

ELC-30524
Sistemas de Potencia II

Capítulo 2
Limite de Estabilidad
Transitoria

Prof. Francisco M. González-Longatt

fglongatt@ieee.org

<http://www.giaelec.org/fglongatt/SP2.htm>

Límite de Estabilidad Transitoria

- El *límite de estabilidad transitoria* se refiere al valor de potencia que puede ser transmitida con estabilidad cuando el sistema es sujeto a un *perturbación aperiódica (aperiodic disturbance)*.
- Por perturbación aperiódica significa una que no se produce con regularidad y solo después de intervalos tales que el sistema alcanza una condición de equilibrio entre perturbaciones.

Límite de Estabilidad Transitoria

- Los *tres principales tipos de perturbaciones* o disturbios transitorios que reciben consideración en los estudios de estabilidad, en orden de incremento de importancia son:
 - Cambios de Potencia (*Load Changes*)
 - Operaciones de Suicheo o maniobra (*Switching Operations*)
 - Fallas con subsecuentes aislamiento de circuitos (*Circuit Isolation*)

Sistemas de Potencia II

Análisis de Estabilidad



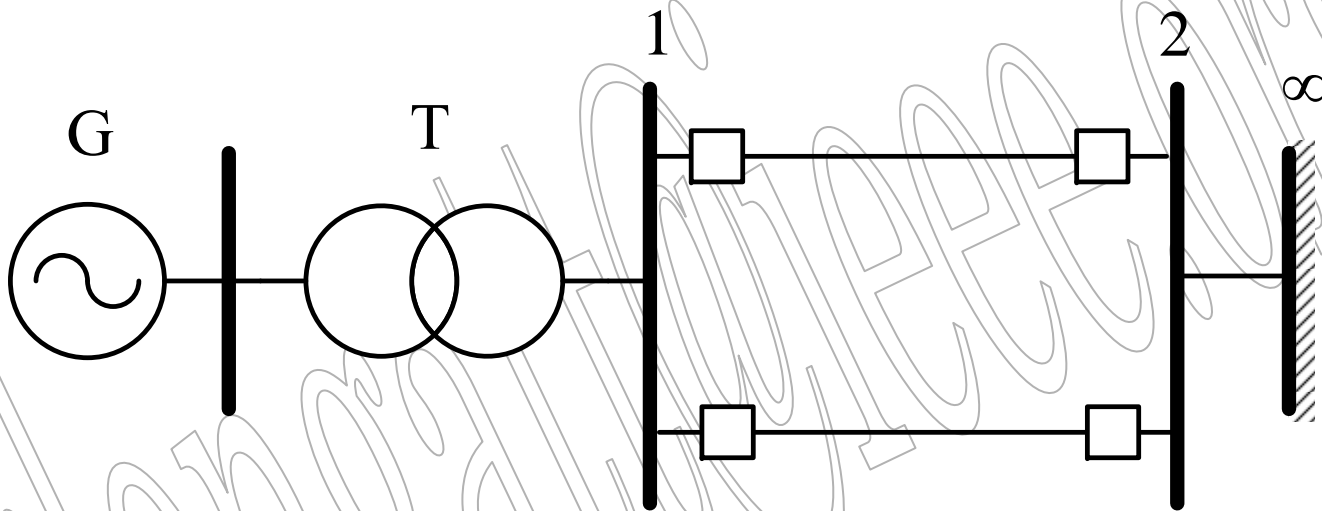
Cambio de Potencia

Cambio de Potencia

- Los incrementos de carga pueden resultar en perturbaciones transitorias que son de importancia para el punto de estabilidad (*stability standpoint*) si:
 - (1) *la carga total excede el límite de estabilidad de régimen permanente* para unas condiciones específicas de voltaje y reactancias, o
 - (2) si la carga se incrementa produce *una oscilación que causa que el sistema oscile más allá del punto crítico*, por lo cual recuperar la estabilidad puede ser imposible, como se apuntó previamente.

Cambio de Potencia

- Considere un sistema de potencia como se muestra:

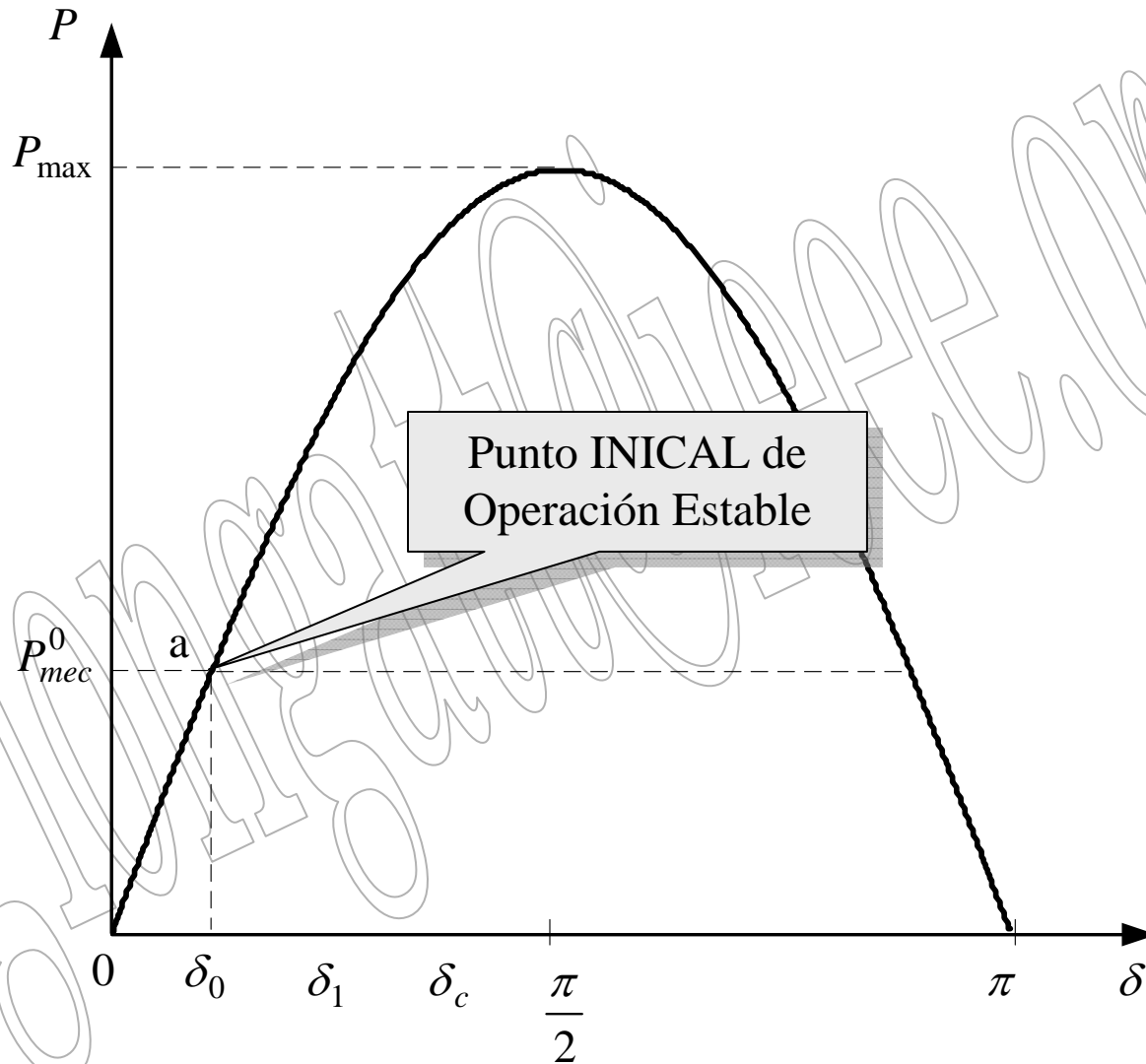


- Este sistema es sujeto a un cambio de potencia (mecánica o eléctrica)

Cambio de Potencia

- Inicialmente se tiene la máquina operando en condiciones estables, entregando una potencia a la barra de potencia infinita, de P_{elec}^0
- Debido a que se desprecian las pérdidas en la máquina la totalidad de la potencia eléctrica proviene de la potencia mecánica inyectada en el eje, de tal modo que se cumple: $P_{elec}^0 = P_{mec}^0$
- Este punto de operación estable, define un ángulo de operación, δ_0 , punto a.

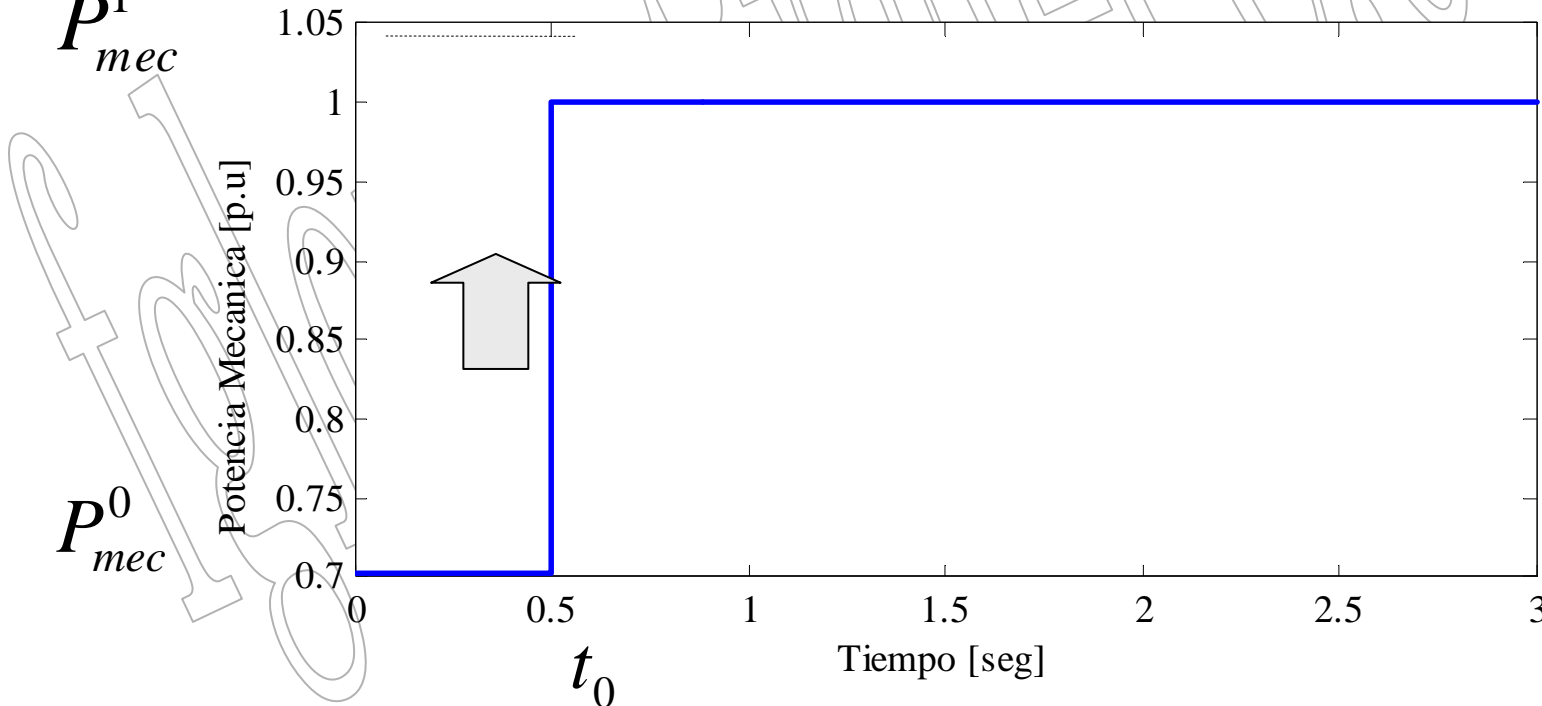
Cambio de Potencia



Cambio de Potencia

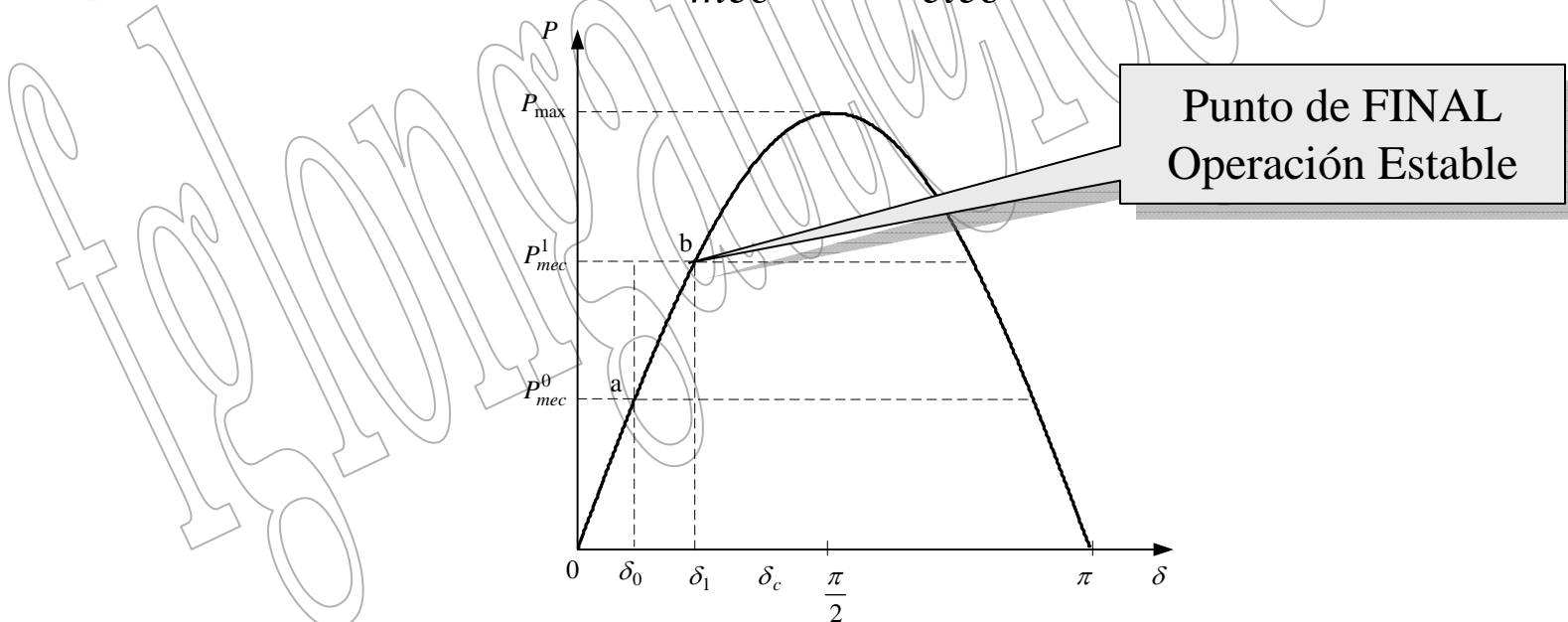
- Partiendo de estas condiciones estables de operación, se produce por algún medio un aumento repentino en la potencia mecánica de la máquina, pasando de P_{mec}^0

a P_{mec}^1 .

