



ESTABILIDAD DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

ROBERTO RAMIREZ ARCELLES
2017

CAPITULO 4.

ESTABILIDAD TRANSITORIA

4.1 DEFINICION

Es la capacidad del sistema de potencia de mantener el sincronismo cuando es sometido a una gran perturbación. Se asocia fundamentalmente a la operación en paralelo de las máquinas síncronas en el sistema.

Un generador síncrono pierde estabilidad cuando “pierde el paso” con respecto al resto del sistema de potencia.

En esta condición, el rotor del generador síncrono alcanza valores de ángulo más allá de cierto ángulo crítico en el cual, se rompe el acople magnético entre el rotor (y por lo tanto el motor primo) y el estator.

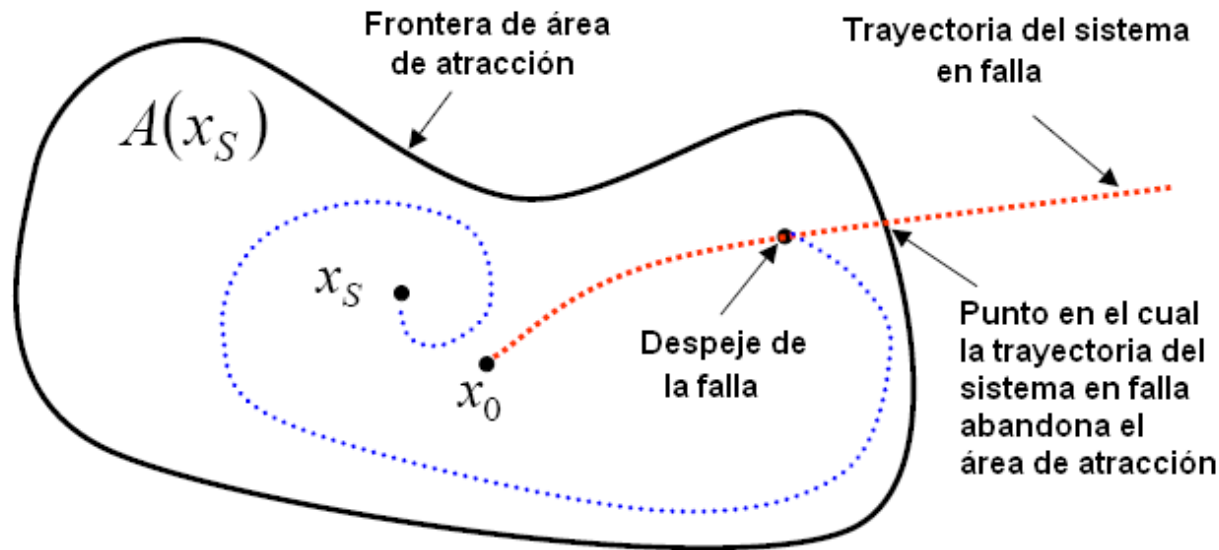
4.2 METODOS DE ANALISIS

Directos: Son métodos que permiten estudiar la estabilidad transitoria mediante el análisis de las variaciones posibles de la energía en las diferentes fases del movimiento de los rotores después de producida la perturbación.

Indirectos o de simulación: Se diagnostica la estabilidad mediante la inspección de la evolución en el tiempo de las principales magnitudes de operación del sistema luego del evento.

4.3 METODOS DE ANALISIS DIRECTOS

Permiten estudiar la estabilidad transitoria mediante el análisis de las variaciones posibles de la energía en las diferentes fases del movimiento de los rotores después de producida la perturbación.



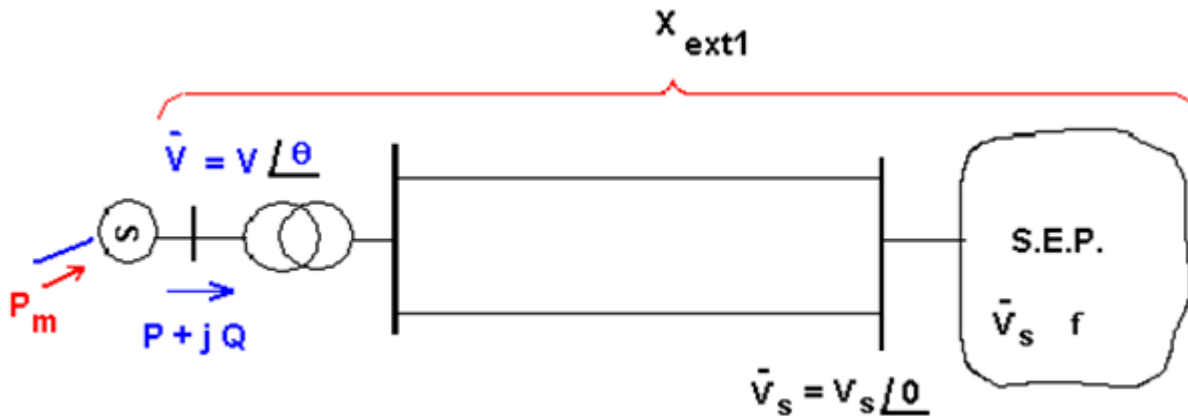
$A(x_S)$ área de atracción del sistema post-falla

x_S punto de operación del sistema post-falla

x_0 punto de operación del sistema pre-falla

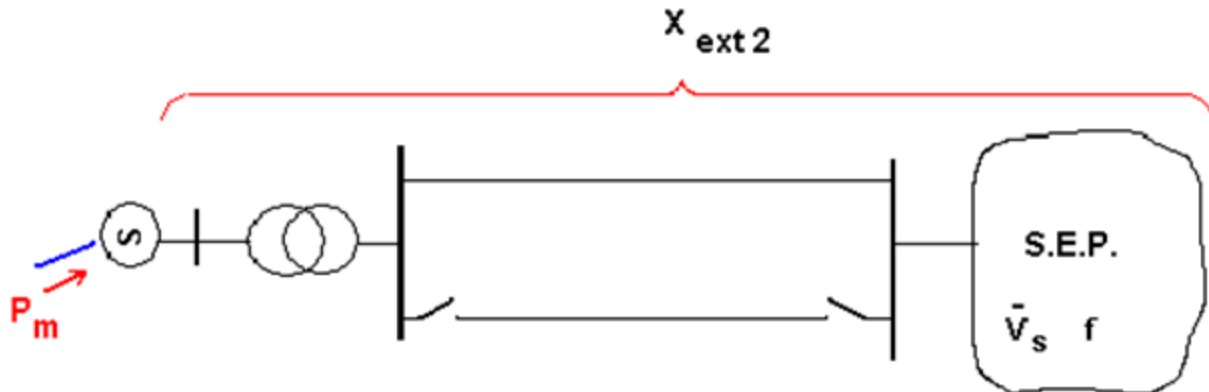
4.3.1 CRITERIO DE IGUALDAD DE ÁREAS, SISTEMA GENERADOR-LÍNEA-BARRA INFINITA

En el sistema elemental se analiza el cambio brusco provocado por la desconexión de una de las líneas de transmisión.



Sistema operando en estado estacionario.

Sistema operando en estado estacionario con una línea fuera de servicio.



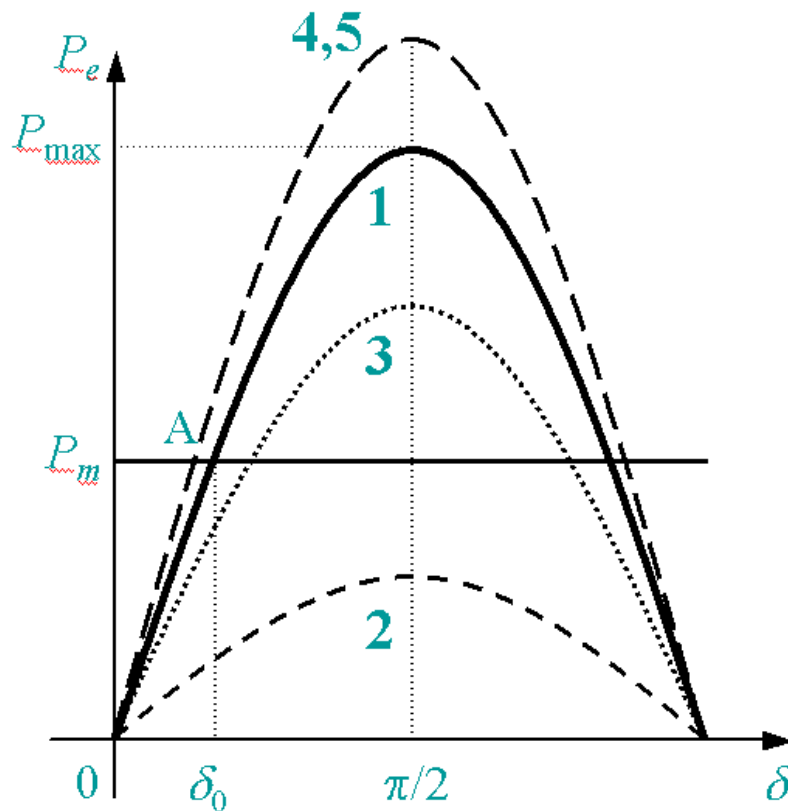
SUPUESTOS

- a. Modelo clásico para el generador, con pérdidas despreciables.
- b. Sistema de transmisión conservativo. Considerar despreciable el efecto capacitivo de las líneas. Por lo tanto, los modelos del transformador y de la línea son X_t y X_L /circuito.
- c. El motor primo (turbina) se modela como una potencia mecánica P_m . Los cambios en la potencia de la turbina son enteramente dependientes de la acción de control iniciada por el regulador de velocidad, el cual actúa aproximadamente después de 1 segundo. Por lo tanto en la primera oscilación $P_m \approx$ constante.

d. P_e es la potencia electromagnética del generador. De acuerdo al modelo asumido, está dada por:

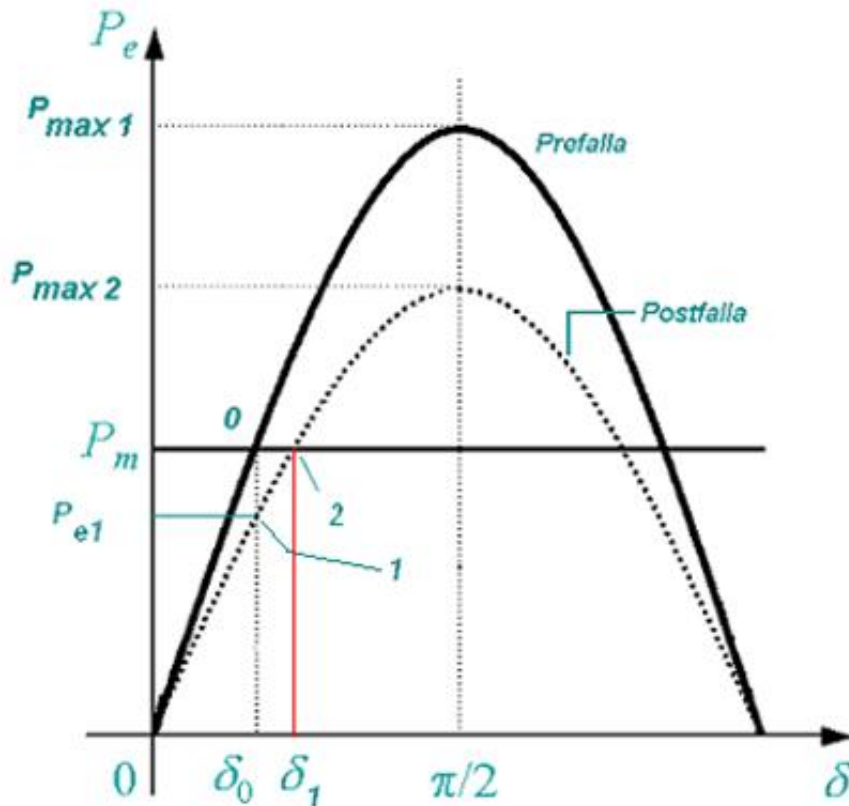
$$P_e = \frac{E'_q}{X'_{d\Sigma}} V_s \sin \delta; \quad X'_{d\Sigma} = X'_d + X_{\text{ext}}$$

Puede asumir las siguientes formas:



ANÁLISIS DE LA DESCONEXIÓN BRUSCA DE UNA LÍNEA

Las características cuasi-estacionarias que definen los puntos de operación en los sistemas operando con dos o con una línea de transmisión.



“0”: punto de operación del sistema antes de la falla, caracterizado por el ángulo δ_0 .

“2”: nuevo punto de operación del sistema al final del transitorio, caracterizado por el ángulo δ_1 .

Del análisis de estas características se deduce que un cambio brusco de los parámetros del sistema (*la impedancia entre los bornes y el S.E.P. cambia de X_{ext1} a X_{ext2}*) produce en el sistema el paso del régimen “0” al régimen “2”.

En el punto de operación “0”: del sistema esta en equilibrio, caracterizado por el ángulo δ_0 , se cumple:

$$P_m - P_{e0} = P_{ac} = 0 \quad (\underline{\omega}=1,0; \Delta\underline{\omega}=0)$$

Al salir fuera de servicio una de las líneas de transmisión, se rompe el equilibrio; instantáneamente la potencia electromagnética disminuye hasta el valor P_{e1} y aparece un desbalance en la potencia acelerante que producirá la aceleración del rotor del generador.

Por lo tanto, en este instante se cumple que:

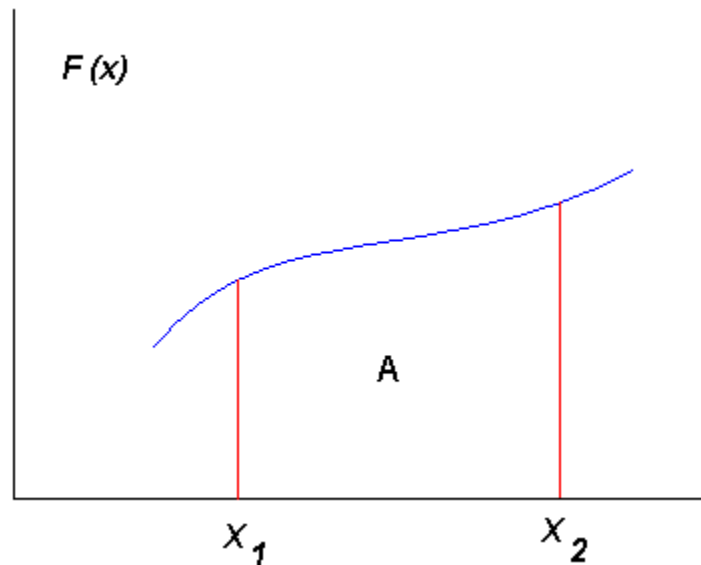
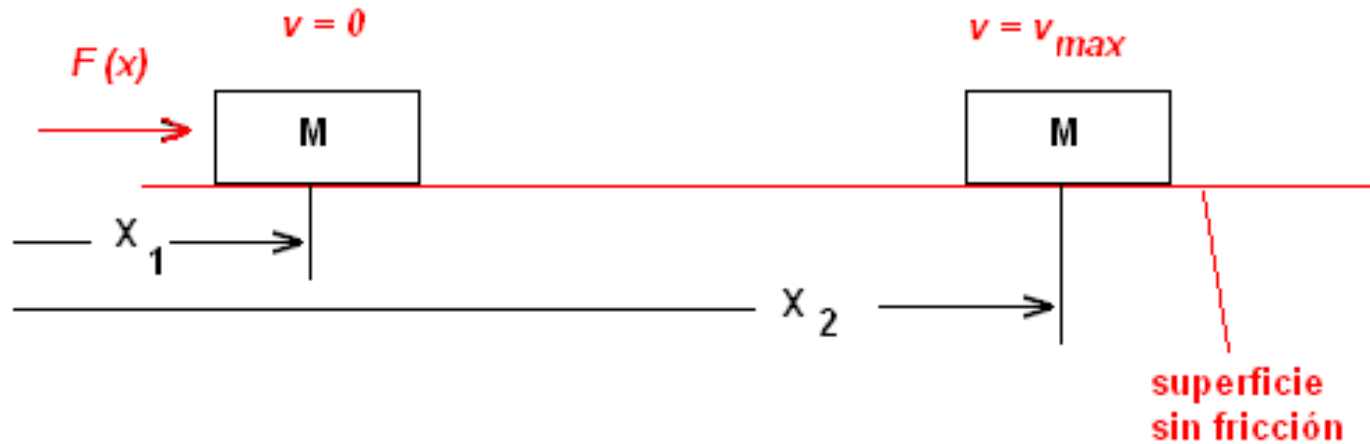
$$P_{ac} = 2H \frac{d\omega}{dt} > 0; \quad \text{entonces} \quad \frac{d\omega}{dt} > 0$$

A partir del momento en que se rompe el equilibrio se inicia un proceso de aceleración del rotor, que estará descrito por la ecuación:

$$P_{ac} = P_{m0} - P_{max2} \sin \delta = 2H \frac{d\omega}{dt}$$

Mediante un criterio denominado Igualdad de Áreas se probará la estabilidad transitoria sin obtener la evolución en el tiempo del ángulo de los rotores.

Recordemos el sistema traslacional de la figura



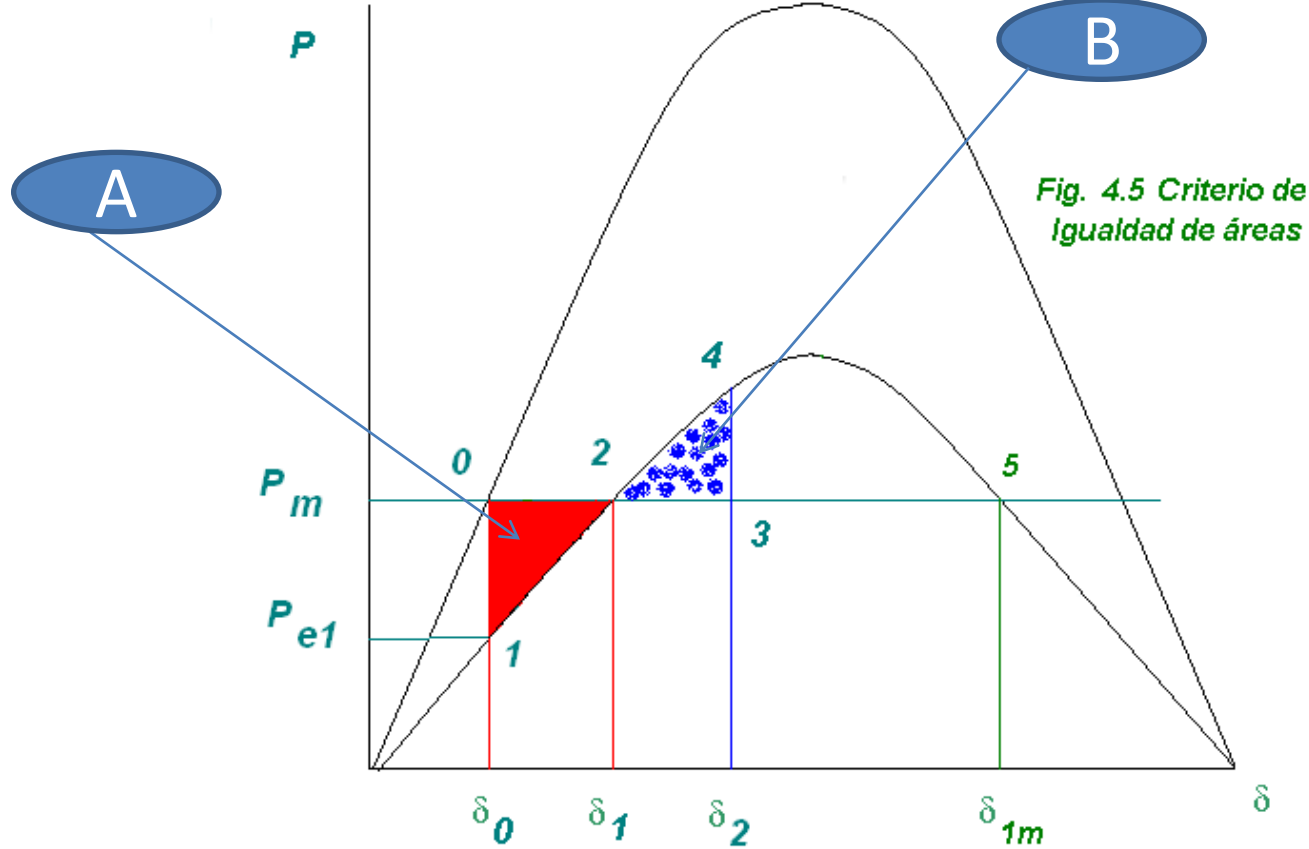
En este movimiento se realiza un trabajo que se define como el aumento de la energía cinética en el espacio recorrido.

$$M v_{\max}^2 = \int_{X1}^{X2} F(x) dx = A$$

Para nuestro caso:
$$A = \int_{\delta_0}^{\delta_1} P_{ac} d\delta = \frac{(2H)(v_{\max}^2)}{2}$$

A representa la energía cinética almacenada en el rotor desde δ_0 hasta δ_1 , que se expresa como:

$$A = P_m (\delta_1 - \delta_0) + P_{\max 2} (\cos \delta_1 - \cos \delta_0)$$



Durante la aceleración del rotor, en el instante t_1 (cuando δ asume el valor δ_1), la potencia acelerante se hace nula, cumpliéndose:

$$P_{ac} = 0; \quad \frac{d\omega}{dt} = 0; \quad \Delta\omega > 0$$

Para $t > t_1$ y $\delta > \delta_1$, la potencia acelerante se hace negativa:

$$P_{ac} = 2H \frac{d\omega}{dt} < 0; \text{por lo tanto } \frac{d\omega}{dt} < 0$$

Estas ecuaciones indican que "empieza la desaceleración o frenado del rotor".

