

## Estabilidad Transitoria

### 2.1 Límite de Estabilidad Transitoria

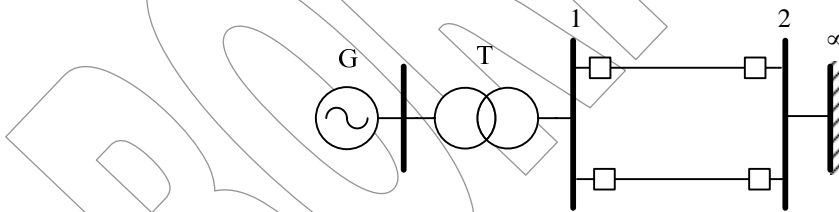
El límite de estabilidad transitoria se refiere al valor de potencia que puede ser transmitida con estabilidad cuando el sistema es sujeto a un perturbación aperiódica (aperiodic disturbance). Por perturbación aperiódica significa una que no se produce con regularidad y solo después de intervalos tales que el sistema alcanza una condición de equilibrio entre perturbaciones. Los tres principales tipos de perturbaciones o disturbios transitorios que reciben consideración en los estudios de estabilidad, en orden de incremento de importancia son:

1. Cambios de Potencia (*Load Changes*)
2. Operaciones de Suicheo o maniobra (*Switching Operations*)
3. Fallas con subsecuentes aislamiento de circuitos (*Circuit Isolation*)

### 2.2 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.

Considere un sistema de potencia como el de la Figura 1. El cual consta de un generador, entregando una potencia a una barra de potencia infinita por intermedio de un sistema de transmisión.



**Figura 1. Sistema de Potencia de una máquina contra un sistema de potencia infinito**

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,  $\delta_0$ , punto a.

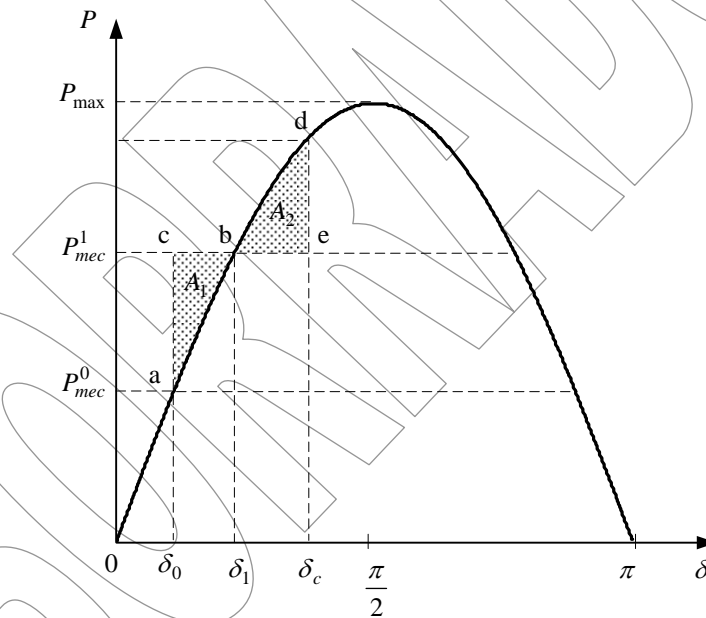
Partiendo de estas condiciones estables de operación, se produce por algún medio un aumento repentino en la potencia mecánica de la máquina, pasando de  $P_{mec}^0$  a  $P_{mec}^1$ . Si la condición final corresponde a un

posible estado estable de operación, la máquina debe quedar operando en un nuevo punto, b, a un ángulo  $\delta_1$ , donde se logre el nuevo equilibrio entre potencia mecánica y potencia eléctrica  $P_{elec}^1 = P_{mec}^1$

Bajo esta situación, se produce un transitorio el cual se trata de explicar en forma simple. En un instante dado, la potencia mecánica cambia de  $P_{mec}^0$  a  $P_{mec}^1$ , de tal modo que considerando la respectiva curva característica potencia-ángulo (Figura 2), 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. 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  $\delta_1$ , y alcanza un ángulo más grande  $\delta_{max}$ . Entre los puntos b y d (Figura 2), se cumple que la potencia eléctrica es mayor que la potencia mecánica ( $P_{acel} < 0$ ), de tal modo, que el rotor comienza a perder velocidad. 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.