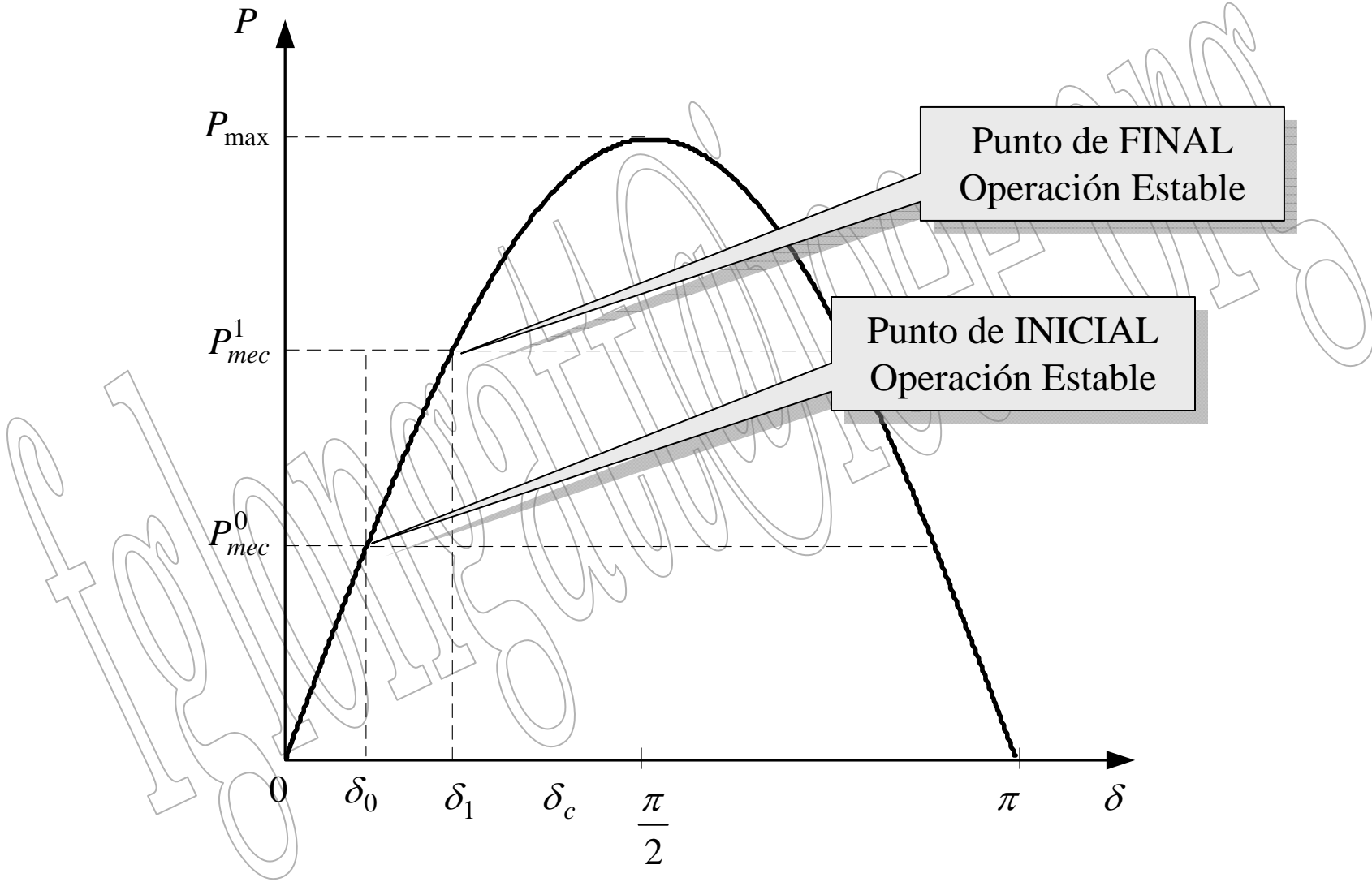


Cambio de Potencia

- Si la condición final corresponde a un posible estado estable de operación, la máquina debe quedar operando en un nuevo punto, b, a un ángulo δ_1 , donde se logre el nuevo equilibrio entre potencia mecánica y potencia eléctrica $P_{mec}^l = P_{elec}^l$

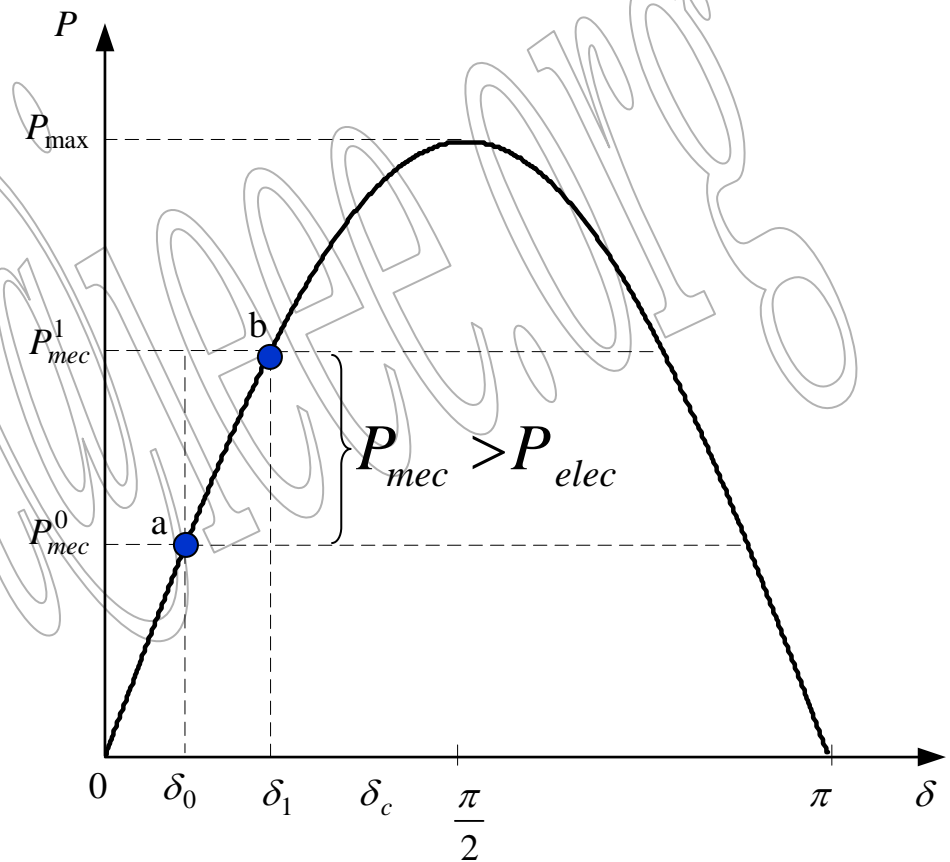


Cambio de Potencia



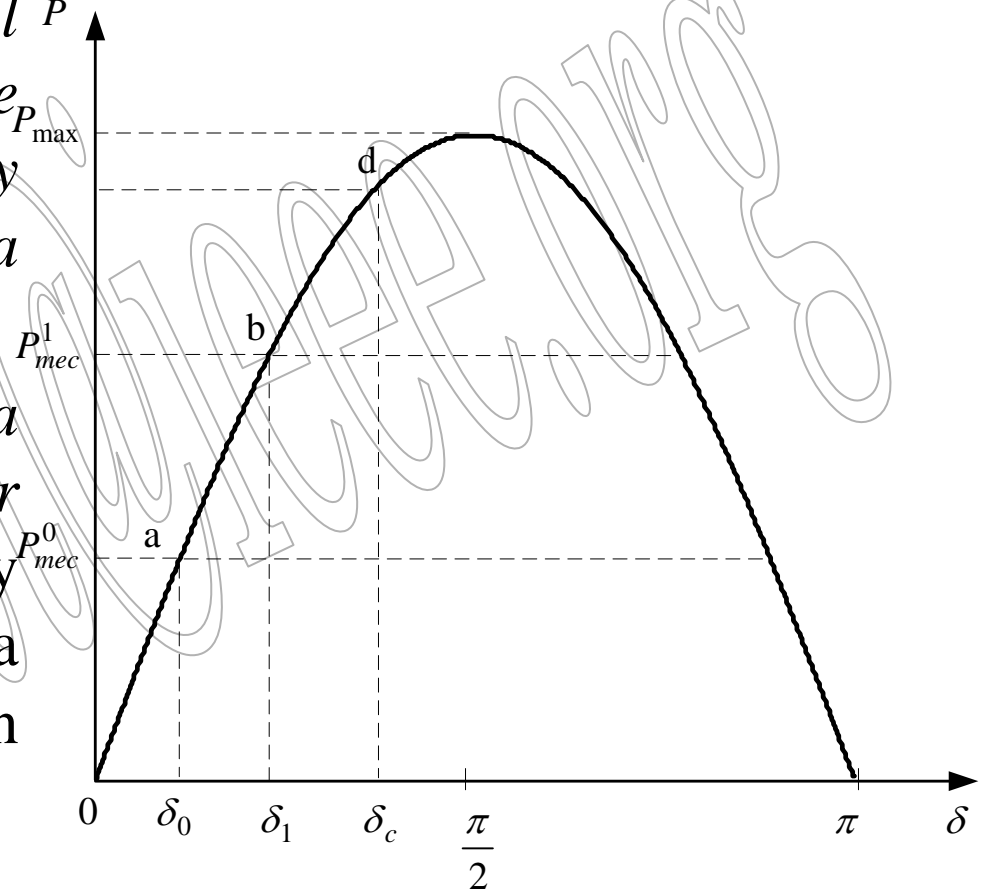
Cambio de Potencia

- Se observa que entre los puntos a y b, se cumple que la potencia mecánica es mayor que la potencia eléctrica ($P_{acel} > 0$), por lo que la diferencia inicial de potencia de entrada y salida son usada en aceleración del generador.

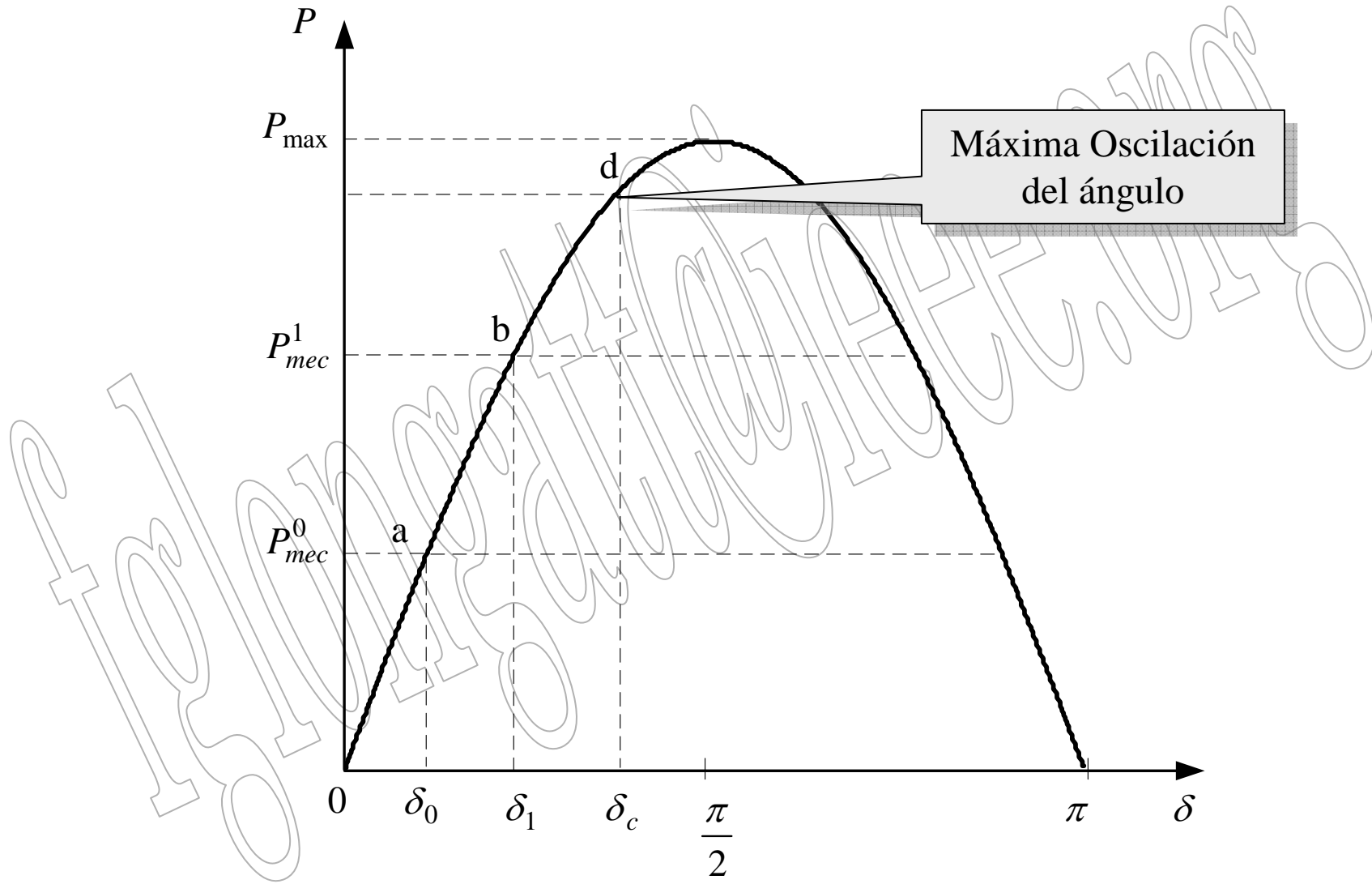


Cambio de Potencia

- Este cambio causa que el rotor se desprenda y aparte de la velocidad sincrónica y se incrementa su diferencia angular.
- La diferencia en la energía almacenada no puede ser inmediatamente absorbida y como resultado, el sistema sobrepasa δ_1 , y alcanza un ángulo más grande δ_{max} .

