



## Sistemas de Potencia II

---

# Capítulo 1 Definiciones y Clasificación de la Estabilidad

Prof. Alberto Sergio Tejada Rojas



# Sistemas de Potencia II

## Estabilidad

### Introducción



# Introducción



- *La estabilidad es un problema de equilibrios.*





# Introducción



- *La estabilidad de un sistema de potencia puede ser ampliamente definida como:*

*aquella propiedad de un sistema de potencia que permite a este mantenerse en un estado de operación equilibrado bajo condiciones normales y recuperar un estado aceptable de equilibrio luego de ser sujeto a una perturbación.*



# Introducción



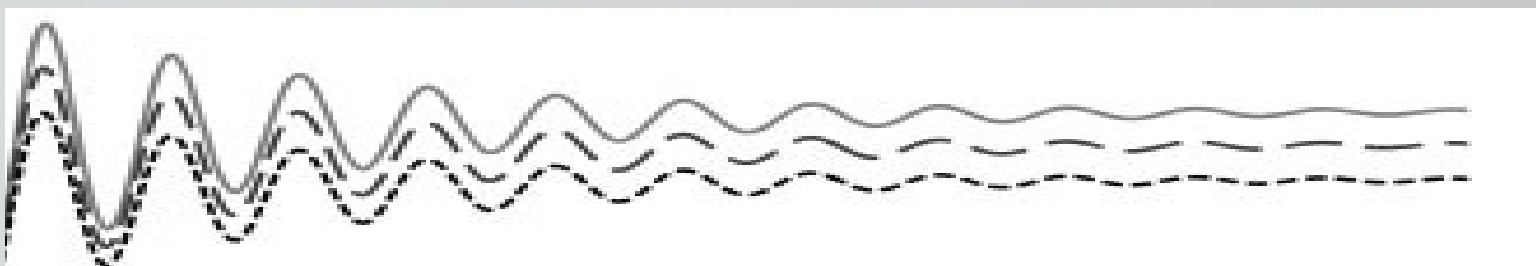
- La *inestabilidad* en un sistema de potencia puede ser *manifestada en muchas diferentes formas* dependiendo de la configuración y modo de operación.
- Tradicionalmente el problema de estabilidad ha sido  
*el mantenimiento de la operación sincronizada.*



# Sistemas de Potencia II



## Estabilidad



## Definiciones Básicas



# Estabilidad: Definición

- Si la respuesta de un sistema de potencia durante un periodo transitorio es oscilatoria es amortiguado y el es fija luego de una perturbación en un tiempo finito un nuevo estado de operación de régimen permanente, *el sistema es estable*.
- *Si el sistema no es estable, este es considerado inestable.*

***Power System Control and Stability, Anderson and Fouad, 1977***





# Estabilidad: Definición

- La *estabilidad de un sistema de potencia* puede ser ampliamente definida como aquella propiedad de un sistema de potencia que permite a este mantenerse en un estado de

equilibrio <sup>ec</sup> luego de ser <sup>operación equilibrado</sup> sujeto a una <sup>condiciones</sup> perturbación. <sup>normales y recuperar</sup>  
un estado aceptable de  
*Power System Stability and Control.*

**Prabha**

**Kundur, 2002**





# Estabilidad: Definición

- La *inestabilidad* en un sistema de potencia puede ser manifestada en muchas diferentes formas dependiendo de la configuración y modo de operación.
- Tradicionalmente el problema de estabilidad ha sido el mantenimiento de la operación sincronizada.
- Todas las máquinas sincrónicas mantenga el sincronismo, o mas coloquialmente “*en paso*” (*in step*).



# Estabilidad: Definición



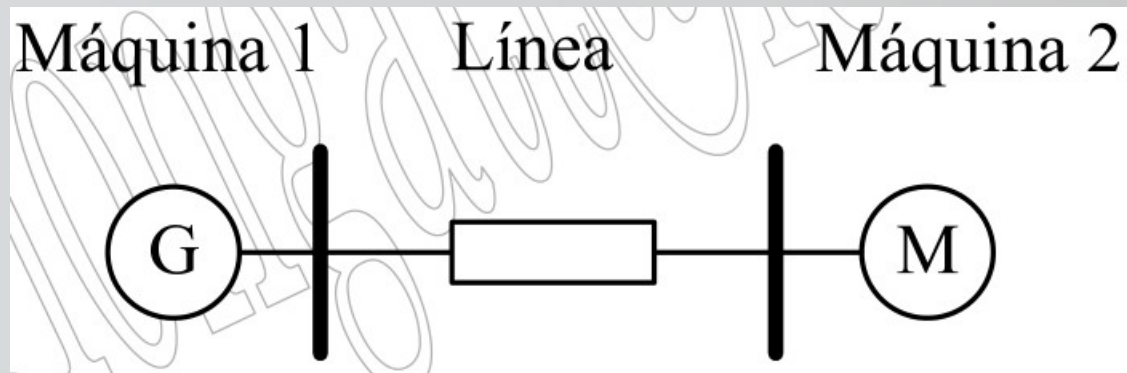
- La inestabilidad también puede ser encontrada sin la pérdida de sincronismo.

Por ejemplo, un sistema consistente de un motor de inducción a través de una línea de transmisión puede transformarse inestable por el *colapso del voltaje* de la carga.



# Estabilidad: Definición

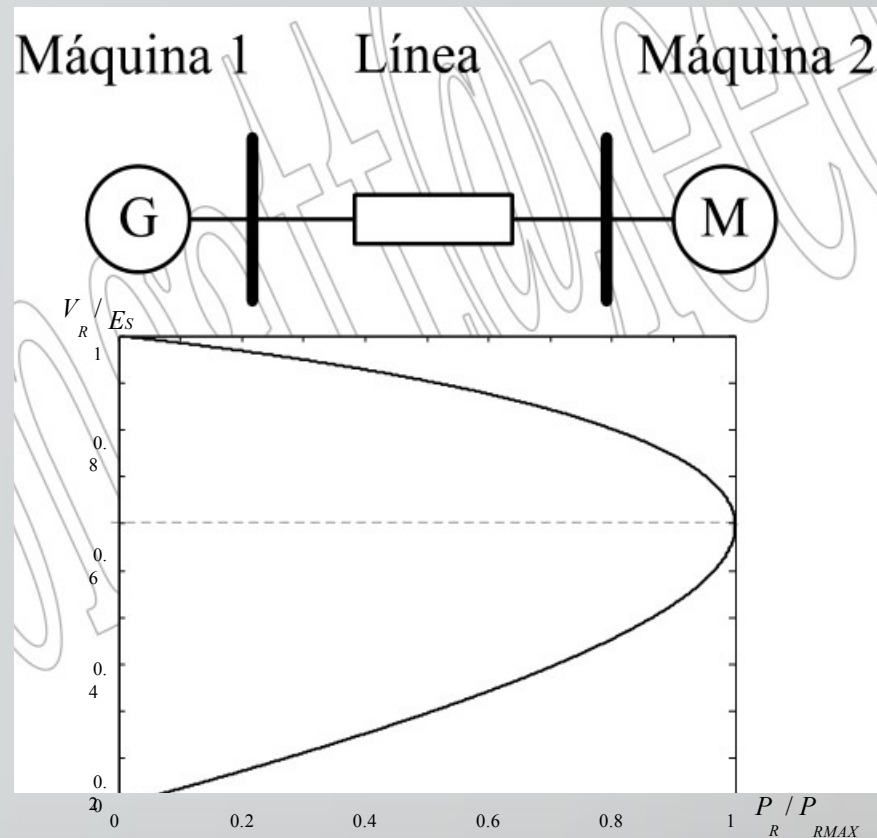
- *Por ejemplo un sistema consistente de un generador sincrónico alimentando una carga de motor de inducción a través de una línea de transmisión puede transformarse inestable por el colapso del voltaje de la carga.*





# Estabilidad: Definición

- Mantener el sincronismo no es una cuestión en éste caso; en cambio, la preocupación es *la estabilidad y el control de voltaje*.





# Estabilidad: Definición

---



- *Un cambio repentino o una secuencia de cambios en uno o mas parámetros del sistema o en una o mas cantidades operativas.*

***IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, July 1982***



# Perturbación: Definición

- En la evaluación de la estabilidad el interés es el comportamiento del sistema cuando es sujeto a una *perturbación* (*disturbance*) transitoria.
- La perturbación *puede ser pequeña o grande*.
- Por la magnitud de la perturbación:
  - *Pequeñas*: pequeñas variaciones en la carga y generación
  - *Grandes*: Cortocircuitos , rechazos de carga o





## Perturbación: Definición

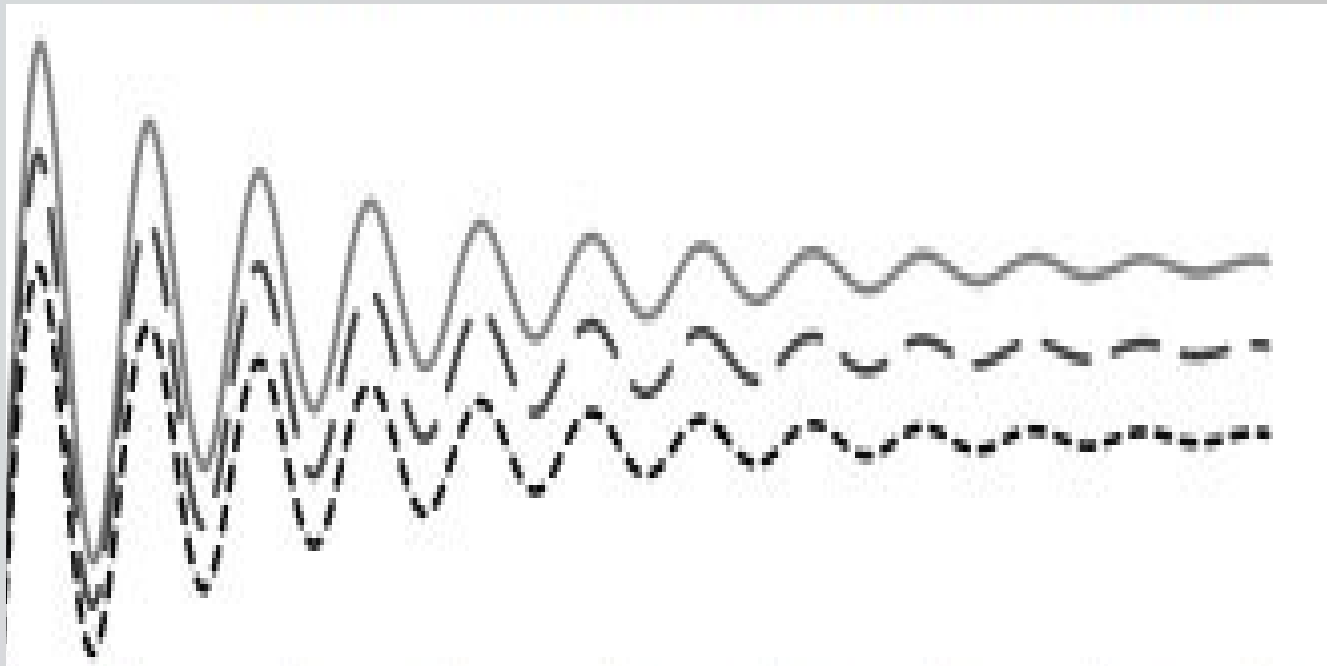
- Las *perturbaciones pequeñas* en la forma de cambios de carga tienen lugar continuamente, y el sistema se ajusta por si mismo a las condiciones cambiantes.
- El sistema debe ser capaz de operar satisfactoriamente *bajo esas condiciones y satisfacer satisfactoriamente el máximo valor de la carga*.
- Este además debe ser capaz de sobrevivir a numerosas perturbaciones de una naturaleza severa, tales como cortocircuitos en una línea de transmisión, pérdida de un generador de gran tamaño o carga, o la pérdida de una línea de interconexión entre dos subestaciones.





## Perturbación: Definición

- *La respuesta del sistema a una perturbación involucra mucho del equipamiento.*

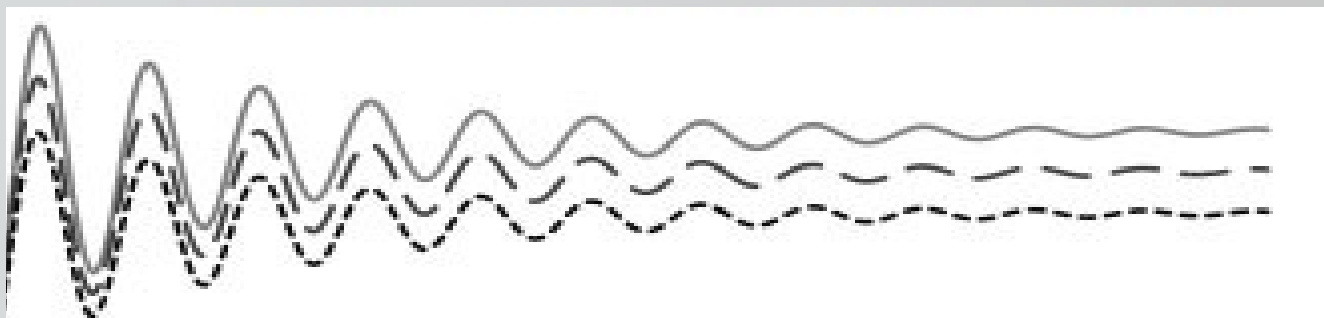




# Sistemas de Potencia II



## Estabilidad



## Clasificación



# Clasificación de Estabilidad



- La estabilidad de un sistema de potencia es un *problema sencillo*; sin embargo, *es impracticable estudiar este como tal*.
- La *inestabilidad de un sistema de potencia puede tomar diferentes formas y puede ser influenciado por un amplio rango de factores*.