En atención a la Figura 2, se muestran dos áreas sombreadas  $abc$  y  $bde$ , llamadas  $A_1$  y  $A_2$  respectivamente. 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 tomarse como iguales, para que se logre estabilidad.

La oscilación no excederá el ángulo  $\delta_{max}$ , y debido a las pérdidas en un sistema real, el equilibrio será finalmente alcanzado en  $\delta_1$ .

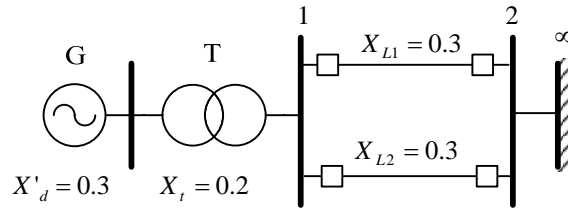


**Figura 2. Diagrama de Potencia Ángulo para Analizar el Incremento de Carga**

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

### 2.2.1.1. Ejemplo

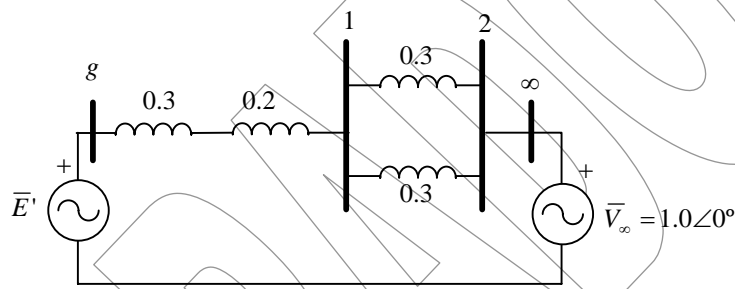
Un generador sincrónico de 60 Hz, posee una constante de inercia  $H = 9.94$  Mjoule/MVA y una reactancia transitoria  $X'_d = 0.3$  por unidad, esta conectada a una barra de potencia infinita a través de un circuito puramente reactivo, como se muestra en la Figura siguiente.



Las reactancias marcadas en el diagrama están dadas en una base común. El generador entrega una potencia de 0.6 por unidad, factor de potencia de 0.8 en atraso a la barra de potencia infinita, cuyo voltaje es  $V = 1.0 p.u.$ . Determine:

- (a) El nuevo punto de operación suponiendo que ocurre un aumento súbitamente la potencia mecánica es aumentada un 50%.
- (b) La máxima potencia de entrada que puede ser aplicada sin pérdida de sincronismo.
- (c) Repetir (a) con potencia inicial igual a cero. Asuma que el voltaje interno del generador permanece constante y es igual al valor calculado en (a).

La reactancia equivalente entre el voltaje detrás de la reactancia de la máquina y la barra de potencia infinita puede ser fácilmente calculada como:



De modo que resulta:

$$X_{g\infty} = 0.3 + 0.2 + \frac{0.3}{2} \quad X_{g\infty} = 0.65 p.u$$

Se procede a calcular el voltaje interno de la máquina  $E'$  (voltaje de excitación), considerando que se entrega una potencia en la barra de potencia infinita de:

$$\bar{S} = \frac{0.6 p.u}{0.8} \angle \cos^{-1}(0.8) \quad \bar{S} = 0.75 \angle 36.86 p.u$$