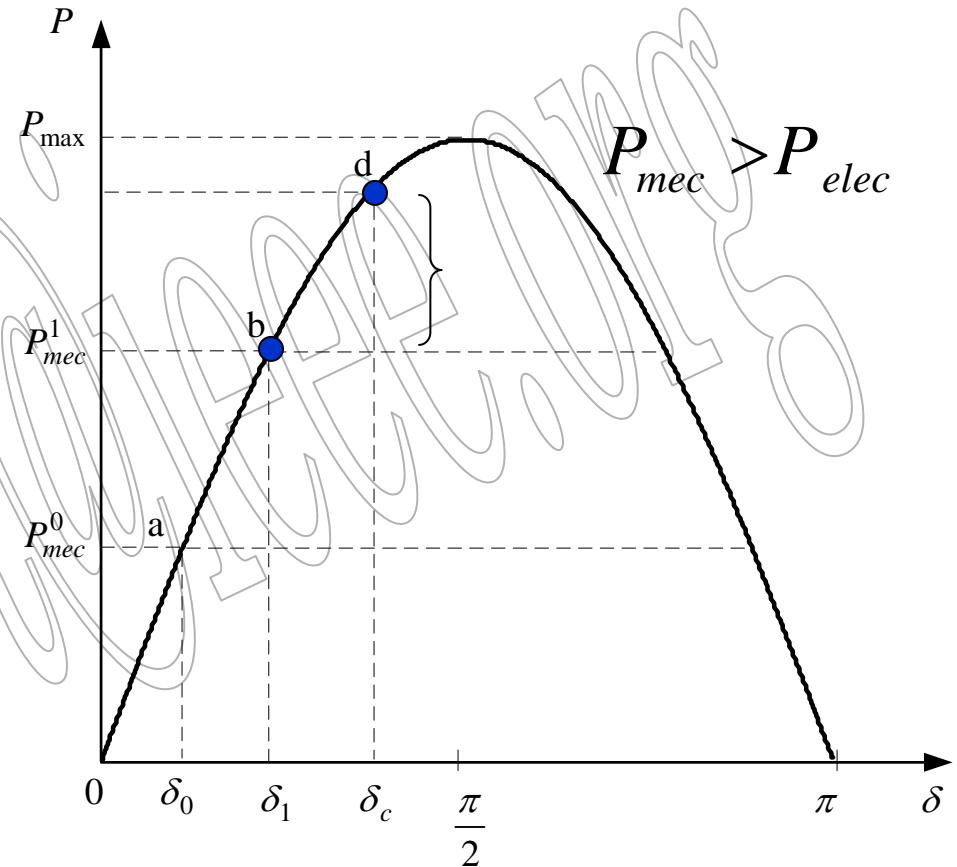


Cambio de Potencia



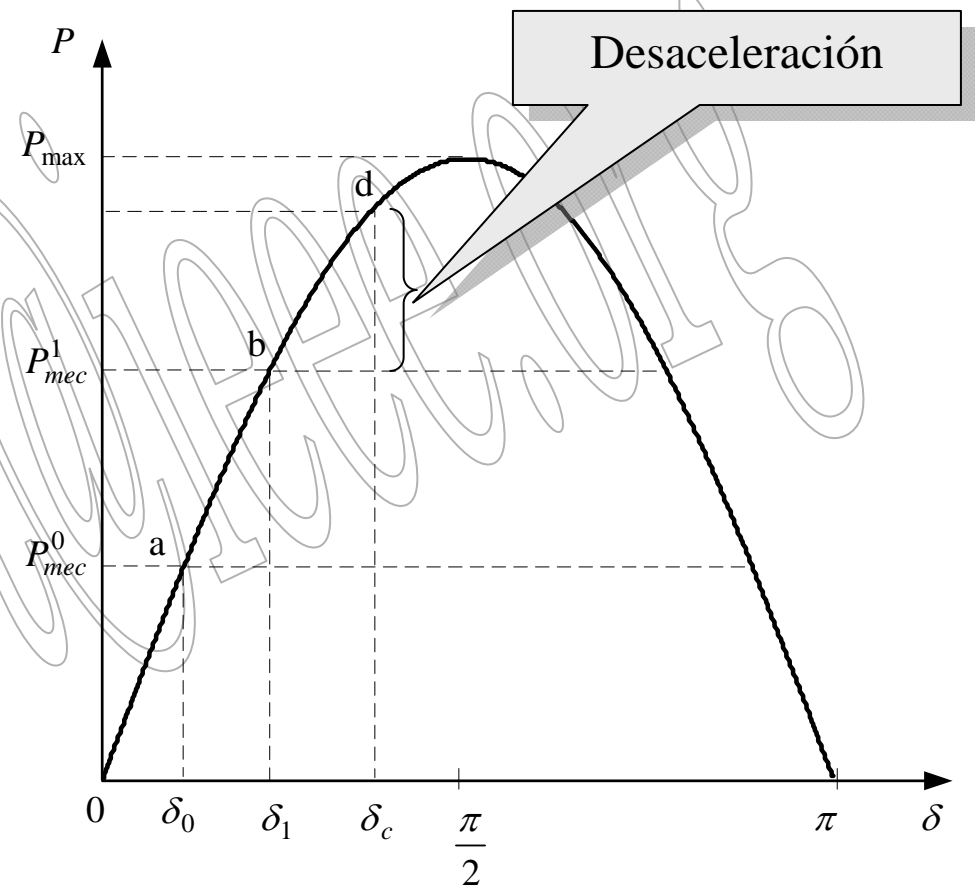
Cambio de Potencia

- Entre los puntos b y d, se cumple que la potencia eléctrica es mayor que la potencia mecánica ($P_{acel} < 0$), el rotor comienza a perder velocidad.



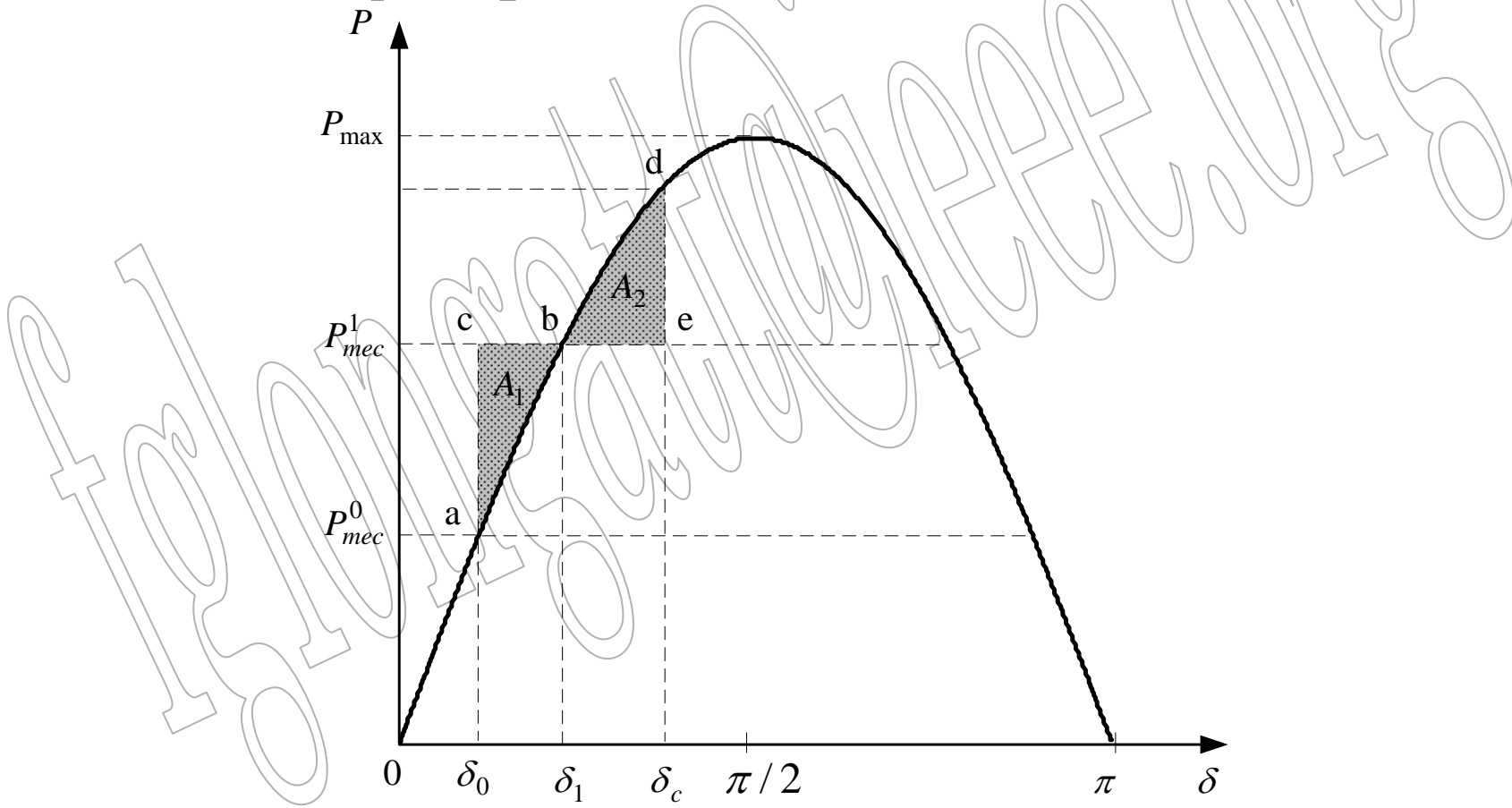
Cambio de Potencia

- El rotor comenzará a desacelerarse, completando la oscilación, la cual se mantendrá repitiéndose, hasta que toda la energía que se almacene en el proceso de aceleración se entregue en el proceso de desaceleración.

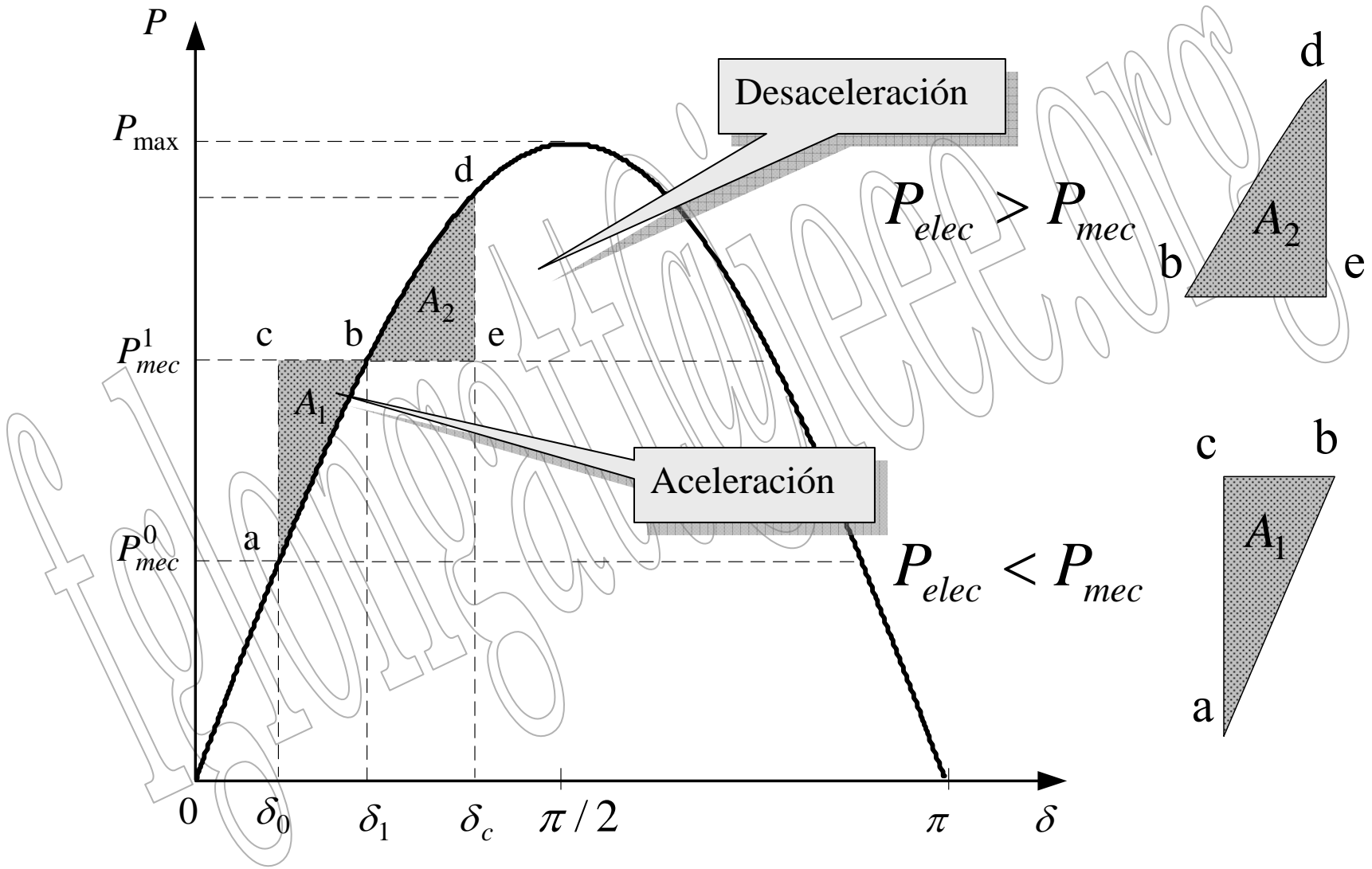


Cambio de Potencia

- Se muestran dos áreas sombreadas abc y bde , llamadas A_1 y A_2 respectivamente.