# Clasificación de Estabilidad



- El análisis del problema de estabilidad, identificación de factores que contribuyen a la inestabilidad y la formación de métodos para mejorar la operación estable son grandemente facilitadas por la clasificación de la estabilidad en apropiadas categorías.



# Clasificación de Estabilidad

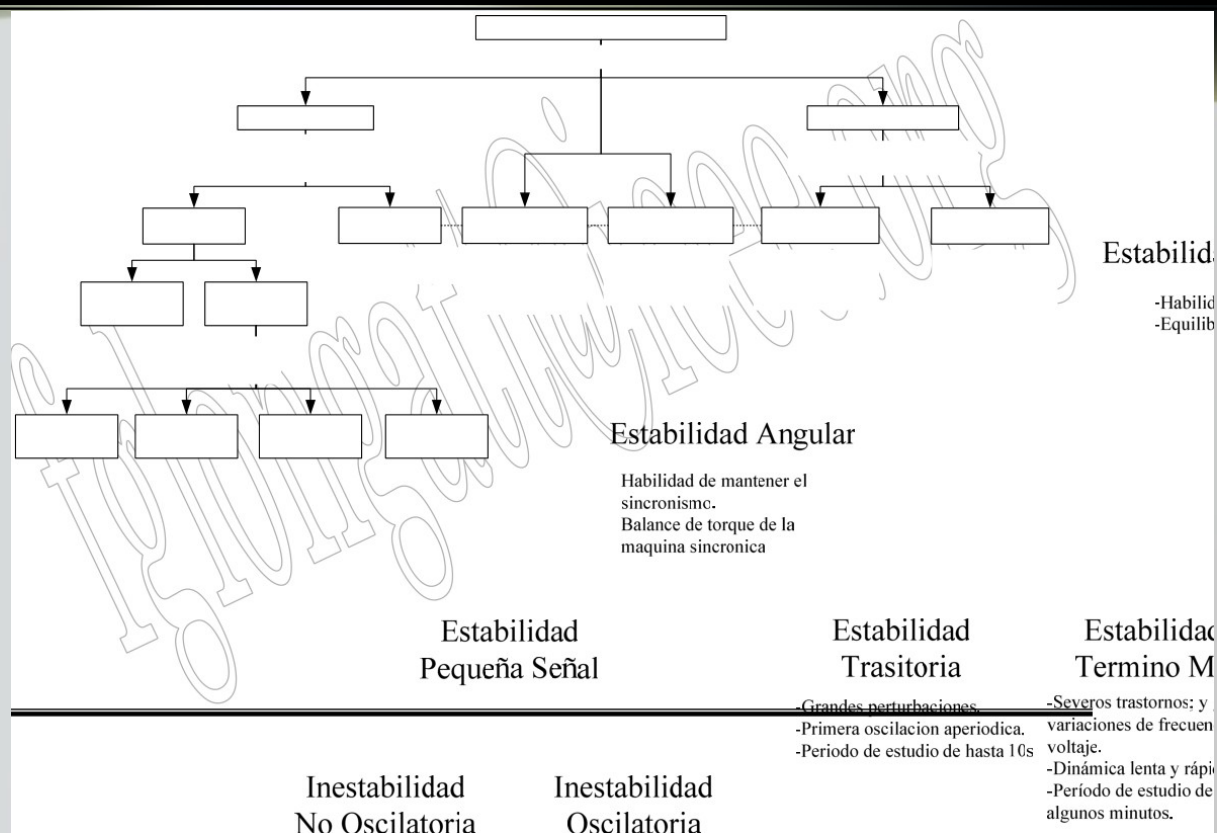


La base son las siguientes consideraciones:

- *Naturaleza física* de la inestabilidad resultante.
- El *tamaño de la perturbación* considerada.
- Los *dispositivos, procesos, y el espacio de tiempo* que debe ser tomado en consideración para determinar la estabilidad.
- El más apropiado *método de cálculo* y predicción de estabilidad.



# Clasificación de Estabilidad

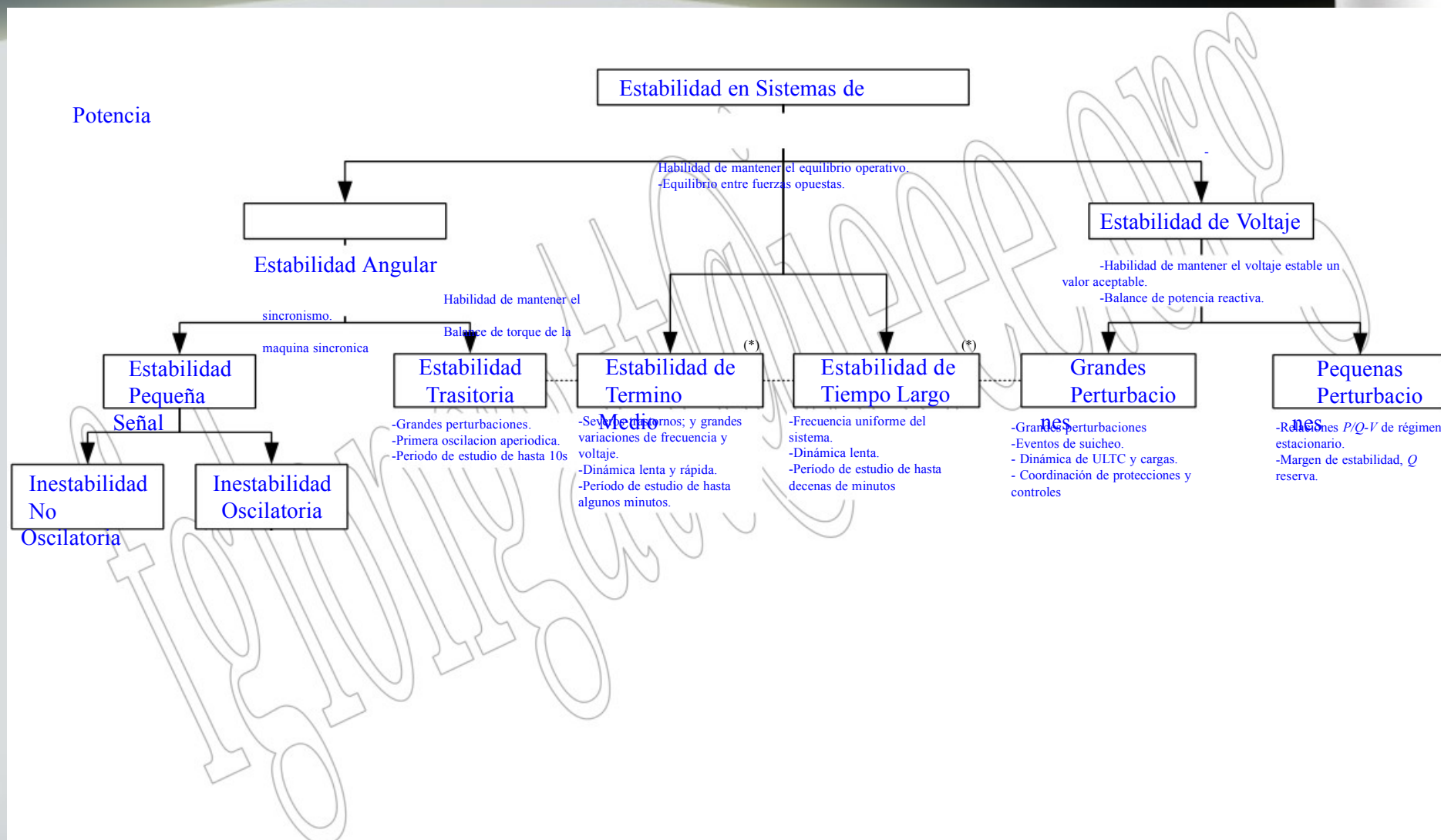


La Figura se da una grafica completa del problema de estabilidad de sistema de potencia, identificando sus clases y subclases en términos de las categorías descritas en las secciones previas.





# Clasificación de Estabilidad





# Clasificación de Estabilidad

- Como una necesidad practica, *la clasificación ha sido basada en un número de consideraciones diversas, haciendo esto difícil para seleccionar claramente la distinción entre categorías* y proveer definiciones rigurosas y ahora convenientes para uso práctico.
- Por ejemplo, aquí hay solapamiento entre la estabilidad de medio-termino y de largo-termino y estabilidad de voltaje.



## 4. Clasificación de Estabilidad

- Mientras la clasificación de la estabilidad de sistemas de potencia es un efectivo y conveniente medio para lidiar con la complejidad del problema, *la estabilidad completa del sistema debe siempre ser mantenida en mente.*
- *Las soluciones a los problemas de estabilidad de una categoría no pueden ser a expensa de otros.*



## 4. Clasificación de Estabilidad

---



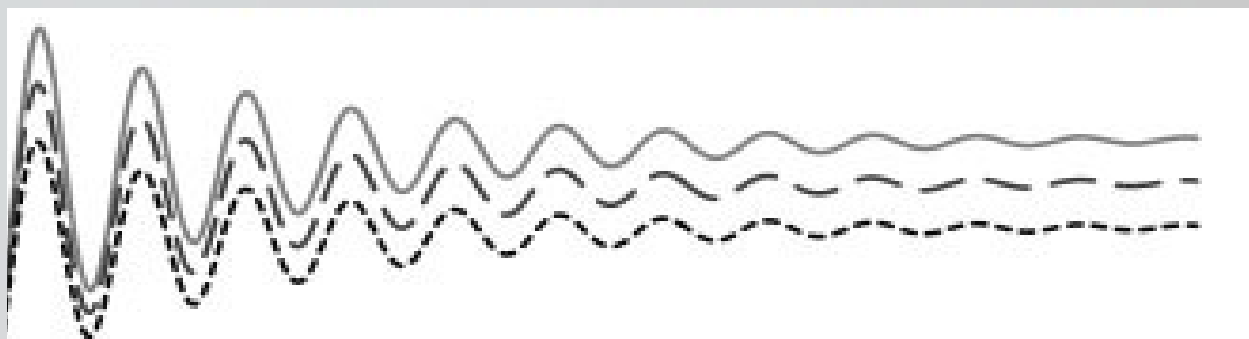
- Esto es esencial para ver todos los aspectos del fenómeno de estabilidad y a cada aspecto desde más de un punto de vista.
- Esto requiere que el desarrollo y bien pensado uso de *diferentes tipos de herramientas analíticas*.



# Sistemas de Potencia II



## Estabilidad

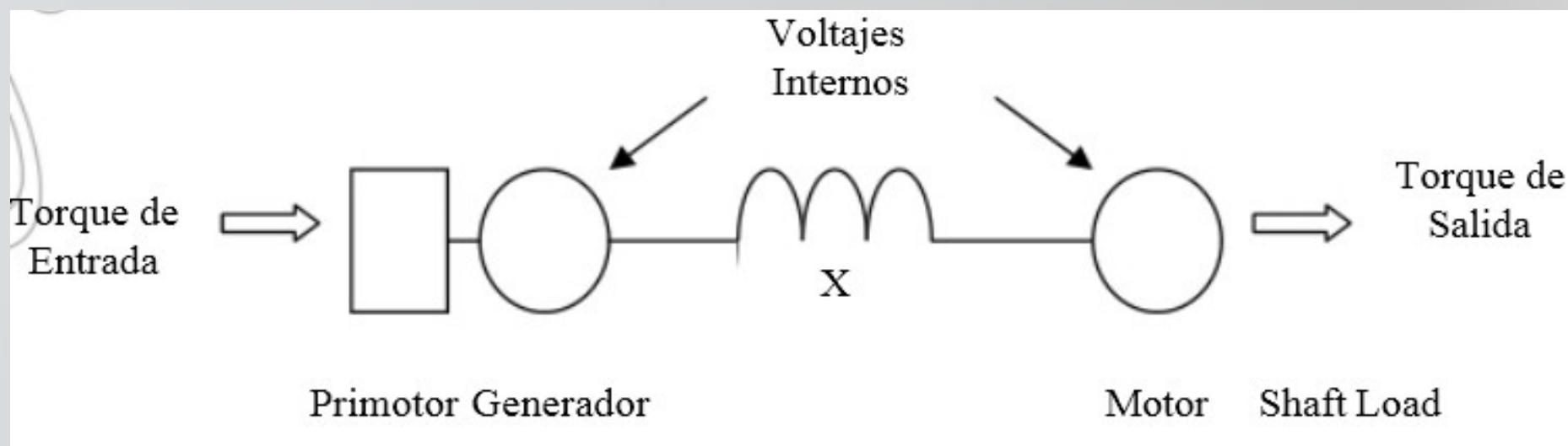


## Aspectos Básicos de Maquinas



# Factores Esenciales en el Problema

- Los factores esenciales en el problema de estabilidad son ilustrados en la conexión de un sistema de dos máquinas

