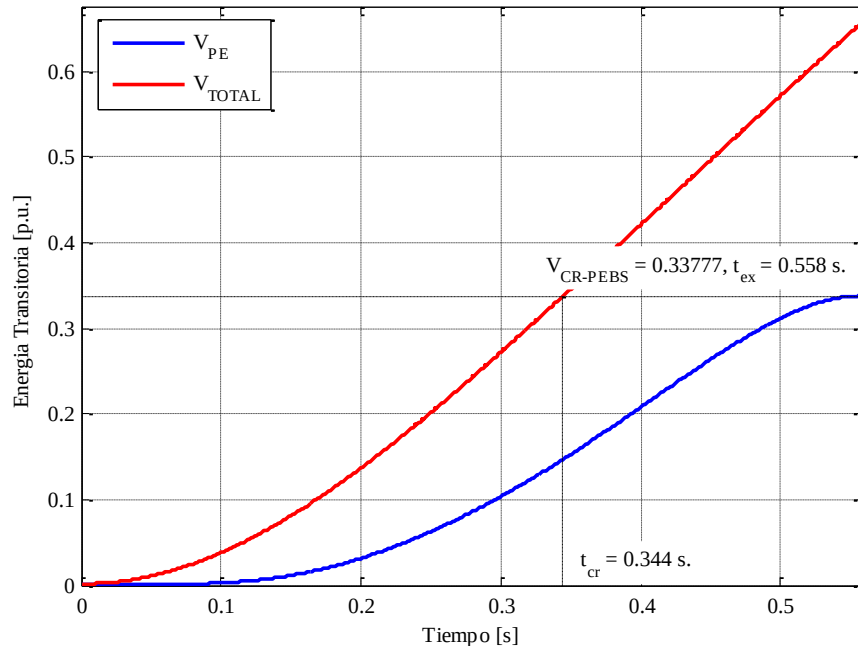
4.3.4 Estabilidad Transitoria mediante Método Directo basado en FET **** Caso 1 ****

a) Método PEBS

SISTEMA SEIN50 (50 generadores, 460 barras)