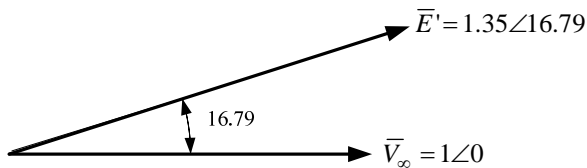
La corriente queda dada por:

$$\bar{I} = \frac{\bar{S}^*}{\bar{V}^*} = \frac{0.75 \angle -36.86}{1.0 \angle 0} = 0.75 \angle -36.86 p.u$$

El voltaje de excitación resulta:

$$\bar{E}' = \bar{V} + jX_{g\infty} \bar{I} \quad \bar{E}' = 1 \angle 0 + j0.65(0.75 \angle -36.86) \quad \bar{E}' = 1.35 \angle 16.79 p.u$$

En este caso, como se ha supuesto el voltaje de la barra de potencia infinita a referencia, se obtiene que el ángulo inicial de operación es  $\delta_0 = 16.79$ .



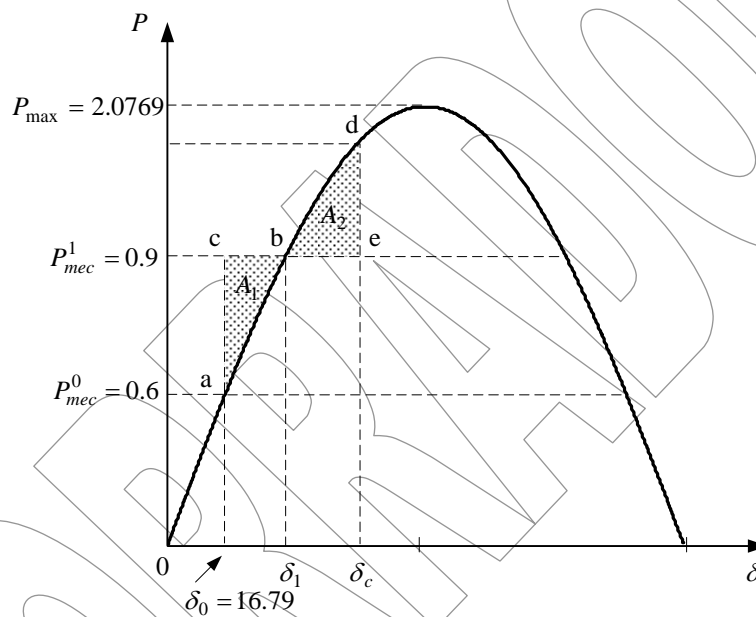
La ecuación característica de potencia ángulo queda dada por:

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

$$P_{elec} = \frac{1.0 \times 1.35}{0.65} \text{sen} \delta \quad P_{elec} = 2.0769 \text{sen} \delta$$

Se conoce que para el punto estable inicial de operación, a, se cumple:  $P_{elec} = 0.6$ , si  $\delta = \delta_0$ .

$$0.6 = \frac{1.0 \times 1.35}{0.65} \text{sen} \delta_0 \quad \text{sen}^{-1} \left( \frac{1.0 \times 1.35}{0.65 \times 0.6} \right) = \delta_0 \quad \delta_0 = 16.79 = 0.2930 \text{rad}$$



**Figura 3. Diagrama de Potencia-Angulo para el Ejemplo 1(a)**

Es importante visualizar la situación, correspondiente a la perturbación ocasionada dentro del sistema de potencia por el cambio de potencia, mediante el uso de un diagrama de potencia-ángulo (ver Figura 3). Se observa que en caso de que exista estabilidad, el nuevo punto de operación corresponde a un ángulo  $\delta_1$ , el cual viene dado por:

$$P_{elec}^1 = P_{mec}^1 = 2.0769 \text{sen} \delta_1 \quad 0.9 = 2.0769 \text{sen} \delta_1 \quad \delta_1 = 25.6796 = 0.4482 \text{rad}$$

En esta se muestran las áreas acelerantes  $A_1$ , y desacelerante  $A_2$ . Las cuales quedan definidas por:

$$A_1 = \int_{\delta_0=16.79}^{\delta_1=25.67} (P_{mec}^1 - P_{elec}) d\delta \quad A_2 = \int_{\delta_0=16.79}^{\delta_1=25.67} (0.9 - 2.0769 \text{sen} \delta) d\delta$$