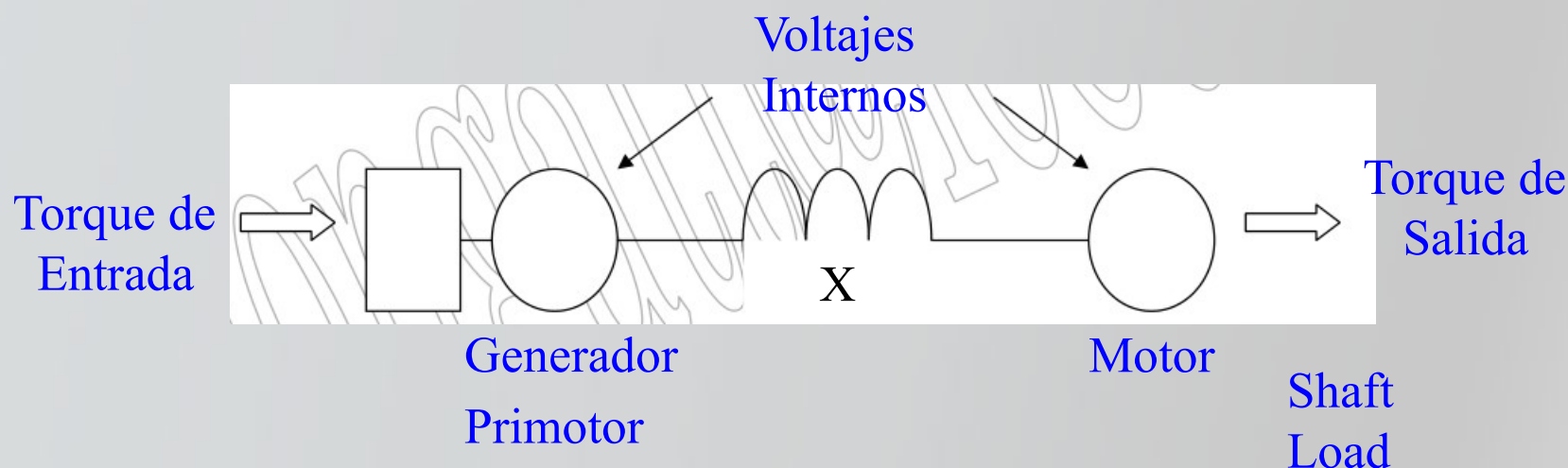






# Factores Esenciales en el Problema

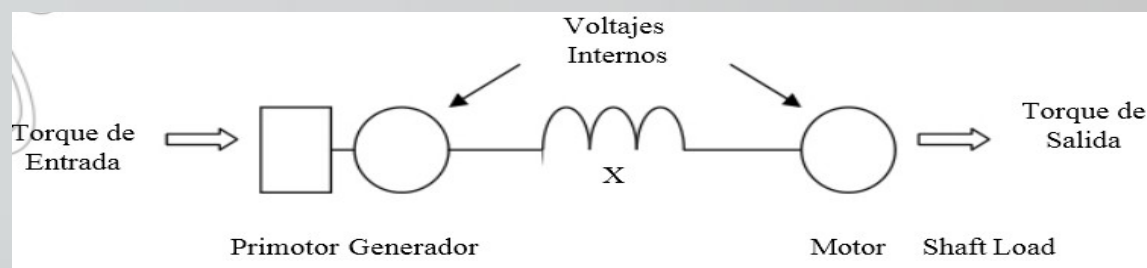
- Son siete los factores que afectan la estabilidad, pudiendo ser agrupados estos en tipos eléctricos y mecánicos.





# Factores Esenciales en el Problema

- Los factores mecánicos son:
  - El torque de entrada del primotor.
  - Inercia de primotor y generador.
  - Inercia del motor y la carga mecánica.
  - Torque de salida al eje de carga (*Shaft Load*).
- Los factores eléctricos son esencialmente:
  - El voltaje interno del generador.
  - La reactancia del sistema incluyendo:
    - Generador.
    - Línea.
    - Motor.
  - Voltaje interno del motor sincrónico.





# Característica de Maquina Sincrónica

- Una máquina sincrónica posee dos elementos esenciales: la *armadura* (*armature*) el *campo* (*field*). y
- El *devanado de campo* es excitado por corriente *continua*.
- Cuando el rotor es impulsado (*driven*) por una promotor (*prime-mover*) el campo magnético rotatorio del devanado de campo *induce* voltajes alternos en los devanados trifásicos del estator.
- La frecuencia de las cantidades eléctricas del estator es entonces sincronizado con la velocidad mecánica del rotor: de aquí la designación de “*maquina sincrónica*”.



# Característica de Maquina Sincrónica



- Cuando dos o mas máquinas sincrónicas están interconectadas, los voltajes y corrientes del estator de todas las maquinas *deben poseer la misma frecuencia y la velocidad del rotor de cada maquina esta sincronizada con esta frecuencia.*
- Entonces, *los rotores de todas las maquinas interconectadas deben estar en sincronismo.*
- El arreglo físico (distribución espacial) del devanado de armadura en el estator es tal que las corrientes alternantes, variantes en el tiempo, fluyendo en el devanado trifásico produce un campo magnético rotativo que, bajo operación de régimen permanente gira a la misma velocidad que el rotor



# Característica de Maquina Sincrónica

- El campo del estator y el rotor reacciona el uno con el otro y un torque electromagnético resulta de la tendencia de los dos campos de alinearse entre ellos.
- En un generador, este torque electromagnético opuesto a la rotación del rotor, de modo que el torque electromecánico debe ser aplicado por el promotor para mantener la rotación.
- El *torque eléctrico (o potencia) de salida del generador es cambiado solo por el cambio del torque mecánico de entrada por el promotor.*





# Característica de Maquina Sincrónica

- El efecto de incrementar el torque mecánico de entrada es para avanzar el rotor a una nueva posición relativa a campo magnético resolverte del campo y el estator.
- De modo inverso, una reducción del torque mecánico o potencia de entrada, retardará la posición del rotor. Bajo condiciones de operación de regimen permanente el campo del rotor y el campo giratorio del estator poseen la misma velocidad.
- Sin embargo, existe una separación angular entre ellos dependiendo del torque eléctrico (o potencia) de salida del generador

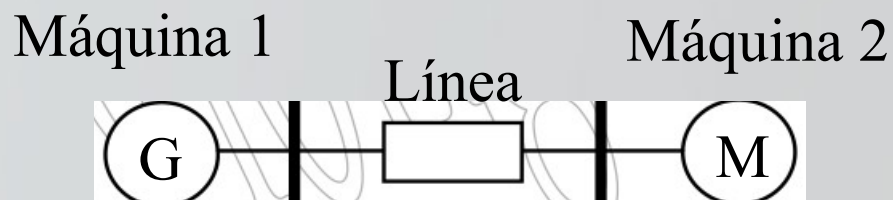




# Relación de Potencia-Angulo



- Una característica muy importante que posee una conexión con la estabilidad de sistemas de potencia es la relación entre el *intercambio de potencia y posiciones angulares de los rotores de las máquinas sincrónicas*.
- Esta relación es altamente no lineal:

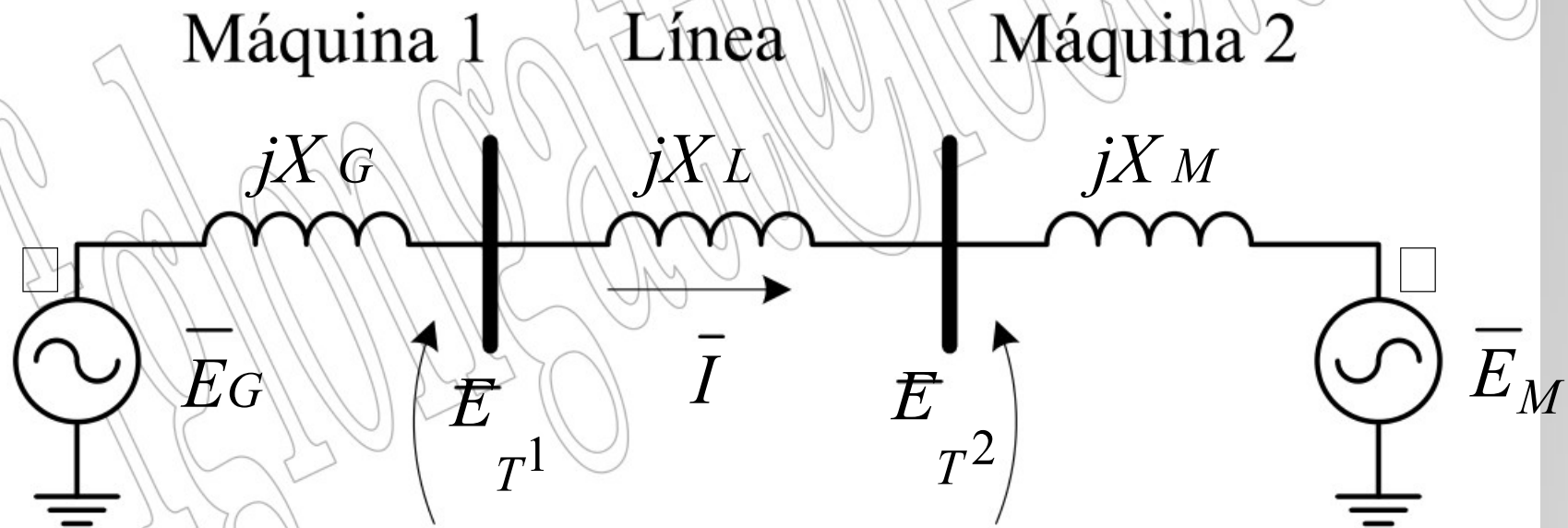


(a) Diagrama Unifilar



# Relación de Potencia-Angulo

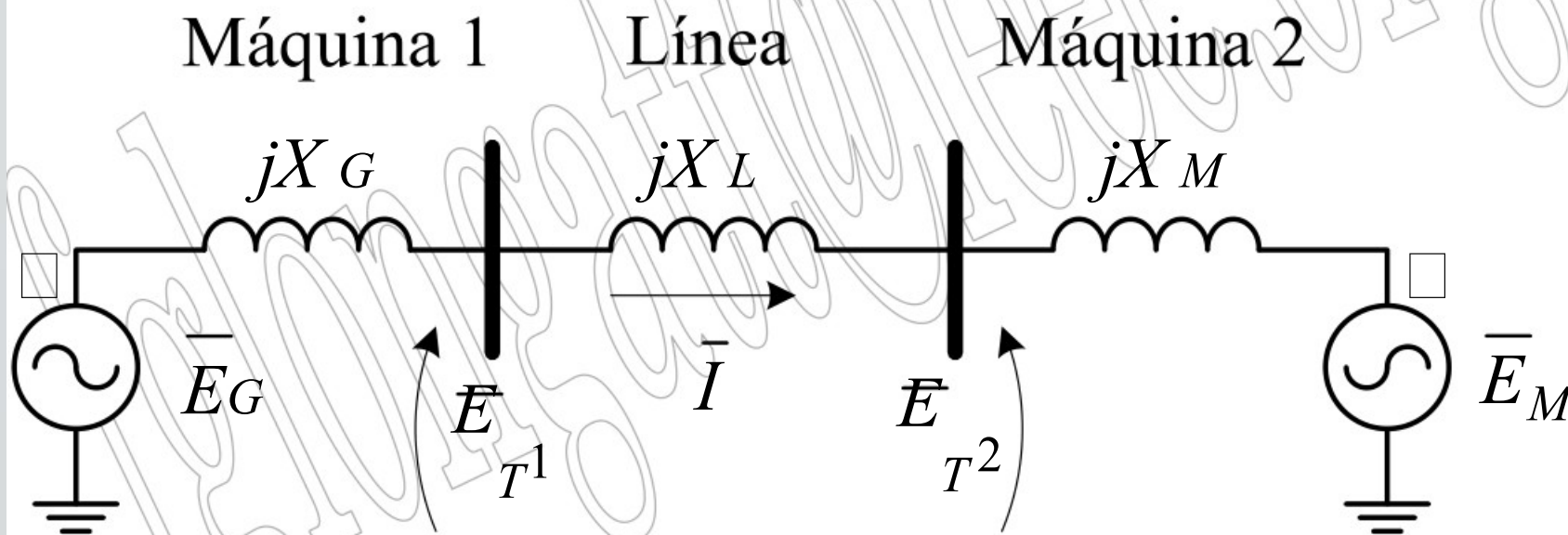
- Este consiste de dos máquinas conectadas por una línea de transmisión que posee una reactancia inductiva  $X_L$  con resistencia y capacitancia despreciable.





# Relación de Potencia-Angulo

- Asúmase que la máquina 1 representa un generador alimentando potencia a un motor sincrónico representado por la máquina 2





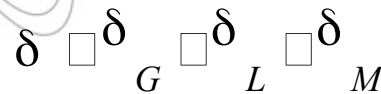
# Relación de Potencia-Angulo

- La potencia transferida desde el generador al motor es una función de la separación angular ( $\delta$ ) entre los rotores de las dos máquinas.
- Esta separación angular es debido a tres componentes: ángulo interno del generador  $\delta_G$  (ángulo por el cual el rotor del generador adelanta el campo giratorio del estator); la diferencia angular entre los voltajes terminales del generador y el motor (ángulo por el cual el campo del estator del generador adelanta al del motor); y el ángulo interno del motor (ángulo por el cual el rotor atrasa el campo magnético giratorio del estator).





- Diagrama fasorial identificando las relaciones entre los voltajes del motor y el generador.