Evento 1: cc-3 ϕ en la Barra 272, en $t = 0$ s

Evento 2: Eliminación de cc-3 ϕ con salida de línea: Barra 272 - Barra 368



b) Márgenes de Energía

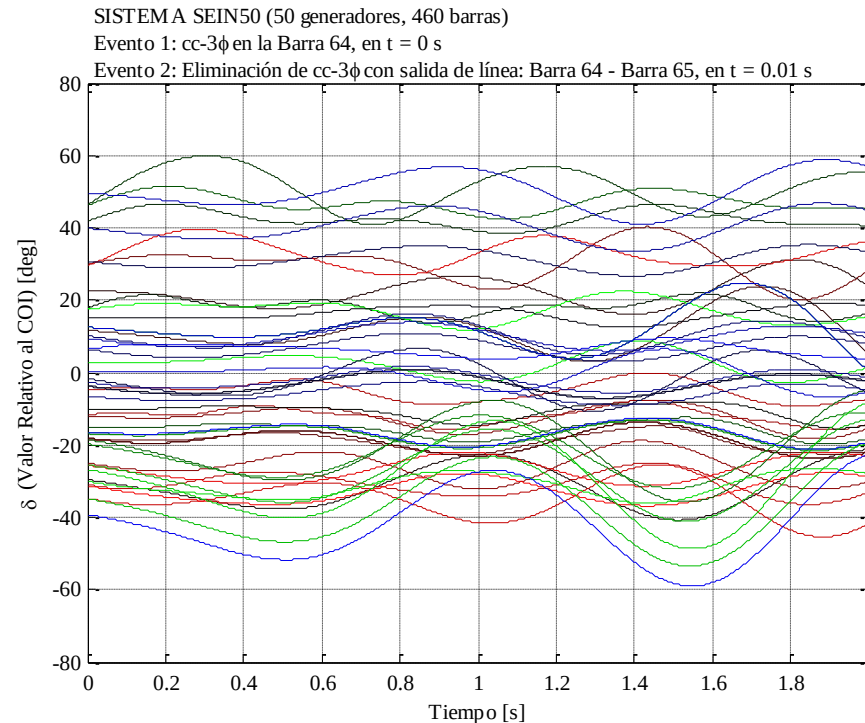
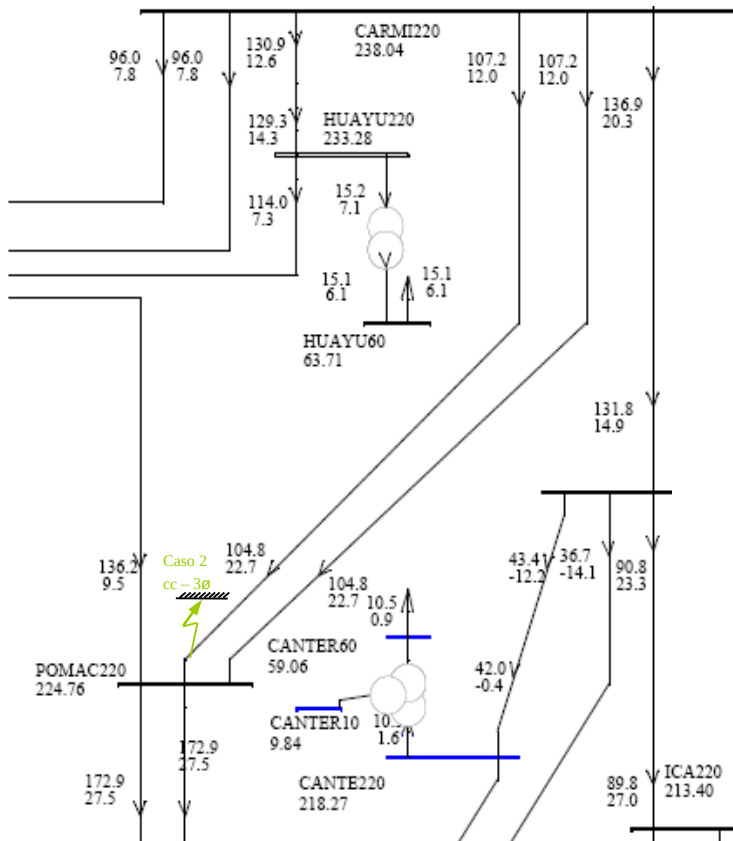
Identificación de Generador		$t_{cl} = 0.20$		$t_{cl} = 0.40$		$t_{ex} = 0.56$	
		θ_i^{cl}		θ_i^{cl}		θ_i^{ex}	
i	# Barra	(rad)	(deg)	(rad)	(deg)	(rad)	(deg)
1	7	-0.5740	-32.90	-0.7580	-43.46	-0.9920	-56.85
2	24	0.3440	19.72	0.1920	10.99	0.0280	1.59
3	29	0.1520	8.68	-0.0020	-0.11	-0.1590	-9.14
4	39	-0.3610	-20.70	-0.4340	-24.89	-0.4780	-27.38
5	40	-0.3610	-20.67	-0.4340	-24.84	-0.4770	-27.32
6	42	-0.3580	-20.53	-0.4100	-23.52	-0.4400	-25.19
7	43	0.4920	28.20	0.4240	24.30	0.3990	22.87
8	44	-0.2500	-14.33	-0.3200	-18.35	-0.3580	-20.49
9	47	-0.4880	-27.95	-0.5880	-33.70	-0.6490	-37.19
10	50	-0.2330	-13.37	-0.2810	-16.09	-0.3060	-17.53
41	294	-0.0080	-0.47	0.2500	14.35	0.4400	25.19
42	296	0.0440	2.52	0.3150	18.04	0.5090	29.18
43	304	0.9290	53.24	1.4480	82.99	1.8990	108.78
44	308	0.2920	16.73	0.5770	33.03	0.7680	43.98
45	351	1.1600	66.46	1.8470	105.82	2.6620	152.53
46	383	-0.0360	-2.06	-0.1210	-6.94	-0.1730	-9.93
47	399	0.1670	9.59	0.0270	1.56	-0.1060	-6.06
48	408	0.0830	4.77	0.0310	1.77	-0.0060	-0.32
49	414	-0.7470	-42.83	-0.9680	-55.46	-1.2740	-73.02
50	423	-0.3260	-18.68	-0.3900	-22.33	-0.4300	-24.63
$V(0) =$		0.137	p.u.	0.421	p.u.	0.337	p.u.
$\Delta MET =$		0.200	p.u.	-0.084	p.u.		