Al llegar el rotor al ángulo δ_2 toda la energía cinética se convierte en energía potencial que alcanza su máximo y se tiene:

$$\omega = 1,0; \quad \Delta \omega = 0,0; \quad \Delta P_{ac} < 0$$

La energía potencial **B** o de frenado esta expresada por:

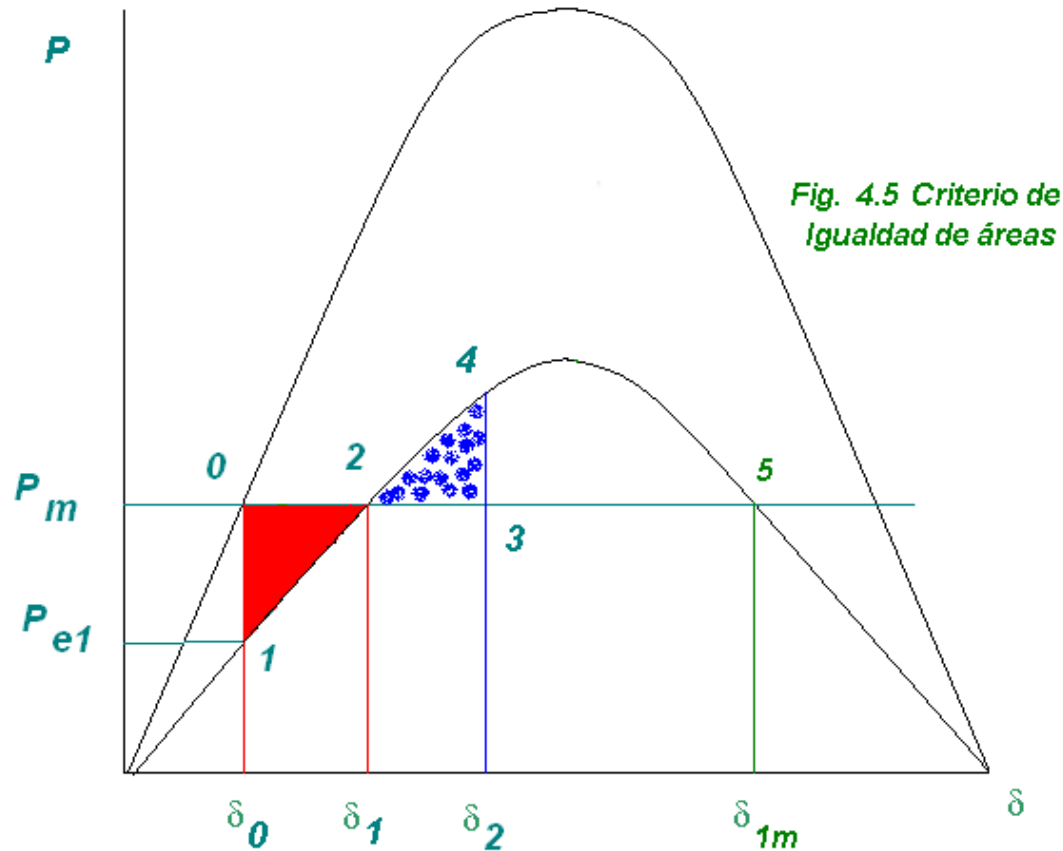
$$B = P_{\max 2} (\cos \delta_1 - \cos \delta_2) - P_m (\delta_2 - \delta_1)$$

Por lo tanto igualando las áreas de aceleración **A** y frenado **B** se obtiene el máximo ángulo de oscilación del rotor (δ_2)

$$\delta_2 + \frac{P_{\max 2}}{P_m} \cos \delta_2 = \delta_0 + \frac{P_{\max 2}}{P_m} \cos \delta_0$$

La condición crítica se da cuando $\delta_2 = 180^\circ - \delta_1 = \delta_{1m}$, en este caso el generador todavía recupera el sincronismo y el área de aceleración resulta igual a la máxima área de frenado posible.

Se puede decir que en este caso el sistema no tiene reserva de estabilidad y se cumple que: $S_{0120} = S_{23542}$



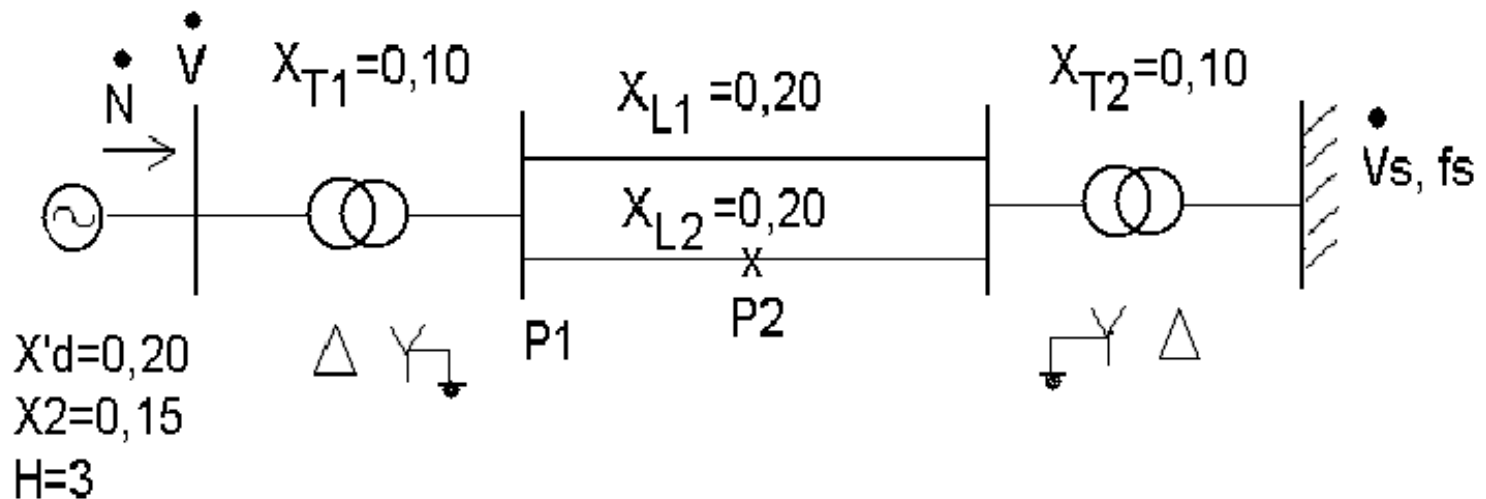
Sin embargo, se pierde la estabilidad cuando:

$$S_{0120} > S_{23542}$$

4.3.2 APLICACIONES: CRITERIO DE IGUALDAD DE ÁREAS

A: SISTEMA GENERADOR-LÍNEA-BARRA INFINITA

Se utiliza el sistema mostrado en la Figura 4.6, con el régimen inicial y los parámetros indicados, tal que siendo $V_s=1.0$ p.u., se cumple: $P_m \approx P = 0.989$; $Q = 0.15$; $I = 1.0 \angle 8.63^\circ$ p.u.; $E'_q = 1.049$ p.u.; $\delta_0 = 28.12^\circ$



A.1 Interpretación del criterio Igualdad de Áreas

Imaginar una falla trifásica fugaz en una línea muy cerca de la barra en el punto P_1 , que se extingue en 5 ciclos y suponer que la protección de la línea esta deshabilitada.

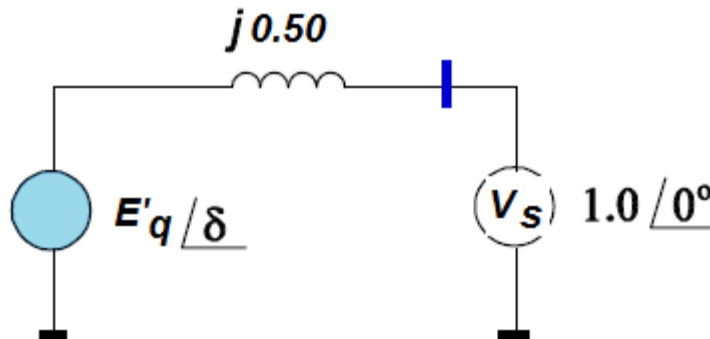
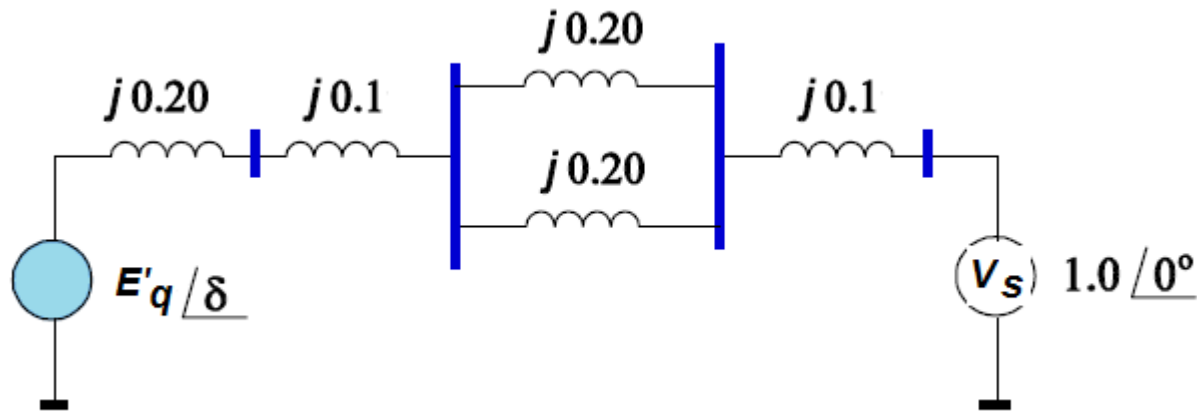
Determinar si se compromete la estabilidad y cual es el máximo ángulo de oscilación del rotor.

Proceso:

- (1) Calcular la condiciones iniciales y construir la característica P-Delta “Pre Falla”.
- (2) Característica P-Delta “En Falla”.
- (3) Característica P-Delta “Post Falla”.

(1) Condición inicial y construir la característica P-Delta Pre Falla.

$$V_s = 1.000 \text{ p.u.} \quad E'_q = 1.049 \text{ p.u.}$$



$$P_e = \frac{E'_q}{0.5} V_s \sin \delta$$

$$P_e = 2.098 \sin \delta$$

Característica P-Delta En Falla: Como la barra se conecta a tierra la potencia es cero.

Característica P-Delta Post Falla: Como la falla es fugaz, la topología post-falla es la misma que la Pre Falla.

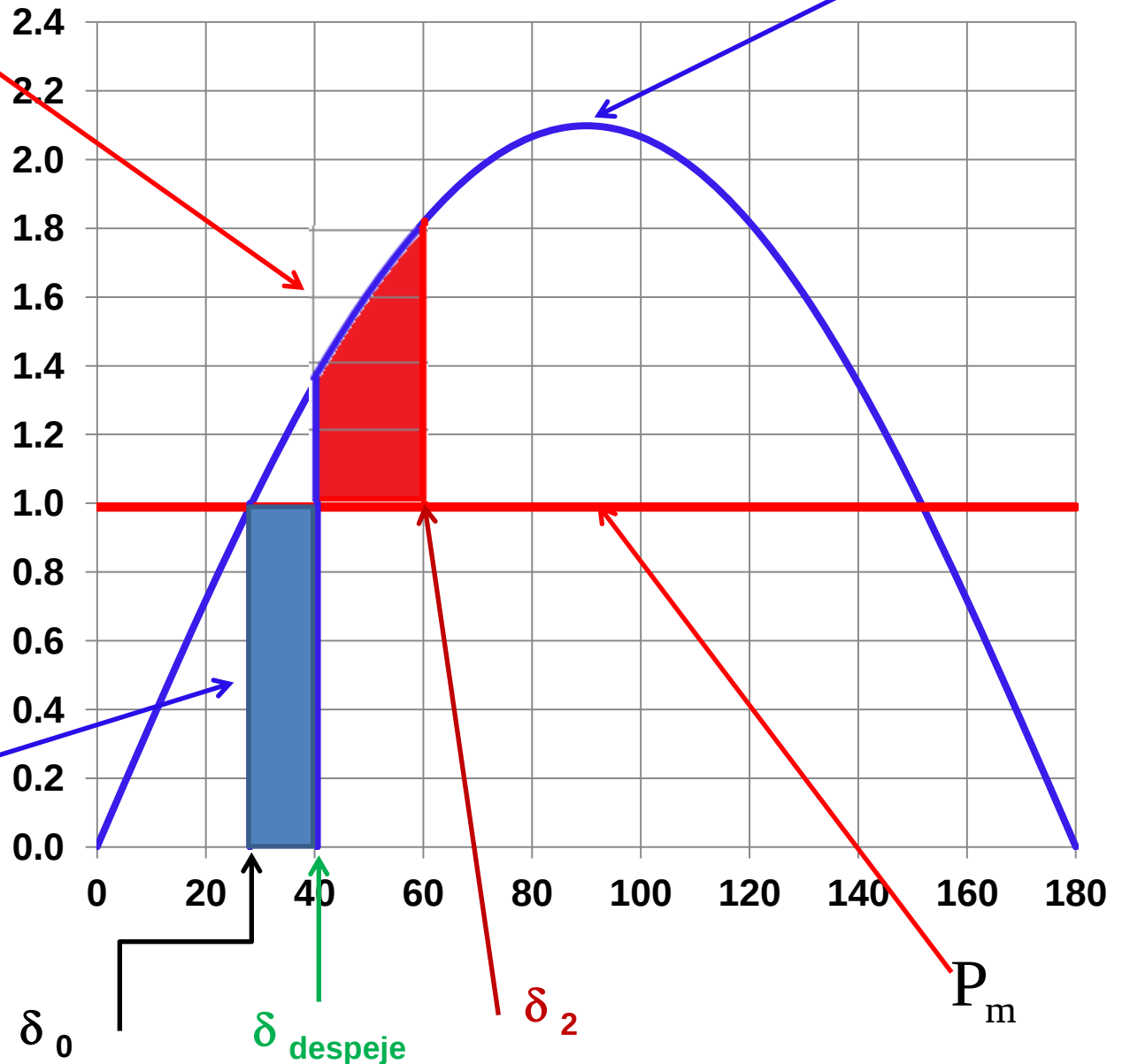
$$B = P_{\max 1} (\cos \delta_{\text{DESPEJE}} - \cos \delta_2) - P_m (\delta_2 - \delta_{\text{DESPEJE}})$$

$$P_{\text{ePRE FALLA}} = P_{\text{ePOST FALLA}}$$

**CRITERIO
DE ESTABILIDAD**

$$A = B$$

$$A = P_m (\delta_C - \delta_0)$$



La ecuación de aceleración del rotor es: $P_m = \frac{2H}{w_0} \frac{d}{dt} \left(\frac{d\delta}{dt} \right)$

Como P_m es constante, la solución de la ecuación diferencial, integrada desde las condiciones iniciales de estado estacionario a momento en que se despeja la falla es:

$$\delta_{DESPEJE} - \delta_0 = \frac{w_0 P_m}{4H} (t_{DESPEJE}^2)$$

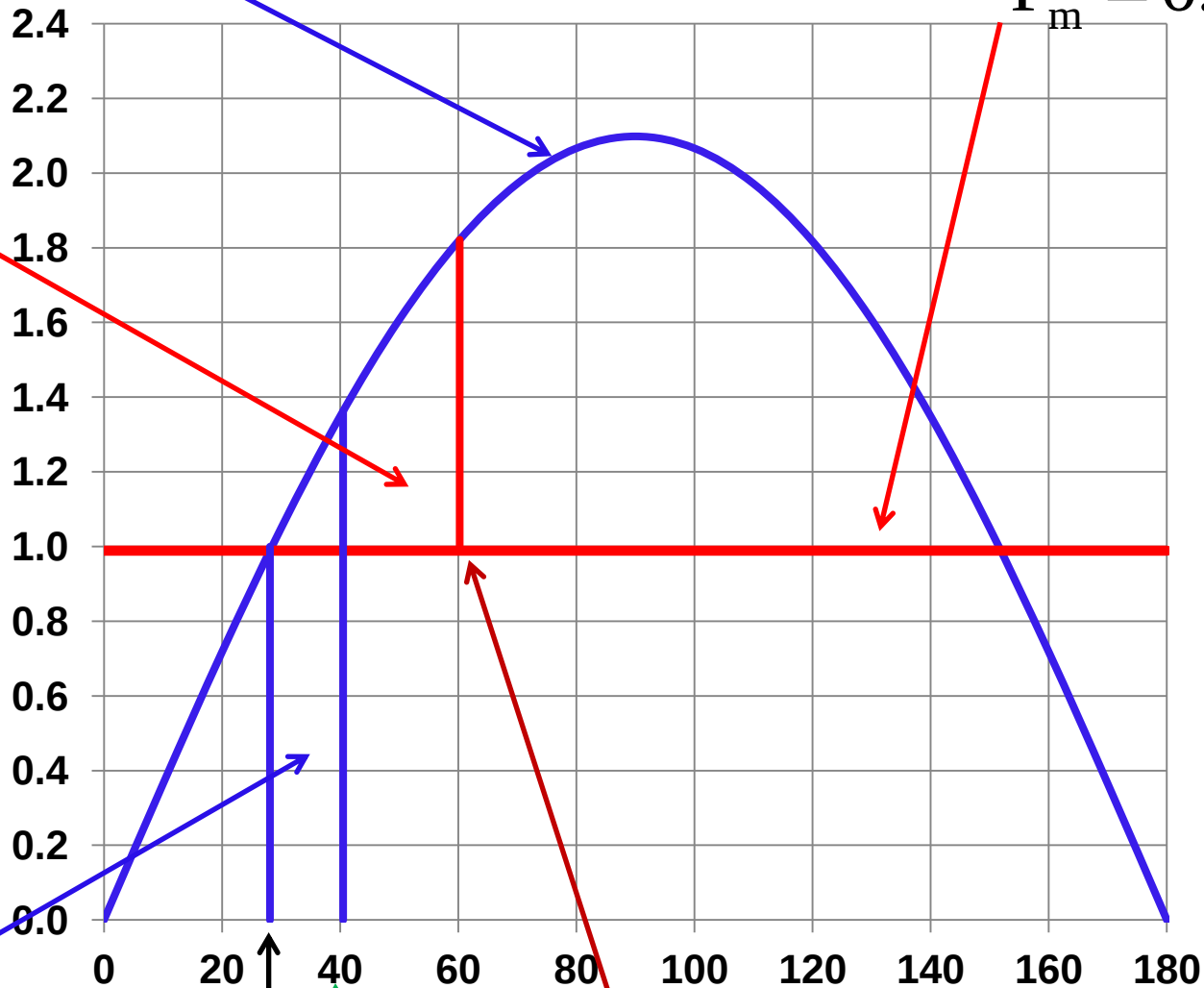
$$\delta_{despeje} = 40.5^\circ$$

$$P_e = 2.098 \sin \delta$$

$$P_m = 0.989$$

B

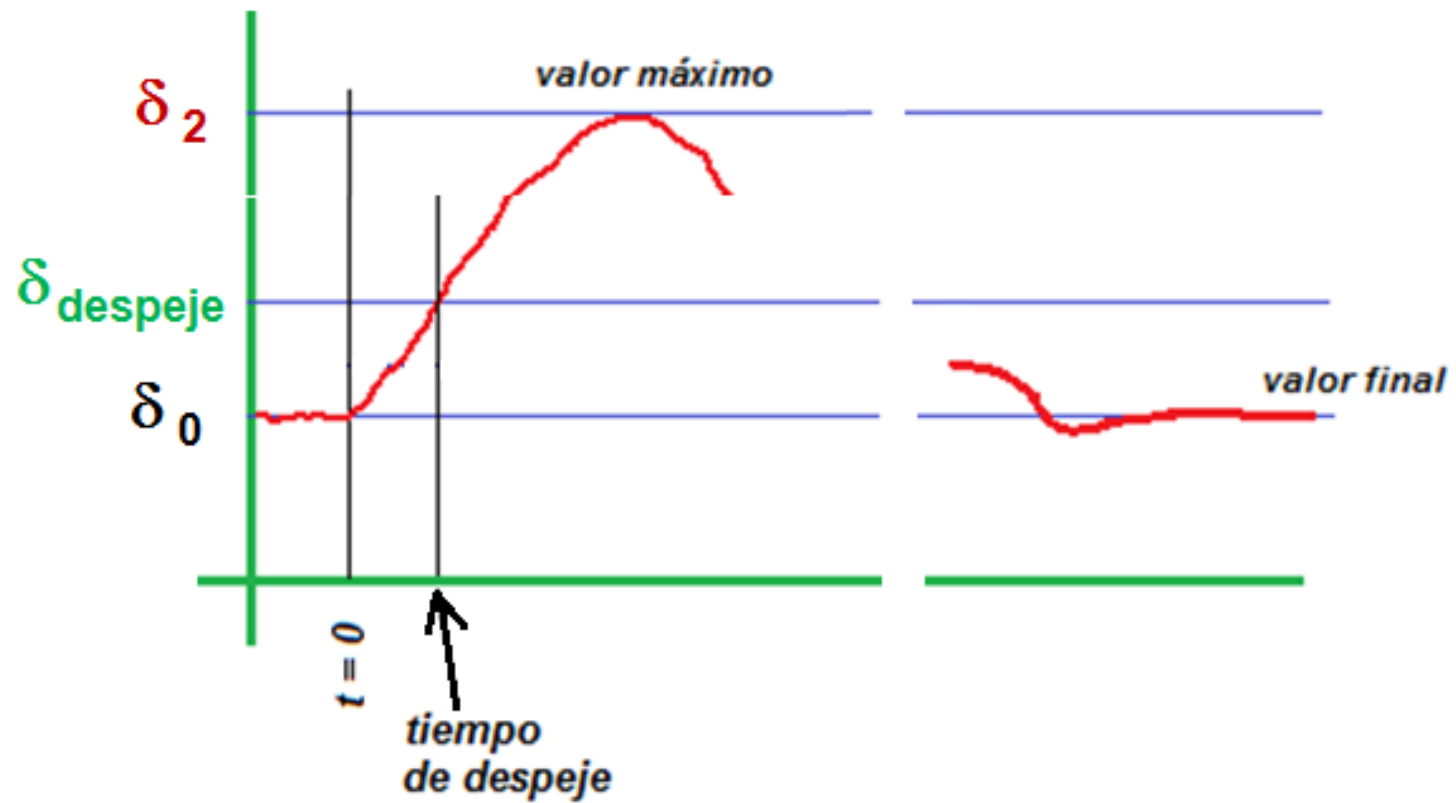
A=0.2134



$$\delta_0 = 28.12^\circ$$

$$\delta_{\text{despeje}} = 40.5^\circ$$

$$\delta_2 = 60.24^\circ$$



A.2 Efecto de la ubicación de la falla

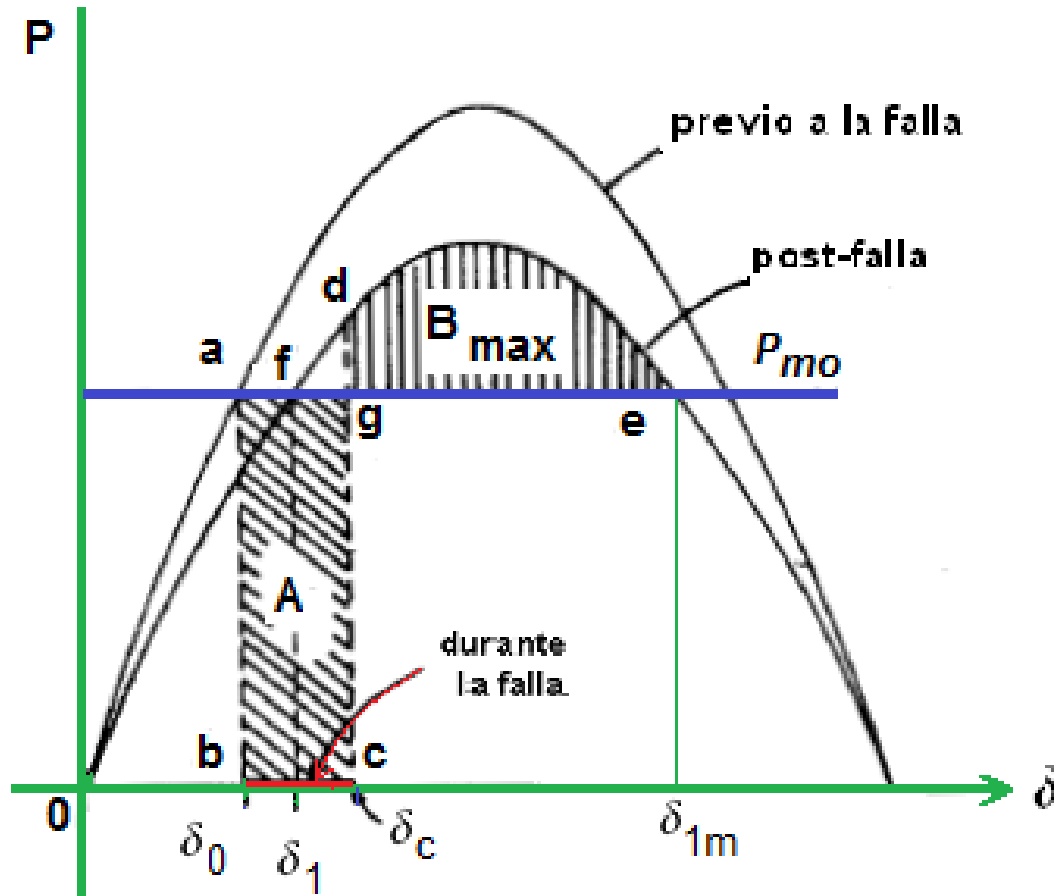
Se supone una falla trifásica en una de las líneas, cerca de la barra en " P_1 " y en otro caso, en " P_2 ", punto medio de la línea.

La falla se despeja mediante la apertura de los interruptores correspondientes.

•Tiempo crítico de despeje de falla para una falla en P_1

Cuando la falla trifásica se presenta en P_1 el criterio de igualdad de áreas se muestra en la Figura

CRITERIO DE ESTABILIDAD



$$A = B_{\max}$$

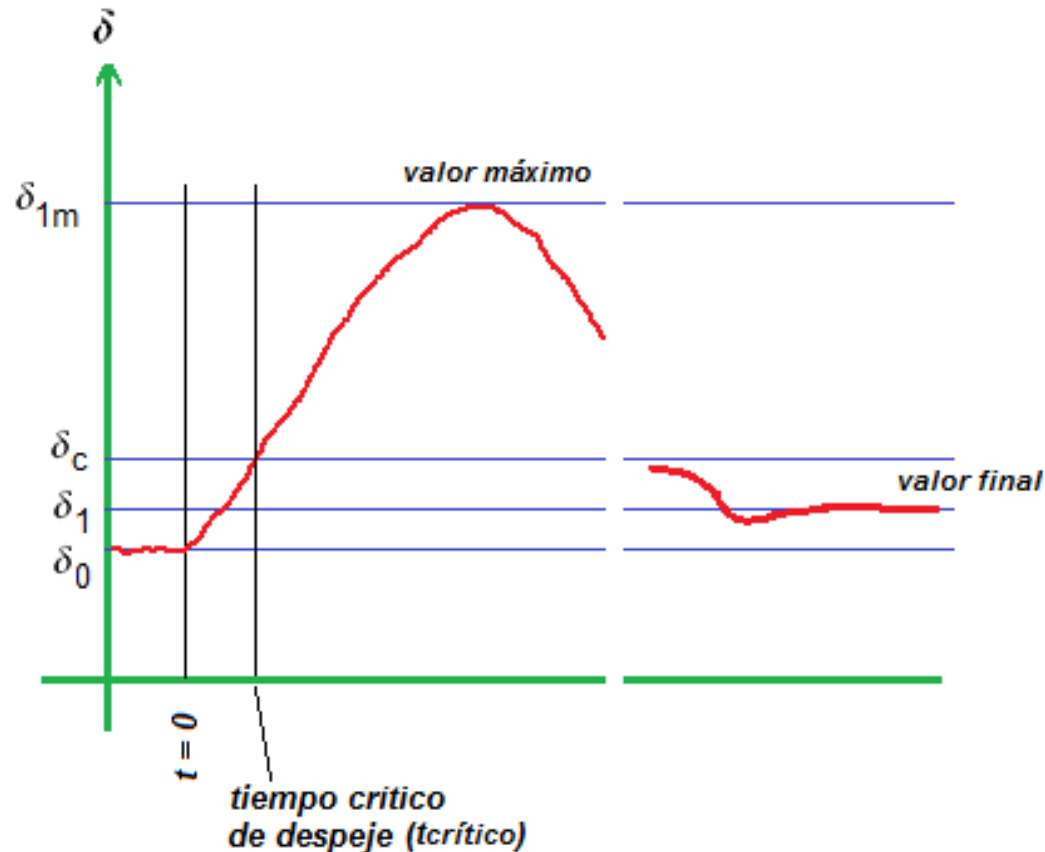
$$A = P_m (\delta_C - \delta_0) \quad B_{\max} = P_{\max 2} (\cos \delta_C - \cos \delta_{1m}) - P_m (\delta_{1m} - \delta_C)$$

El ángulo crítico resulta:

$$\cos \delta_C = \cos \delta_{1m} + \frac{P_m}{P_{\max 2}} (\delta_{1m} - \delta_0)$$

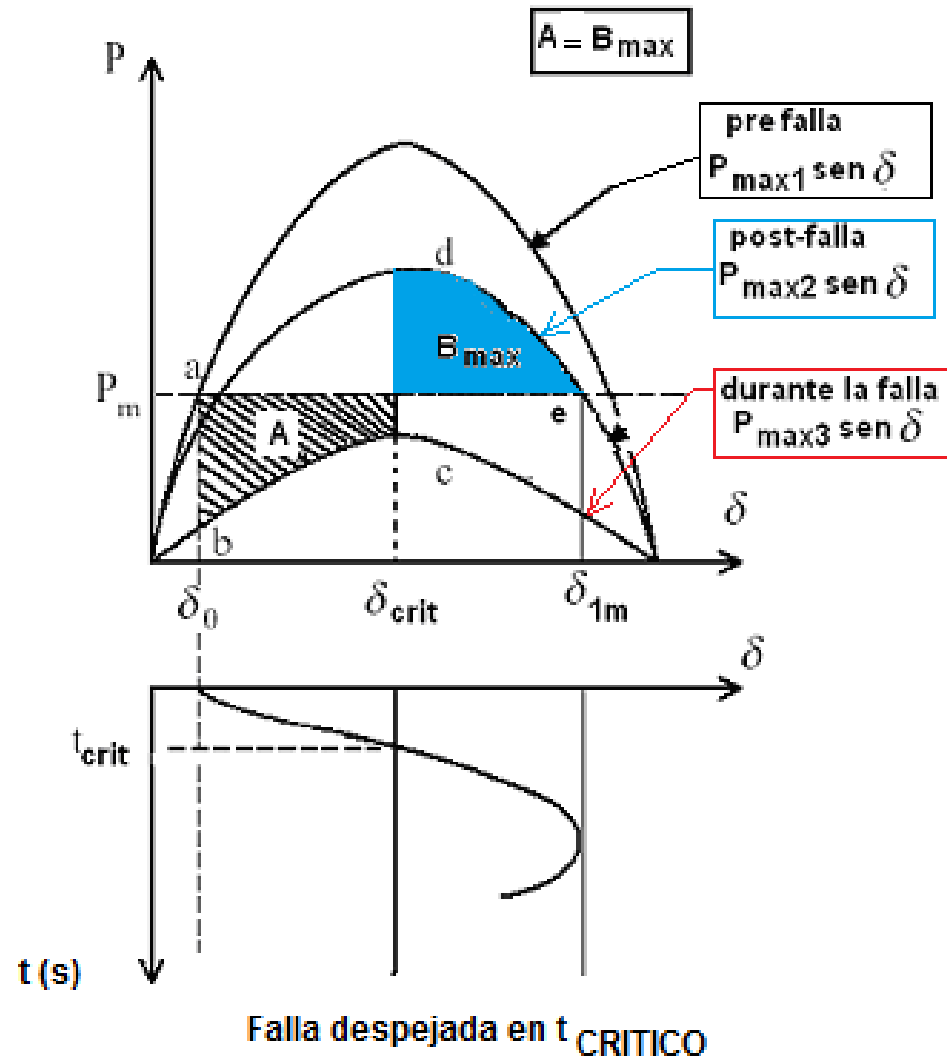
La ecuación de aceleración del rotor es: $P_m = \frac{2H}{w_0} \frac{d}{dt} \left(\frac{d\delta}{dt} \right)$

Como P_m es constante: $t_{\text{CRITICO}} = \sqrt{\frac{4H(\delta_c - \delta_0)}{w_0 P_m}}$



•Tiempo crítico de despeje de falla para una falla en P_2

Cuando la falla trifásica se presenta en "P2", el criterio de igualdad de áreas se muestra en la Figura.



El ángulo crítico δ_c se obtiene de la siguiente relación:

$$\cos \delta_C = \{P_m (\delta_{1m} - \delta_0) + P_{\max 2} \cos \delta_{1m} - P_{\max 3} \cos \delta_0\} / (P_{\max 2} - P_{\max 3})$$

En este caso la ecuación diferencial de aceleración del rotor es:

$$P_m - P_{\max 3} \sin \delta = \frac{2H}{w_0} \frac{d}{dt} \left(\frac{d\delta}{dt} \right)$$

Puede utilizarse la siguiente aproximación:

$$P_{\max 3 AVE} \cong \left[\int_{\delta_0}^{\delta_C} P_{\max 3} \sin \delta d\delta \right] / (\delta_C - \delta_0)$$

la ecuación diferencial puede se aproxima a:

$$P_m - P_{\max 3 AVE} \cong \frac{2H}{w_0} \frac{d}{dt} \left(\frac{d\delta}{dt} \right)$$

El tiempo crítico se estima con:

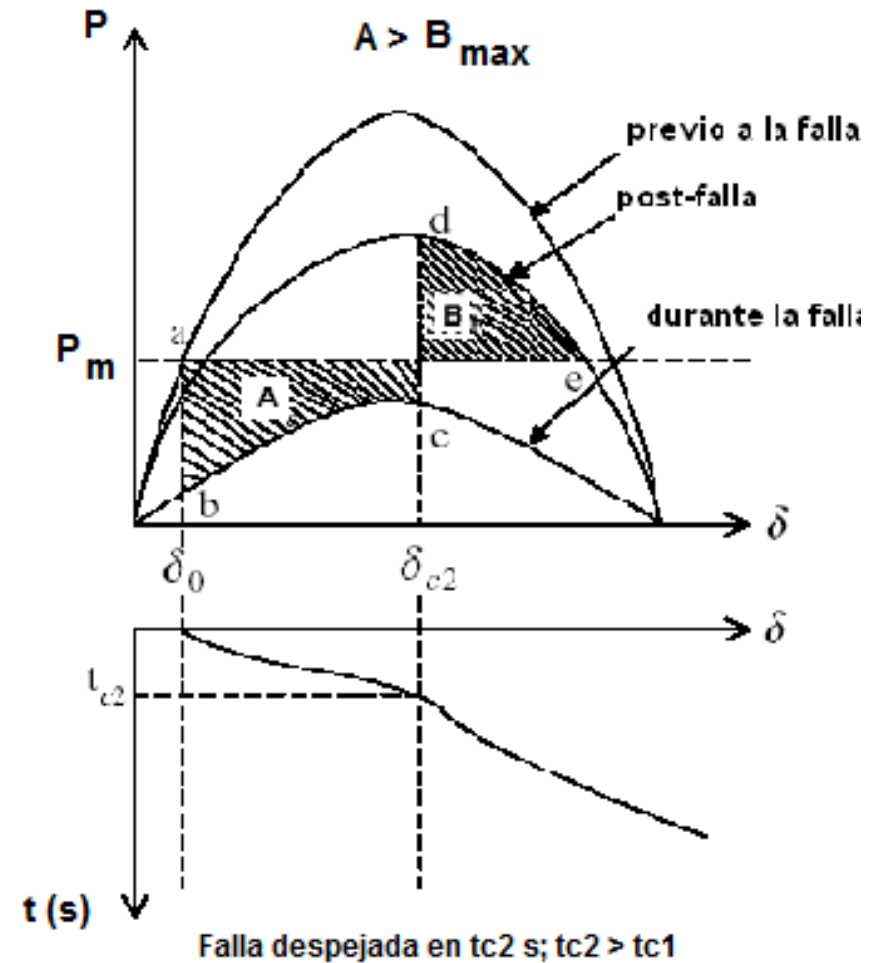
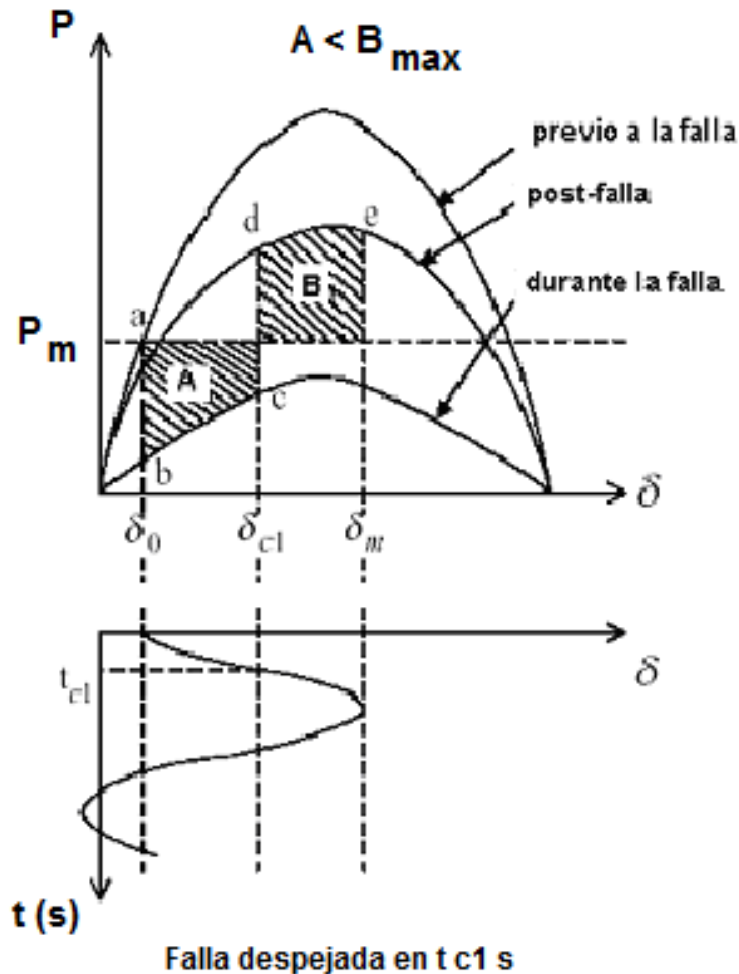
$$t_{\text{CRITICO}} = \sqrt{\frac{4H(\delta_C - \delta_0)}{w_0(P_m - P_{\max 3 AVE})}}$$

En el cuadro se muestra el efecto de la ubicación de la falla sobre la característica $P_e - \delta$, el ángulo crítico del rotor y el tiempo crítico de despeje de la falla.

FALLA EN	PRE FALLA	EN FALLA	POST FALLA	ANGULO CRITICO DEL ROTOR (Grados)	TIEMPO CRITICO (s)
P1	$2.098 \text{ sen } \delta$	0	$1.7483 \text{ sen } \delta$	70.44	0.154
P2	$2.098 \text{ sen } \delta$	$0.404 \text{ sen } \delta$	$1.7483 \text{ sen } \delta$	80.19	0.207

Se aprecia que la falla que requiere menor tiempo de apertura es la que se ubica más cerca de la central de generación.

Criterio de igualdad de áreas a un caso de falla en " P_2 ",
que resulta estable e inestable, respectivamente.



A.3 Efecto del tipo de falla

Para simular fallas asimétricas en el punto P_2 del sistema, se debe considerar en la red de secuencia positiva, en el punto de falla, una impedancia de falla Z_f que depende del tipo de falla.