# Relación de Potencia-Angulo

- La potencia transferida desde el generador al motor viene dado por:

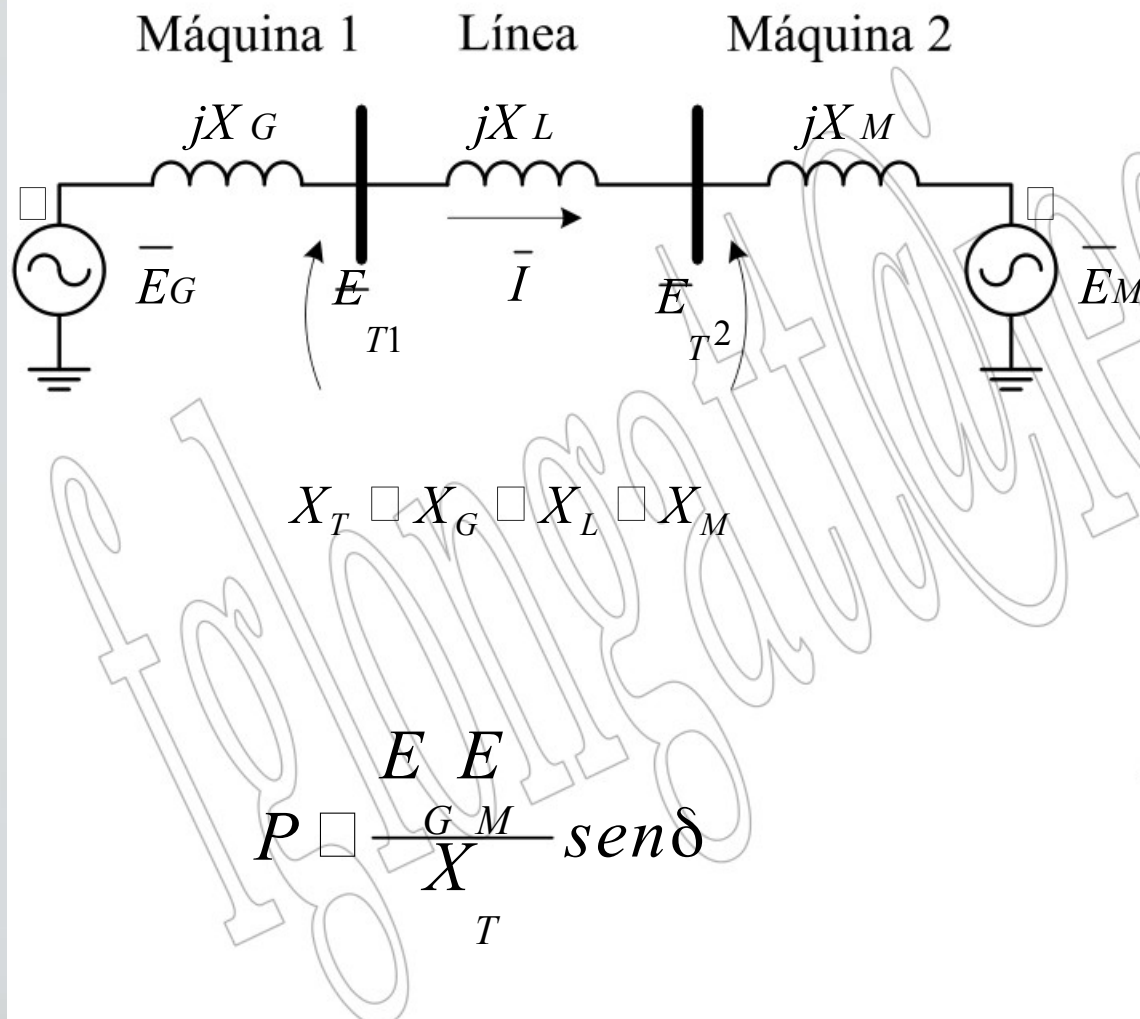
$$P \approx \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta$$

donde:

$$X_T \approx X_G \approx X_L \approx X_M$$

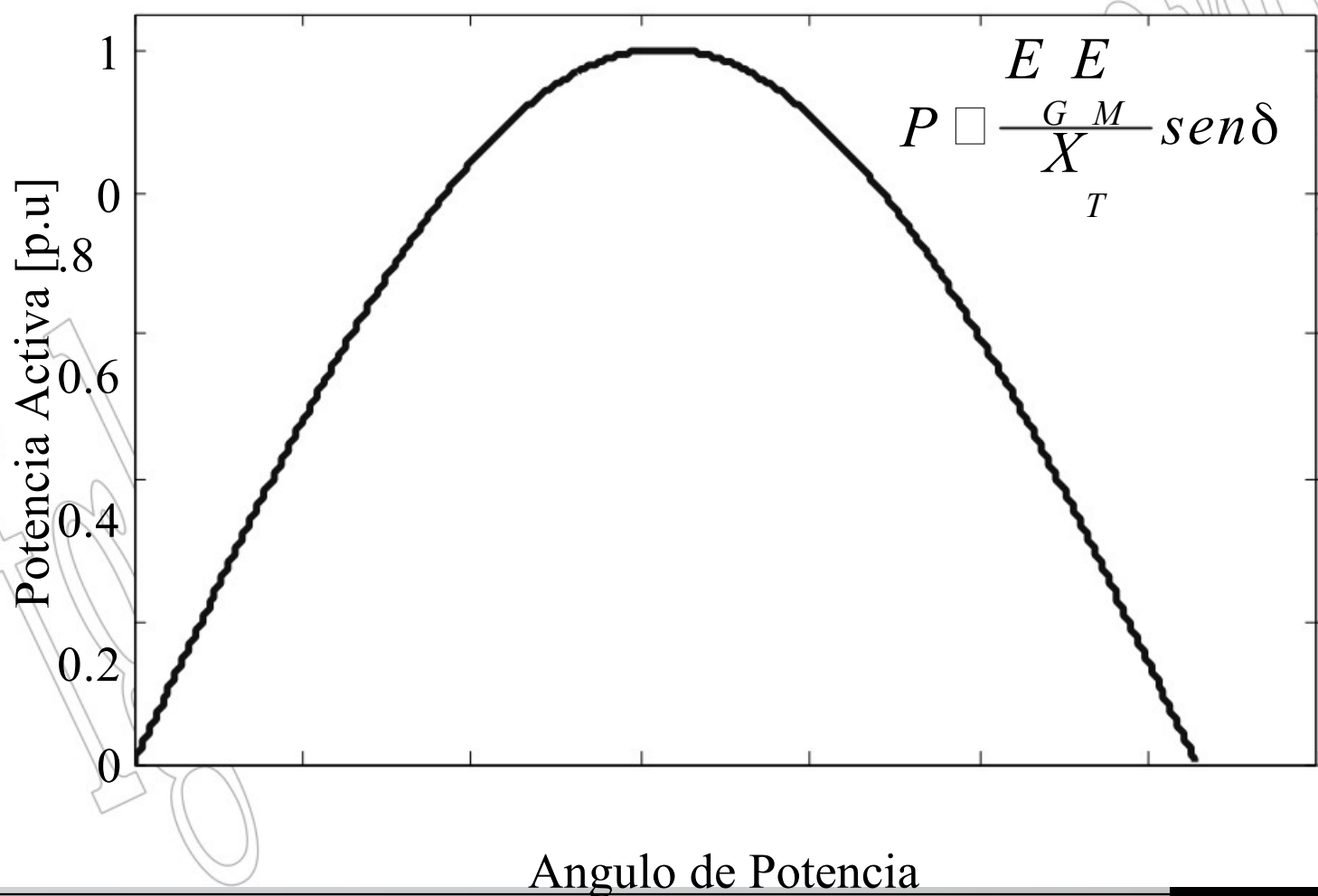


# Relación de Potencia-Angulo





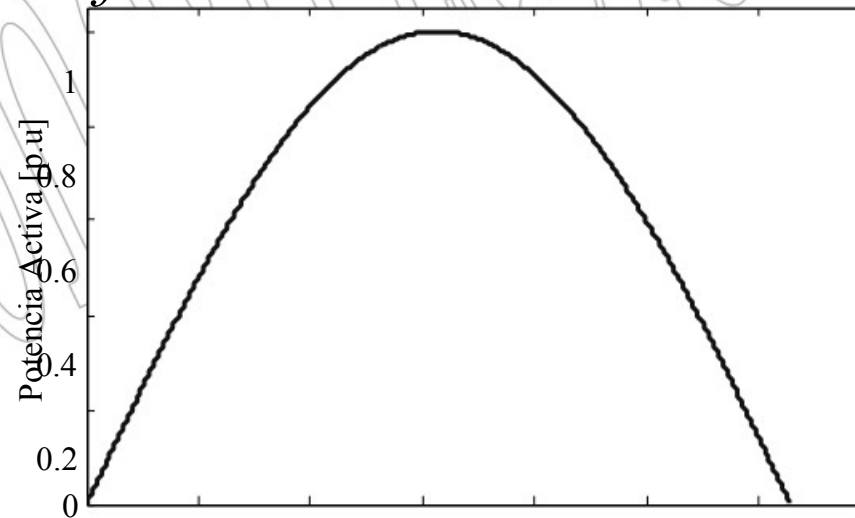
# Diagrama Potencia-Angulo





# Diagrama Potencia-Angulo

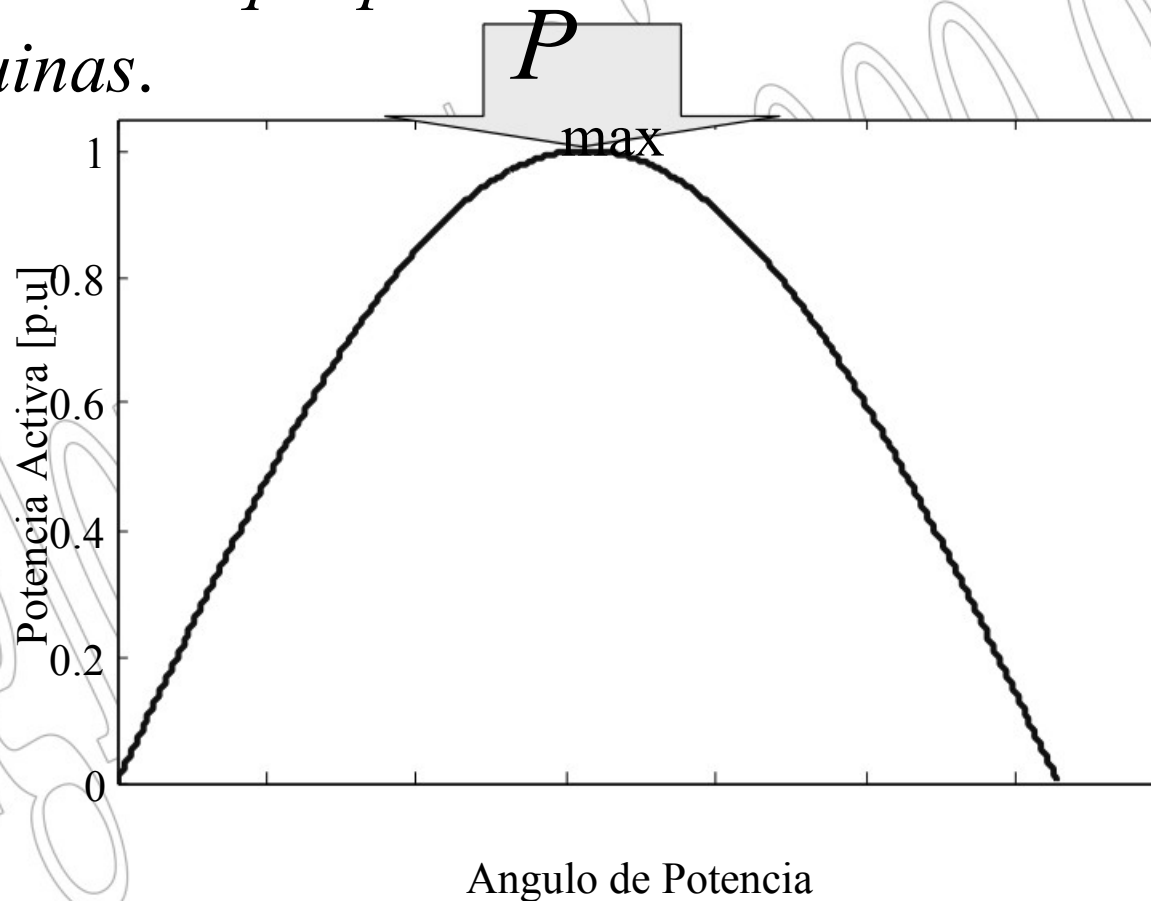
- Como el *ángulo de potencia* es incrementado, la *potencia transferida* se incrementa hasta llegar a un máximo.
- Luego de cierto ángulo, normalmente  $90^\circ$ , otro *aumento del ángulo* resulta en una *disminución de la potencia transferida*.