Cambio de Potencia



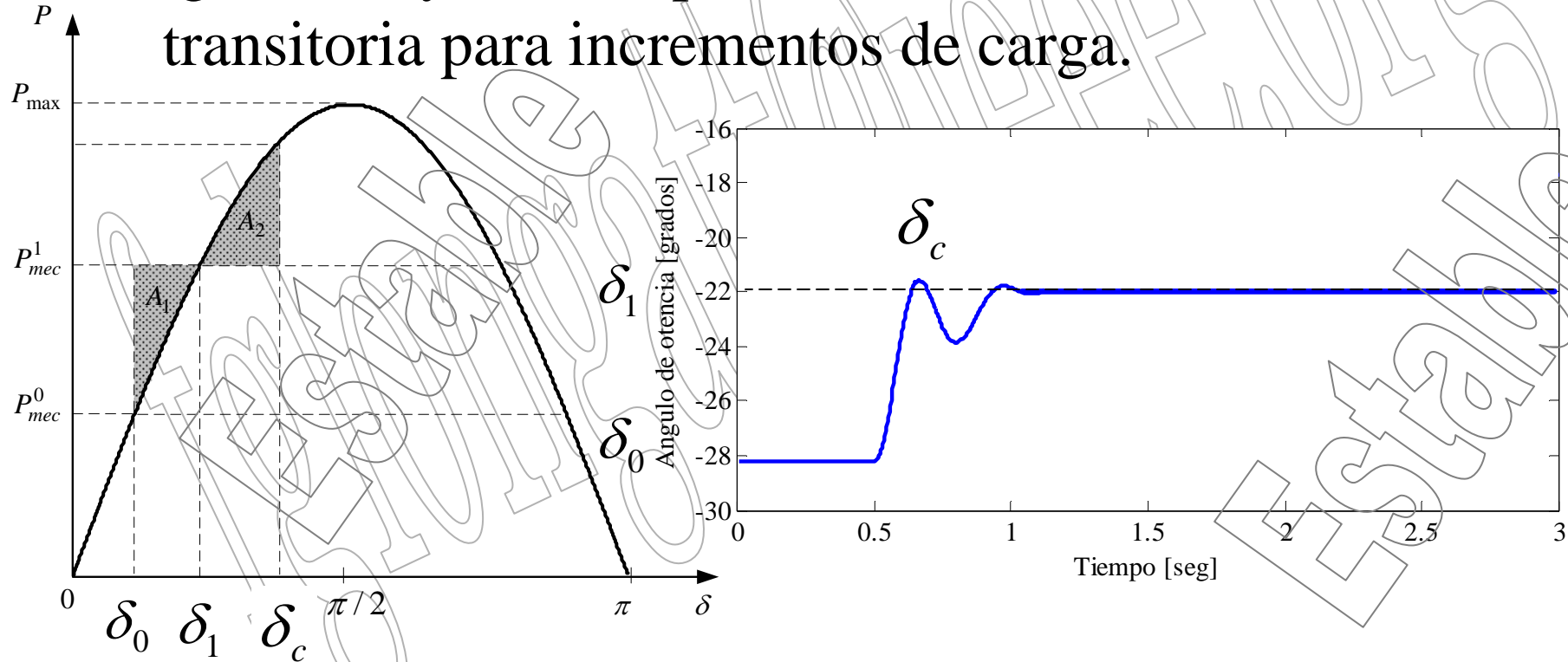
Cambio de Potencia

- Se puede ver claramente que para el área A_1 , se encuentra por debajo de la recta de potencia mecánica, lo que implica que se trata de un *área de desceleración*, mientras que el área definida por bde , A_2 , corresponde a un *área de aceleración*, ya que el área está por encima de la potencia mecánica.
- Despreciando las pérdidas, *estas dos áreas pueden tomadas como iguales, para que se logre estabilidad.*

$$A_1 = A_2$$

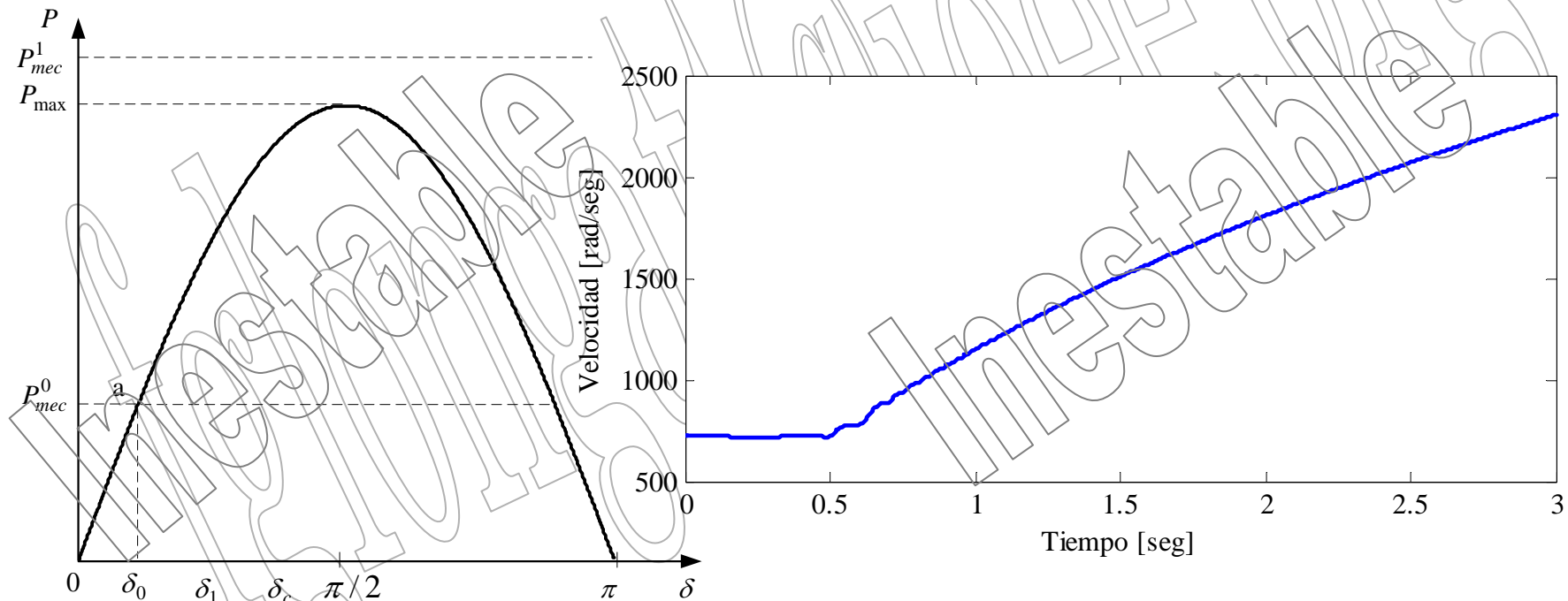
Cambio de Potencia

- Con condiciones de incremento de carga más severas, un punto es alcanzado donde el ángulo crítico es igualado y éste representa el límite de estabilidad transitoria para incrementos de carga.



Cambio de Potencia

- El valor del incremento de carga que un sistema puede soportar depende del límite de régimen permanente del sistema y el ángulo de operación.



Sistemas de Potencia II

Análisis de Estabilidad



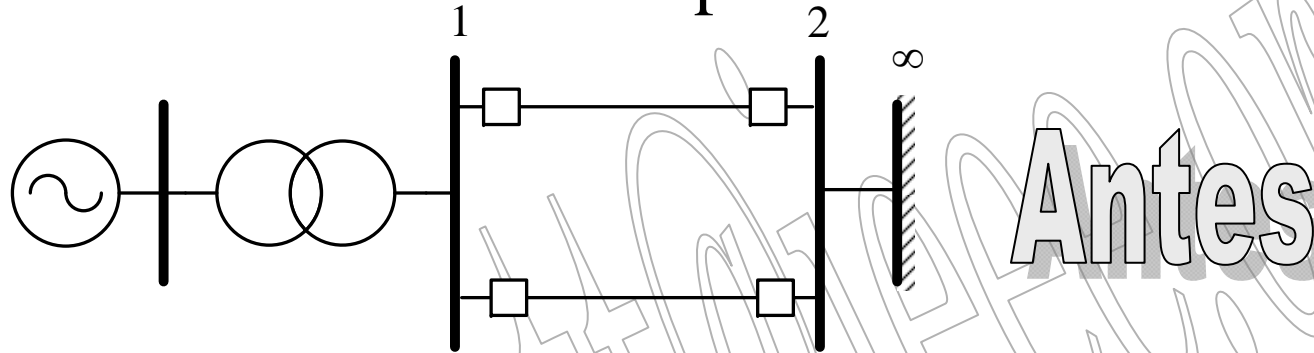
Operaciones de Maniobra o Suicheo

Operaciones de Maniobra o Suicheo

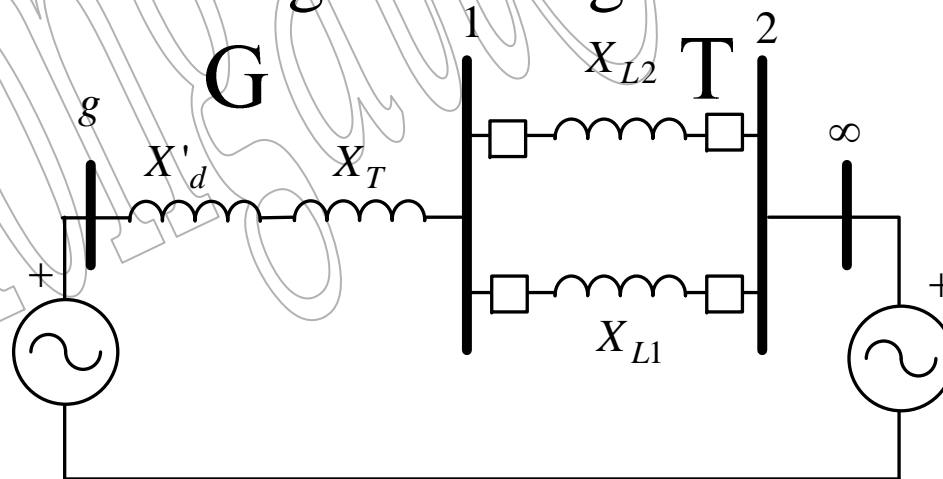
- Pueden ser analizadas con el criterio de áreas iguales.
- Las operaciones de maniobra, se requieren de dos diagramas de operación potencia ángulo:
 - (1) el diagrama de potencia ángulo para las *condiciones iniciales*,
 - (2) el diagrama potencia ángulo para la condición final, que es la *condición luego* que la operación de maniobra ha tenido lugar.

Operaciones de Maniobra o Suicheo

- Considere un sistema de potencia como se muestra:



- En este caso el diagrama de reactancias del sistema queda dado en la siguiente Figura.

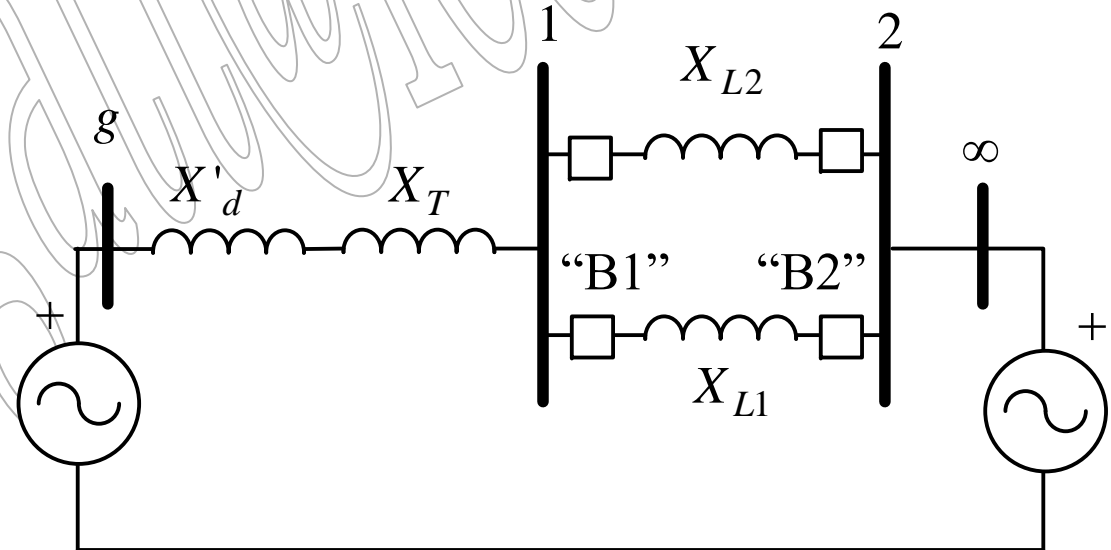


Operaciones de Maniobra o Suicheo

- Como se conoce por teoría la curva de potencia ángulo, posee un máximo, que para condiciones de voltajes constantes, depende inversamente de la impedancia equivalente vista desde el voltaje detrás de la reactancia de la máquina.