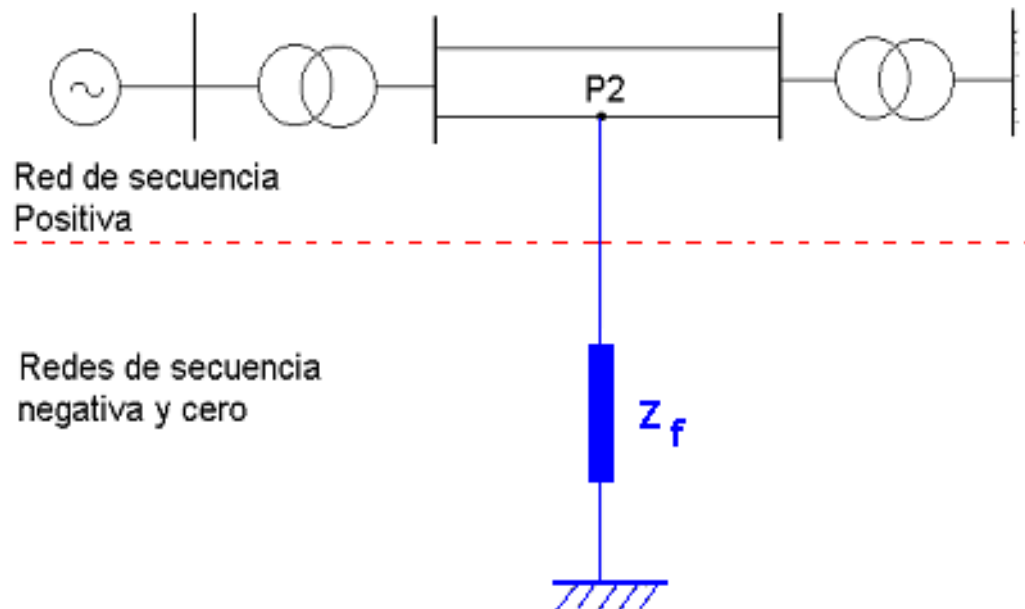


Fig. 4.10

Tipo de Falla	Impedancia de Falla Z_f
Trifásica a tierra 3F	0
Bifásica LL	X_{2eq}
Bifásica a tierra LLG	$X_{2eq} X_{0eq} / (X_{2eq} + X_{0eq})$
Monofásica a tierra LG	$X_{2eq} + X_{0eq}$

X_2 y X_0 : reactancias Thevenin de secuencia negativa y cero en el punto de falla

Utilizando los datos del sistema se obtiene la característica $P_e - \delta$ durante la falla.

Tipo de Falla	$P_e - \delta$ en falla	Impedancia de Falla Z_f
3F	0.404 sen δ	0
LL	1.235 sen δ	0.125
LG	1.556 sen δ	0.275
LLG	0.986 sen δ	0.068

El orden de severidad de las fallas es 3F, LLG, LL y LG.

Factores que influyen en la estabilidad

La estabilidad transitoria de un generador depende de:

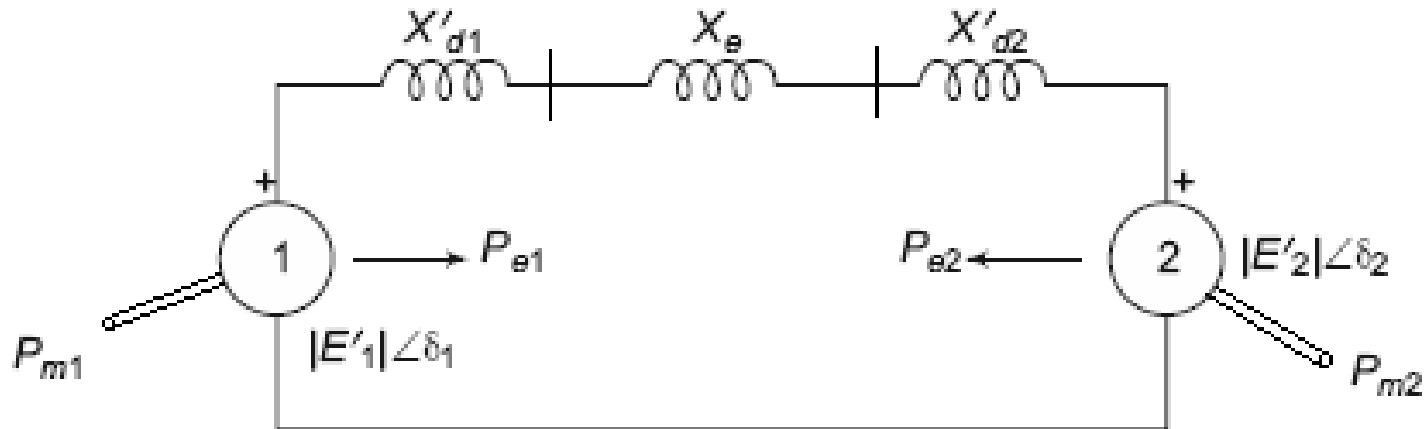
- a) El nivel de carga del generador
- b) La potencia activa de salida del generador durante la falla, que depende de la ubicación y tipo de falla.
- c) El tiempo critico de despeje de falla.
- d) La f.e.m. transitoria $E'q$, que depende de la corriente de excitación (sobre o subexcitación).
- e) La magnitud de la tensión en la barra de conexión del generador con el sistema.
- f) La reactancia del sistema de transmisión post-falla.
- g) La inercia del generador, a mayor inercia menor velocidad de cambio en el ángulo; esto reduce la energía cinética ganada durante la falla.

Se debe remarcar que para fines de planificación, el criterio de estabilidad transitoria que se utiliza para el caso de líneas de doble circuito es la falla trifásica con apertura definitiva. En el caso de líneas de un solo circuito se utiliza como criterio de verificación la falla monofásica con apertura y recierre monofásico.

Los limites de estabilidad transitoria en sistemas existentes se definen utilizando las fallas de mayor ocurrencia en el sistema, en función de la estadística de fallas.

B: SISTEMA GENERADOR-LÍNEA-MOTOR

El sistema elemental de la Figura fue modelado en el Capítulo 3



La ecuación de oscilación equivalente se convierte en:

$$\frac{2H_{12}}{\omega_0} \frac{d^2 \delta_{12}}{dt^2} = P_{m12} - P_{12}$$

$$\frac{d\delta_{12}}{dt} = w_0 \Delta w_{12}$$

Donde:

$$\delta = \delta_1 - \delta_2$$

$$H_{12} = \frac{H_1 H_2}{H_1 + H_2}$$

$$P_{m12} = \left(\frac{H_2 P_{m1} - H_1 P_{m2}}{H_1 + H_2} \right)$$

$$P_{e12} = \left(\frac{H_2 P_{e1} - H_1 P_{e2}}{H_1 + H_2} \right)$$

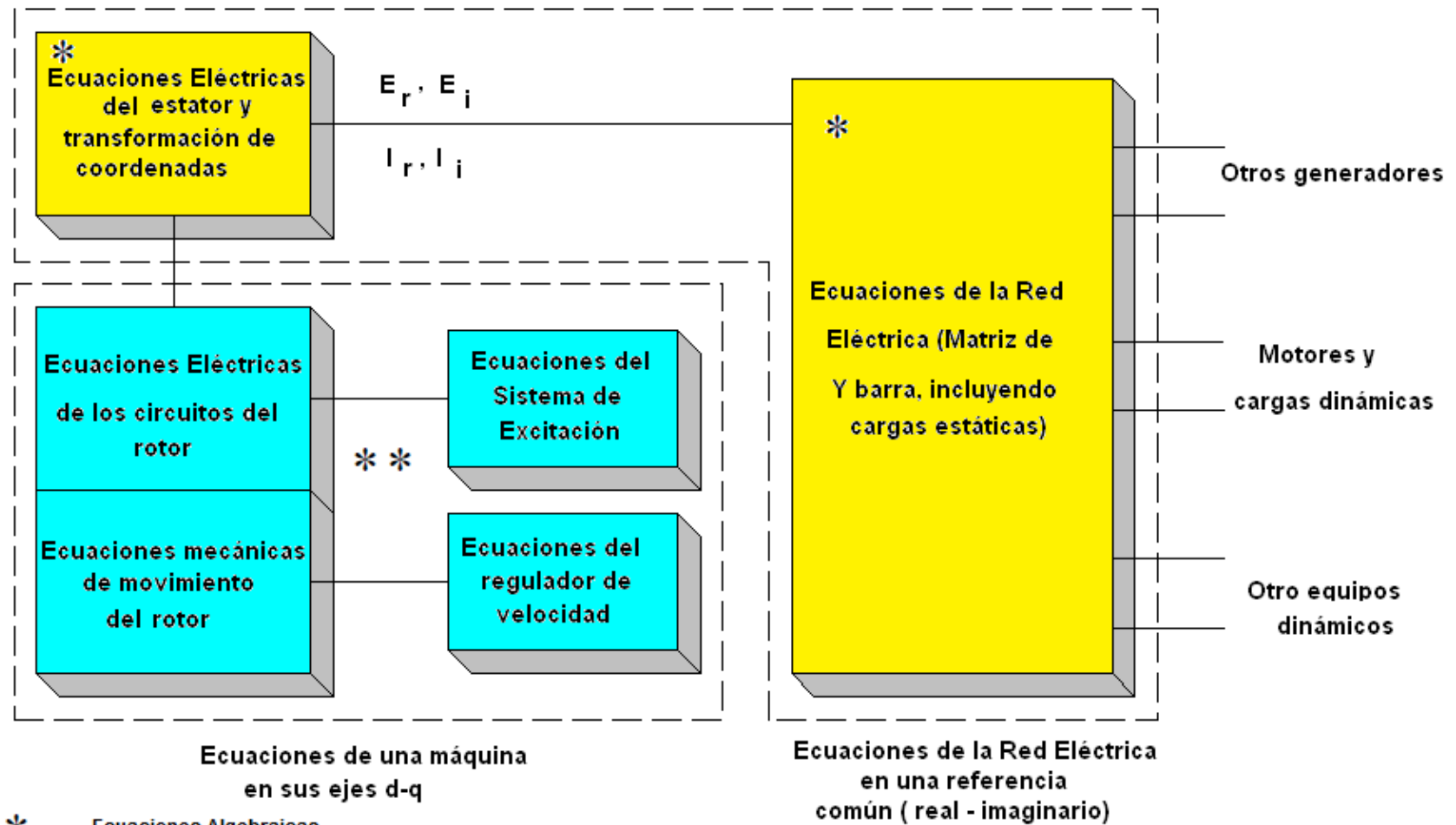
$$P_{12} = \frac{E'_1 E'_2}{X'_{d1} + X'_e + X'_{d2}} \sin \delta$$

4.4 METODOS DE ANALISIS INDIRECTOS

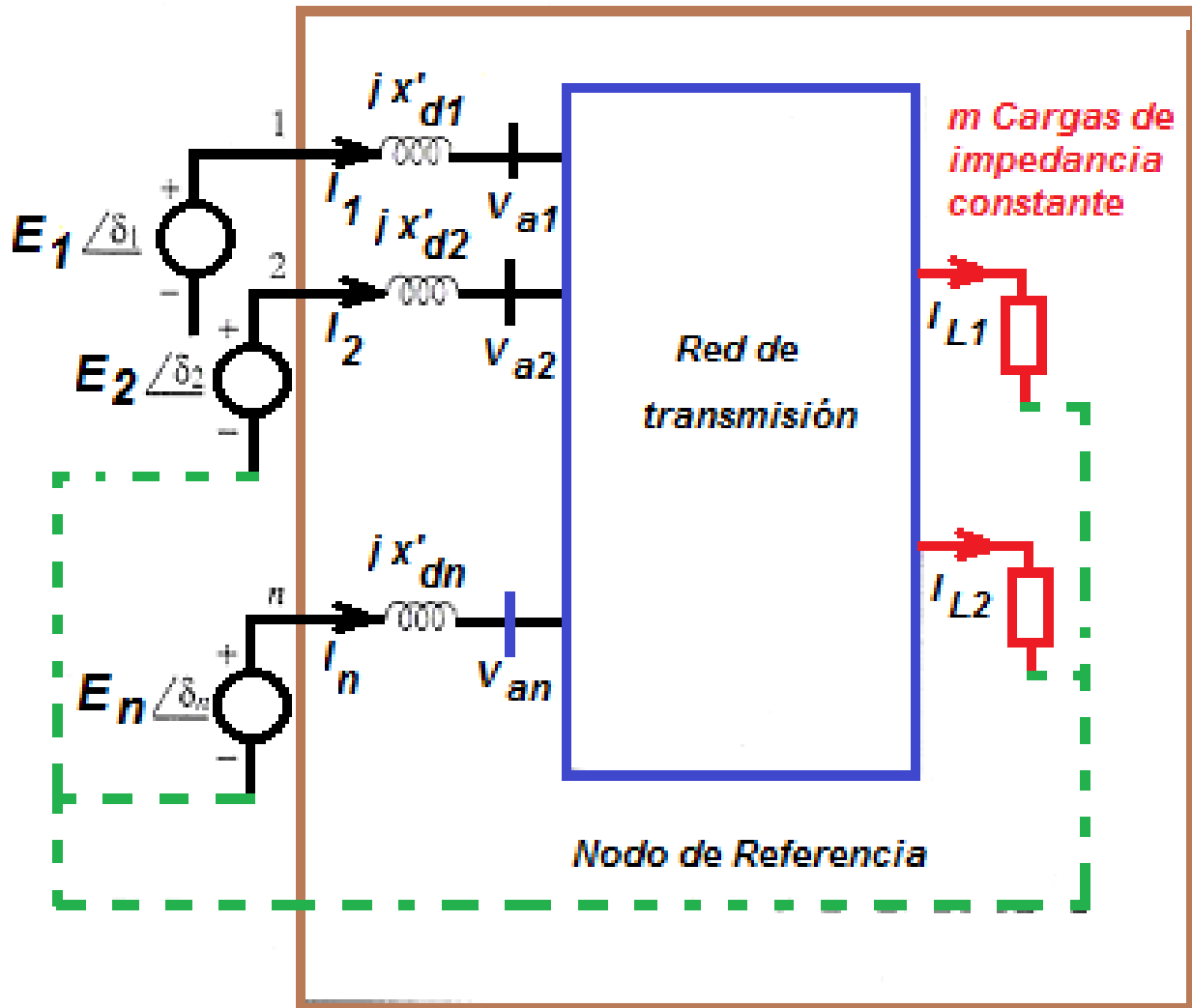
La simulación en el dominio del tiempo consiste en la solución de un sistema de ecuaciones algebraico-diferenciales:

$$\frac{dy}{dx} = F(x, y)$$
$$0 = G(x, y)$$

ESTABILIDAD TRANSITORIA DE UN SISTEMA DE POTENCIA MULTIMÁQUINA



Utilizando el modelo clásico



Modelamiento de las cargas

Se supone que las cargas pueden ser expresadas por un modelo de impedancia constante.

Con la información del flujo de potencia pre-falla, se puede escribir:

$$P_L + jQ_L = V_L \cdot I_L^*$$

Despejando la corriente que consume la carga, resulta:

$$\bar{I}_L = \frac{P_L}{V_L} - j \frac{Q_L}{V_L}$$

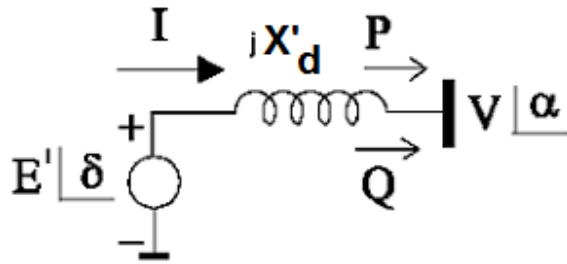
La admitancia de la carga se calcula:

$$\bar{Y}_L = G_L + jB_L = \frac{P_L}{V_L^2} - j \frac{Q_L}{V_L^2}$$

Resulta:

$$P_L + jQ_L = \bar{V}_L [\bar{V}_L (G_L - jB_L)] = V_L^2 (G_L - jB_L)$$

Condiciones iniciales en las máquinas



Si $\alpha = 0$ entonces:

$$\bar{I} = I_r + jI_m = \frac{P}{V} - j\frac{Q}{V}$$

Por otro lado: $\bar{E}' = \bar{V} + jX'_d \bar{I} = (V + \frac{QX'_d}{V}) + j(\frac{PX'_d}{V})$

El módulo es: $E' = \sqrt{(V + \frac{QX'_d}{V})^2 + (\frac{PX'_d}{V})^2}$

El ángulo resulta: $\delta' = \arctan(\frac{PX'_d}{V^2 + QX'_d})$

Por lo tanto el ángulo inicial de carga de este generador será:

$$\delta_0 = \delta' + \alpha$$

Reducción de la red

Los pasos para modelar la red son:

- Conectar las admitancias de las cargas entre las barras de carga y el nodo de referencia.
- Crear nuevas barras para representar las tensiones internas de las máquinas. Estas nuevas barras se conectan a las barras de generación a través de las reactancias transitorias. La numeración de las barras es tal que las “n” primeras son ahora las barras internas de las máquinas.
- Todas las impedancias del sistema aumentado resultante son convertidas en admitancias.

El objetivo de reducir es obtener un modelo de la red en términos de la matriz de admitancia de las barras, de la forma:

$$\bar{I}_n = \bar{Y}_{red} \bar{E}_n$$

$\bar{I}_n$ vector de las corrientes inyectadas en las barras internas

$\bar{E}_n$ vector de las tensiones en las barras internas

$\bar{Y}_{red}$ matriz de admitancia de barras reducida

Para que se modele el sistema de acuerdo a $\bar{I}_n = \bar{Y}_{red} \bar{E}_n$

se debe considerar la ecuación nodal para el sistema aumentado (por las barras internas y admitancias de las cargas):

$$\bar{I} = \bar{Y} \bar{V}$$

I : vector de las corrientes inyectadas en las barras

V : vector de las tensiones en las barras

Y : matriz de admitancia de las barras

Luego de la adición de las barras internas, estas son las únicas cuyas inyecciones son diferentes de cero.

La ecuación puede ser escrita como:

El índice n indica las cantidades referentes de las barras internas de las máquinas y el índice r indica cantidades referentes al resto del sistema. Nótese que las admitancias de las cargas contribuyen para los elementos diagonales de Y_{rr} .

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_n \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{nn} & \vdots & Y_{nr} \\ \dots & \dots & \dots \\ Y_{rn} & \vdots & Y_{rr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{E}_n \\ \dots \\ \dot{V}_r \end{bmatrix}$$

Ec. 4.18

Si las barras de generación de las máquinas fueran numeradas de $n + 1$ a $2n$, y la barra $n + 1$ correspondiera a la barra de generación de la barra interna i , la ecuación anterior podrá ser escrita como:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_n \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y'_{d1} & & & \vdots & -y'_{d1} & & \vdots & & \\ & \ddots & & \vdots & & \ddots & \vdots & & \\ & & y'_{dn} & \vdots & & -y'_{dn} & \vdots & & \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \\ -y'_{d1} & & & \vdots & & & & & \\ & \ddots & & \vdots & & & & & \\ & & -y'_{dn} & \vdots & & & & & \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & & & & & \\ & & & \vdots & & Y_{rr} & & & \\ & & & \vdots & & & & & \\ & & & \vdots & & & & & \\ & & & \vdots & & & & & \\ & & & \vdots & & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}'_1 \\ \vdots \\ \dot{E}'_n \\ \dots \\ \dot{V}_1 \\ \vdots \\ \dot{V}_n \\ \dots \\ \dot{V}_{n+1} \\ \dot{V}_{n+2} \\ \vdots \\ \dot{V}_{n+r} \end{bmatrix}$$

donde $y' = -j/x'_d$, y $n + r = m$.

De la ecuación (4.18), se obtiene que:

$$\dot{I}_n = Y_{nn} \dot{E}_n - Y_{nr} \dot{V}_r \quad \text{Ec. 4.19}$$

$$0 = Y_{rn} \dot{E}_n - Y_{rr} \dot{V}_r \quad \text{Ec. 4.20}$$

Eliminando $\dot{V}_r$ en la ecuación (4.20), se obtiene:

$$\dot{I}_n = Y_{\text{red}} \dot{E}_n = (Y_{nn} - Y_{nr}^{-1} Y_{rn}) \dot{E}_n \quad \text{Ec. 4.21}$$

Despejando:

$$Y_{\text{red}} = Y_{nn} - Y_{nr} Y_{rr}^{-1} Y_{rn} \quad \text{Ec. 4.22}$$

La reducción de la red es conveniente, porque en general el número de barras de generación es considerablemente menor que el número total de barras. Sin embargo, una reducción puede ser realizada de la manera descrita cuando las cargas se han tratado como admitancias constantes. Si este no fuera el caso, la matriz identidad de las barras de carga tiene que ser reservada.

La reducción debe ser efectuada para tres periodos distintos: antes de la falla, **AF**, durante la falla, **DF**, y post-falla, **PF**. Se deben usar soluciones numéricas de las ecuaciones diferenciales de oscilación de las máquinas para la simulación completa del sistema.

La potencia eléctrica entregada por la i -ésima máquina está dada por:

$$P_{e,i} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n E_i E_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), i = 1, 2, \dots, n. \quad \text{Ec. 4.23}$$

Si los elementos de la matriz de admitancia de barras de la red reducida son expresados en forma rectangular, entonces:

$$\dot{Y}_{ij} = Y_{ij} \angle \theta_{ij} = G_{ij} + j B_{ij}$$

La potencia eléctrica está dada por:

$$P_{e,i} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n E_i E_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)], i = 1, 2, \dots, n. \quad \text{Ec. 4.24}$$

Entonces, las ecuaciones de oscilación son:

$$2H_i \frac{d\omega_i}{dt} + D_i \omega_i = P_{m,i} - P_{e,i} \quad \text{Ec. 4.25}$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i \quad \text{Ec. 4.26}$$

Las potencias mecánicas de entrada, supuestas constantes, son determinadas a partir de las condiciones de antes de la falla, esto es:

$$P_{m,i} = P_{e,i} |_{t=0} = P_{e,i}^0$$

Etapas para realizar una simulación de estabilidad transitoria:

1. Ejecutar un flujo de potencia para la condición de pre-falla. Esto es necesario para calcular las potencias mecánicas de los generadores y también sus tensiones internas. Igualmente, las impedancias equivalentes para representación de las cargas son obtenidas del estudio de flujo de potencia.
2. Calcular impedancias (o admitancias) equivalentes para las cargas;
3. Calcular tensiones internas de los generadores;
4. Calcular la matriz ***Ybarra*** para cada condición de la red (pre-falla, durante la falla y post-falla);
5. Eliminar todos los nodos, excepto de las barras internas del generador, y obtener la matriz ***Yred*** para cada condición de la red.
6. Las ecuaciones diferenciales (4.25) y (4.26) son entonces integradas usándose un método numérico (Euler modificado, Runge-Kutta de cuarto orden, regla trapezoidal, etc.), con la adecuada selección de la matriz ***Yred*** para cada condición de falla.