La integral del ara acelerante  $A_1$ , resulta ser una integral definida donde sus limites son conocidos.

$$A_1 = \frac{873}{6250} + \frac{20769}{10000} \cos\left(\frac{2241}{5000}\right) - \frac{20769}{10000} \cos\left(\frac{293}{1000}\right)$$

$$A_1 = 0.0231$$

Por otra parte la integral del área definida por el área de desaceleración,  $A_2$  queda dada por:

$$A_2 = \int_{\delta_1=25.67}^{\delta_{\max}} (P_{elec} - P_{mec}^1) d\delta \quad A_2 = \int_{\delta_1=25.67}^{\delta_{\max}} (2.0769 \operatorname{sen} \delta - 0.9) d\delta$$

Esta integral, posee en su límite superior el máximo ángulo de oscilación, el cual ha de ser determinado.

$$A_2 = -\frac{9}{10} \delta_{\max} - \frac{20769}{10000} \cos(\delta_c) + \frac{20169}{50000} + \frac{20769}{10000} \cos\left(\frac{2241}{5000}\right)$$

$$A_2 = -0.9\delta_{\max} - 2.0769\cos\delta_c + 2.2751$$

Ahora bien, el criterio de las áreas iguales, establece que se el sistema lograra estabilidad si  $A_1 = A_2$

$$A_1 = 0.0231$$

$$A_2 = -0.9\delta_{\max} - 2.0769\cos\delta_c + 2.2751$$

Igualando se tiene, que la ecuación a resolver es:

$$0.0231 = -0.9\delta_{\max} - 2.0769\cos\delta_c + 2.2751$$

Como se observa se trata de una ecuación no lineal, cuya solución por métodos numéricos arroja:

$$\delta_{\max} = 0.292852 \text{ rad} = 52.71$$

Una vez obtenido, el valor del ángulo de la máxima oscilación, se procede a construir la curva característica potencia-ángulo para la solución:

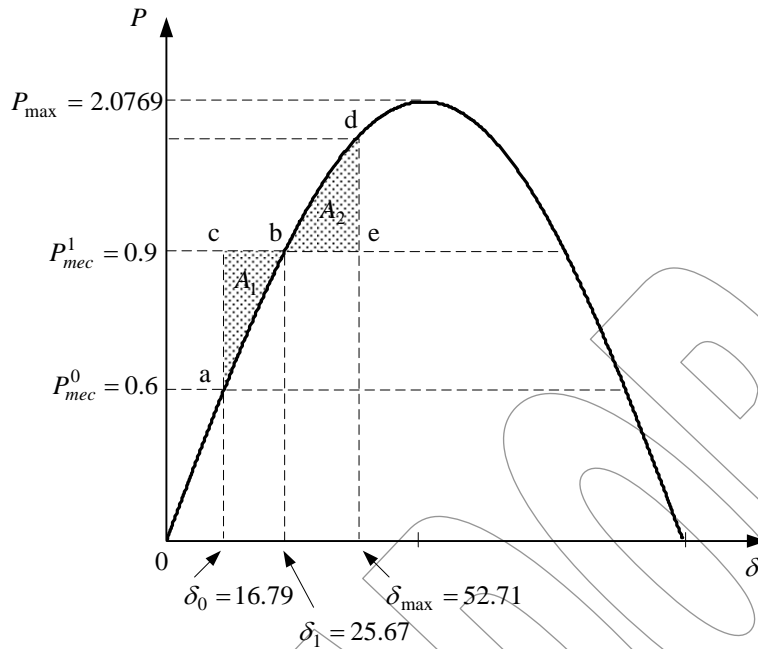


Figura 4. Diagrama de Potencia-Angulo Solución para el Ejemplo 1(a)

### 2.2.2. Operaciones de Maniobra o Suicheo

Los límites de estabilidad transitoria para operaciones de maniobra pueden ser investigados en forma similar usando el criterio de áreas iguales, que ha sido aplicado para la determinación del límite transitorio de incremento de carga.