# Diagrama Potencia-Angulo

- Este es entonces *una máxima potencia de régimen permanente que puede ser transmitido entre las dos máquinas.*



$$P_{\max} = \frac{E_G E_M}{X_T}$$





# Diagrama Potencia-Angulo

- La magnitud de la máxima potencia es directamente proporcional a los voltajes internos de las máquinas e inversamente proporcional a la reactancia entre los voltajes, la cual incluye la reactancia de la línea de transmisión que conecta las máquinas y las reactancias de las máquinas.

$$P_{\max} \propto \frac{E_G E_M}{X_T}$$



# Sistemas de Potencia II

Estabilidad

Clasificación





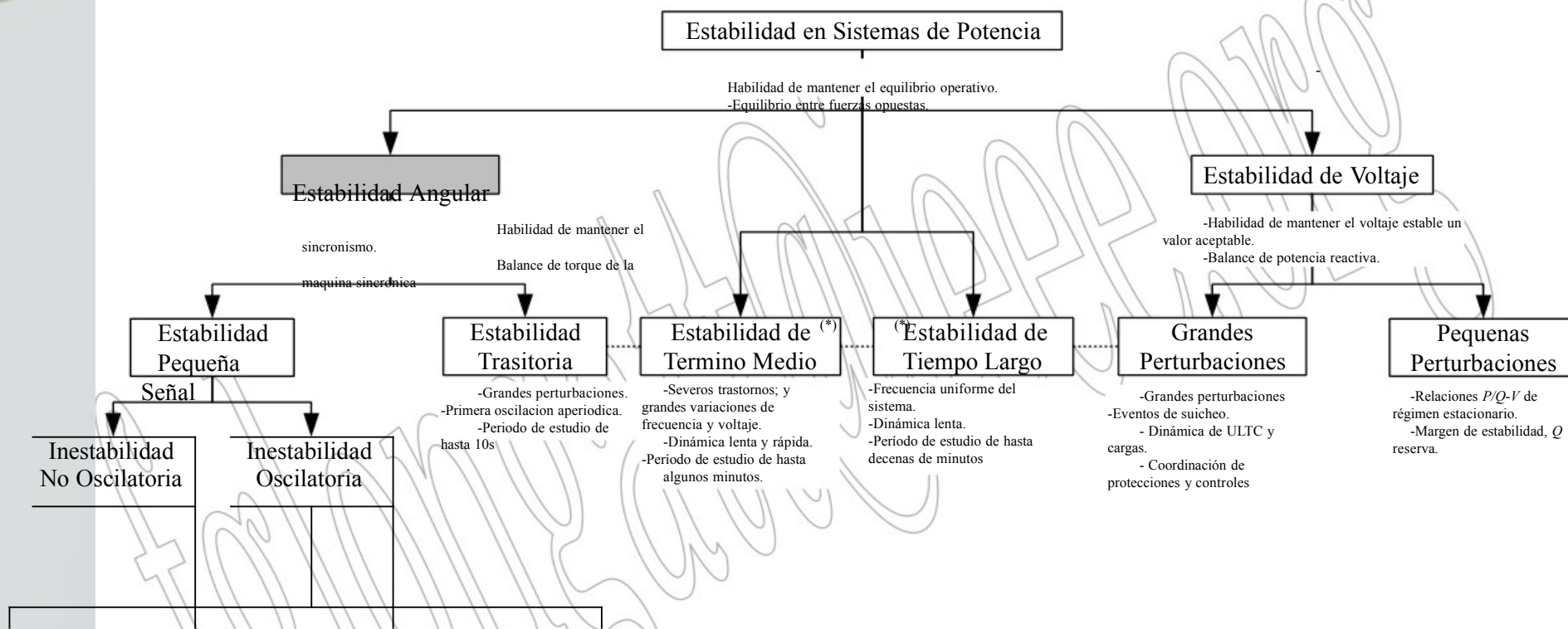
# Sistemas de Potencia II

Estabilidad

ESTABILIDAD  
ANGULAR



# Clasificación de Estabilidad





# Clasificación de Estabilidad

## Estabilidad en Sistemas de Potencia

Estabilidad Angular

Estabilidad de Voltaje



- Habilidad de mantener
- Equilibrio entre fuerzas



# Estabilidad de Angulo

- Es la habilidad de las maquinas sincrónicas interconectadas en un sistema de potencia de *mantener el sincronismo*
  - El problema de estabilidad envuelve el estudio de las *oscilaciones electromecánicas* inherentes en los sistemas de potencia
- Un *factor fundamental en este problema es la manera en que las salidas de las maquinas sincrónicas varían con sus rotores oscilando.*





# Estabilidad de Angulo

- La estabilidad es una *condición de equilibrio entre fuerzas opuestas*.
- El mecanismo por el cual maquinas sincrónicas interconectadas mantienen el sincronismo las unas con otras es a través de *fuerzas restauradoras*, las cuales actúan siempre que estas son fuerzas tendentes a *acelerar o desacelerar una o mas maquinas con respecto a otras maquinas*.
- Bajo condiciones de *régimen permanente*, existe *equilibrio* ente el torque mecánico de entrada y el torque eléctrico de salida de cada máquina, y la *velocidad se mantiene constante*.





# Estabilidad de Angulo

- Si el *sistema es perturbado* este equilibrio es trastornado, resultando en la *aceleración o desaceleración* de los rotores de las maquinas de acuerdo con las leyes de movimiento de un cuerpo rotante.
- Si un generador temporalmente gira mas rápido que otro, la posición angular de ese roto relativo a aquella de las maquinas mas lentas avanzará.
- La *diferencia angular resultante transfiere parte de la carga* de la maquina mas lenta a la maquinas mas rápida, dependiendo de las relaciones de potencia-ángulo.



# Estabilidad de Angulo

- Las relaciones de *potencia-ángulo*, como se ha discutido, son altamente *no lineales*.
- Mas allá de ciertos limites, un incremento en la separación angular es acompañado de un decremento en la transferencia de potencia; esto incrementa la separación angular mas y encamina hacia la *inestabilidad*.
- Para una situación dada, *la estabilidad del sistema depende de los ángulos de los dispositivos en los que se encuentren los dispositivos de restablecimiento.*



# Estabilidad de Angulo

- Cuando una maquina sincrónica pierde el sincronismo o “*sale fuera de paso*” (*falls out the step*) con el resto del sistema, su rotor gira a una velocidad mas alta o baja que la requerida para generar voltaje a la frecuencia del sistema.
- El deslizamiento (*slip*) entre campo rotatorio estatorico (correspondiente a frecuencia del sistema) y el campo del rotor resulta en *grandes fluctuaciones de la potencia de salida de la maquina*, esto causa que el sistema de protección aislé a la maquina *inestable del sistema*.





# Estabilidad de Angulo

- El cambio en el torque eléctrico de una maquina sincrónica luego de una perturbación puede ser resuelto en dos componentes:

$$\Delta T_e \approx T_s \Delta \delta + T_D \Delta \omega$$

donde:

$T_s \Delta \delta$  es la componente de cambio de torque en fase con la perturbación del ángulo rotorico  $\Delta \delta$  y es referida la componente de *torque sincronizante*,  $T_s$  es el coeficiente del torque sincronizante.

$T_D \Delta \omega$  es la componente del torque en fase con la desviación de velocidad  $\Delta \omega$  y es referido como la componente de *torque de amortiguamiento*;  $T_D$  es el coeficiente de torque de amortiguamiento.



# Estabilidad de Angulo

- La estabilidad de un sistema depende en la *existencia de ambas componentes de torque* para cada una de las maquinas sincrónicas.
- La carencia de suficiente *torque sincronizante* resulta en la inestabilidad a través de un *flujo aperiódico* en el ángulo del rotor.
- La carencia de suficiente *torque de amortiguamiento* resulta en una *inestabilidad oscilatoria*.





# Clasificación de la Estabilidad Angular

## Estabilidad Angular

Habilidad de mantener el  
sincronismo.

Balance de torque de la  
maquina sincronica

Estabilidad  
Pequeña Señal

Estabilidad  
Trasitoria

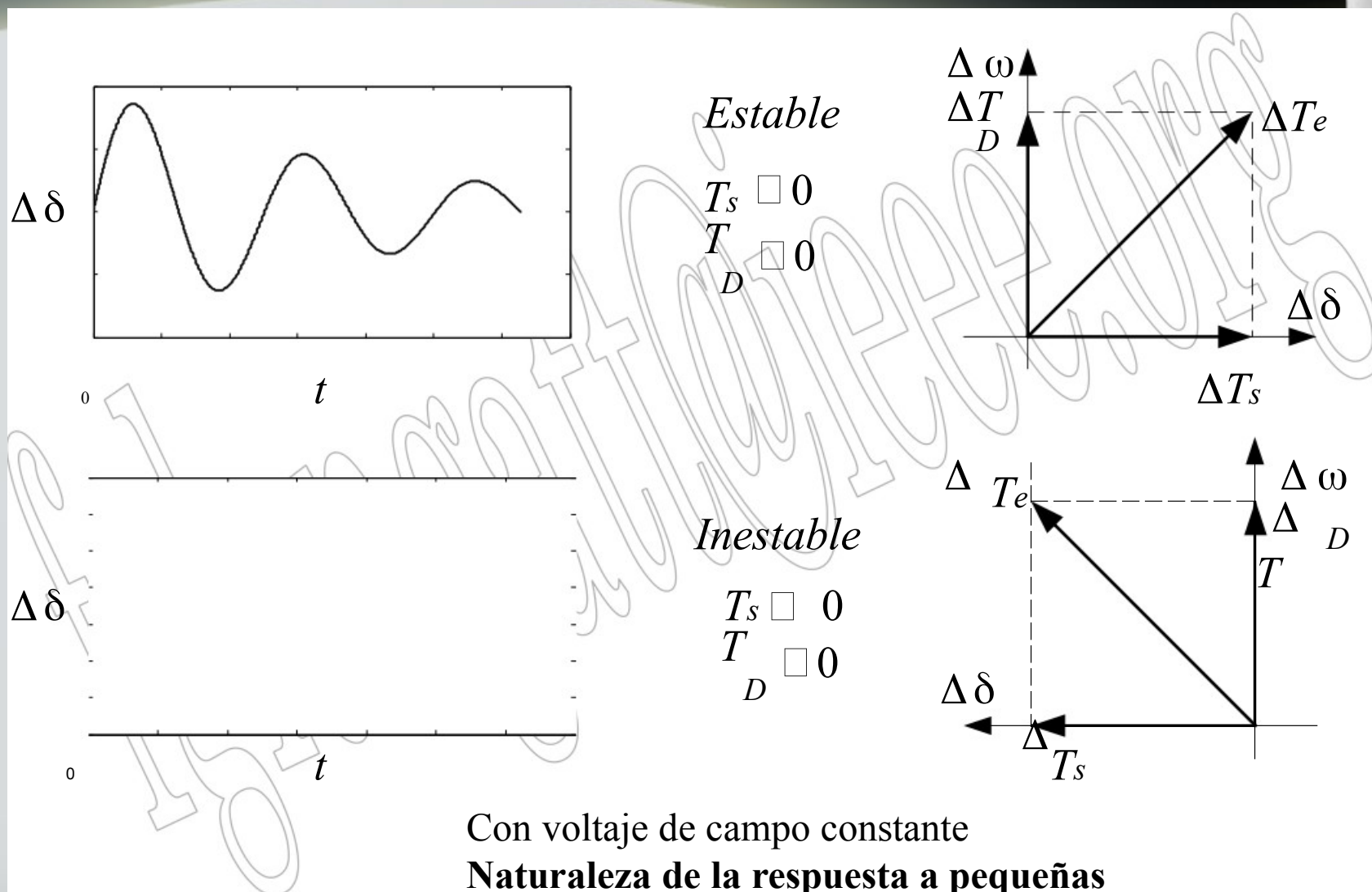


# Estabilidad de Pequeña Señal

- Es la habilidad del sistema de mantener el sincronismo bajo pequeñas perturbaciones
  - La inestabilidad que puede resultar en de dos de las siguientes formas:
    - (i) un continuo aumento del ángulo rotorico debido a la carencia de suficiente *torque sincronizante*
    - (ii) oscilaciones del rotor debido a incremento en la amplitud debido a la carencia de suficiente *torque de amortiguamiento*.
- Esta depende de un número de factores incluyendo la *condición operativa inicial, la fortaleza del sistema de transmisión, y el tipo de controles de excitación del generador empleados*