4.3 Resultados en Sistema SEIN50

4.3.2 Estabilidad Transitoria mediante Simulación en el Dominio del Tiempo ** Caso 2 **

c) Resultados de Integración Numérica

Tiempo de Eliminación $t_{cl1} = 0.01$ s.

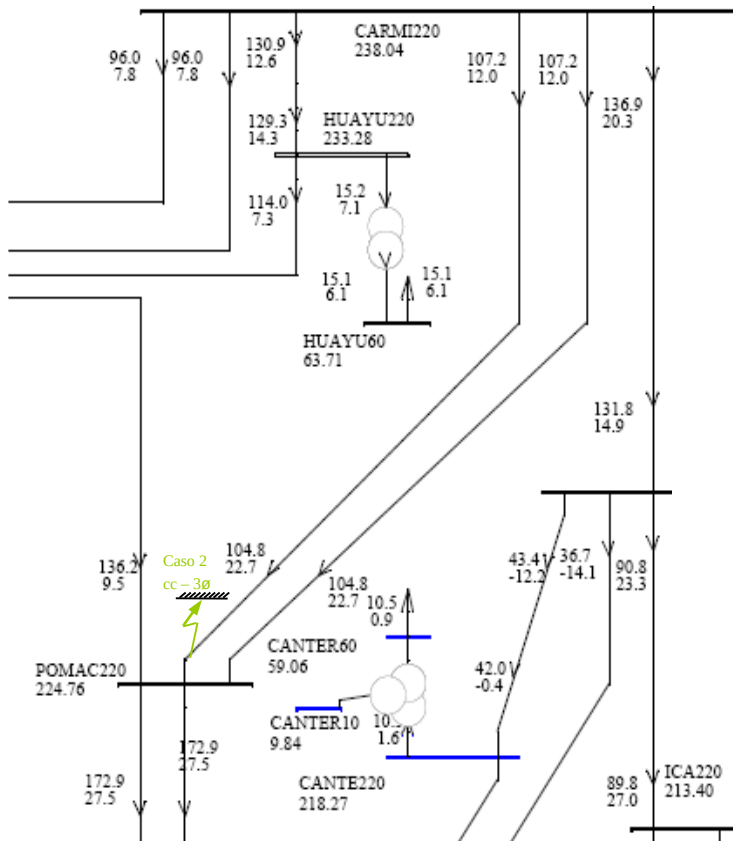


4.3 Resultados en Sistema SEIN50

4.3.2 Estabilidad Transitoria mediante Simulación en el Dominio del Tiempo ** Caso 2 **

c) Resultados de Integración Numérica

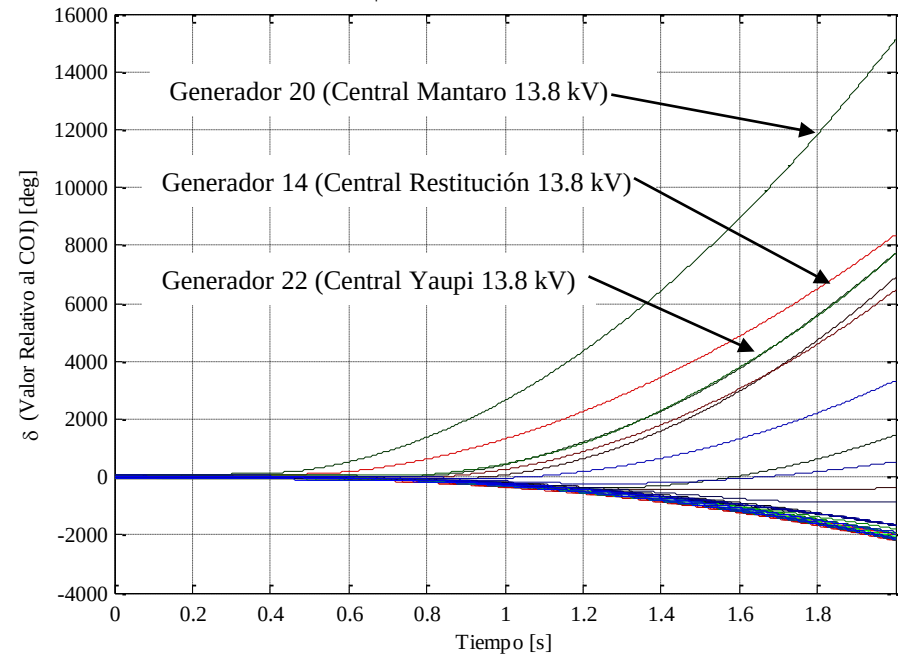
Tiempo de Eliminación $t_{cl2} = 0.03$ s.