En el caso de 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 de potencia ángulo para la condición final, que es la condición luego que la operación de maniobra ha tenido lugar.

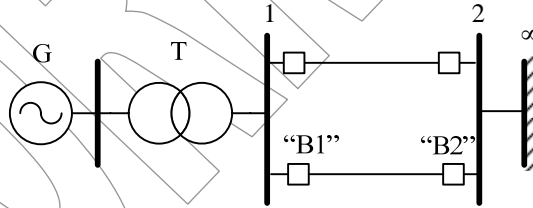
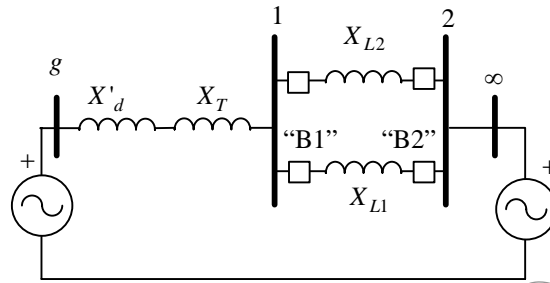


Figura 5. Sistema de Potencia de una máquina contra un sistema de potencia infinito

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



**Figura 6. Circuito Equivalente para Analizar el Transitorio debido a una Maniobra**

La Figura 5 indica un sistema con dos líneas de transmisión inicialmente en servicio; la Figura 6 muestra el diagrama de impedancia la red mostrada. Si se supone que súbitamente se produce en forma simultanea la apertura de los interruptores “B1” y “B2”, entonces la línea de transmisión 2, sale de operación.

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

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

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

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

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

$$X''_{g\infty} > X'_{g\infty}$$

En tal sentido, se reconoce que la potencia que puede ser transmitida a unas condiciones de voltaje dadas, quedan dada por:

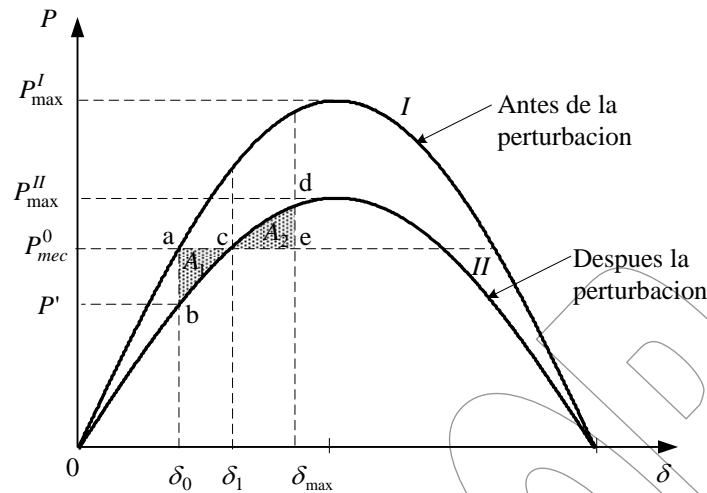
$$P_{elec}^I = \frac{|\bar{V}_\infty| |\bar{E}'|}{X'_{g\infty}} \text{sen} \delta \quad : \text{ Antes de la Perturbación}$$

$$P_{elec}^{II} = \frac{|\bar{V}_\infty| |\bar{E}'|}{X''_{g\infty}} \text{sen} \delta \quad : \text{ Después de la Perturbación}$$

Es fácil demostrar que  $P_{max}^{II} < P_{max}^I$ .

Se procede a construir las respectivas características potencia ángulo de la situación planteada.

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento.



**Figura 7. Diagrama Potencia Ángulo para el Análisis del Transitorio debido a una Operación de Maniobra**

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.