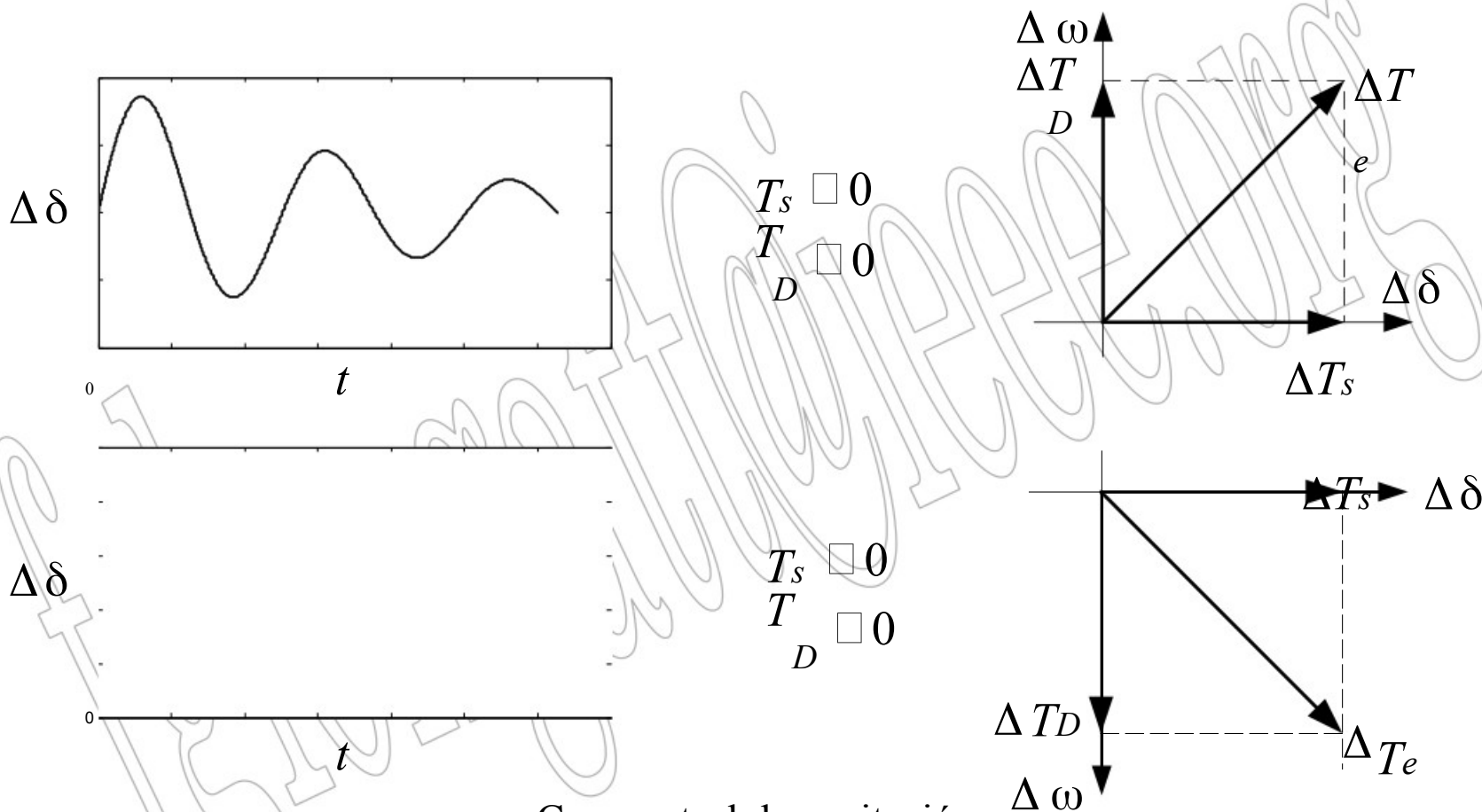


# Estabilidad de Pequeña Señal





# Estabilidad de Pequeña Señal

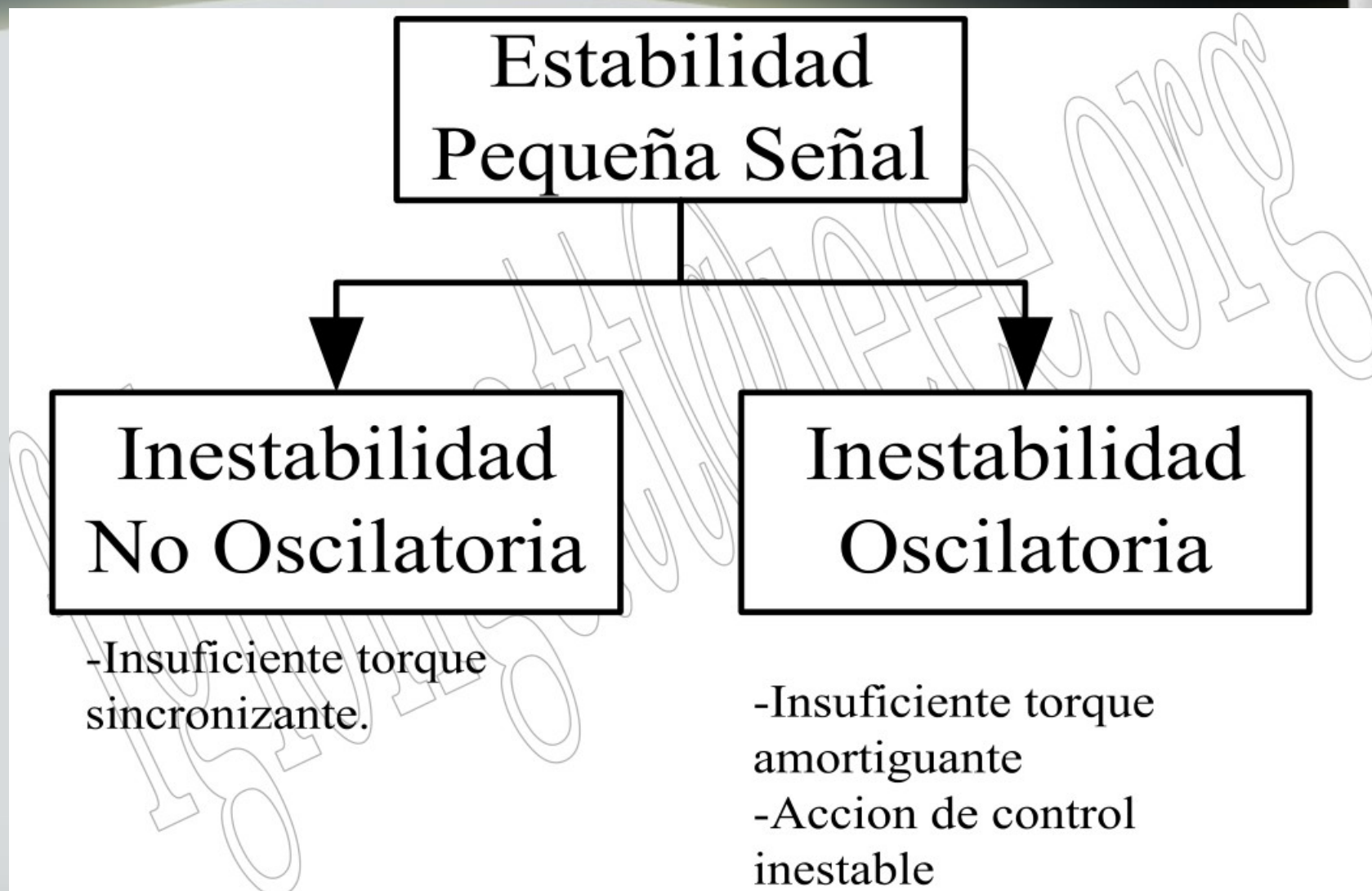


Con control de excitación  
Naturaleza de la respuesta a pequeñas perturbaciones





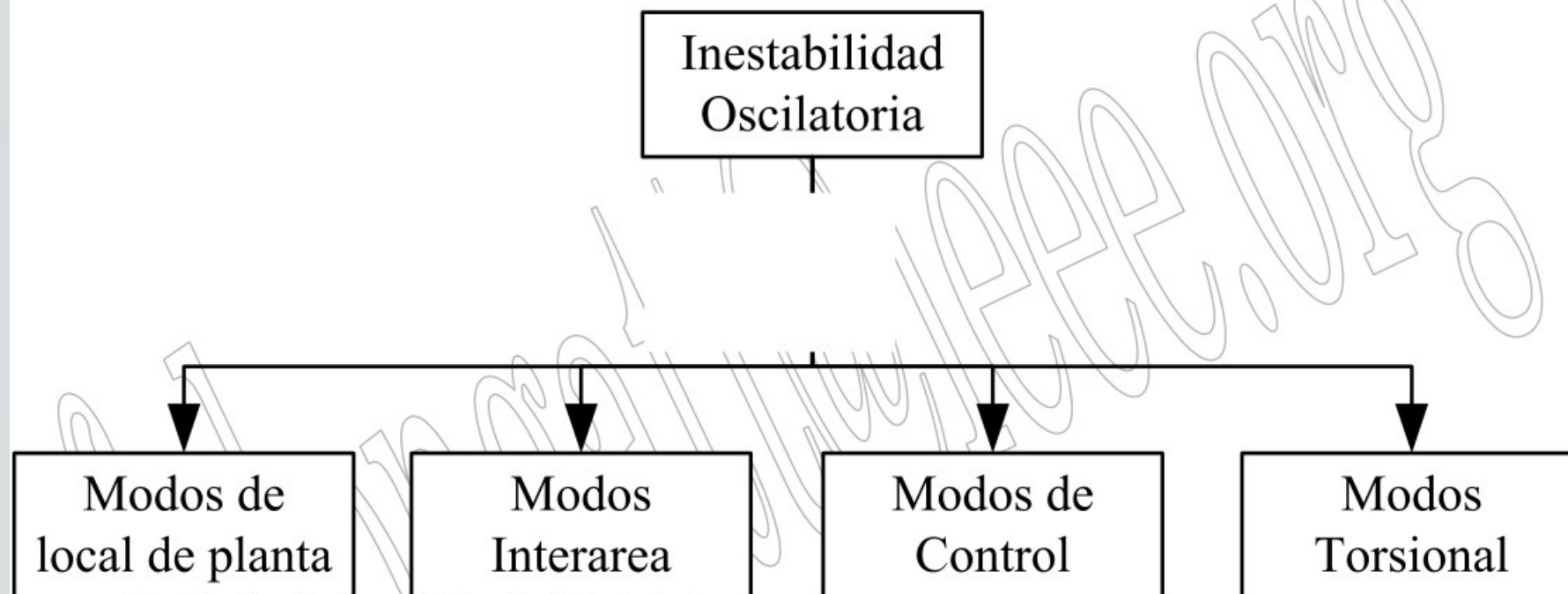
# Clasificación Estabilidad Pequeña Señal







# Clasificación Estabilidad Pequeña Señal



-Insuficiente  
amortiguante  
-Acción de c



# Modos Locales o Modos de Máquina-Sistema

- Son asociados con la *oscilación de unidades a una estación de generación* con respecto al resto del resto de sistemas de potencia.
- El término local es usado debido a que las *oscilaciones son localizadas* en una estación o una parte pequeña del sistema de potencia.



# Modos Ínter áreas

- Son asociados con la *oscilación de algunas maquinas en una parte del sistema contra maquinas en otras partes.*
- Estos son causados por *dos o mas grupos de maquinas muy cercanamente acopladas* siendo interconectadas por débiles líneas



# Modos de Control

- Son asociados con unidades de generación y otros controles.
- Mal ajustadas excitatrices, gobernadores de velocidad, convertidores HCVC y compensadores estáticos de VAR son las causas comunes de este modo de inestabilidad





# Modos Torsionales

- Son asociados con los componentes rotacionales del eje del sistema turbina generador.
- Los modos de inestabilidad torsional pueden ser causados por la interacción con controles de excitación, gobernadores de velocidad, controles HCDC y líneas compensadas con capacitor serie.





# Estabilidad Transitoria

- Es la habilidad del sistema de potencia para mantener el sincronismo cuando es sujeto a una *perturbación transitoria severa*.
- La respuesta resultante del sistema involucra *grandes excusiones de los ángulos rotoricos* de las maquinas y es influenciado por la relación potencia ángulo no lineal.



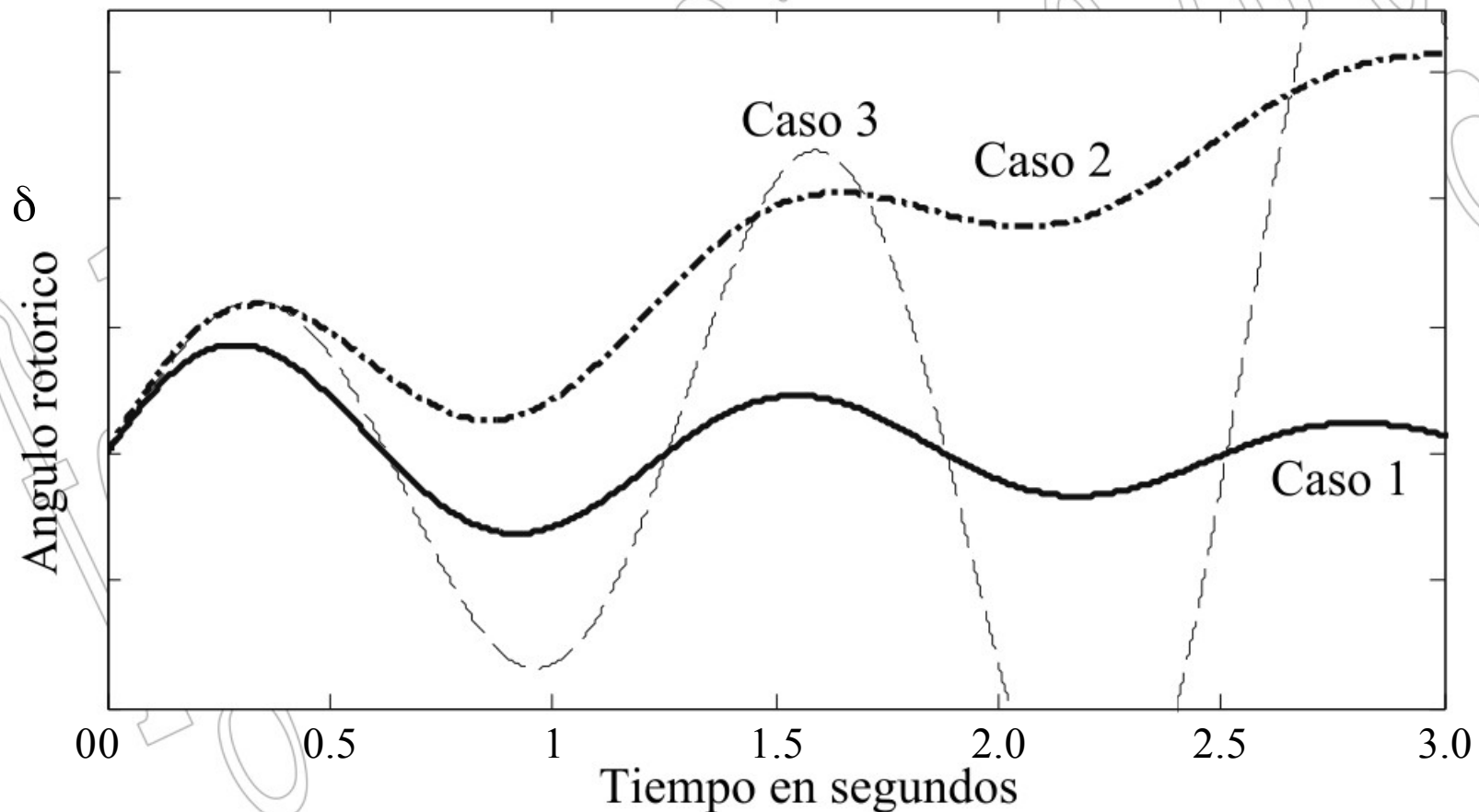
# Estabilidad Transitoria

- La estabilidad depende de tanto del *estado inicial operativo del sistema* y de la *severidad de la perturbación*.
- Usualmente, el sistema es alterado tanque que la operación de régimen permanente *posterior a la perturbación difiere de la anterior a la perturbación*.