SISTEMA SEIN50 (50 generadores, 460 barras)

Evento 1: cc-3φ en la Barra 64, en $t = 0$ s

Evento 2: Eliminación de cc-3φ con salida de línea: Barra 64 - Barra 65, en $t = 0.03$ s

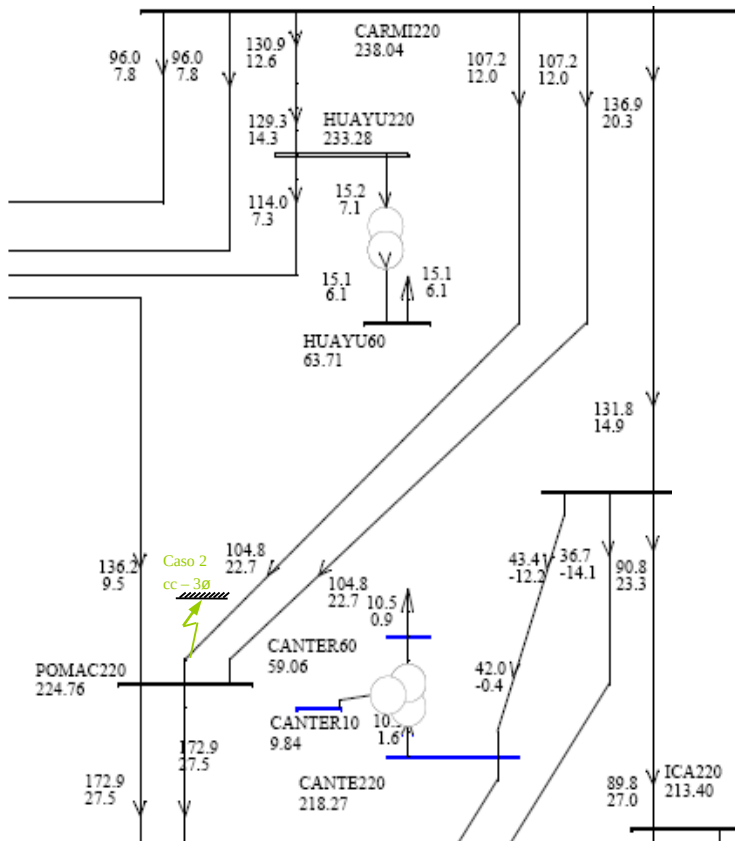


4.3 Resultados en Sistema SEIN50

4.3.3 Funciones de Energía Transitoria ** Caso 2 **

- Curvas

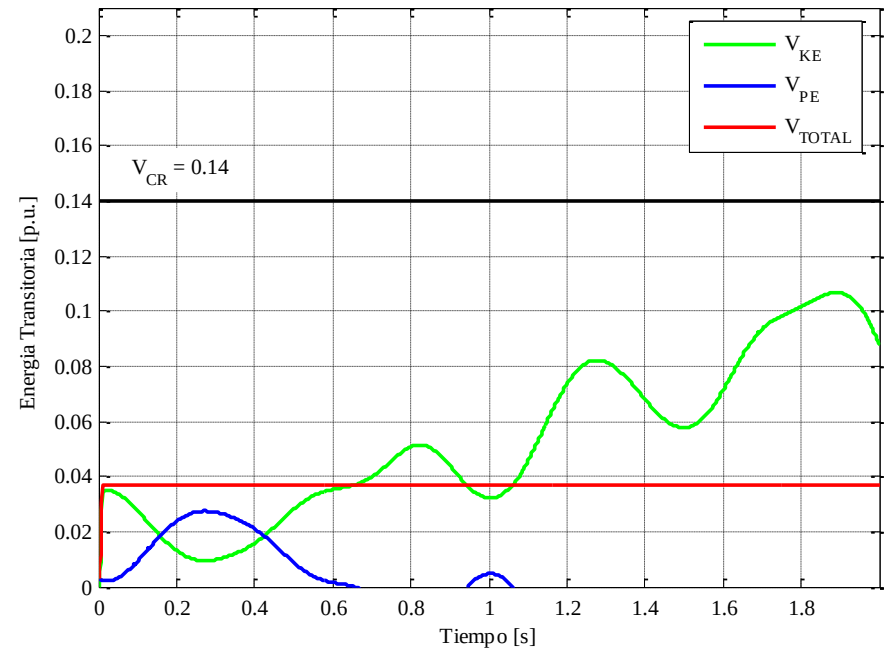
Tiempo de Eliminación $t_{cl1} = 0.01$ s.