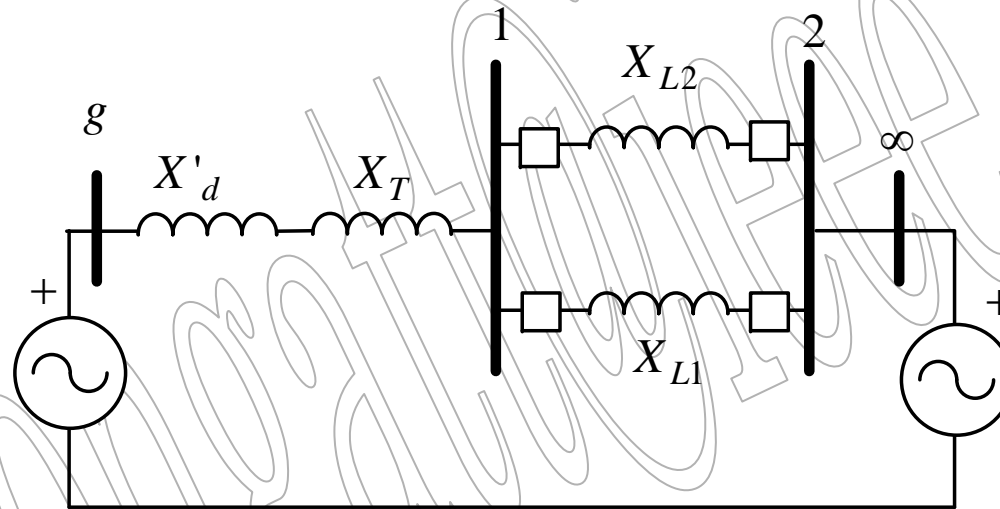
$$P_{elec} = \frac{|\bar{E}_i| |\bar{V}_\infty|}{X_{G\infty}} \text{sen} \delta(t)$$

Antes



Operaciones de Maniobra o Suicheo

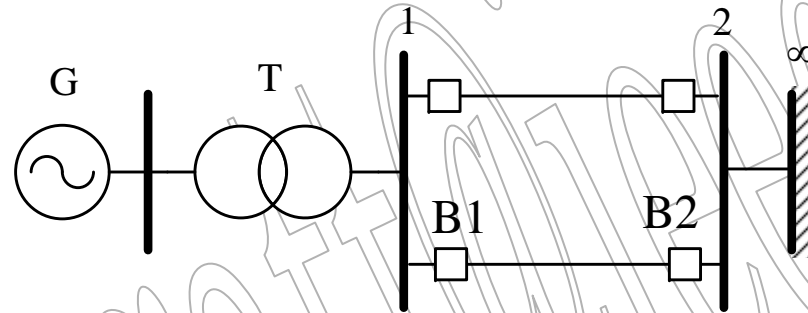
- En el caso de las dos líneas en operación la impedancia viene dada por:



$$X_{g\infty}^I = X'_d + X_T + \frac{X_{L1}X_{L2}}{X_{L1} + X_{L2}}$$

Operaciones de Maniobra o Suicheo

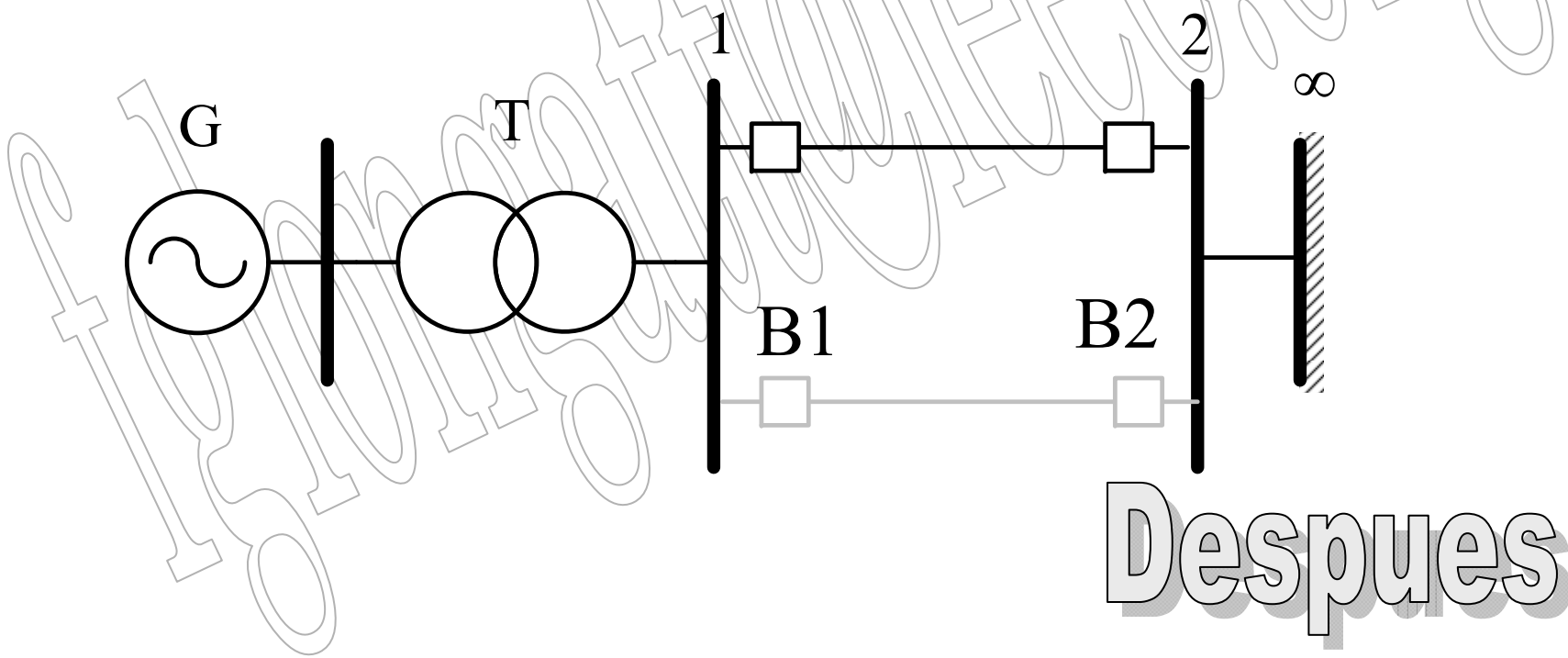
- Inicialmente el sistema tiene dos líneas de transmisión en servicio;



- Si se supone que *súbitamente se produce en forma simultánea la apertura de los interruptores “B1” y “B2”*, entonces la línea de transmisión 2, sale de operación.

Operaciones de Maniobra o Suicheo

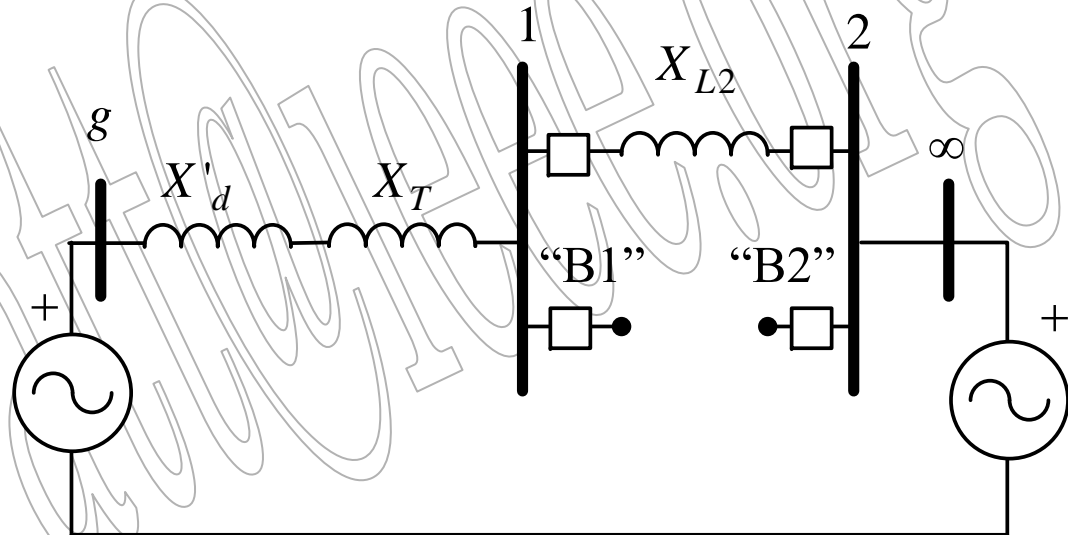
- Si se supone que súbitamente se produce en forma simultánea la apertura de los interruptores “B1” y “B2”, entonces la línea de transmisión 2, sale de operación.



Operaciones de Maniobra o Suicheo

- Cuando la línea se saca de operación se modifica la reactancia vista entre el generador y la barra de potencia infinita:

Despues

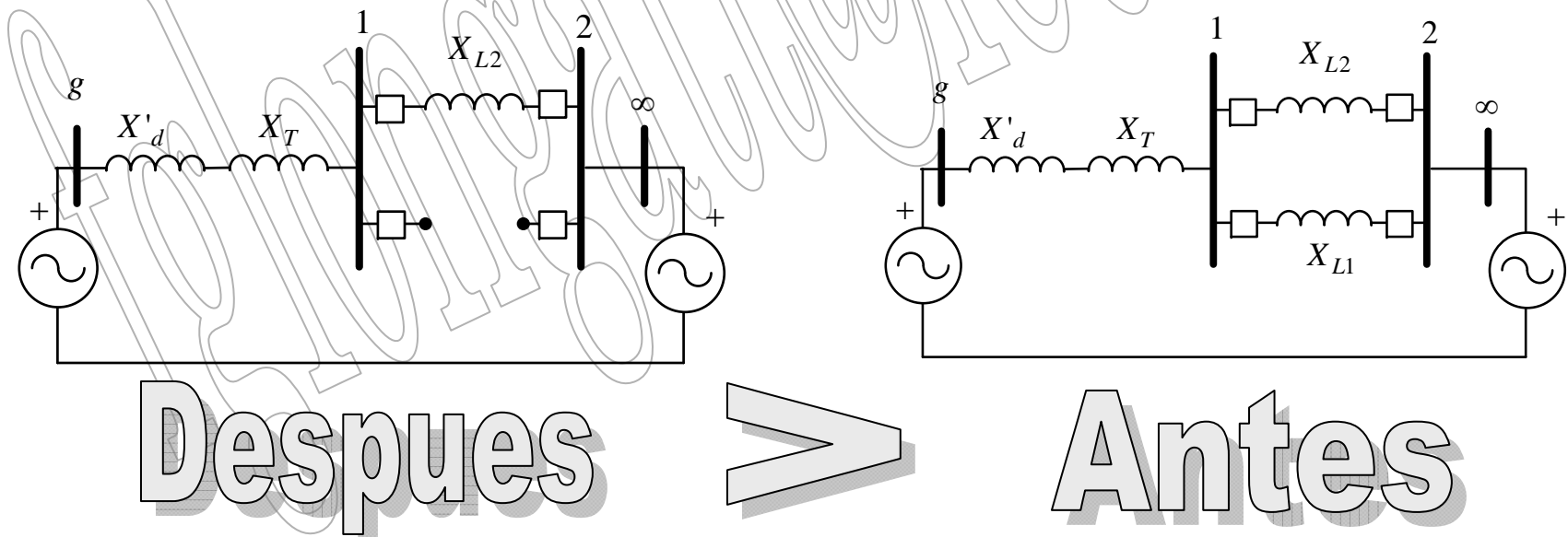


$$X_{g\infty}^{II} = X'_d + X_T + X_{L1}$$

Operaciones de Maniobra o Suicheo

- Se puede ver fácilmente que la reactancia cuando la línea es sacada de operación es mayor que cuando esta está en servicio:

$$X_{g\infty}^{II} > X_{g\infty}^I$$



Operaciones de Maniobra o Suicheo

- Se reconoce que la potencia que puede ser transmitida a unas condiciones de voltaje dadas, quedan dada por:

$$P_{elec}^I = \frac{|\bar{V}_\infty| |\bar{E}'|}{X_{g\infty}^I} \text{sen } \delta$$