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  $P_{elec}^0 = P_{mec}^0$ , la condición inicial de operación al ángulo  $\delta_0$  y la potencia  $P_{elec}^0$ , y la condición final de operación a  $\delta_1$ . En el momento que la operación de maniobra tiene lugar la potencia eléctrica de salida es reducida desde  $P_{elec}^0$  a  $P'$ . Este cambio produce una disminución de la potencia de magnitud  $\Delta P = (P_{elec}^0 - P')$ , esto 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  $\delta_1$ , llegando hasta un máximo punto de oscilación  $\delta_{max}$ , 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  $\delta_1$ . Para lograr estabilidad el área *abc*, acelerante  $A_1$ , debe ser igual sea igual al área *cde*, desacelerante  $A_2$ .

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.

### 2.3 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.

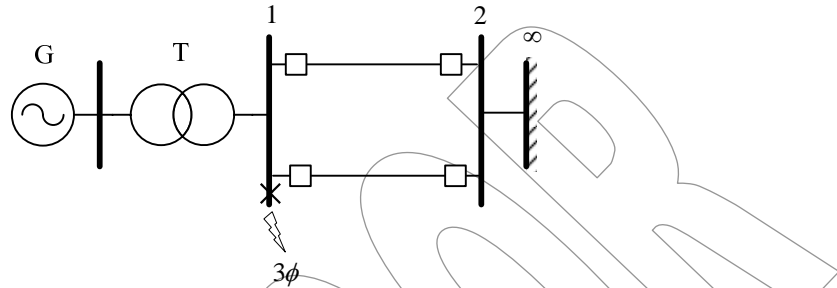
Condiciones adicionales son requeridas para cubrir casos en los cuales la falla es aislada por dos o más pasos, tal como podría ser producido por la desconexión de una sección de línea por suicheo secuencial. Pasos adicionales pueden ser requeridos para tomar en cuenta el caso del interruptor con recierre 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.

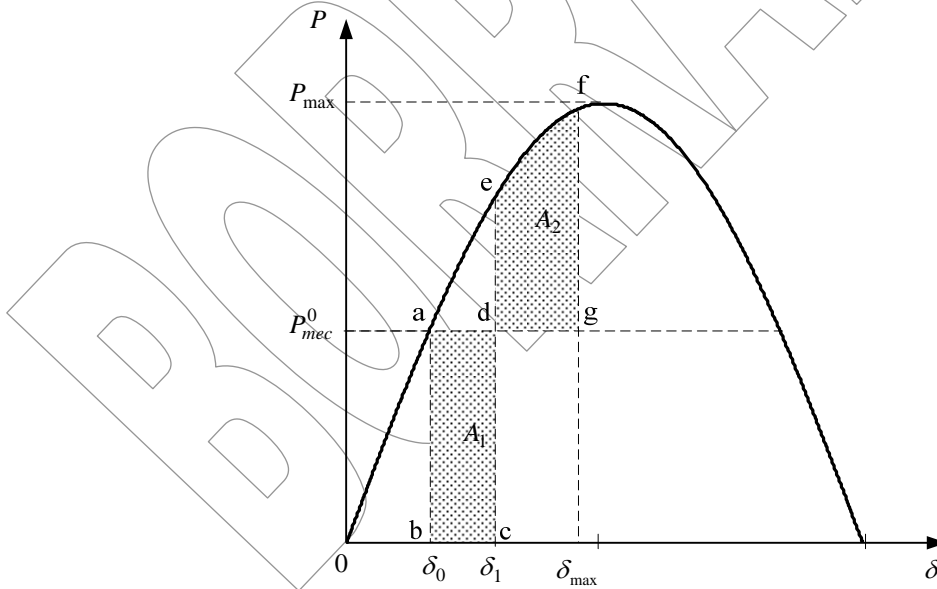
### 2.3.1.1. Falla Sin Transferencia de Potencia

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.