SISTEMA SEIN50 (50 generadores, 460 barras)

Evento 1: cc-3φ en la Barra 64, en $t = 0$ s

Evento 2: Eliminación de cc-3φ con salida de línea: Barra 64 - Barra 65, en $t = 0.01$ s

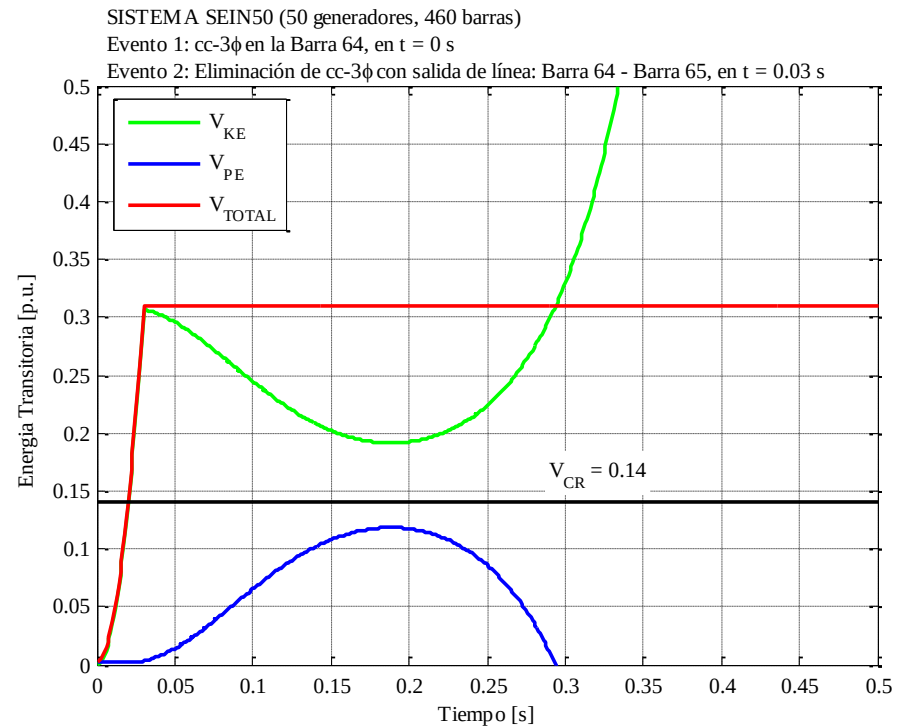
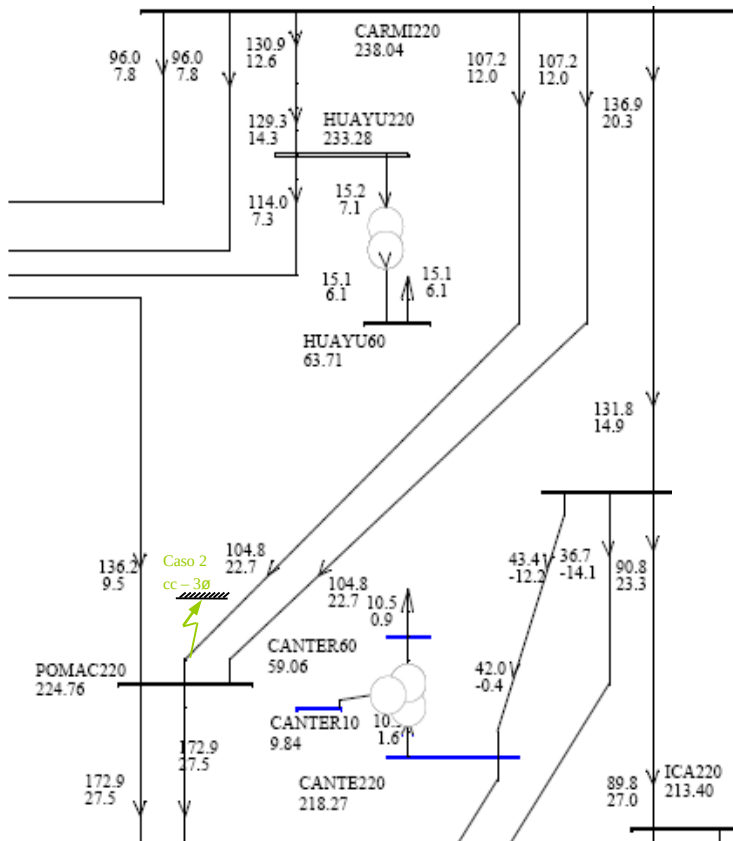