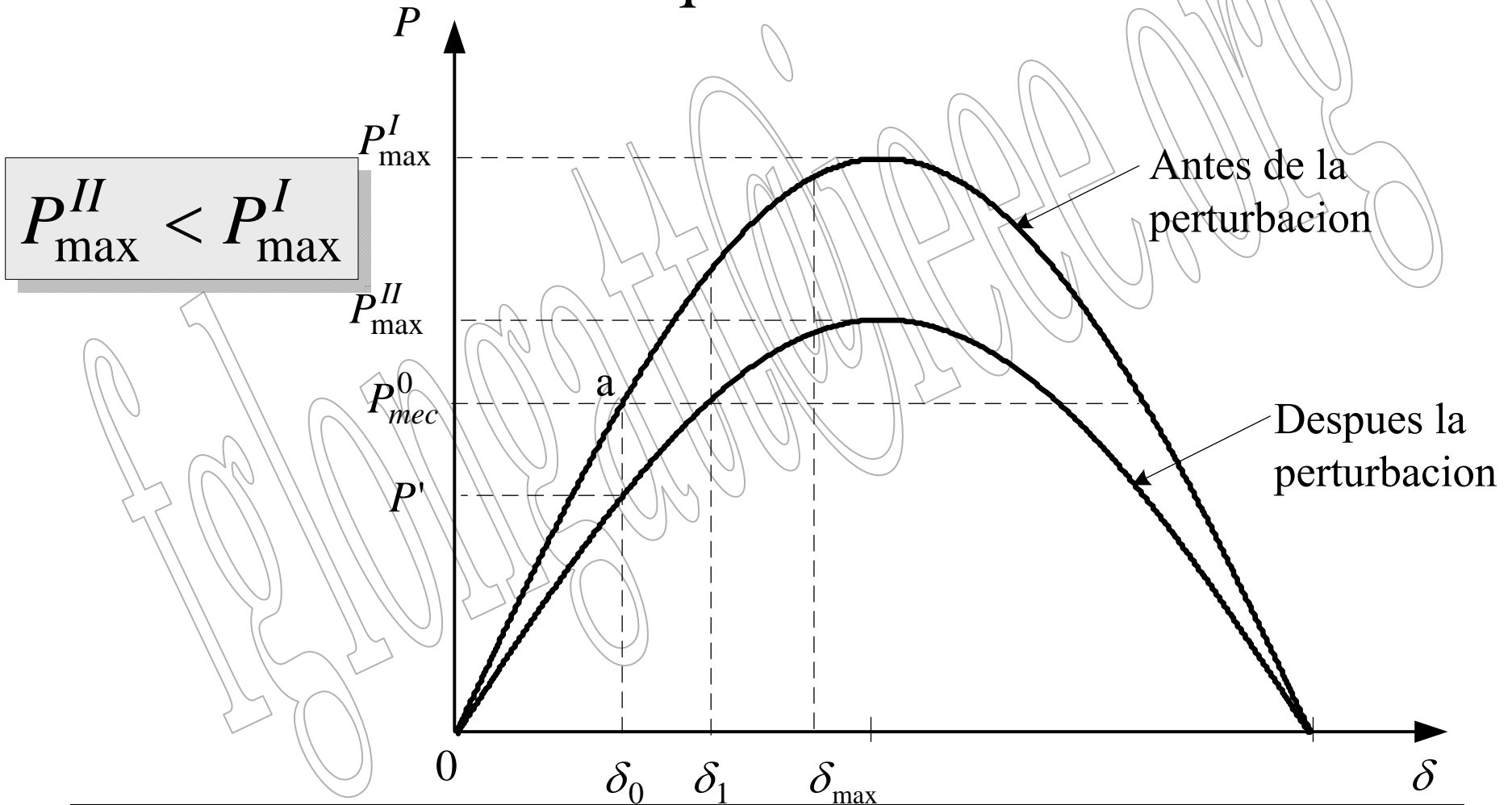
Antes

$$P_{elec}^{II} = \frac{|\bar{V}_\infty| |\bar{E}'|}{X_{g\infty}^{II}} \text{sen } \delta$$

Despues

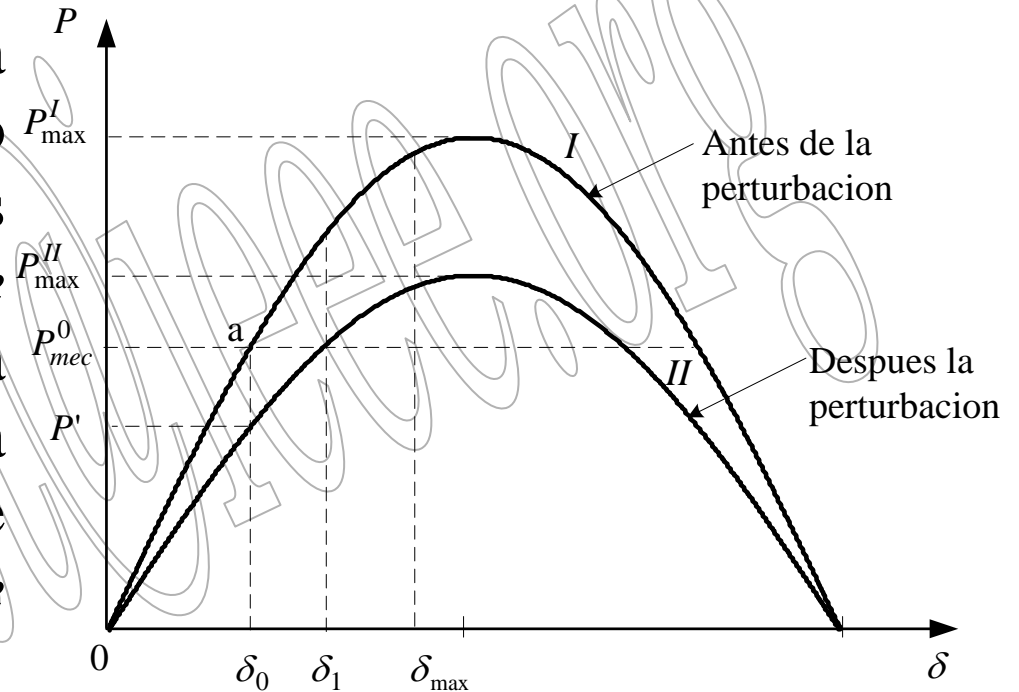
Operaciones de Maniobra o Suicheo

- Es fácil demostrar que:



Operaciones de Maniobra o Suicheo

- En este caso hay dos curvas de potencia ángulo, *I*: para definir el lugar geométrico correspondiente a los estados de potencia *antes de que la perturbación*, sacar la línea de operación tenga efecto, *II*: para una vez que la línea es *puesta fuera de servicio*.



Operaciones de Maniobra o Suicheo

- La curva *I* corresponde a la aplicación de las condiciones iniciales, y la curva *II* a las condiciones finales aplicada.

- El diagrama muestra la potencia transmitida:

$$P_{elec}^0 = P_{mec}^0$$

- En el momento que la operación de maniobra tiene lugar la potencia eléctrica de salida es reducida desde

$$P_{elec}^0 \text{ a } P'$$

Operaciones de Maniobra o Suicheo

- Este cambio produce una disminución de la potencia de magnitud:

$$\Delta P = (P_{elec}^0 - P')$$

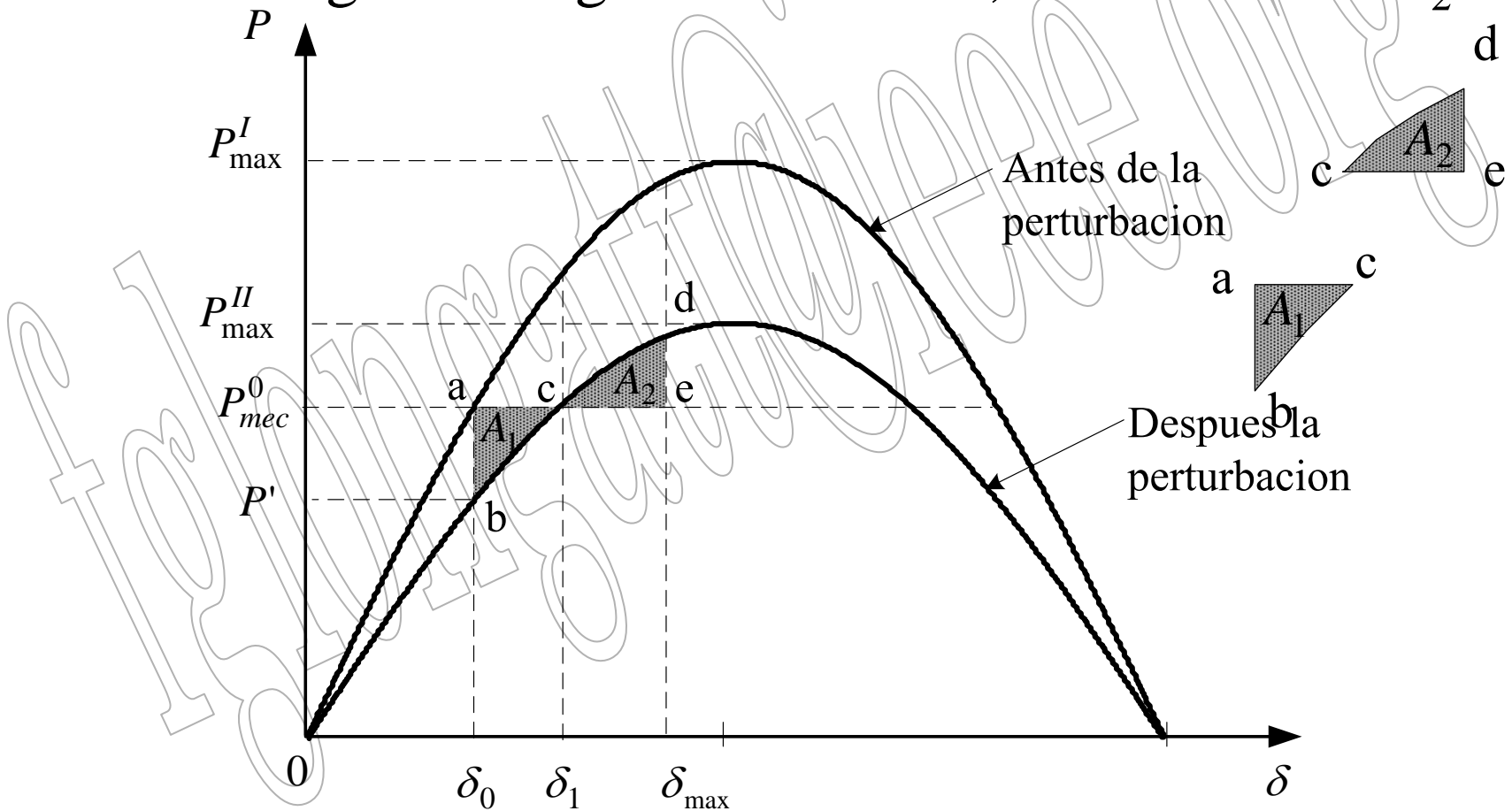
- Establece una *potencia acelerante*, que tiende a que el ángulo aumente, al llegar al punto c, la potencia mecánica y la eléctrica, se igualan, pero en el proceso de aceleración se ha almacenado energía en el rotor, lo cual hace que el ángulo supere δ_1

Operaciones de Maniobra o Suicheo

- Llegando hasta un máximo punto de oscilación δ_{\max} , luego de lo cual comenzara un proceso de frenado de la máquina, en franca tendencia de búsqueda de estabilidad con oscilaciones decrecientes alrededor del punto δ_1 .
- Para lograr estabilidad el área abc , acelerante A_1 , debe ser igual sea igual al área cde , desacelerante A_2 .

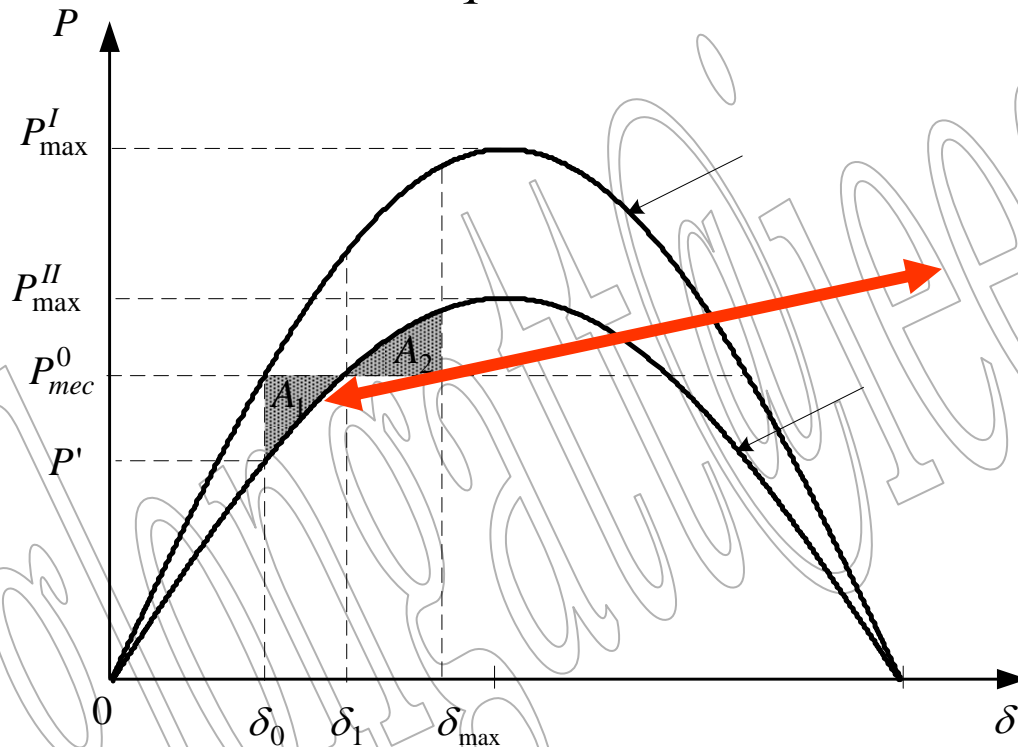
Operaciones de Maniobra o Suicheo

- Para lograr estabilidad el área abc , acelerante A_1 , debe ser igual sea igual al área cde , desacelerante A_2 .