**Figura 8. Sistema de Potencia de una máquina contra un sistema de potencia infinito, con una falla sin transmisión de potencia**

Supóngase que inicialmente el sistema opera en forma estable entregando una potencia a la barra de potencia infinita,  $P_{elec}^0 = P_{mec}^0$ , lo cual queda definido por un ángulo de operación  $\delta_0$ . 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  $P_{elec}^1 = 0$ . Debido a que las resistencias son despreciadas, la potencia eléctrica es cero, y la curva correspondiente a la potencia ángulo es el eje horizontal.



**Figura 9. Diagrama de Potencia Angulo para una Falla por cortocircuito sin potencia transmitida**

La máquina inicialmente esta operando en una condición estable, donde hay un balance entre la potencia eléctrica y la potencia mecánica,  $P_{elec}^0 = P_{mec}^0$ , al ocurrir la falla, la potencia eléctrica transmitida es cero,  $P_{elec}^1 = 0$ , de tal modo que no hay torque que se oponga al torque mecánico en el eje de la máquina, de tal

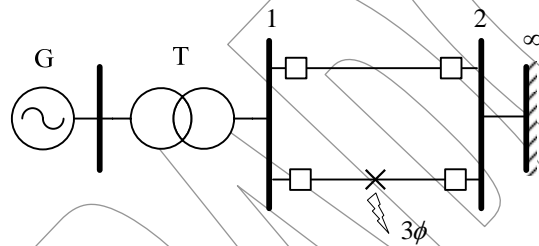
Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento.

modo que toda la potencia mecánica se convierte en potencia acelerante, de tal modo que la potencia de entrada total acelera la máquina aumentando su velocidad, almacenando energía cinética, e incrementando el ángulo,  $\delta$ . Cuando la falla es despejada, se asume que las dos líneas se encuentran intactas. La falla es despejada en  $\delta_1$ , lo cual devuelve la operación a la curva original de potencia-ángulo en el punto e. La potencia neta es ahora desacelerante, y la energía cinética previamente almacenada será reducida a cero en  $f$  cuando el área  $A_1$  y  $A_2$  sean iguales. Debido a que la potencia eléctrica se mantiene aun mayor a la mecánica, el rotor continuara desacelerando y con lo cual pasará por el punto e hasta el punto a. el ángulo del rotor entonces oscilará hacia delante y atrás de  $\delta_0$ , a su frecuencia natural. Debido al amortiguamiento inherente, las oscilaciones se disminuyen en amplitud, hasta retornar al ángulo de operación  $\delta_0$ .

El ángulo de despeje crítico  $\delta_c$ , se logra cuando cualquier incremento en  $\delta_1$  causa que el área  $A_2$ , representando la energía desacelerante, sea menor que el área que representa la energía acelerante.

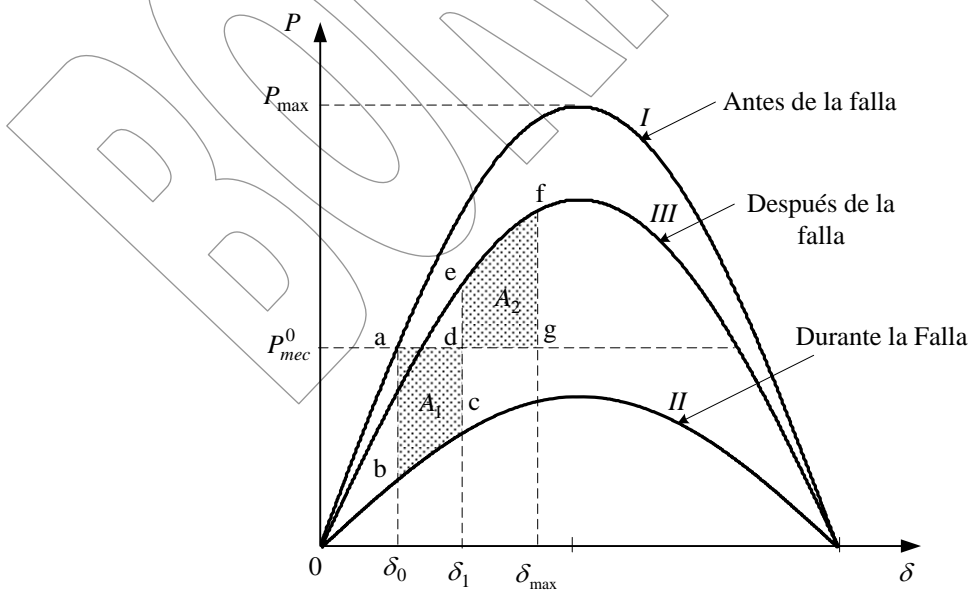
### 2.3.1.2. Falla con Potencia Transmitida