# Estabilidad Transitoria

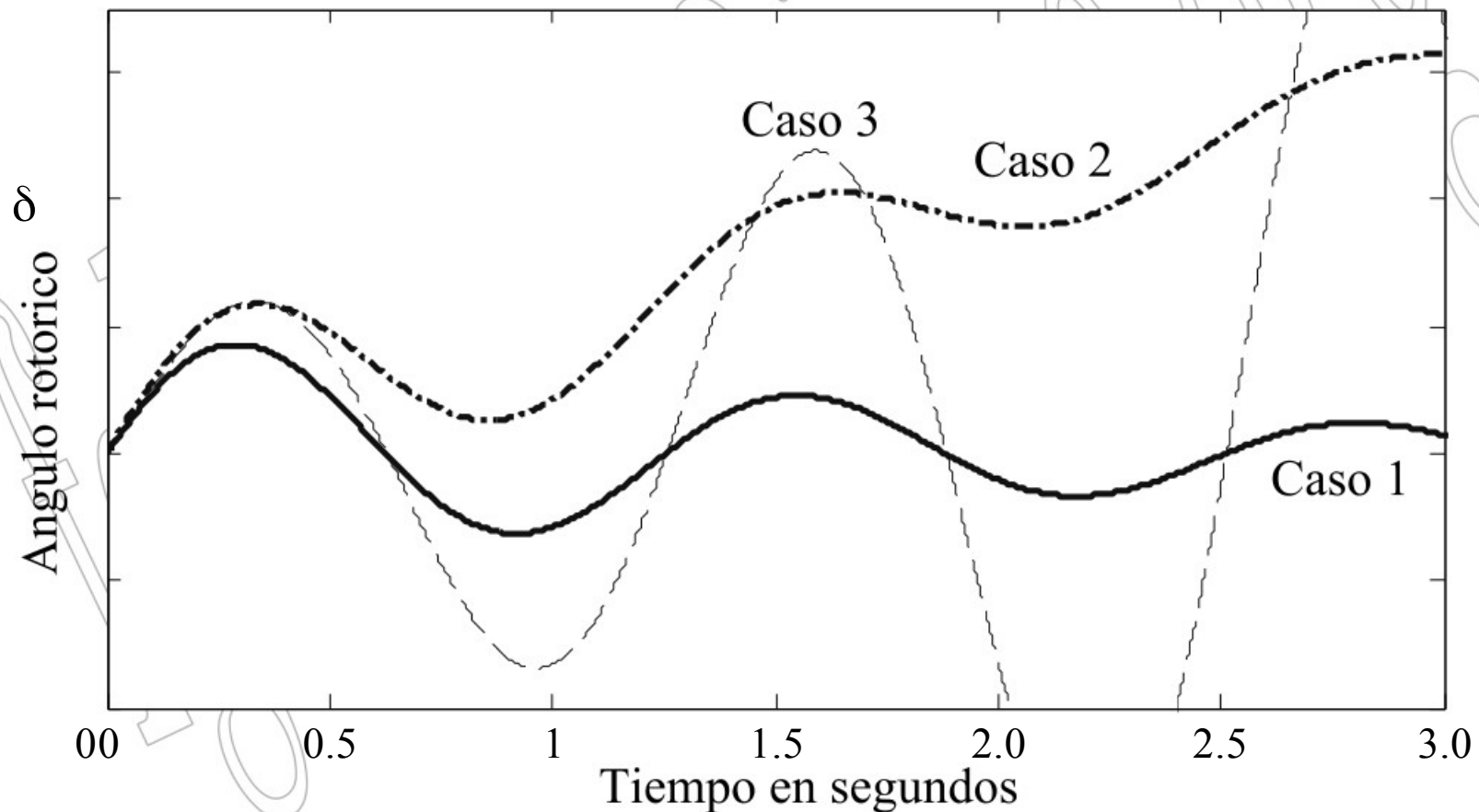
- La Figura ilustra el comportamiento de una maquina sincrónica para situaciones estable e inestables.





# Estabilidad Transitoria

- Esta muestra la respuesta el ángulo rotórico para *un caso estable* y para *dos casos inestables*.

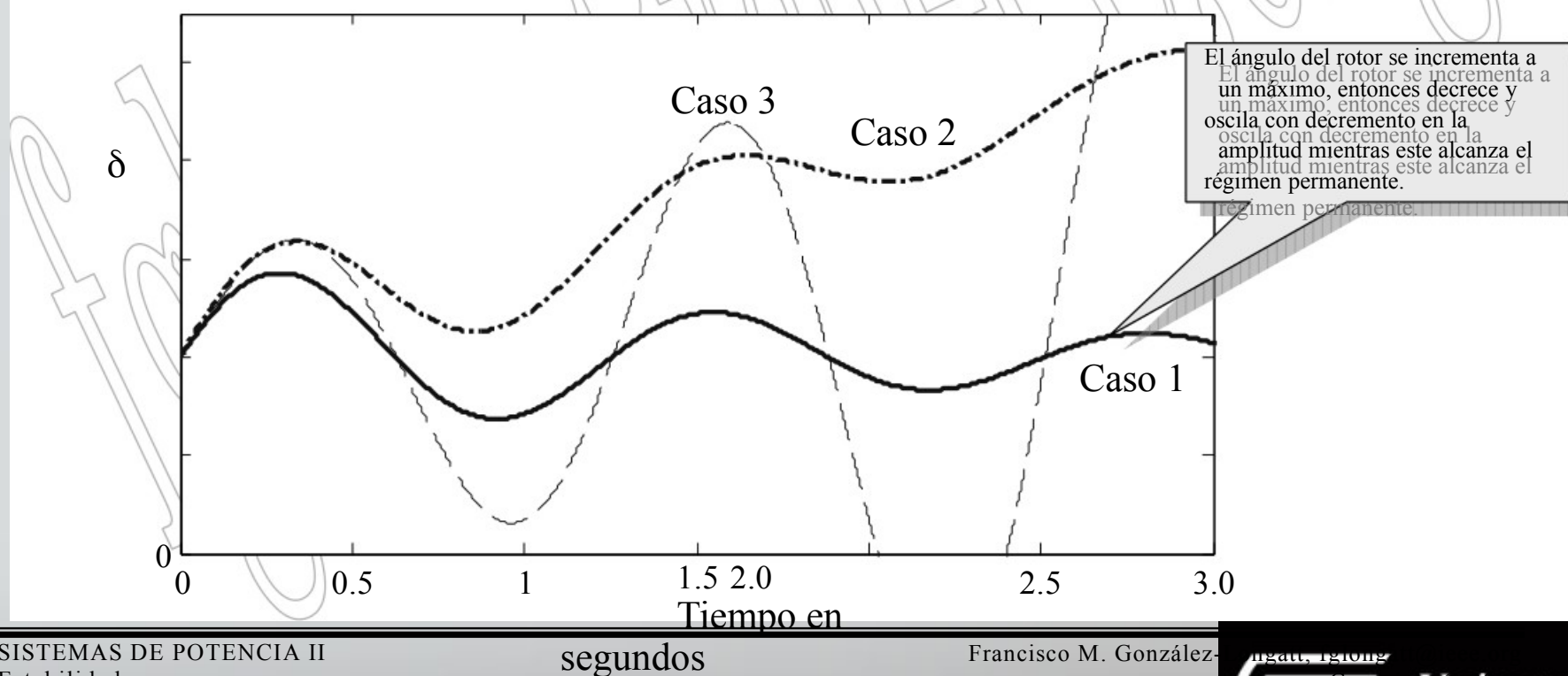






# Estabilidad Transitoria

- En el caso estable (Caso 1), el ángulo del rotor se incrementa a un máximo, entonces decrece y oscila con decremento en la amplitud mientras este alcanza el régimen permanente.

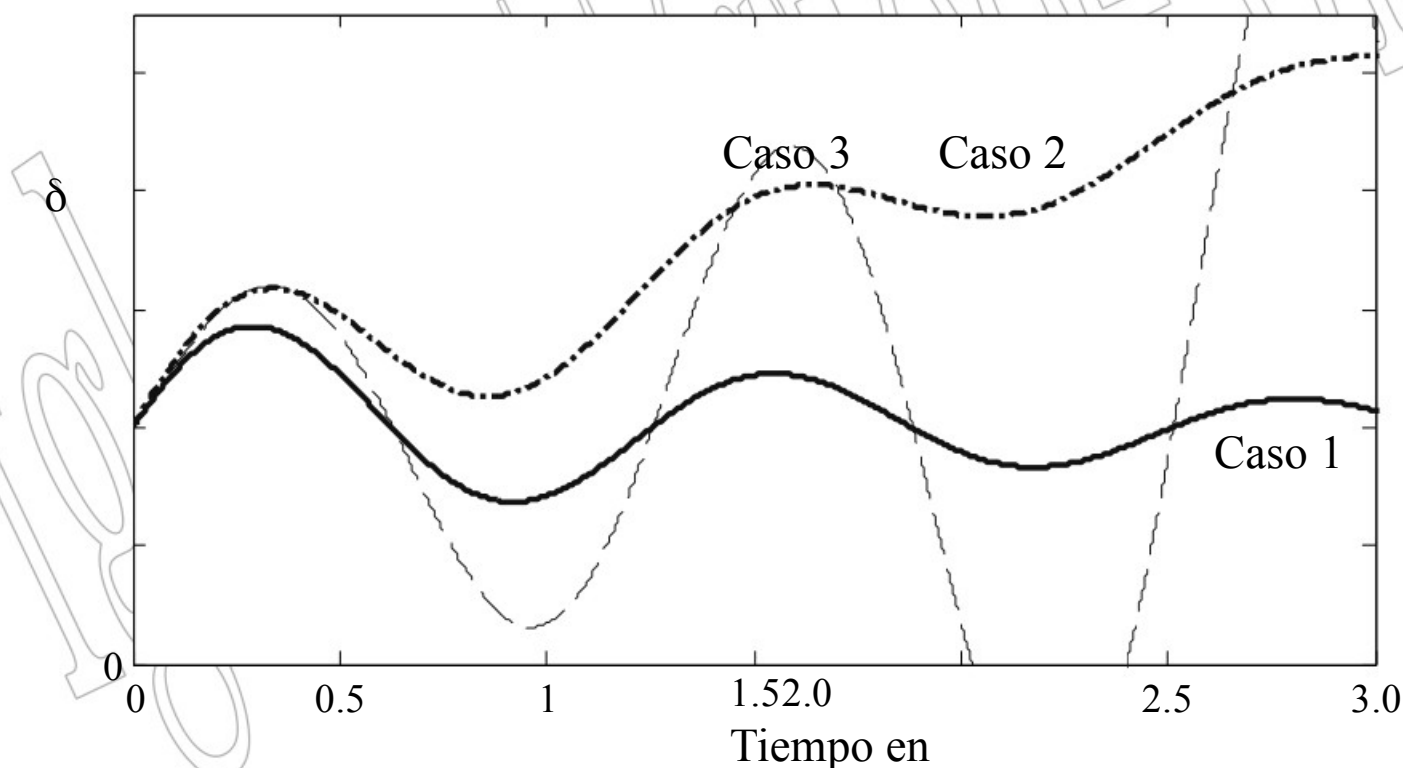






# Estabilidad Transitoria

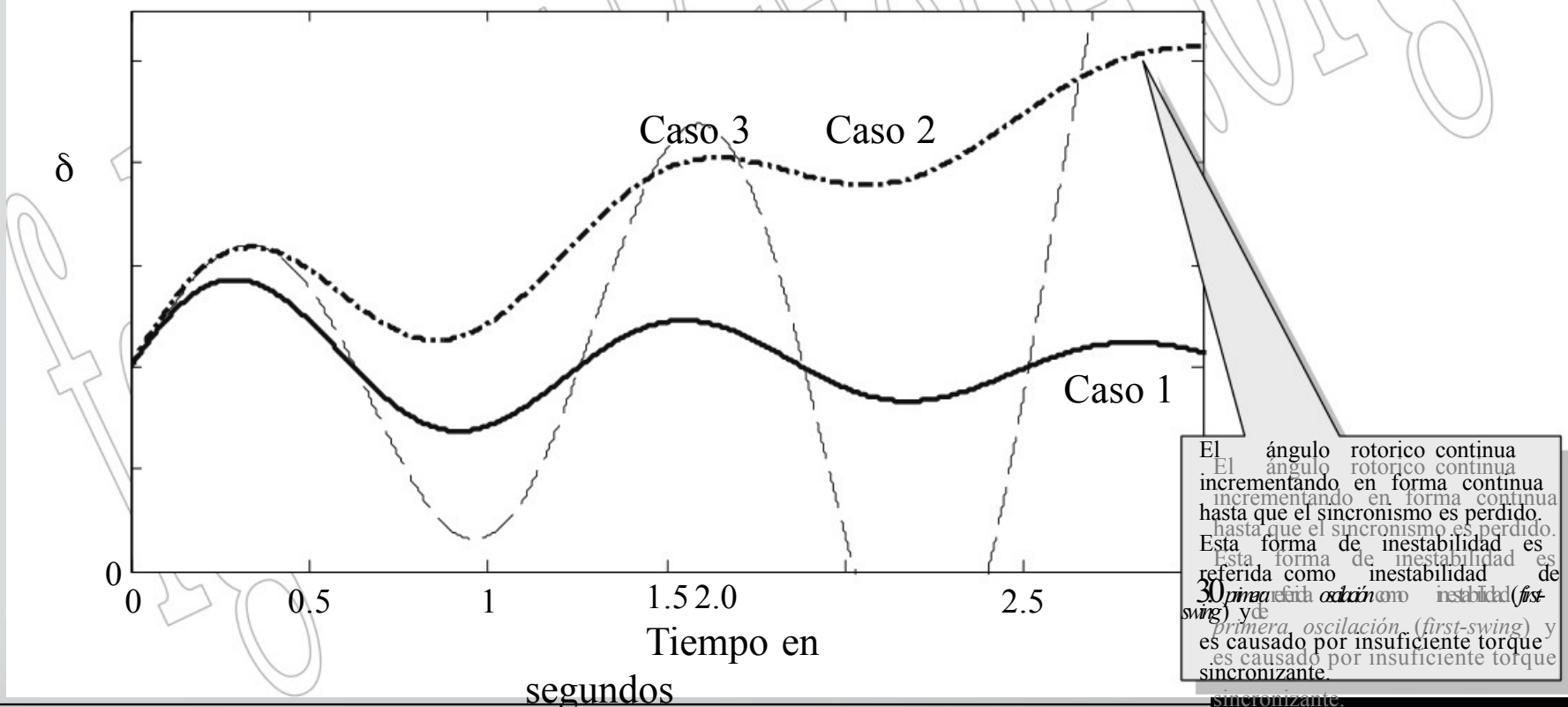
- En el Caso 2, el ángulo rotórico continúa incrementando en forma continua hasta que el sincronismo es perdido.