Operaciones de Maniobra o Suicheo

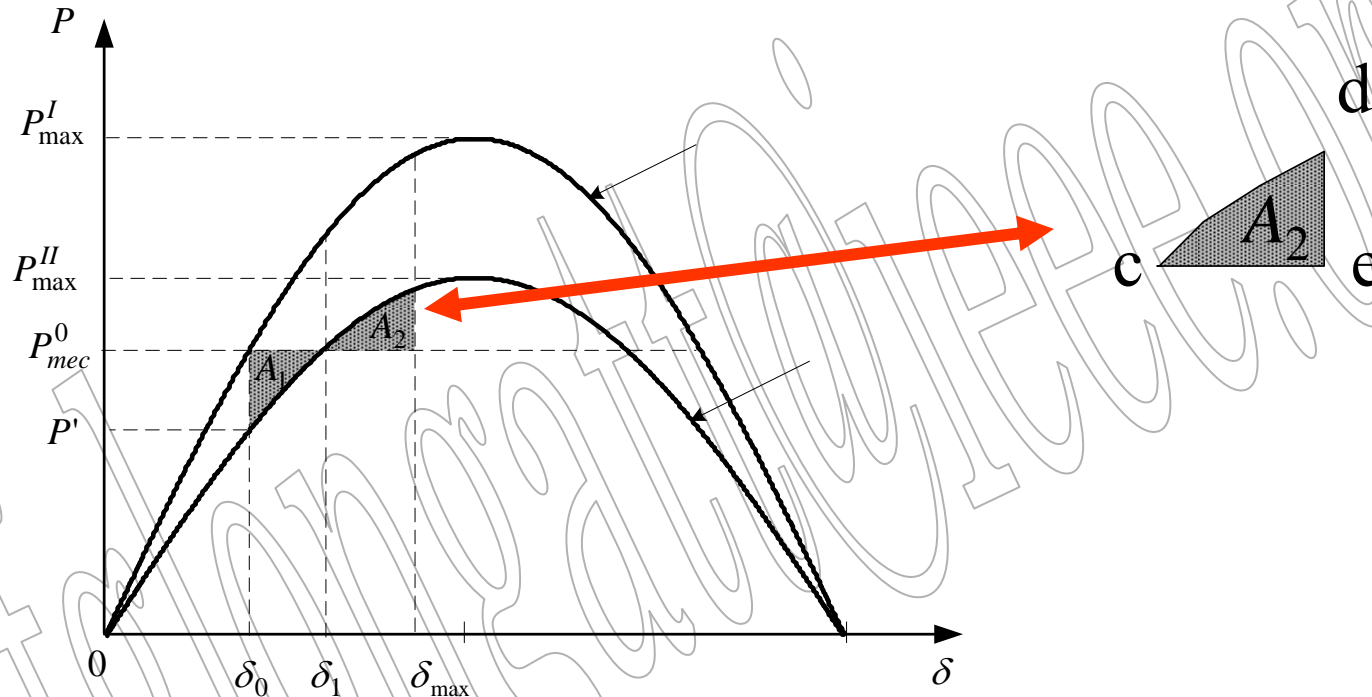
- Area acelerante A_1 :



$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (P^0_{mec} - P^{II}_{elec}) d\delta$$

Operaciones de Maniobra o Suicheo

- Area desacelerante A_2 :



$$A_2 = \int_{\delta_1}^{\delta_{max}} (P^{II}_{elec} - P^0_{mec}) d\delta$$

I

Ante
pertu

Operaciones de Maniobra o Suicheo

- Aplicando, el criterio de áreas iguales se tiene:

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_{mec}^0 - P_{elec}^{II}) d\delta$$

$$A_2 = \int_{\delta_1}^{\delta_{max}} (P_{elec}^{II} - P_{mec}^0) d\delta$$

$$A_1 = A_2$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_{mec}^0 - P_{elec}^{II}) d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta_{max}} (P_{elec}^{II} - P_{mec}^0) d\delta$$

Operaciones de Maniobra o Suicheo

- El valor de potencia transferible sin pérdida de sincronismo depende:
 - (1) el límite de estabilidad de régimen permanente de la condición luego de la operación de maniobra, y
 - (2) la diferencia entre los ángulos de operación de régimen permanente antes y después.
- Los límites de estabilidad para operaciones de maniobra son menores por los grandes valores de la reactancia del circuito final y por el gran porcentaje de cambio en la reactancia del circuito.

Sistemas de Potencia II

Análisis de Estabilidad



Fallas y Subsecuentes Despejes

(Faults and Subsequent Circuit Isolation)

Fallas y Subsecuentes Despejes (*Faults and Subsequent Circuit Isolation*)

- El tercer y más importante tipo de perturbación transitoria proviene de la aplicación de fallas y subsecuentes cambios en la topología de la red que son requerido para aislar la falla.
- Para tales perturbaciones tres o más condiciones circuitales requieren consideración:
 - (1) la *condición inicial*, inmediatamente antes a la falla,
 - (2) la *condición durante la falla*, y
 - (3) la *condición subsiguiente al despeje de la falla*.

Fallas y Subsecuentes Despejes (*Faults and Subsequent Circuit Isolation*)

- Condiciones adicionales son requeridas para cubrir casos en los cuales la falla es aislada por dos o más pasos, tal como podría ser producido por la desconexión de una sección de línea por suicheo secuencial.
- Pasos adicionales pueden ser requeridos para tomar en cuenta el caso del interruptor con recierre de alta velocidad (*high-speed reclosing breaker*), el cual primero desconecta una línea fallada y suprime el arco, y luego restaura la línea a la conexión original del circuito.
- Como quiera que sea, el proceso es seguido en el más complicado de los casos será evidente desde la consideración del caso más simple.

Sistemas de Potencia II

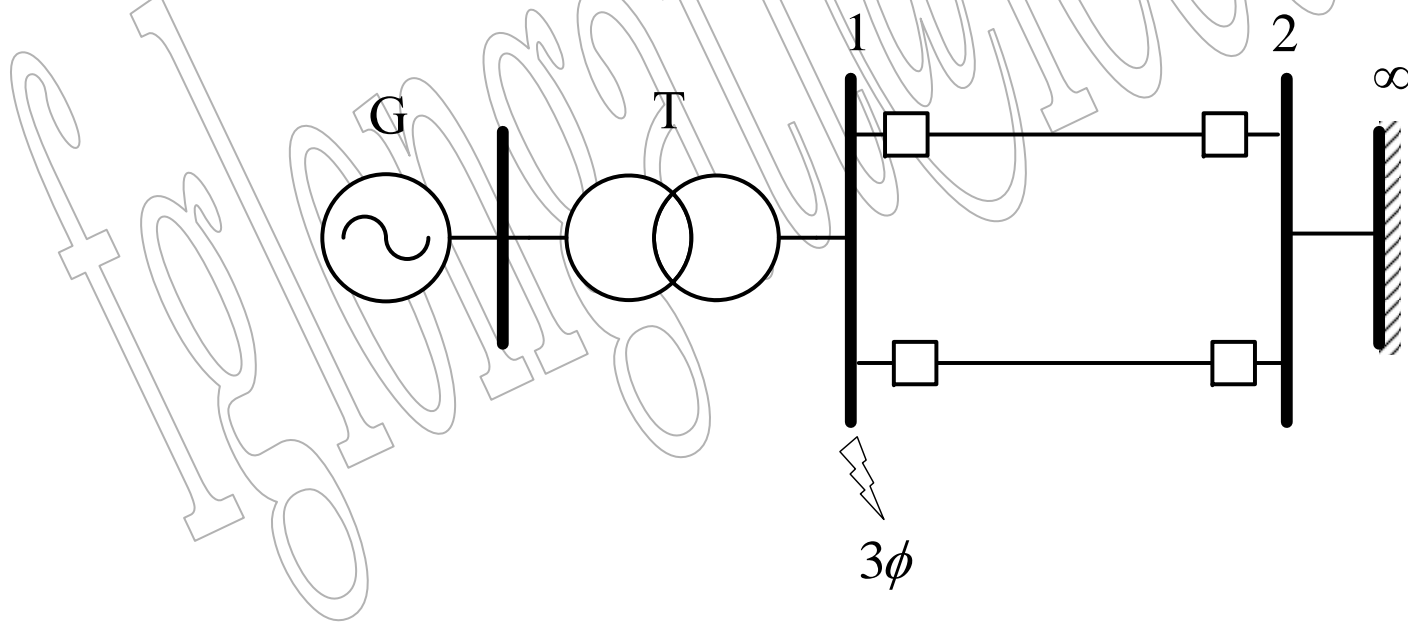
Análisis de Estabilidad



Falla Sin Transferencia de Potencia

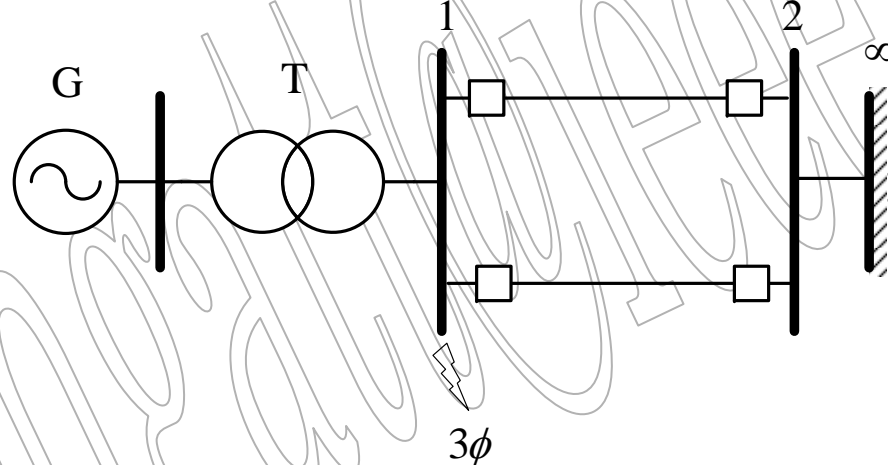
Falla Sin Transferencia de Potencia

- Considere el sistema de potencia de la Figura siguiente.
- El cual esta constituido por una máquina alimentando a una barra de potencia infinita a través de un sistema de transmisión.



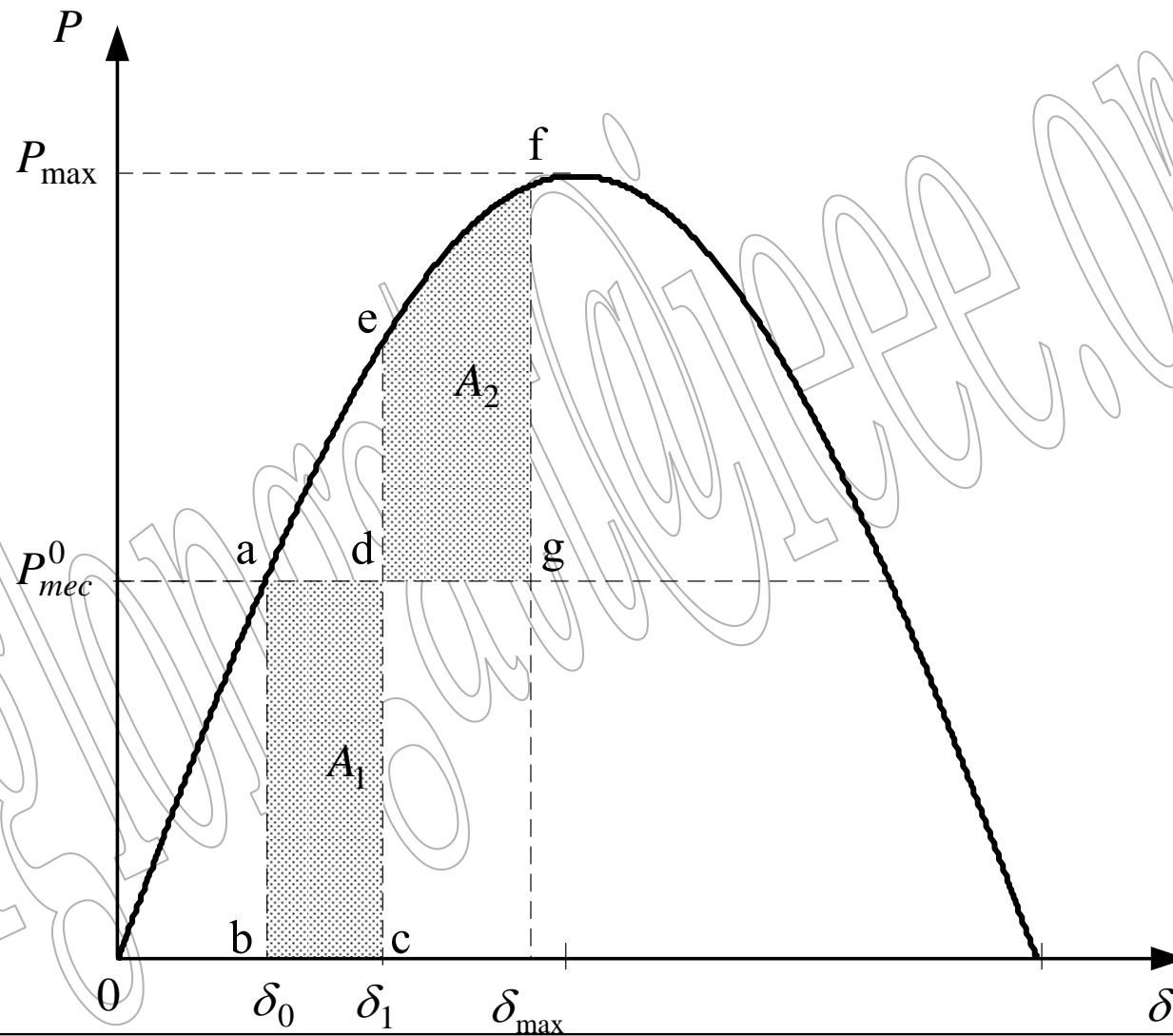
Falla Sin Transferencia de Potencia

- Esta falla ocasiona que el flujo de potencia desde el generador a la barra de potencia infinita se interrumpa, en esta nueva condición.



- Esta falla ocasiona que el flujo de potencia desde el generador a la barra de potencia infinita se interrumpa, en esta nueva condición $P_{elec}^1 = 0$

Falla Sin Transferencia de Potencia



Falla Sin Transferencia de Potencia

- Supóngase que inicialmente el sistema opera en forma estable entregando una potencia a la barra de potencia infinita:

$$P_{elec}^0 = P_{mec}^0$$

- Súbitamente ocurre una falla por cortocircuito trifásico en la barra 1.
- Esta falla ocasiona que el flujo de potencia desde el generador a la barra de potencia infinita se interrumpa, en esta nueva condición.