Como no es posible obtener una solución analítica explícita de las ecuaciones algebraico-diferenciales, es necesario utilizar métodos de integración numérica que permitan la obtención de soluciones aproximadas de tales ecuaciones.

Mediante la aplicación de métodos numéricos de integración se puede obtener soluciones de las ecuaciones diferenciales en un conjunto finito de puntos: $X_0, X_1, X_2, \dots, X_n$, donde X_0 es el punto inicial y X_n es el punto final.

Se considera que tales puntos están equidistantes tal que $X_{n+1} - X_n = h$ (paso de integración).

Por ello a partir de X_n y Y_n , con un paso de integración se obtiene la solución Y_{n+1} en el punto X_{n+1} .

Las ecuaciones diferenciales para el caso de Máquina-Línea -Barra Infinita:

$$\frac{d\delta}{dt} = w_r - w_0 \quad (1)$$

$$\frac{dw_r}{dt} = (P_m - P_e) * \frac{1}{\left(\frac{\omega_r}{\omega_0}\right) * \left(\frac{2H}{\omega_0}\right)} \quad (2)$$

EULER MODIFICADO

Intervalo de interés: $(t_0, t_0 + T)$

Los tiempos discretos del intervalo: $t_k = t_0 + k * h$; $k=0, 1, 2, \dots, T/h$

Las ecuaciones de Euler en el tiempo t_k son:

$$\bar{\delta}_k = \delta_k + \left[\frac{d\delta}{dt} \right]_k * h \quad \bar{w}_k = w_k + \left[\frac{dw}{dt} \right]_k * h \quad (3)$$

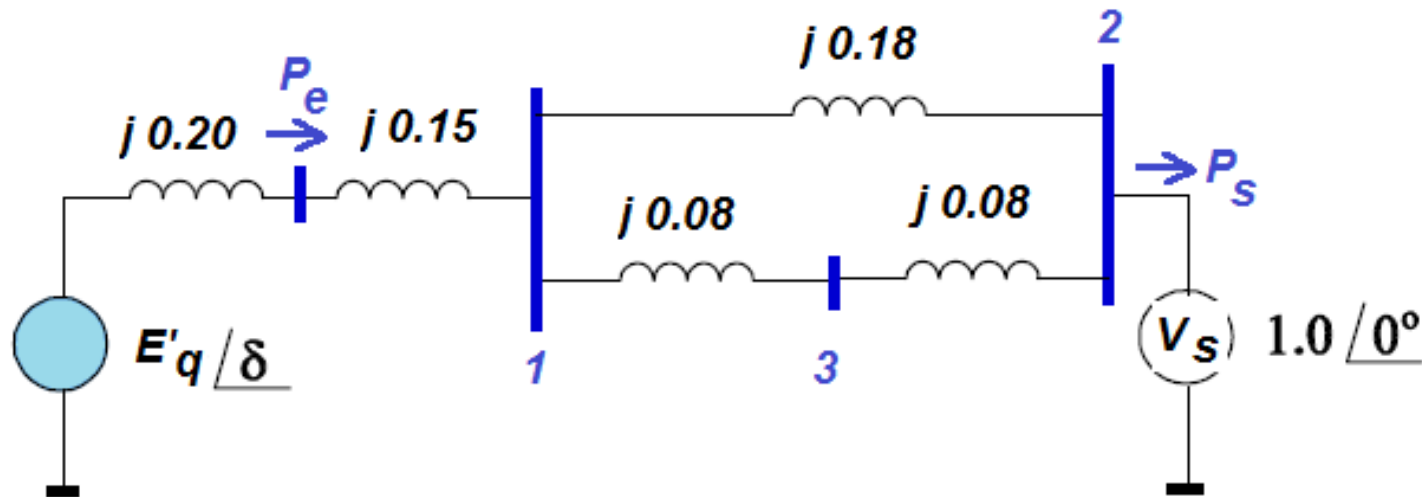
$$\left[\frac{d\bar{\delta}}{dt} \right]_k = \bar{w}_k - w_0 \quad \left[\frac{d\bar{w}}{dt} \right]_k = (P_{mk} - P_{ek}) * \frac{1}{\left(\frac{\bar{\omega}}{\omega_0} \right) * \left(\frac{2H}{\omega_0} \right)} \quad (4)$$

$$\delta_{k+1} = \delta_k + 0.5 * \left[\left[\frac{d\delta}{dt} \right]_k + \left[\frac{d\bar{\delta}}{dt} \right]_k \right] * h \quad (5)$$

$$w_{k+1} = w_k + 0.5 * \left[\left[\frac{dw}{dt} \right]_k + \left[\frac{d\bar{w}}{dt} \right]_k \right] * h \quad (6)$$

A: SISTEMA GENERADOR-LÍNEA-BARRA INFINITA

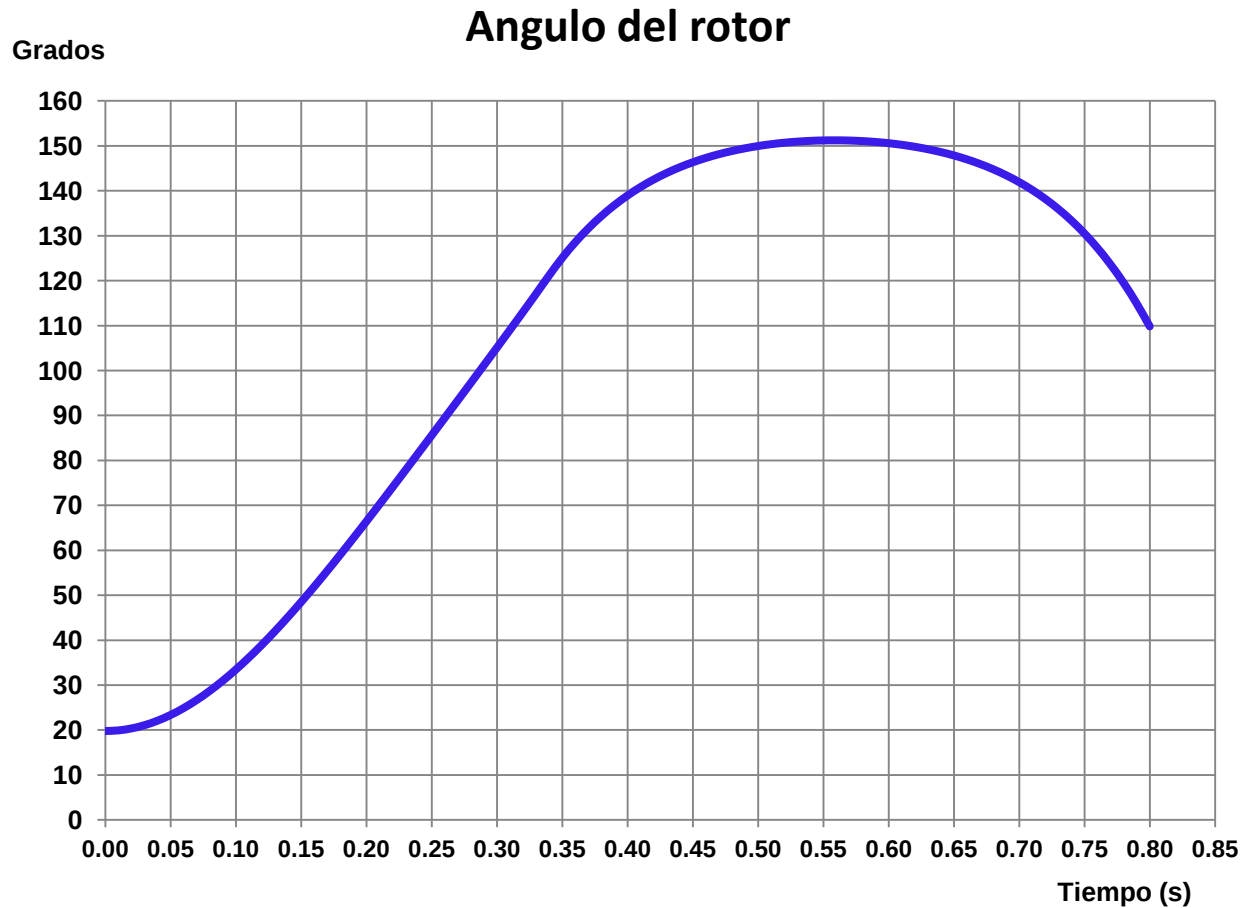
El sistema esta operando en estado estacionario con $V_s=1.0$ p.u. de tal manera que la barra infinita recibe una potencia activa de 1.00 p.u. a un factor de potencia inductivo de 0.9. La constante de inercia es 2.5 s.



Si se presenta una falla trifásica en la barra 3, que se despeja con la apertura de los interruptores de la línea en las barras 1 y 2.

Integrar numéricamente las ecuaciones del sistema utilizando las ecuaciones (1) a (6).

Pm (p.u.)	1.000
Pmax pre (p.u.)	2.9588
Pmax falla (p.u.)	0.9763
Pmax post (p.u.)	2.4268
Delta0 (rad)	0.34476
Frecuencia (Hz)	60
w0 (rad/s)	376.99
H (s)	2.5
t despeje (s)	0.34
h	0.01

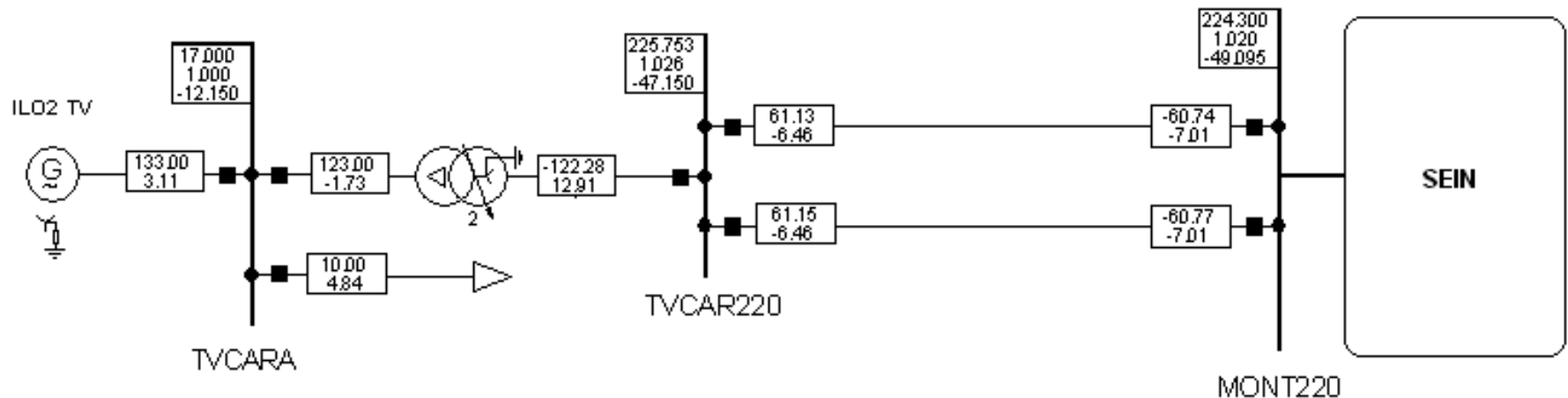


Delta C (Grados)	Tiempo Crítico (s)
121.5	0.3685

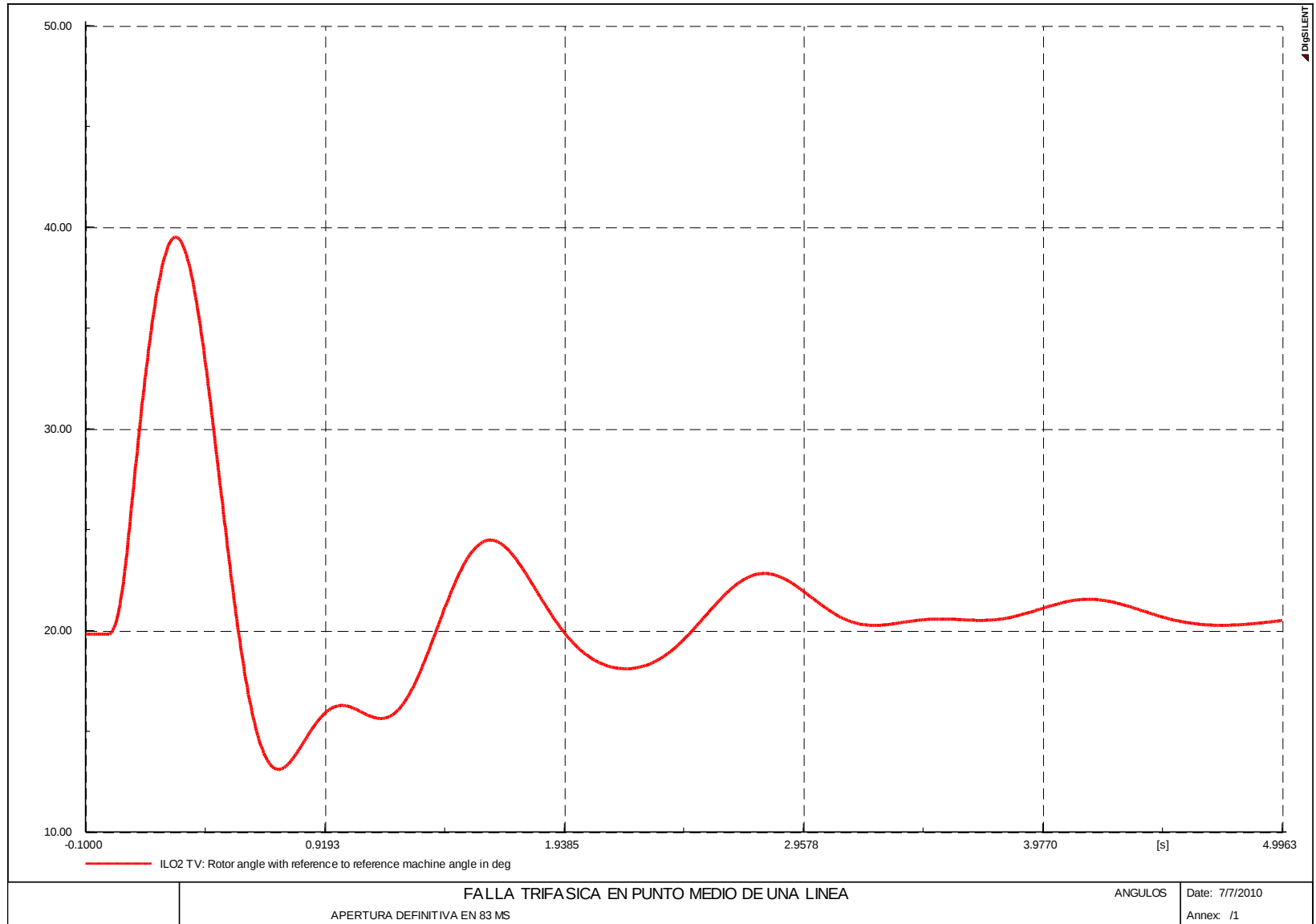
t	Delta (Grados)	Delta (rad)	wr (r/s)	wr-w0 (r/s)	d(Delta)/dt	d(wr)/dt	Delta p (rad)	Pek (p.u.)	wr p (rad/s)	wrp (p.u.)	d(Delta p)/dt	d(wr p)/dt
0.00	19.8	0.34476	376.99	0.00	0.00	50.519	0.34476	0.32996	377.50	1.001	0.5052	50.452
0.02	20.3	0.3549	378.00	1.01	1.01	49.822	0.36491	0.34841	378.50	1.004	1.5041	48.933
0.04	22.1	0.3849	378.97	1.98	1.98	47.763	0.40468	0.38439	379.45	1.007	2.4605	46.115
0.06	24.9	0.4339	379.90	2.90	2.90	44.451	0.46295	0.43601	380.34	1.009	3.3493	42.150
0.08	28.7	0.5007	380.74	3.75	3.75	40.064	0.53816	0.50041	381.14	1.011	4.1494	37.258
0.10	33.4	0.5834	381.49	4.50	4.50	34.849	0.62835	0.57388	381.84	1.013	4.8443	31.721
0.12	39.0	0.6800	382.12	5.13	5.13	29.113	0.73131	0.65202	382.42	1.014	5.4240	25.865
0.14	45.2	0.7881	382.64	5.65	5.65	23.204	0.84468	0.73004	382.88	1.016	5.8852	20.042
0.16	51.9	0.9055	383.05	6.06	6.06	17.483	0.96612	0.80319	383.22	1.017	6.2320	14.598
0.18	59.0	1.0299	383.34	6.35	6.35	12.295	1.09343	0.86716	383.47	1.017	6.4751	9.847
0.20	66.4	1.1592	383.54	6.55	6.55	7.935	1.22469	0.91841	383.62	1.018	6.6313	6.046
0.22	74.0	1.2916	383.67	6.68	6.68	4.637	1.35837	0.95435	383.71	1.018	6.7217	3.381
0.24	81.7	1.4259	383.74	6.75	6.75	2.558	1.49338	0.97338	383.76	1.018	6.7708	1.972
0.26	89.5	1.5613	383.78	6.79	6.79	1.790	1.62915	0.97464	383.80	1.018	6.8046	1.878
0.28	97.3	1.6974	383.82	6.83	6.83	2.376	1.76565	0.95782	383.84	1.018	6.8500	3.123
0.30	105.1	1.8345	383.88	6.89	6.89	4.331	1.90337	0.92280	383.93	1.018	6.9342	5.715
0.32	113.1	1.9733	384.00	7.01	7.01	7.670	2.04337	0.86930	384.08	1.019	7.0845	9.673
0.34	121.2	2.1152	384.20	7.20	7.20	-81.127	2.18724	1.98012	383.38	1.017	6.3935	-72.667
0.36	128.6	2.2438	382.72	5.73	5.73	-67.678	2.30116	1.80781	382.05	1.013	5.0561	-60.101
0.38	134.4	2.3456	381.51	4.52	4.52	-55.343	2.39081	1.65560	380.95	1.011	3.9625	-48.917
0.40	139.0	2.4255	380.52	3.53	3.53	-44.716	2.46075	1.52754	380.07	1.008	3.0786	-39.453
0.42	142.5	2.4876	379.72	2.73	2.73	-35.923	2.51484	1.42337	379.36	1.006	2.3684	-31.722
0.44	145.3	2.5353	379.08	2.09	2.09	-28.862	2.55619	1.34090	378.79	1.005	1.7975	-25.581
0.46	147.3	2.5716	378.56	1.57	1.57	-23.343	2.58728	1.27738	378.33	1.004	1.3356	-20.840
0.48	148.9	2.5985	378.14	1.15	1.15	-19.156	2.61002	1.23013	377.95	1.003	0.9564	-17.307
0.50	150.0	2.6178	377.79	0.80	0.80	-16.115	2.62582	1.19691	377.63	1.002	0.6373	-14.821
0.52	150.7	2.6307	377.49	0.50	0.50	-14.068	2.63570	1.17600	377.35	1.001	0.3585	-13.258
0.54	151.1	2.6380	377.22	0.23	0.23	-12.909	2.64027	1.16629	377.09	1.000	0.1026	-12.534
0.56	151.3	2.6400	376.97	-0.02	-0.02	-12.575	2.63983	1.16723	376.84	1.000	-0.1468	-12.614
0.58	151.1	2.6371	376.72	-0.28	-0.28	-13.047	2.63434	1.17889	376.59	0.999	-0.4058	-13.503
0.60	150.6	2.6289	376.44	-0.55	-0.55	-14.352	2.62345	1.20191	376.30	0.998	-0.6909	-15.252