4.3 Resultados en Sistema SEIN50

4.3.3 Funciones de Energía Transitoria ** Caso 2 **

- Curvas

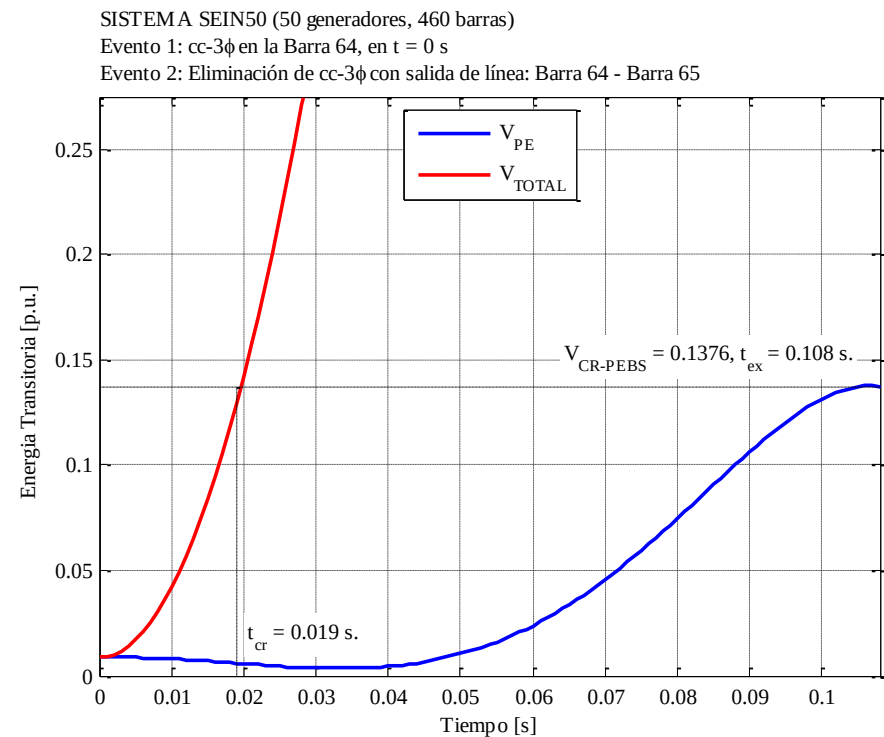
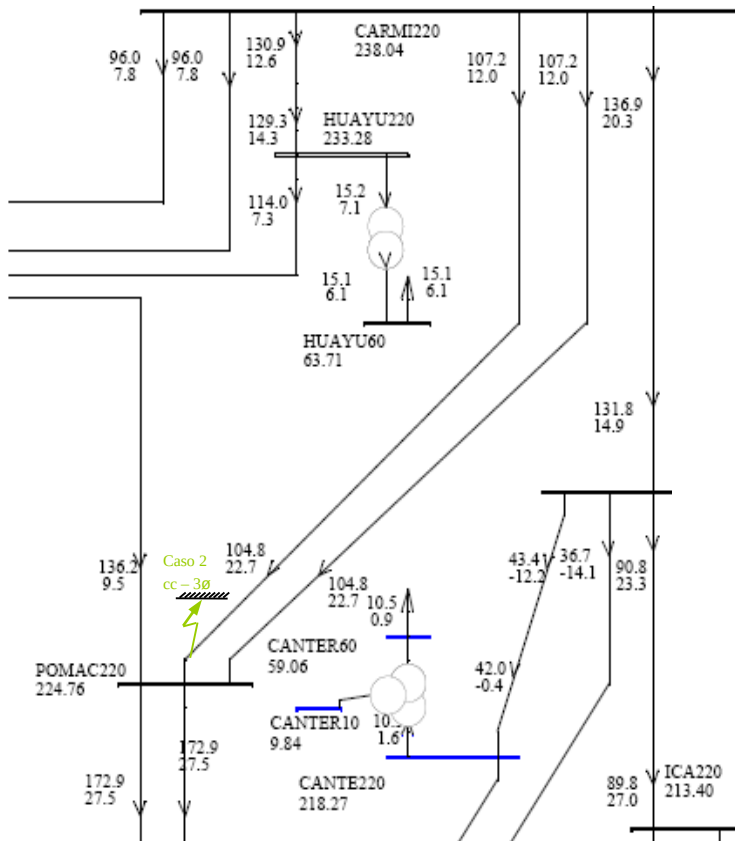
Tiempo de Eliminación $t_{cl2} = 0.03$ s.