Sistemas de Potencia II

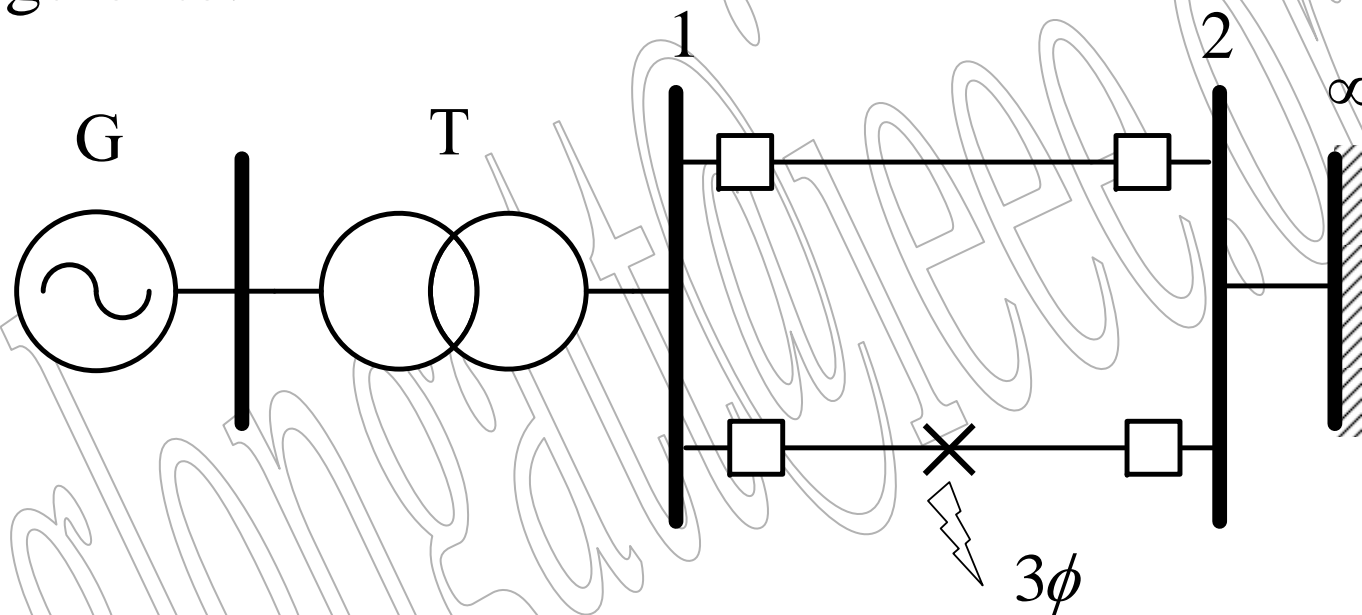
Análisis de Estabilidad



Falla con Potencia Transmitida

Falla con Potencia Transmitida

- Considere el sistema de potencia de la Figura siguiente.



- El cual está constituido por una máquina alimentando a una barra de potencia infinita a través de un sistema de transmisión.

Falla con Potencia Transmitida

- Considere que una súbitamente una falla por cortocircuito trifásico ocurre en una de las líneas de transmisión.
- Asuma que la potencia mecánica de entrada permanece constante, P_{mec}^0 y la máquina opera en régimen permanente, estable

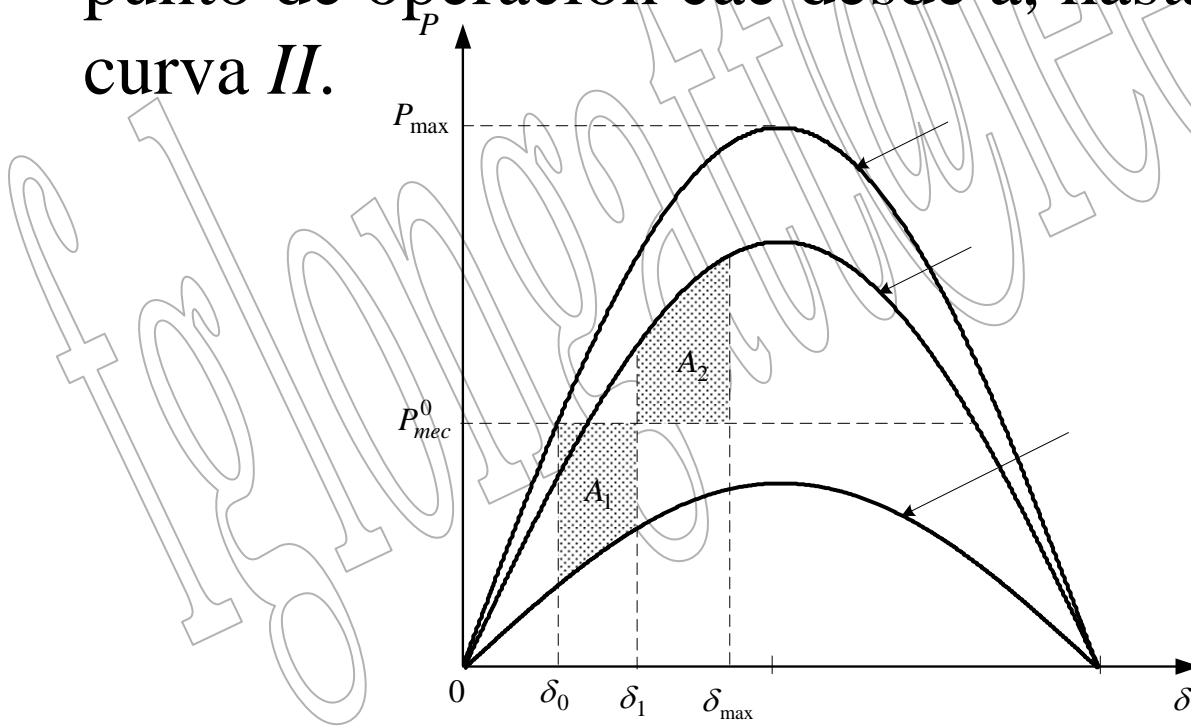
$$P_{elec}^0 = P_{mec}^0$$

Falla con Potencia Transmitida

- La curva correspondiente a las *condiciones previas* a la falla es mostrado por la curva *I*.
- Cuando la ubicación de la falla, se encuentra en una de las líneas de transmisión, la reactancia de transferencia equivalente (desde detrás de la reactancia de la máquina y la barra de potencia infinita) entre las barras se incrementa, *disminuyendo la capacidad de transferencia de potencia y la curva correspondiente potencia-ángulo* es representada por la curva *II*.

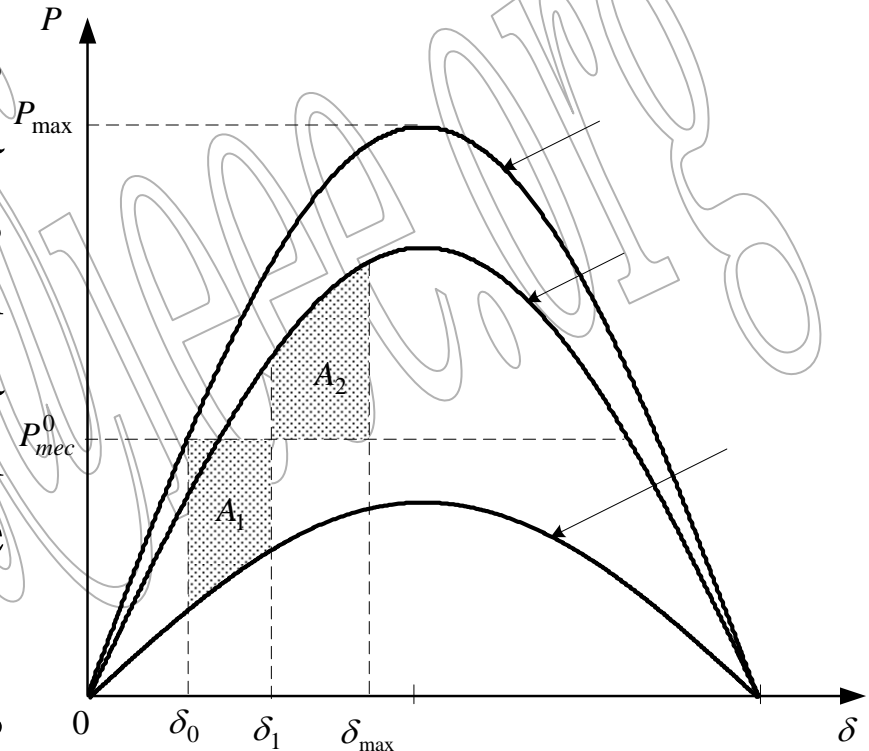
Falla con Potencia Transmitida

- Finalmente la curva *III*, representa la *curva post-falla*, asumiendo que la línea fallada es removida.
- Cuando la falla trifásica ocurre, inmediatamente el punto de operación cae desde a, hasta el punto b en la curva *II*.



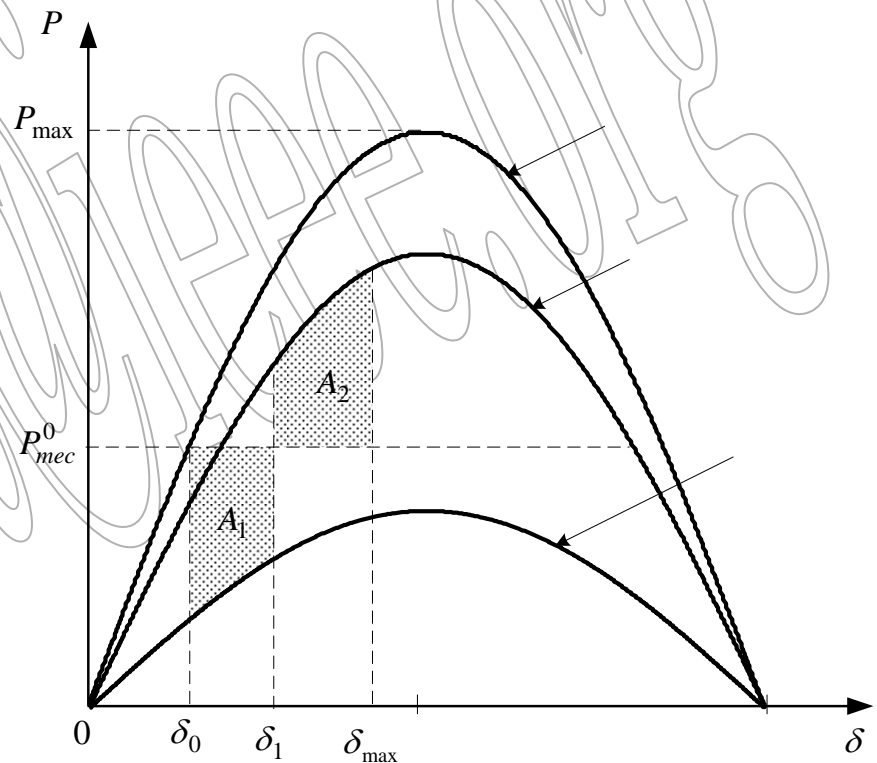
Falla con Potencia Transmitida

- Un exceso de potencia mecánica de entrada, supera a la potencia eléctrica de salida, acelerando el rotor, de tal modo que se almacena energía cinética en el mismo, y el ángulo δ , se incrementa.
- Asumiendo que la falla es despejada en δ_1 por el despeje de la línea fallada.



Falla con Potencia Transmitida

- Esto provoca que súbitamente el punto de operación pase a ser e, sobre la curva *III*.
- La potencia neta es ahora desacelerante, y la energía cinética previamente almacenada será reducida a cero en el punto f, cuando las áreas *defg* y *abad* se igualen.

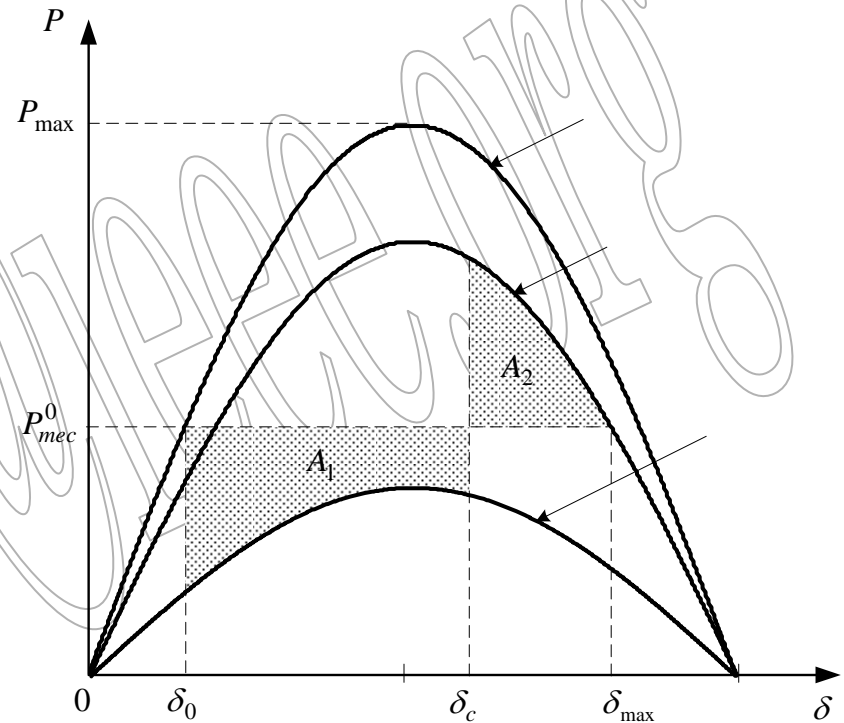


Falla con Potencia Transmitida

- Debido a que la potencia eléctrica es mayor que la potencia mecánica, el rotor continuará desacelerando, y el ángulo de potencia continuara disminuyendo pasando por e .
- El ángulo del rotor entonces oscilará hacia atrás y hacia delante en e , a su frecuencia natural.
- El amortiguamiento presente en la maquina causara que esta oscilación se propague y el nuevo estado de operación sea alcanzado en la curva *III*.

Falla con Potencia Transmitida

- El ángulo crítico de despeje, es alcanzado cuando cualquier incremento en el ángulo δ_c , causa que el área A_2 , que representa la *energía desacelerante*, sea menor al área representada por la *energía acelerante*.
- Esto ocurre cuando δ_{max} , o el punto f , es la intersección de la curva *III* con la potencia mecánica.



Lecturas Recomendadas:

- E.W. Kimbark. *Power System Stability*. Jhon Willey and Sons. 1948.
 - Chapter IV. *The Equal-Area Criterion for Stability*.
- Westinghouse. *Electrical Transmssion and Distribution Reference Book*. EE.UU. 1950.
 - Chapter 13. *Power System Stability. Basic Elements of Theory and Applications*.