4.4.1 Sistema Elemental Generador-Líneas-SEP

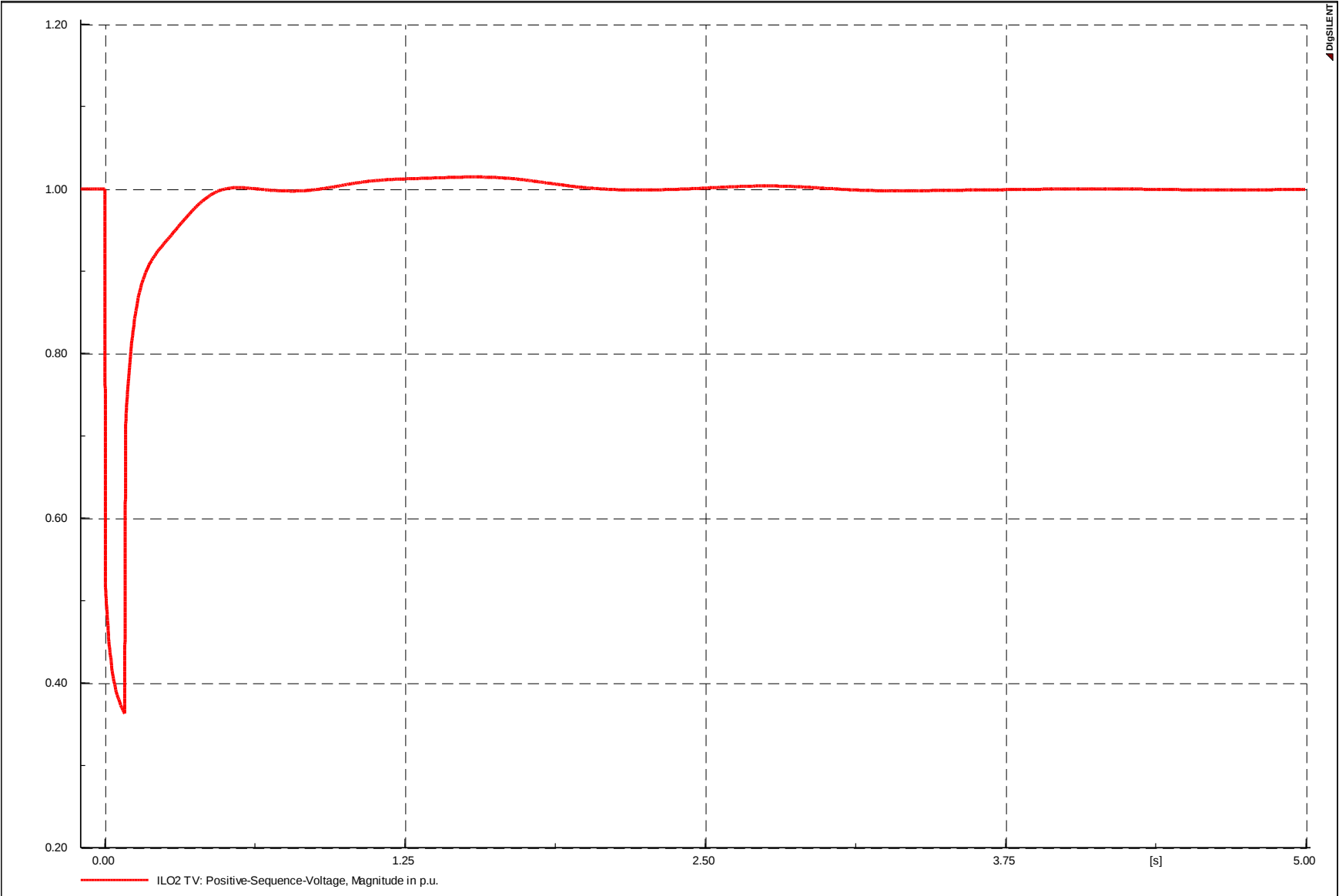
a. El sistema está operando en estado estacionario tal como se muestra en la Figura y se produce un cortocircuito trifásico en el punto medio de una de las líneas. La falla es despejada en 83 ms mediante la apertura definitiva de la línea. Efectuar las simulaciones con los reguladores de tensión y velocidad activados.



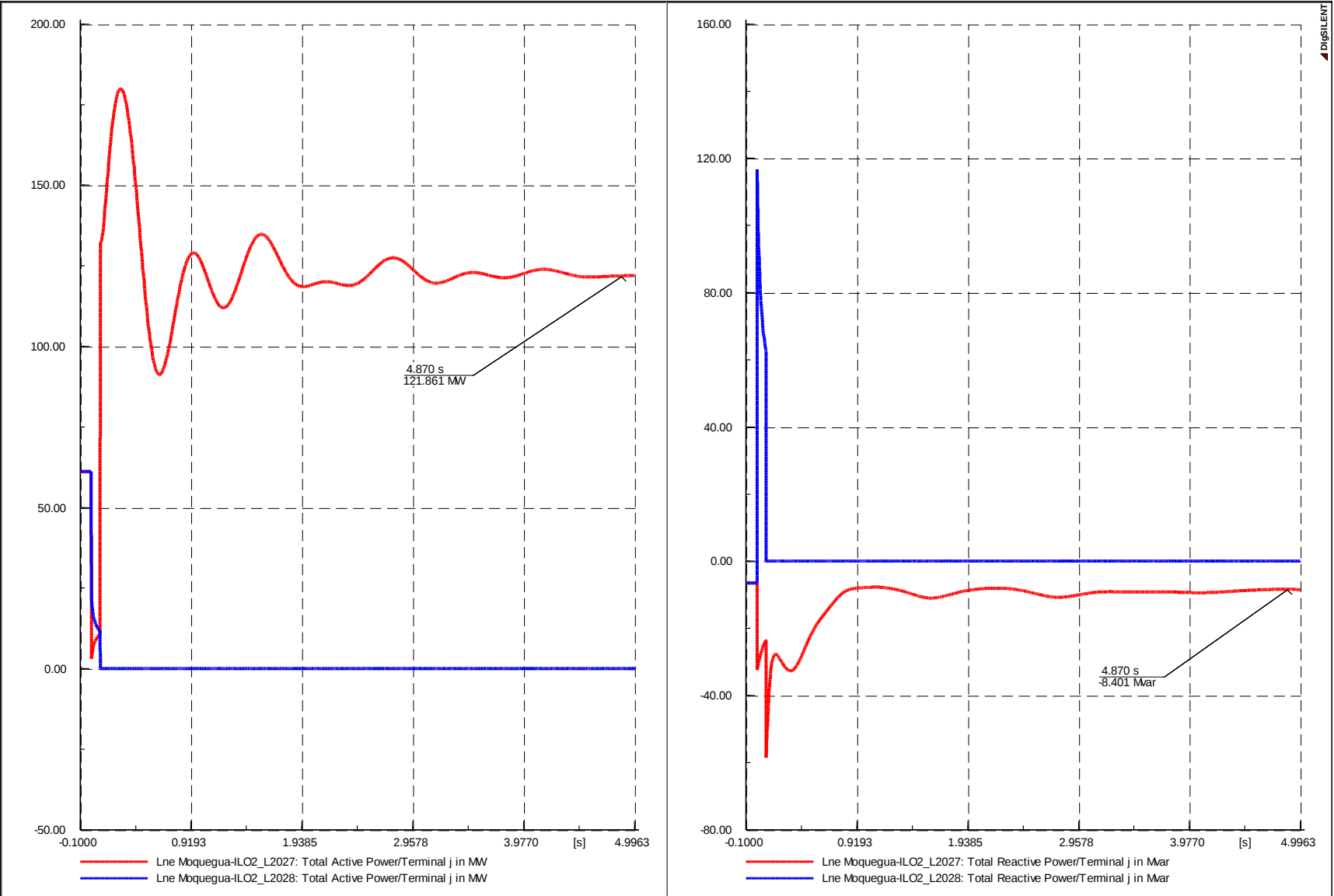
ANGULO RELATIVO DEL ROTOR DE LA UNIDAD



TENSIÓN EN TERMINALES DEL GENERADOR



POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA EN LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN



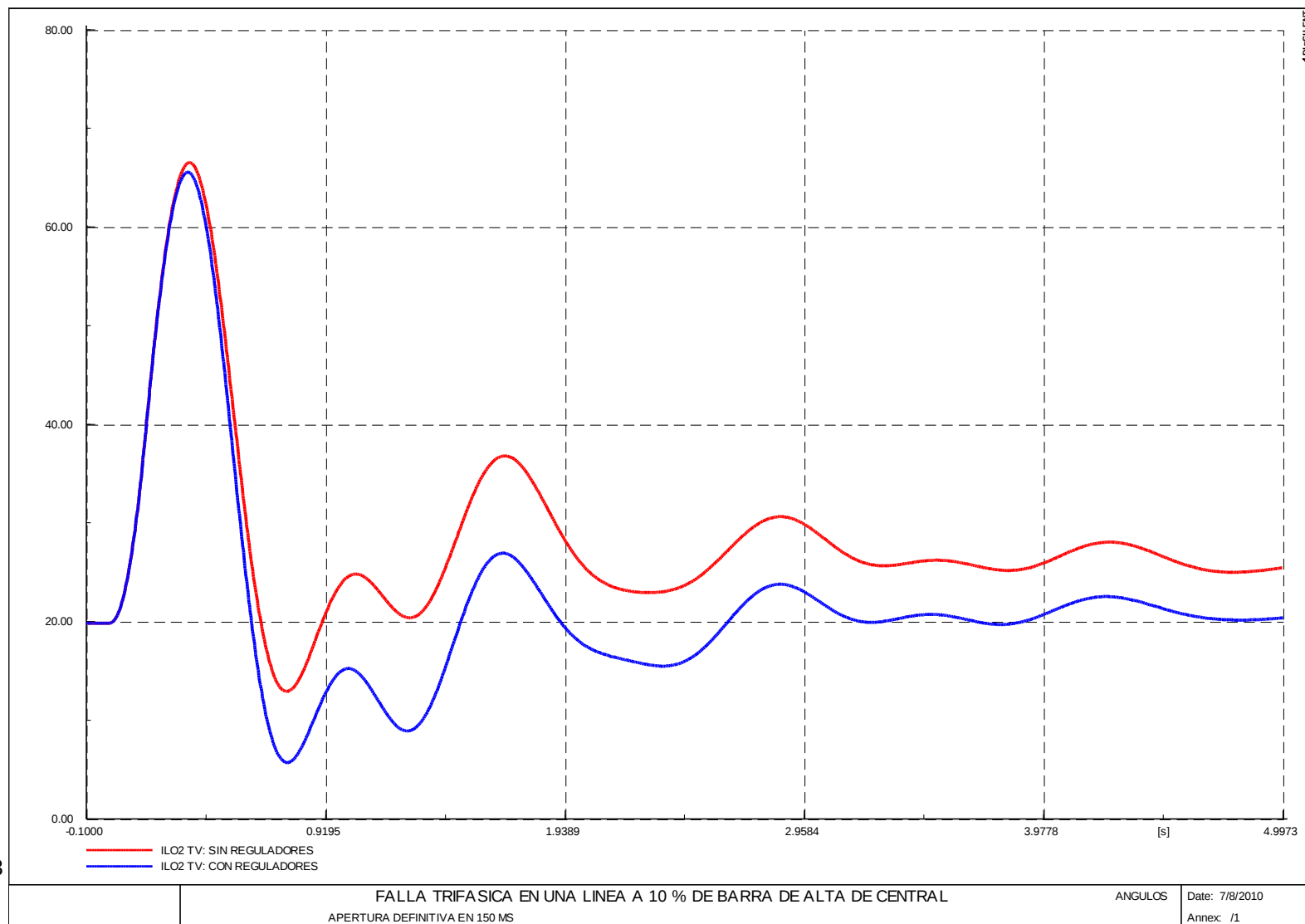
FALLA TRIFASICA EN PUNTO MEDIO DE UNA LINEA

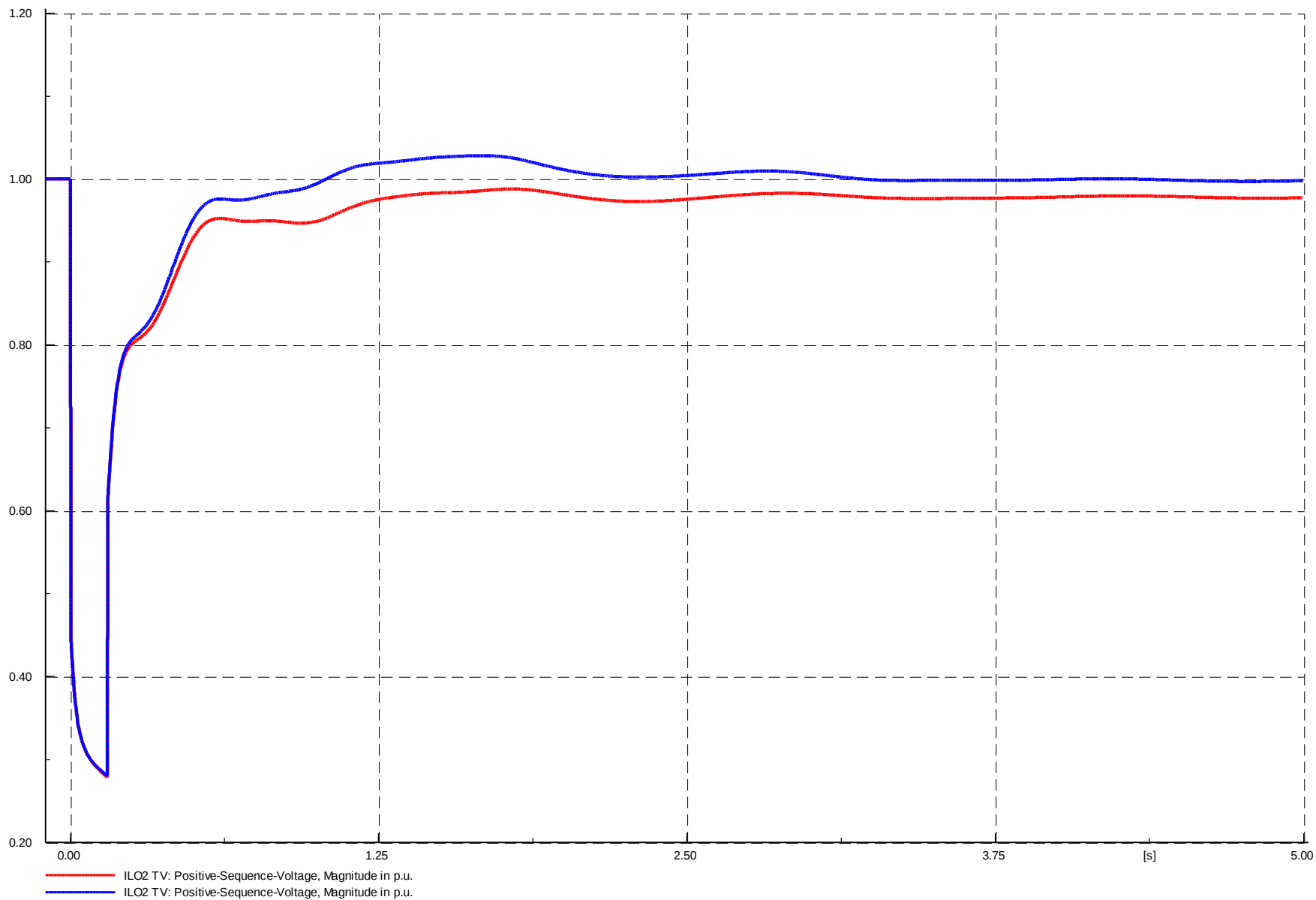
APERTURA DEFINITIVA EN 83 MS

LINEAS Date: 7/7/2010

Annex: /3

b. Si la falla se produce en una de las líneas a 10 % de la barra de alta tensión de la central y es despejada en 150 ms mediante la apertura definitiva de la línea. Comparar resultados sin y con los reguladores de tensión y velocidad.

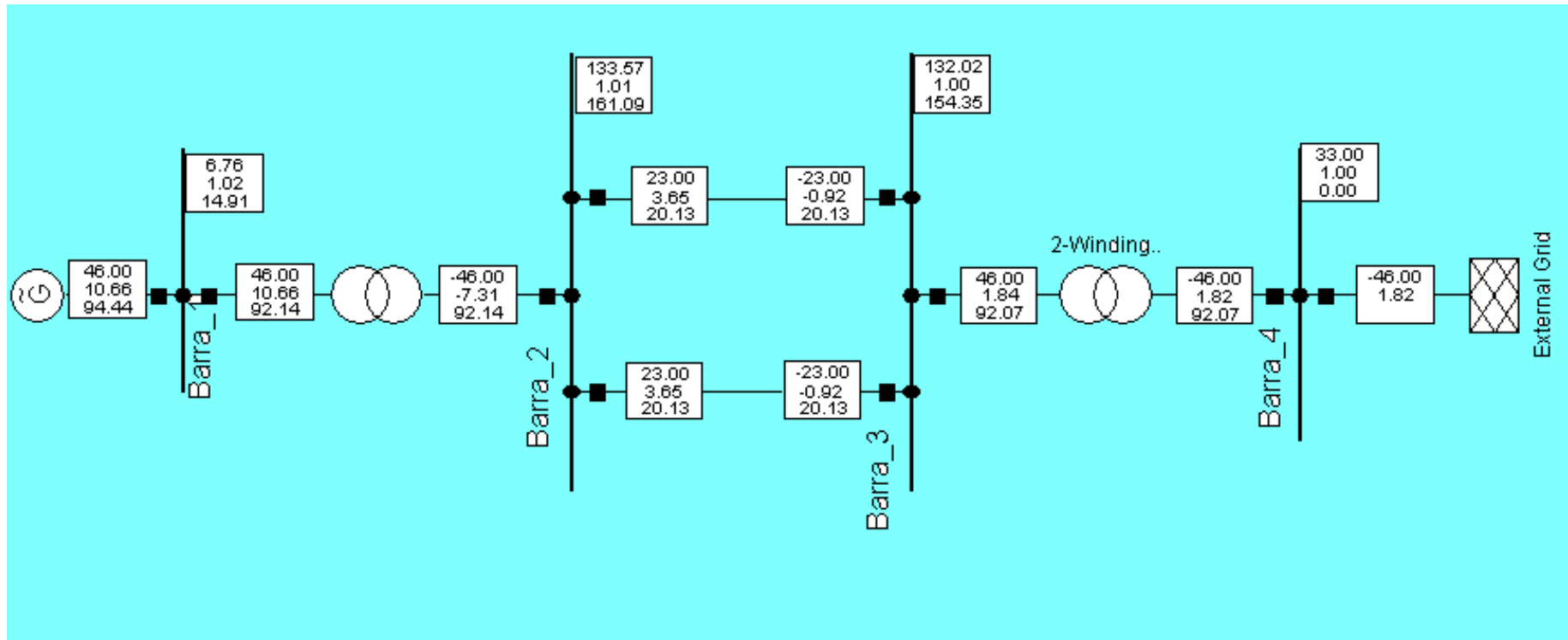




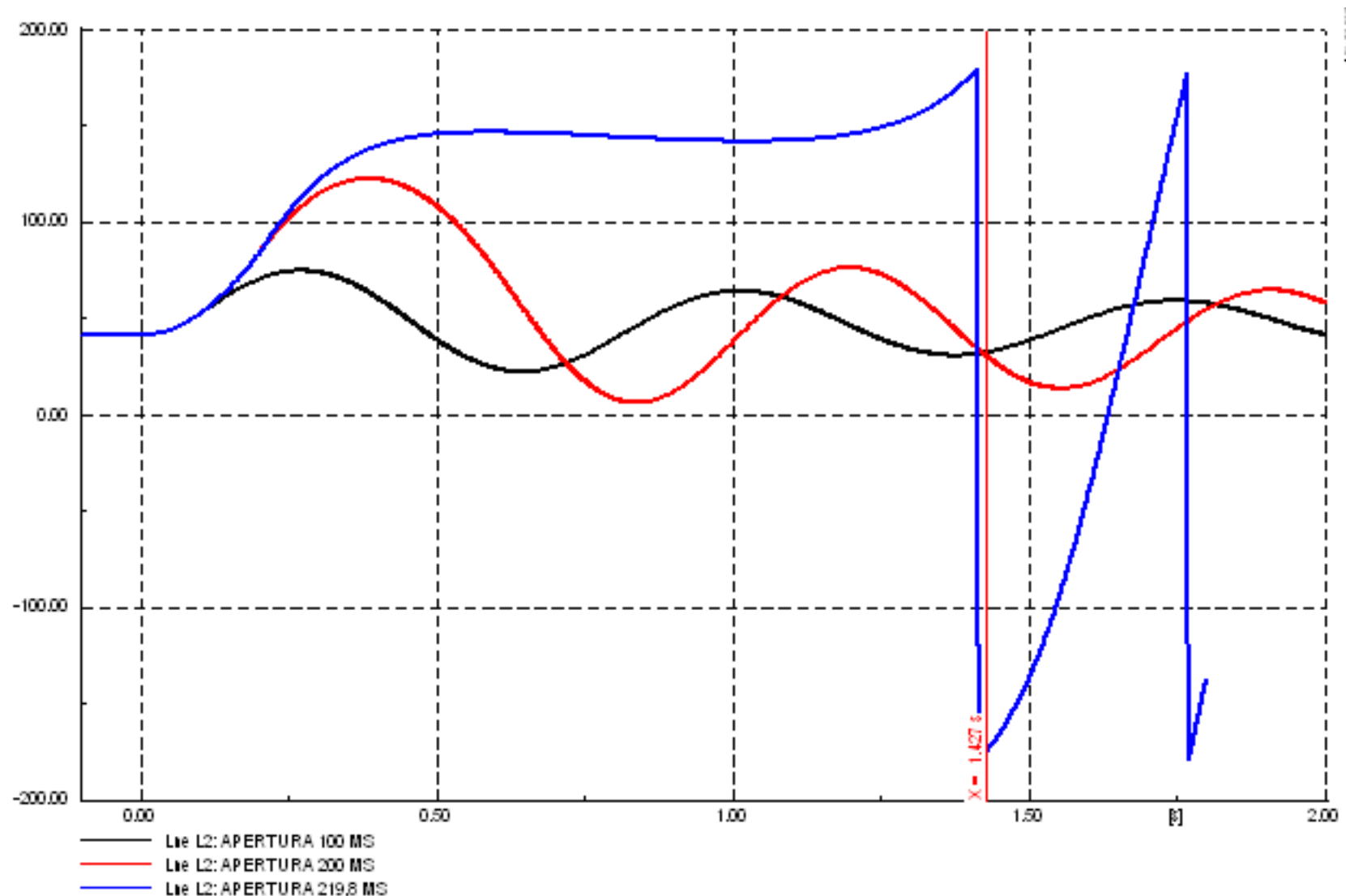
FALLA TRIFASICA EN UNA LINEA A 10 % DE BARRA DE ALTA DE CENTRAL
APERTURA DEFINITIVA EN 150 MS