4.3 Resultados en Sistema SEIN50

4.3.4 Estabilidad Transitoria mediante Método Directo basado en FET ** Caso 2 **

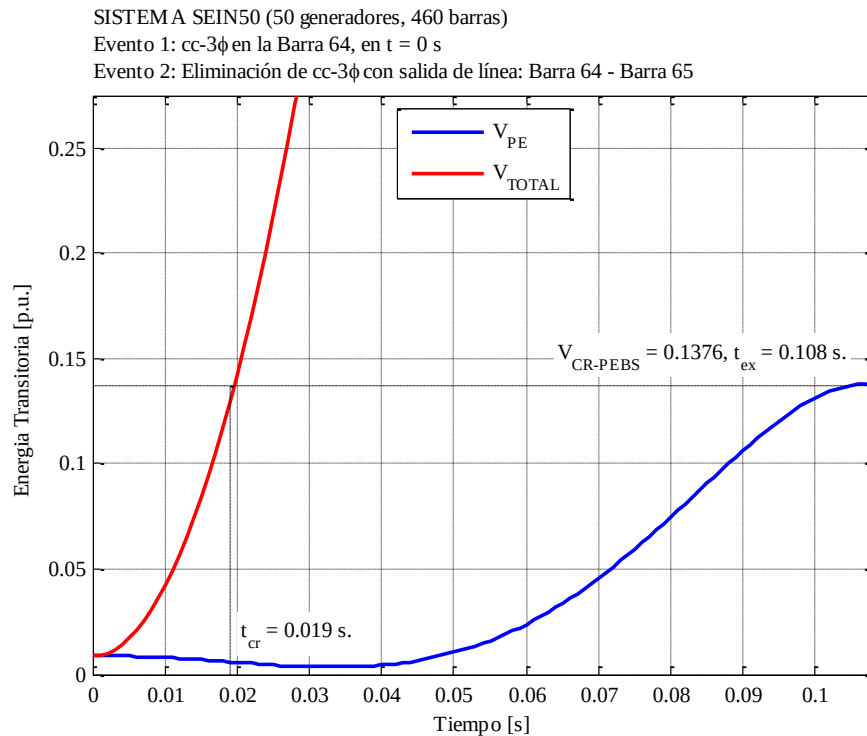
a) Método PEBS



4.3 Resultados en Sistema SEIN50

4.3.4 Estabilidad Transitoria mediante Método Directo basado en FET ** Caso 2 **

a) Método PEBS



b) Márgenes de Energía

Identificación de Generador		$t_{cl} = 0.01$		$t_{cl} = 0.03$		$t_{ex} = 0.11$	
		θ_i^{cl}		θ_i^{cl}		θ_i^{ex}	
i	# Barra	(rad)	(deg)	(rad)	(deg)	(rad)	(deg)
1	7	-0.5180	-29.70	-0.5300	-30.37	-0.6850	-39.27
2	24	0.3930	22.51	0.3920	22.44	0.3730	21.34
3	29	0.2030	11.63	0.1960	11.24	0.1060	6.10
4	39	-0.3190	-18.25	-0.3270	-18.75	-0.4370	-25.04
5	40	-0.3180	-18.23	-0.3270	-18.71	-0.4350	-24.91
6	42	-0.3260	-18.69	-0.3220	-18.43	-0.2720	-15.61
7	43	0.5270	30.18	0.5400	30.95	0.7130	40.85
8	44	-0.2100	-12.01	-0.2130	-12.19	-0.2530	-14.49
9	47	-0.4390	-25.18	-0.4510	-25.83	-0.5960	-34.16
10	50	-0.2040	-11.68	-0.1930	-11.04	-0.0720	-4.11
41	294	-0.1140	-6.53	-0.1230	-7.03	-0.2360	-13.52
42	296	-0.0490	-2.79	-0.0590	-3.38	-0.1930	-11.05
43	304	0.6950	39.85	0.6870	39.35	0.5740	32.88
44	308	0.1630	9.34	0.1530	8.74	0.0170	0.97
45	351	0.8660	49.62	0.8600	49.25	0.7760	44.48
46	383	0.0070	0.38	0.0050	0.30	-0.0090	-0.50
47	399	0.2180	12.47	0.2110	12.11	0.1300	7.45
48	408	0.1150	6.58	0.1260	7.20	0.2690	15.41
49	414	-0.6870	-39.37	-0.7010	-40.18	-0.8930	-51.17
50	423	-0.2870	-16.44	-0.2910	-16.68	-0.3430	-19.66
$V(\theta) =$		0.042 p.u.		0.310 p.u.		0.138 p.u.	
$\Delta MET =$		0.096 p.u.		-0.172 p.u.			

5. Conclusiones

5.1 Conclusiones

- A partir de la aplicación de la metodología en Sistemas de Prueba:
 1. El método PEBS obtuvo un buen desempeño al predecir el tiempo crítico.
 - ❖ Existieron casos donde la estimación fue muy precisa (sistemas ATHAY3 e IEEE17) en comparación a las técnicas de simulación numérica en el dominio del tiempo, hubo un caso (sistema WSCC3) donde el método se acercó con cierto grado de exactitud.
 2. Este método permite calcular en forma aproximada la energía crítica.
 - ❖ El cálculo de la energía crítica exacta es aun un desafío hoy en día.
 - ❖ Teóricamente este valor se obtiene al evaluar la energía transitoria en el UEP de control, el cual está asociado a una falla particular.
 3. La región de estabilidad es una superficie multidimensional muy compleja.