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.



**Figura 10. Sistema de Potencia de una máquina contra un sistema de potencia infinito, con una falla con transmisión de potencia**

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  $P_{elec}^0 = P_{mec}^0$ . La curva correspondiente a las condiciones previas a la falla es mostrado por la curva I.

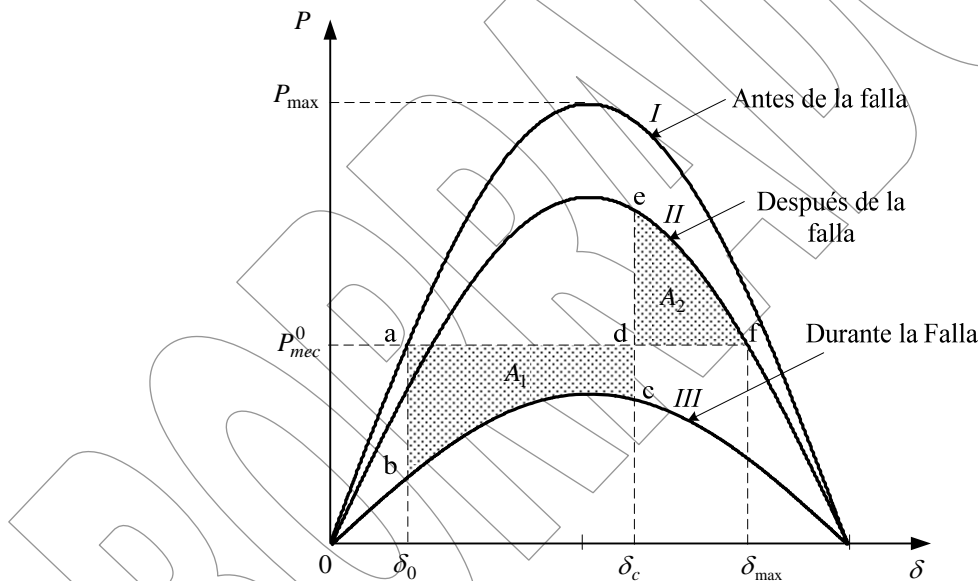


Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento.

**Figura 11. Diagrama de Potencia-Angulo para una falla en el sistema de transmisión con potencia transferida durante la falla**

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*. 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*. 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  $\delta$ , se incrementa. Asumiendo que la falla es despejada en  $\delta_1$  por el despeje de la línea fallada. 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. 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 máquina causara que esta oscilación se propague y el nuevo estado de operación sea alcanzado en la curva *III*.

El ángulo crítico de despeje, es alcanzado cuando cualquier incremento en el ángulo  $\delta_1$ , causa que el área  $A_2$ , que representa la energía desacelerante, sea menor al área representada por la energía acelerante. Esto ocurre cuando  $\delta_{max}$ , o el punto *f*, es la intersección de la curva *III* con la potencia mecánica.



**Figura 12. Diagrama de Potencia-Angulo para una falla en el sistema de transmisión con potencia transferida durante la falla, mostrando el ángulo crítico**

Solo para ser empleado con objetivo de evaluación, o académicos. Prohibido la reproducción total o parcial de este documento.