TENSION
Date: 7/8/2010
Annex: /2

4.4.2 Pérdida del Sincronismo del Sistema Elemental Generador-Líneas-BI



Condición inicial



FALLA 3F PUNTO MEDIO L1

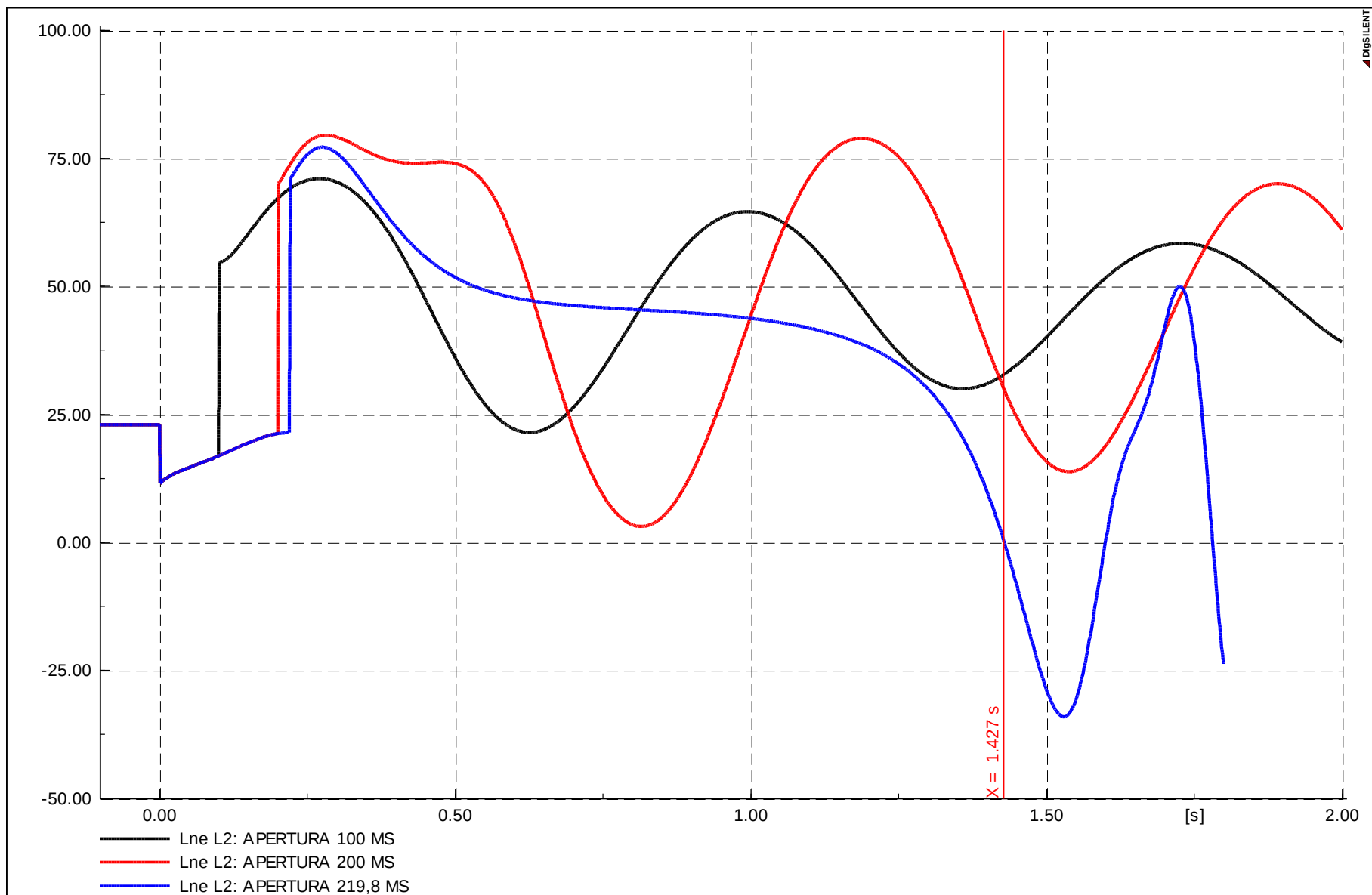
ANG. ROTOR

Date: 2/1/2008

INERCIA DEL GENERADOR: 3,0 s

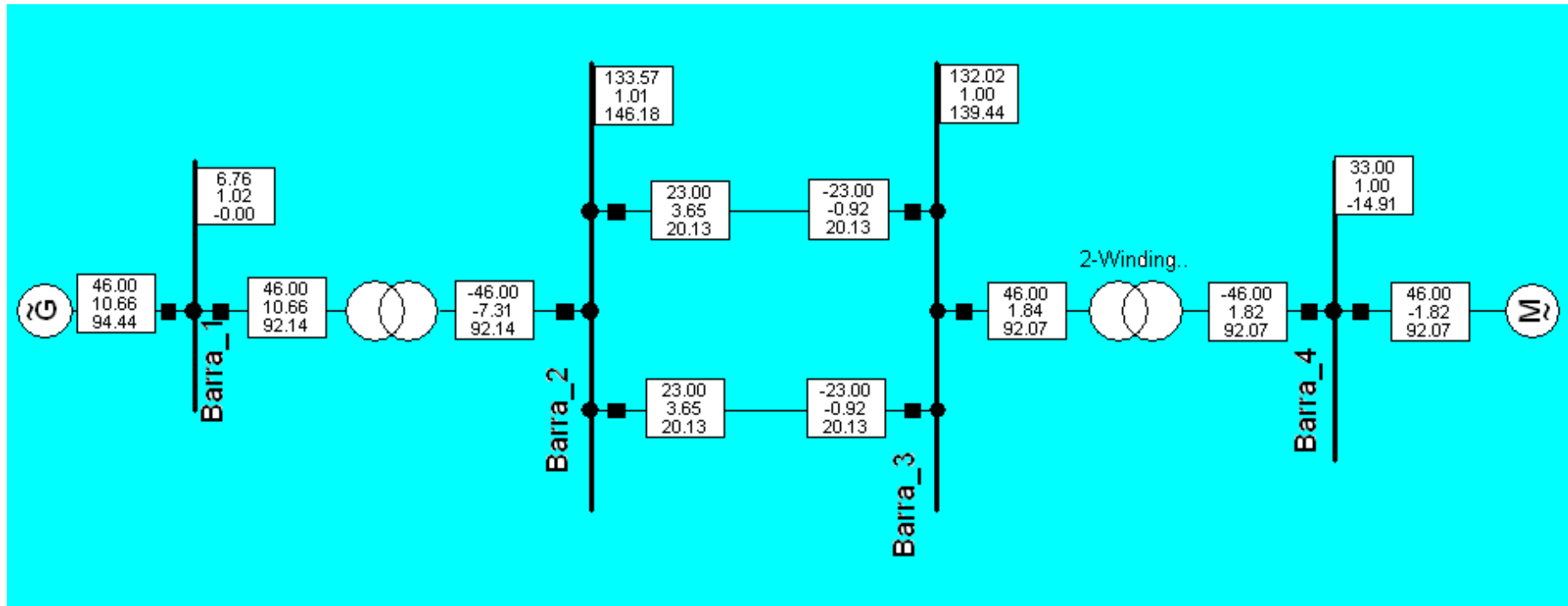
GEN: 46,00 + j 10,66 MVA, V_{grid} : 1,00 p.u.

Annex: .5



FALLA 3F PUNTO MEDIO L1		POT. LINEA	Date: 2/1/2008
INERCIA DEL GENERADOR: 3,0 s	GEN: 46,00 + j 10,66 MVA, V grid : 1,00 p.u.		Annex: /4

4.4.3 Pérdida del Sincronismo del Sistema Generador-Líneas-Motor



Condición inicial

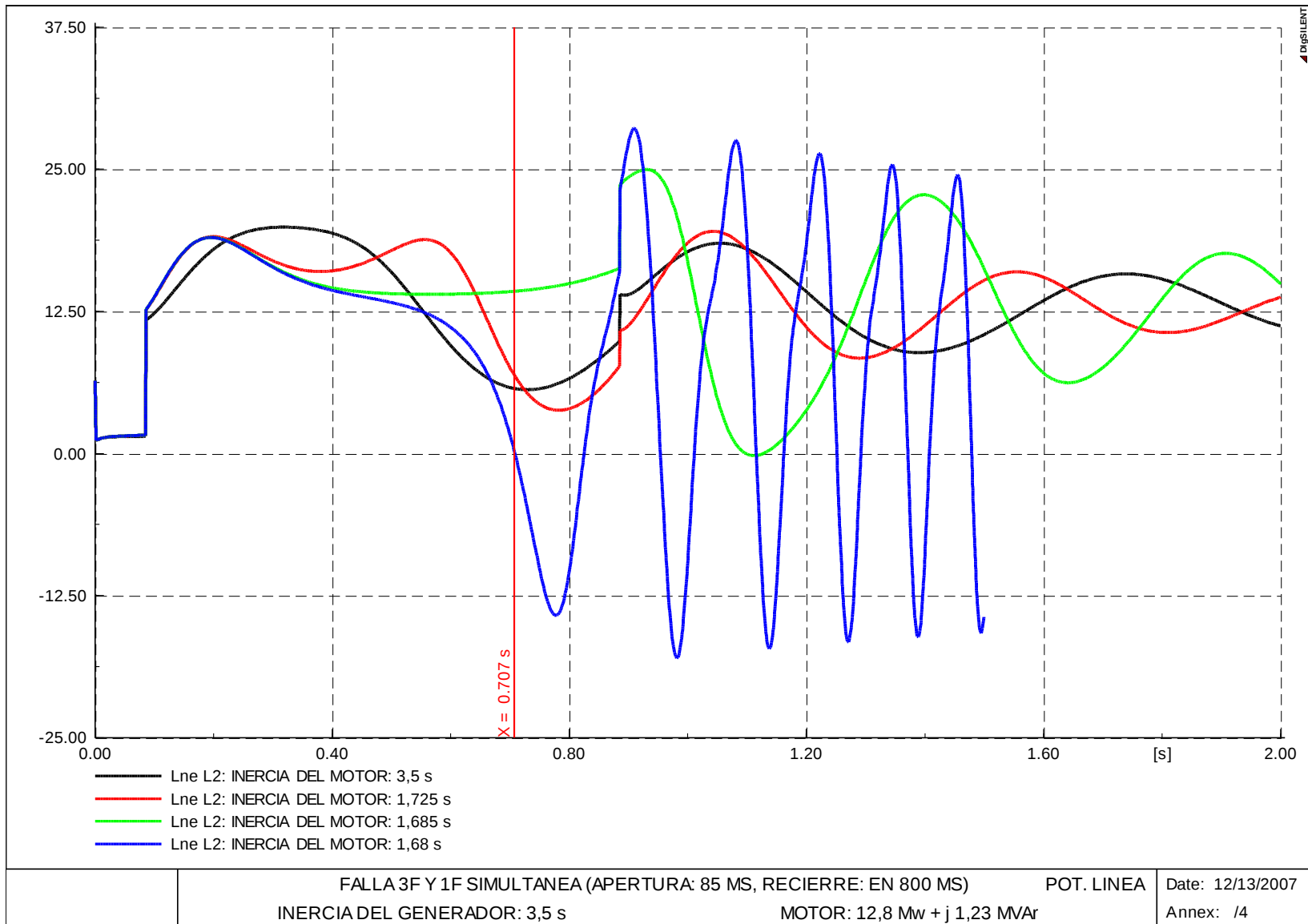
Con la finalidad de estimar los límites de estabilidad transitoria del sistema de la Figura se ha simulado en la línea de transmisión de doble circuito una falla trifásica y monofásica, simultáneas.

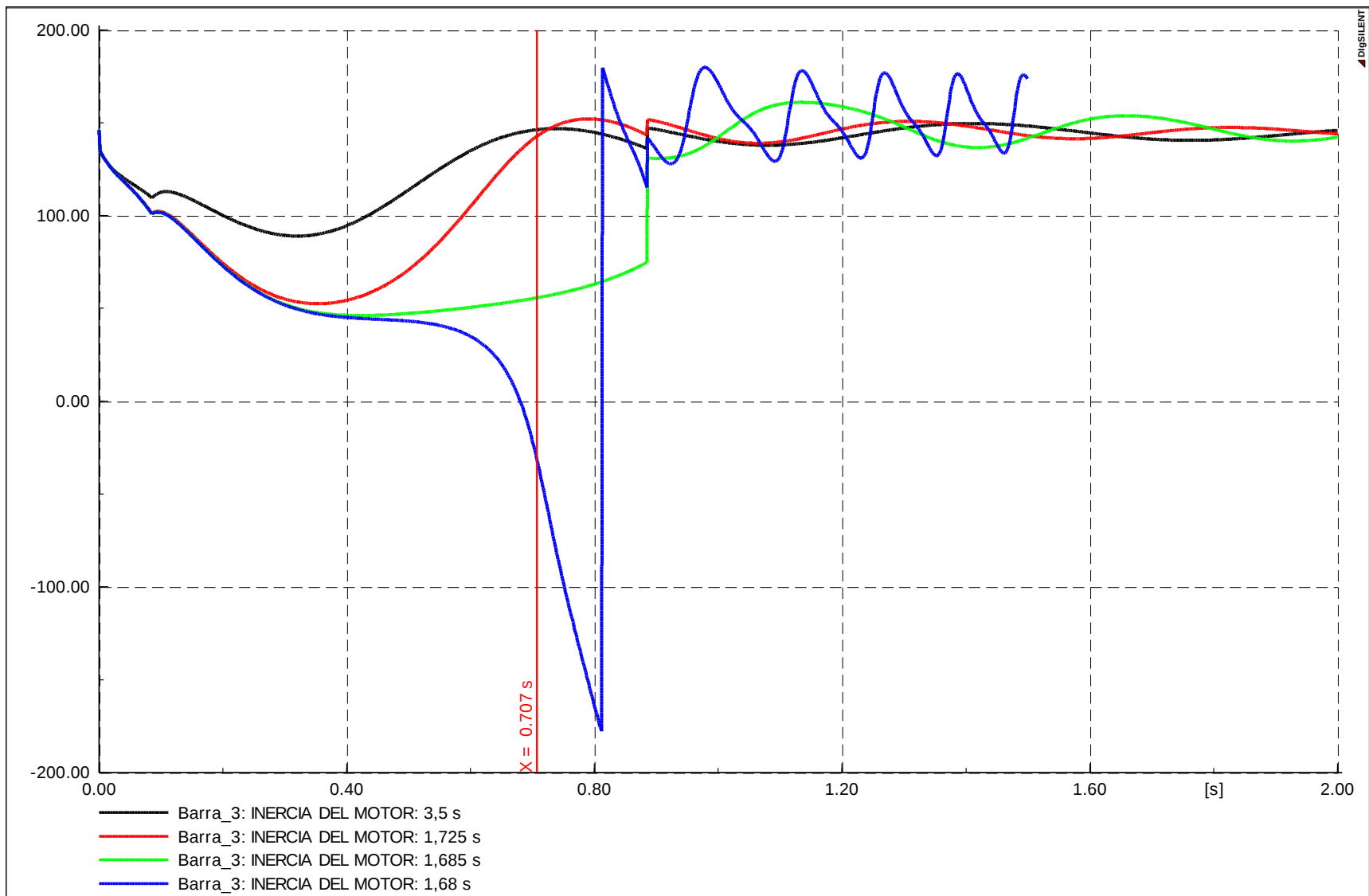
La falla trifásica en uno de los circuitos se despeja mediante la apertura definitiva de sus interruptores en 100 ms. La falla monofásica, en la línea paralela se despeja mediante apertura monofásica en 100 ms, un tiempo de espera de 800 ms y el recierre exitoso.

Se muestra el efecto sobre la estabilidad transitoria del sistema de:

- La constante de inercia,
- La tensión de operación del motor,
- La longitud de las líneas de interconexión.