 - ❖ Valiéndose de algunas propiedades del sistema dinámico, el método PEBS utiliza la superficie frontera de energía potencial y la trayectoria de falla sostenida para generar aproximaciones del UEP de control.
 4. Con los métodos directos se introducen conceptos como: energía del sistema, margen de energía, los cuales ayudan a determinar en forma cualitativa y cuantitativa la estabilidad del sistema.
 - ❖ El margen de energía es muy útil para calificar la estabilidad sin calcular el tiempo crítico, además da la idea de cuan lejos está la frontera de estabilidad, es decir, una distancia medida en energía total del sistema.

5.1 Conclusiones

- A partir de la aplicación de la metodología en el SEIN:
 1. Los tiempos críticos calculados por el método PEBS estuvieron muy próximos a los calculados por simulación en el dominio del tiempo.
 - ❖ Los casos presentados mostraron los problemas de estrés del sistema y condiciones críticas de operación.
 2. Los métodos directos están calificados para superar problemas de tiempo computacional en el procesamiento y capacidad de análisis de la estabilidad transitoria en la operación en tiempo real.
 3. Es importante la aplicación de estos métodos en distintas tareas de planeamiento y operación:
 - ❖ Auxilio a la operación del sistema
 - ❖ Introducir conceptos de energía que pueden abreviar y explicar condiciones desfavorables en el sistema
 4. Los métodos directos, como el método PEBS, se sitúan en una área que continuamente se esta desarrollando en el ámbito académico, y la dirección de ese interés recae en su potencial uso en análisis de seguridad dinámica.

5.1 Conclusiones

- Como trabajos futuros se tiene lo siguiente:
 1. Desarrollar nuevas metodologías que actualmente están siendo desarrolladas, como: método BCU, método shadowing, etc.
 - ❖ Existen aplicaciones de estos métodos en sistemas de prueba y reales, y actualmente están siendo integrados como herramientas para el auxilio en la operación.
 2. Se están desarrollando nuevas funciones de energía asociadas a los controladores y FACTS, se podría probar la eficacia de estas con sistemas reales bajo condiciones reales de operación.
 3. Índices de estabilidad transitoria son calculados a partir de la información de los métodos directos basados en funciones de energía, por consiguiente se podría reutilizar esta información para su inserción y codificación en rutinas dentro de programas abiertos de análisis de estabilidad transitoria.