(1) EFECTO DE LA CONSTANTE DE INERCIA



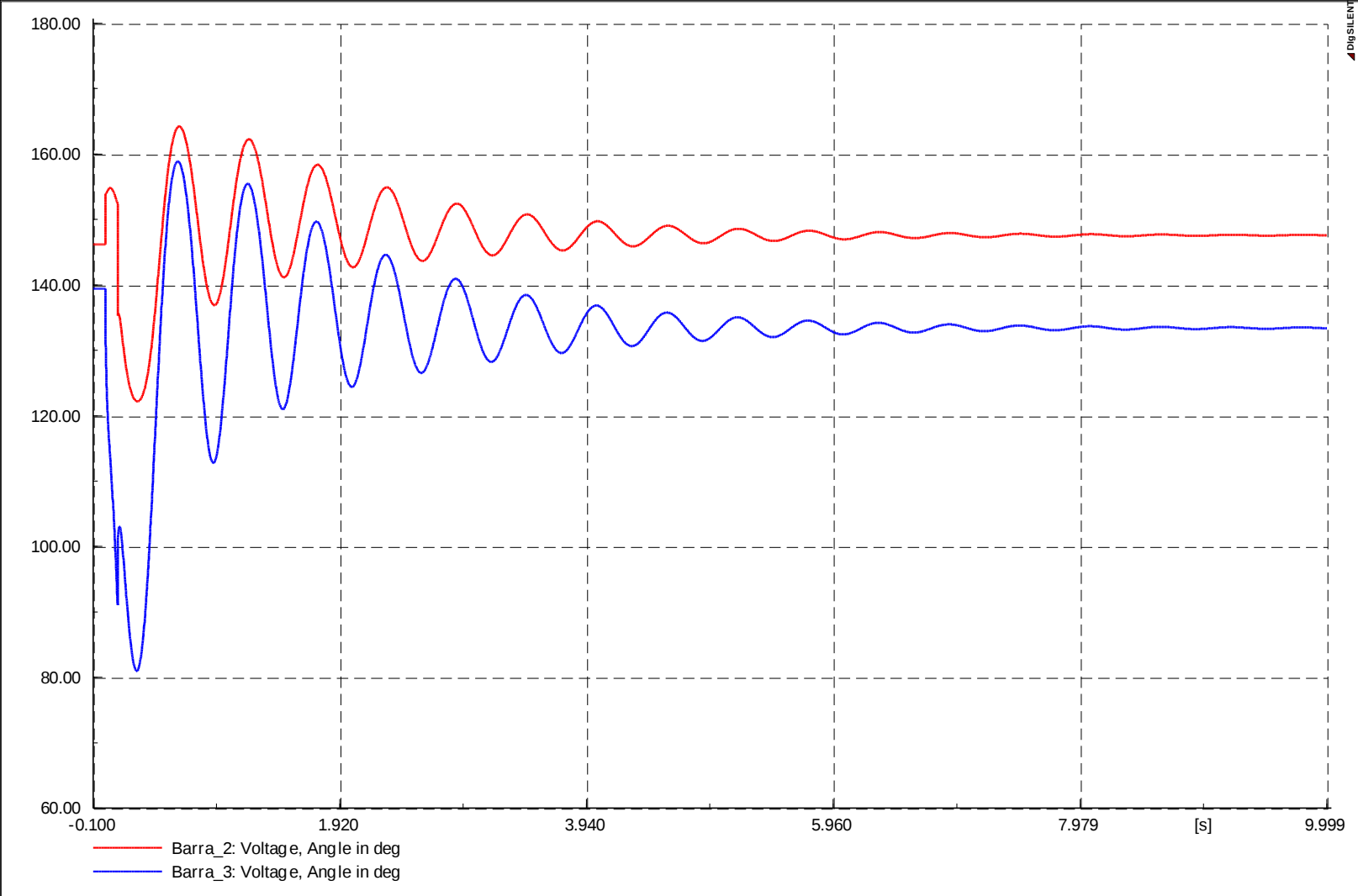


FALLA 3F Y 1F SIMULTANEA (APERTURA: 85 MS, RECIERRE: EN 800 MS)
 INERCIA DEL GENERADOR: 3,5 s

ANG. BARRA 3
 MOTOR: 12,8 Mw + j 1,23 MVar

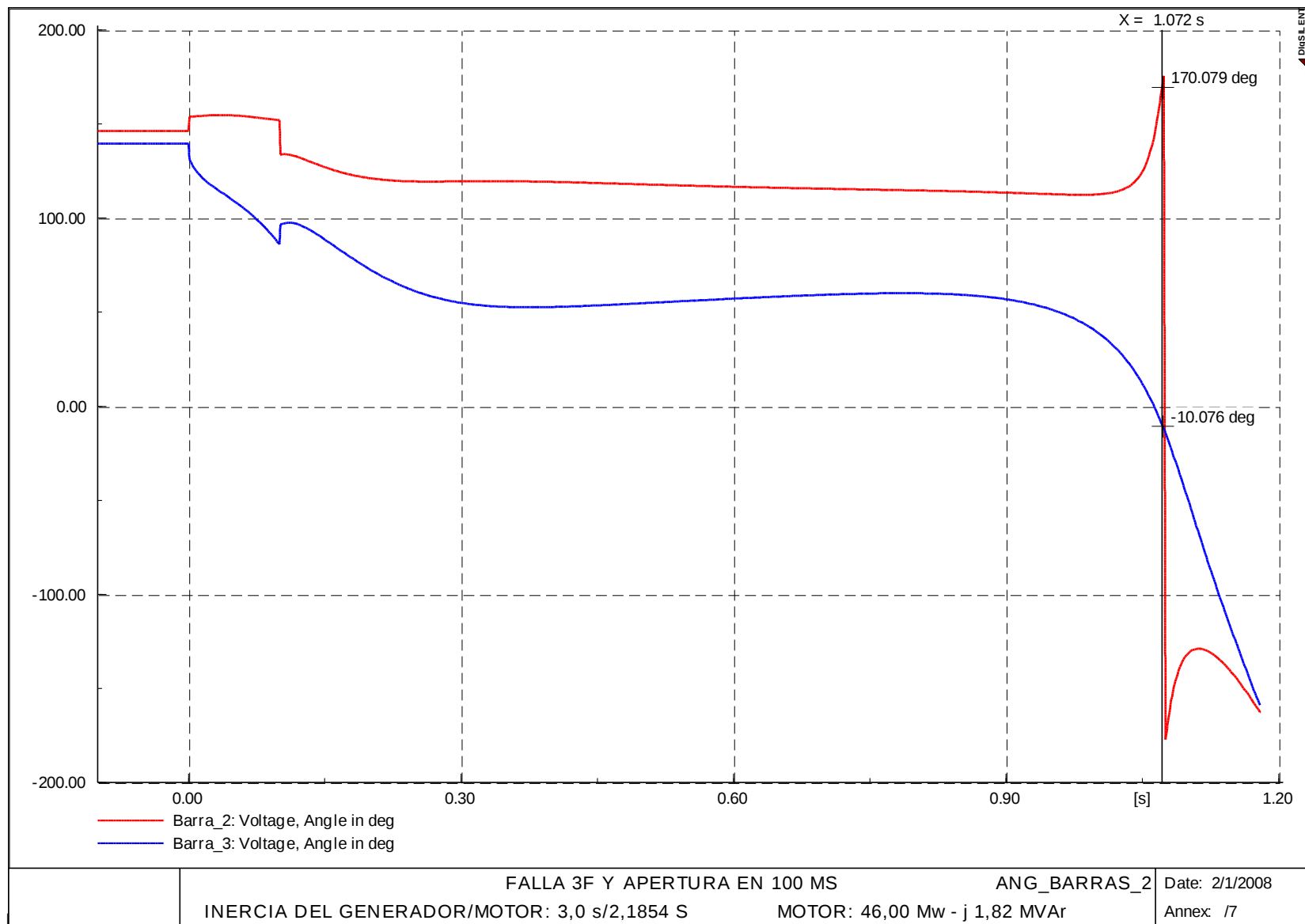
Date: 12/13/2007
 Annex: /5

DIFERENCIA ANGULAR ENTRE LAS BARRAS 2 Y 3 (CASO ESTABLE)

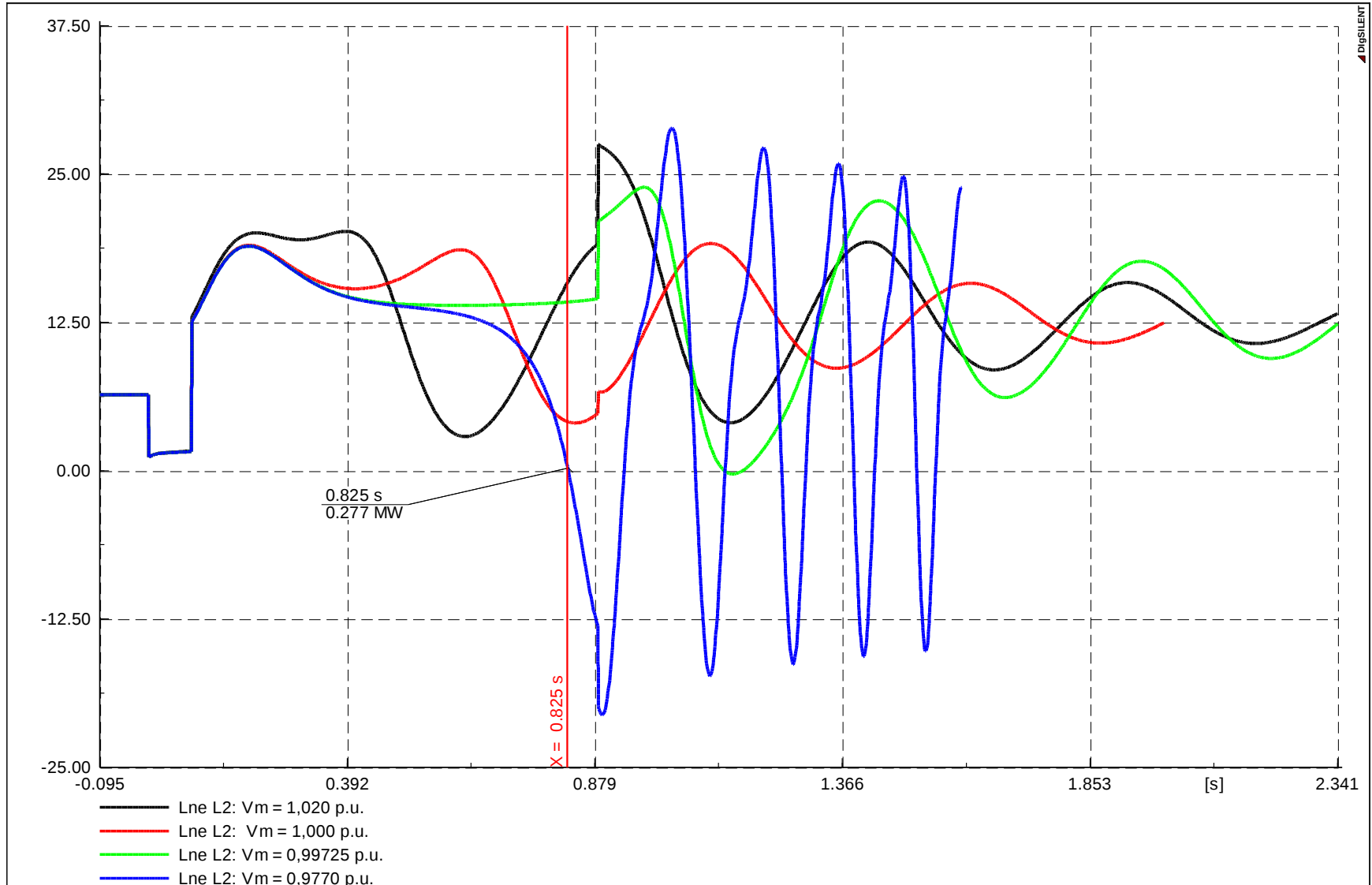


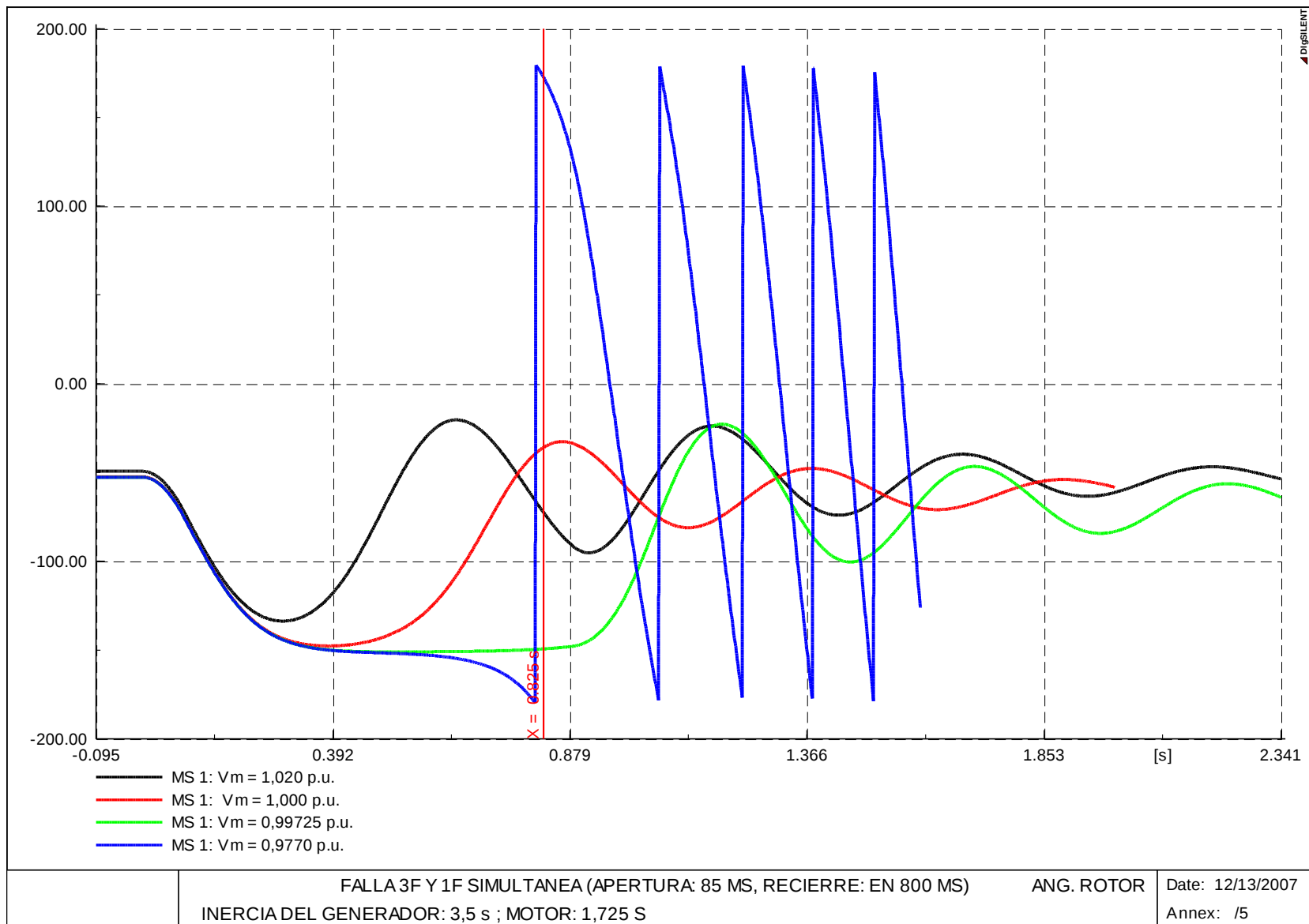
	FALLA 3F Y APERTURA EN 100 MS	ANG_BARRAS_1	Date: 2/1/2008
	INERCIA DEL GENERADOR/MOTOR: 3,0 s/3,0 s	MOTOR: 46,00 Mw - j 1,82 MVar	Annex /6

DIFERENCIA ANGULAR ENTRE LAS BARRAS 2 Y 3 (CASO INESTABLE)

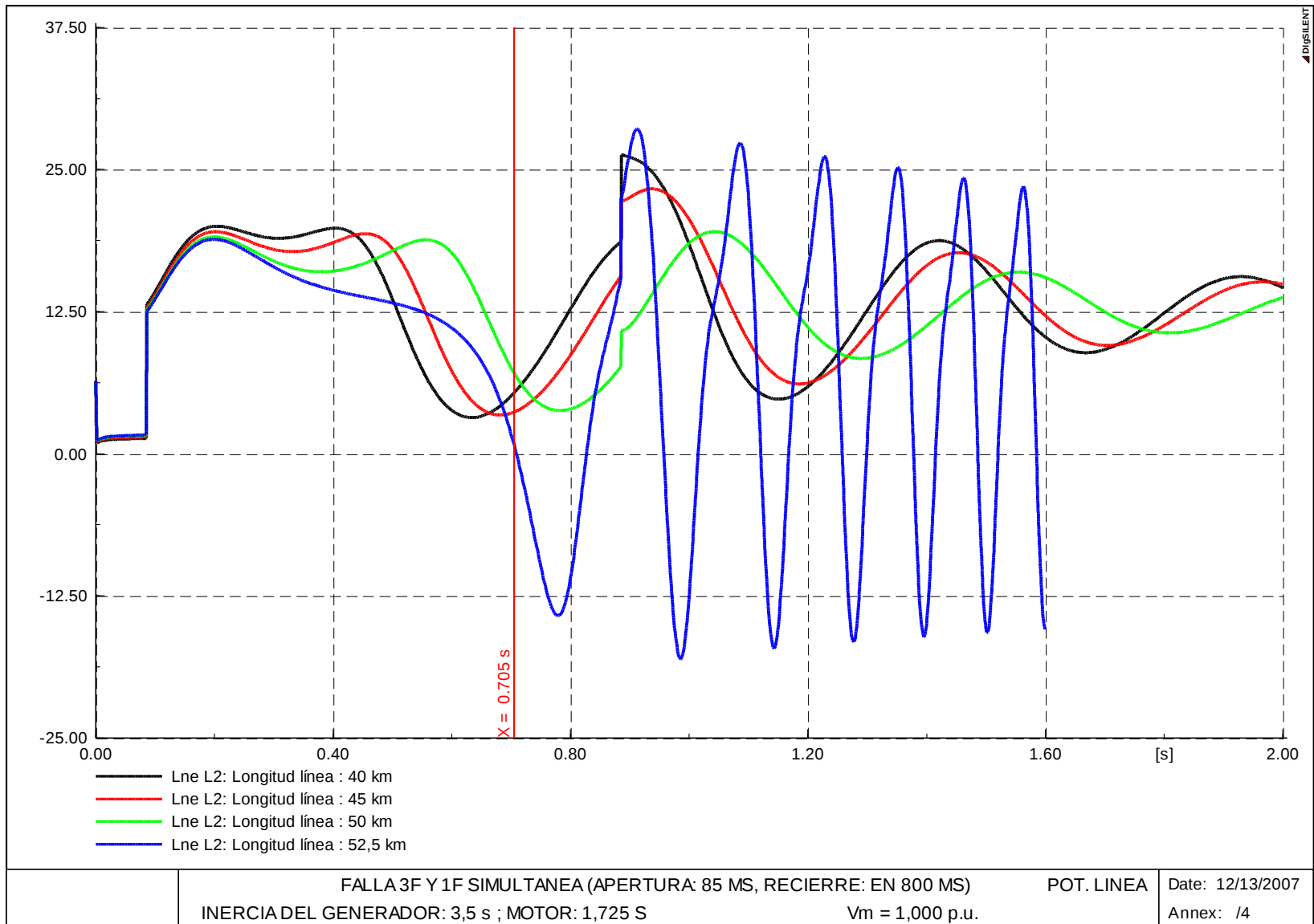


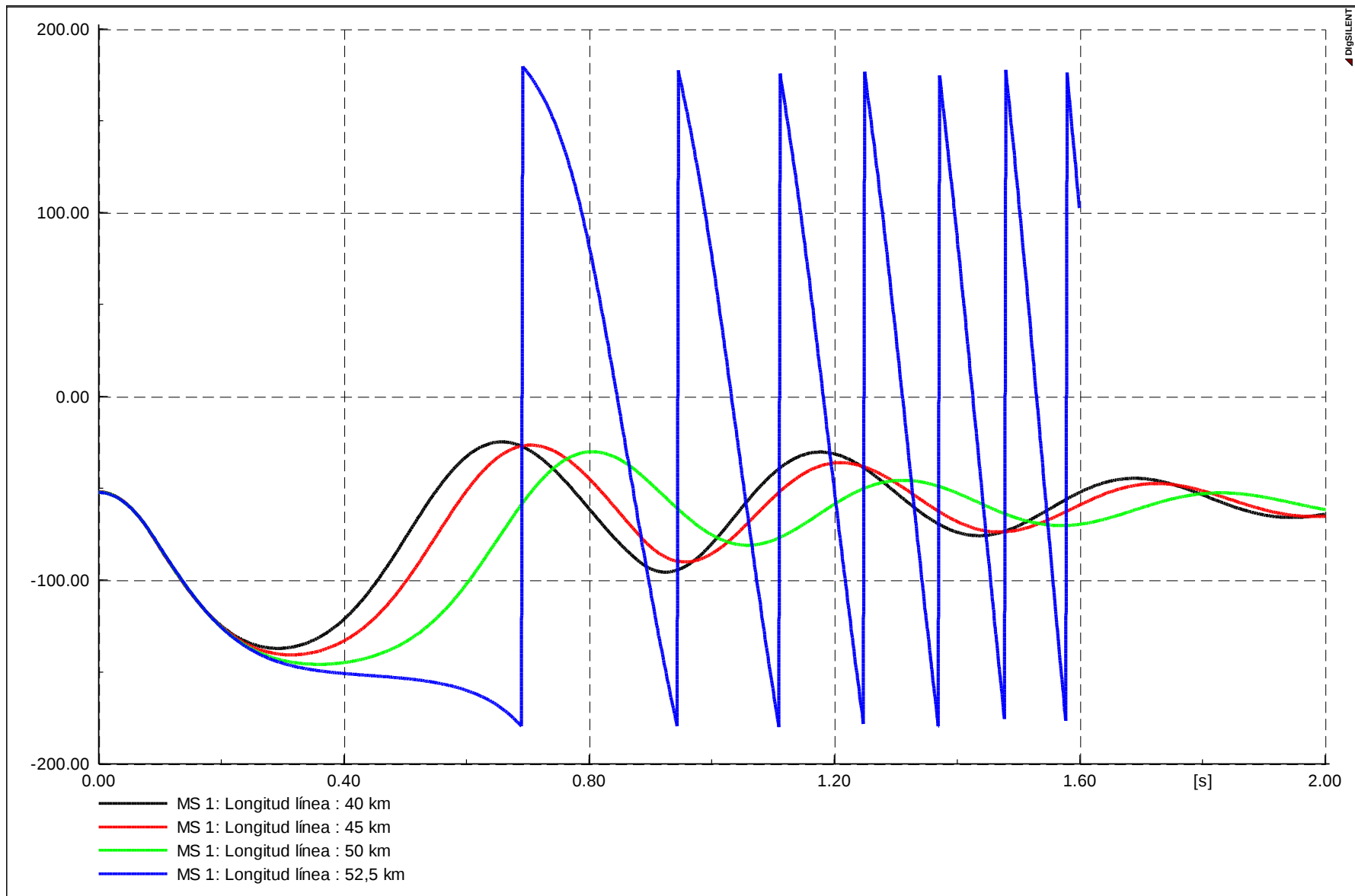
•EFECTO DE LA TENSIÓN DE OPERACIÓN DEL MOTOR SÍNCRONO





•EFECTO DE LA LONGITUD DE LA LÍNEA DE INTERCONEXIÓN





FALLA 3F Y 1F SIMULTANEA (APERTURA: 85 MS, RECIERRE: EN 800 MS)
 INERCIA DEL GENERADOR: 3,5 s ; MOTOR: 1,725 S

$V_m = 1,000$ p.u.

ANG ROTOR

Date: 12/13/2007

Annex: /5

4.5 LÍMITE DE ESTABILIDAD TRANSITORIA

El límite de estabilidad transitoria se refiere al máximo flujo de potencia, mas allá del cual no es posible que la estabilidad se mantenga después de una gran perturbación. El límite de estabilidad transitoria puede ser menor que el límite de estabilidad de estado estacionario.

La estabilidad transitoria implica grandes excursiones en las variables del sistema y por lo tanto las no-linealidades del sistema tienen una influencia considerable.

Las características de un sistema no lineal son diferentes en cada punto de operación y para cada perturbación en particular, así que la estabilidad transitoria por su misma naturaleza se analiza sobre la base de una contingencia.

Para un punto de operación en estado estacionario determinado, el límite de estabilidad transitoria varía de acuerdo con el tipo, la duración y la ubicación de la perturbación en el sistema de transmisión.

4.5.1 Límite de Estabilidad Transitoria de la L.T. de 220 kV Mantaro-Socabaya

Se muestra un resumen de estudio realizado por el COES.