# Estabilidad Transitoria

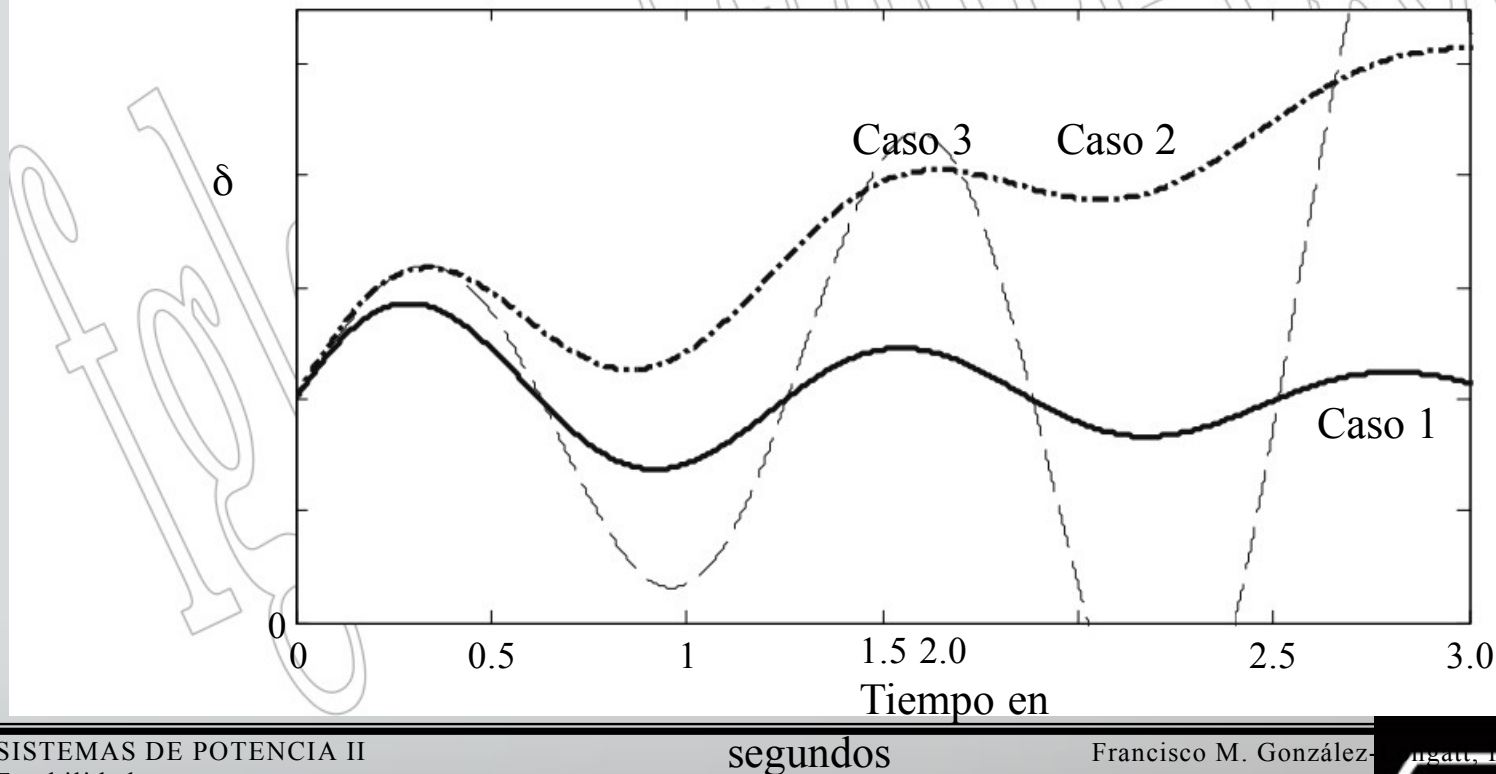
- Esta forma de inestabilidad es referida como inestabilidad de *primera oscilación* (*first-swing*) y es causado por insuficiente torque sincronizante.





# Estabilidad Transitoria

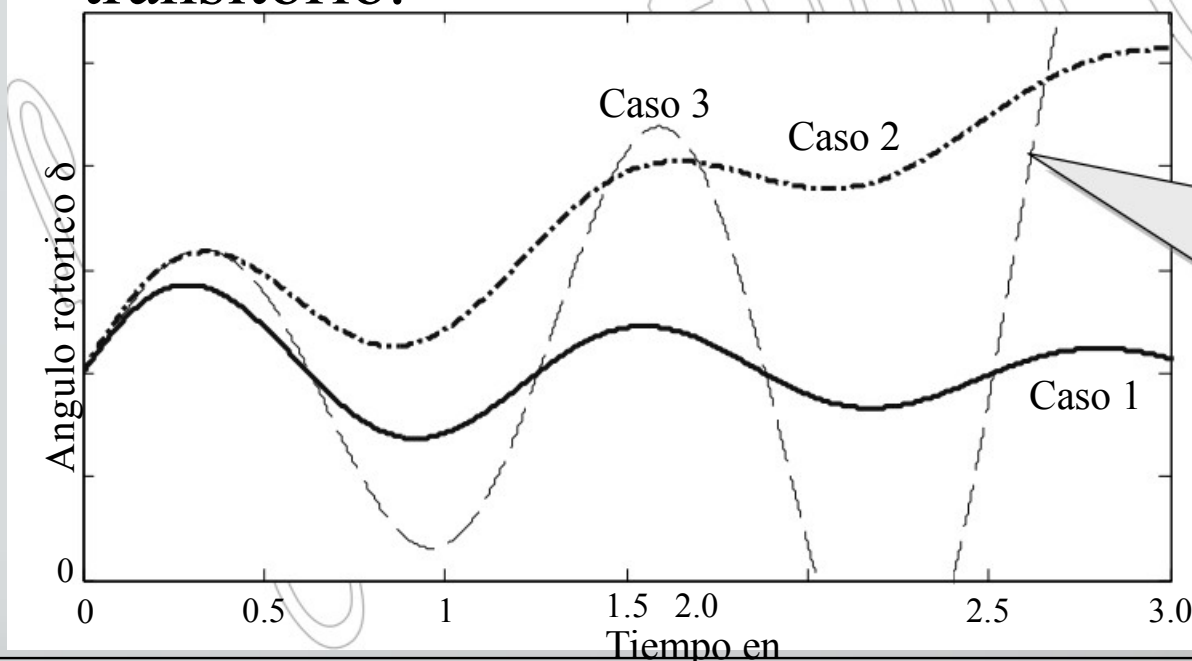
- En el Caso 3, el sistema es estable in la primera oscilación pero se hace inestable como un resultado del crecimiento de las oscilaciones cuando se acerca al estado de régimen permanente.





# Estabilidad Transitoria

- Esta forma de inestabilidad generalmente ocurre cuando la condición de régimen permanente pos falla por si misma es una pequeña señal inestable, y no necesariamente como un resultado del disturbio transitorio.



El sistema es estable in la primera oscilación pero se hace inestable como un resultado del crecimiento de las oscilaciones cuando se acerca al estado de régimen permanente. Esta forma de inestabilidad generalmente ocurre cuando la condición de régimen permanente por falla por si misma es una pequeña señal inestable, y no necesariamente como un resultado del disturbio transitorio





# Estabilidad Transitoria

- En estudios de estabilidad transitoria el periodo de interés es usualmente limitado de 3 a 5 segundos luego de la perturbación, aunque este puede extenderse alrededor de 10 segundos para muy grandes sistemas con modos de oscilación dominante inter-areas.





# Estabilidad Transitoria

- El término *estabilidad dinámica* también ha sido ampliamente usado en la literatura como una clase de inestabilidad de ángulo rotorico.
- Sin embargo, este ha sido usado para denotar diferentes aspectos del fenómeno por diferentes autores.



# Estabilidad Transitoria

- En la literatura norteamericana, esta ha sido mayormente para denotar estabilidad de pequeña señal en la presencia de equipos de control automático (primariamente reguladores de voltaje de generadores) como distinción de la clásica estabilidad de régimen permanente sin controles automáticos.
- En la literatura francesa y alemana, este ha sido usado para denotar que la estabilidad transitoria aquí tratada. Debido a que muchas confusiones han resultado del uso del termino estabilidad dinámica, tanto CIGRE e IEEE han recomendado que este no sea usado.



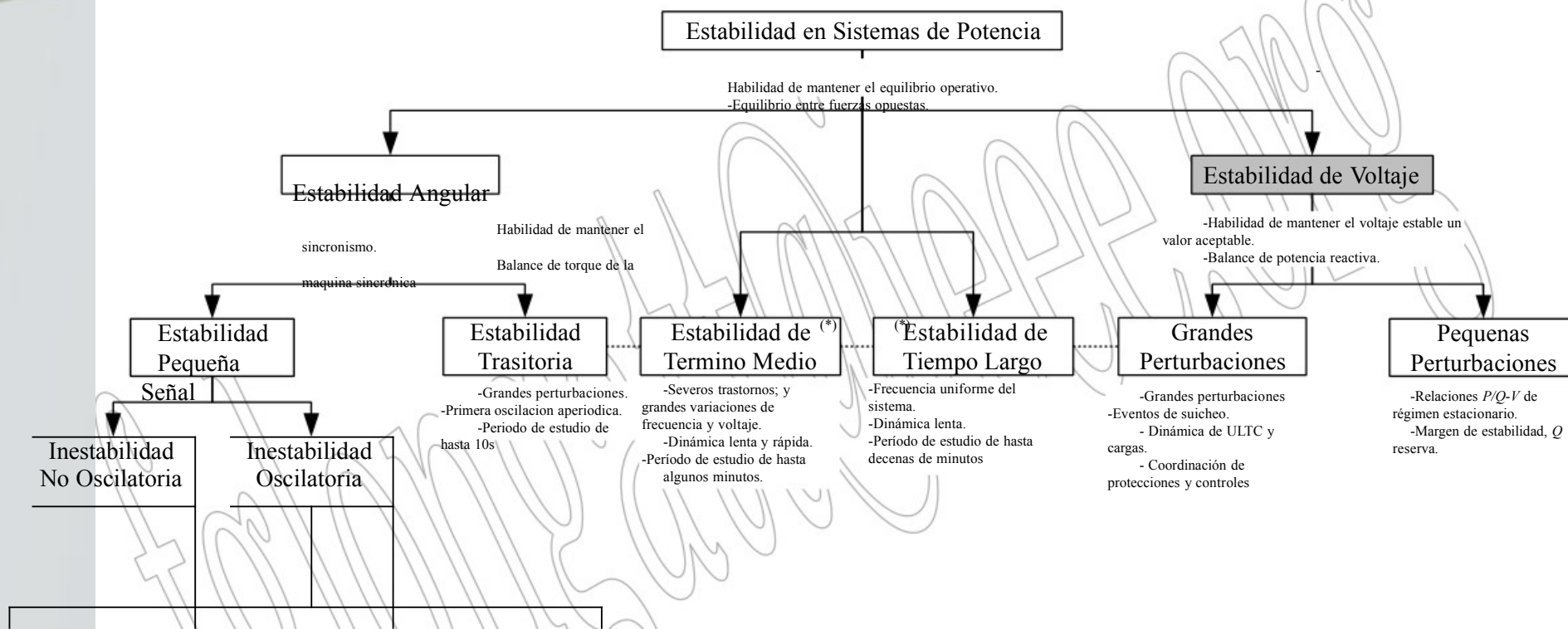
# Sistemas de Potencia II

Estabilidad

ESTABILIDAD DE  
VOLTAJE



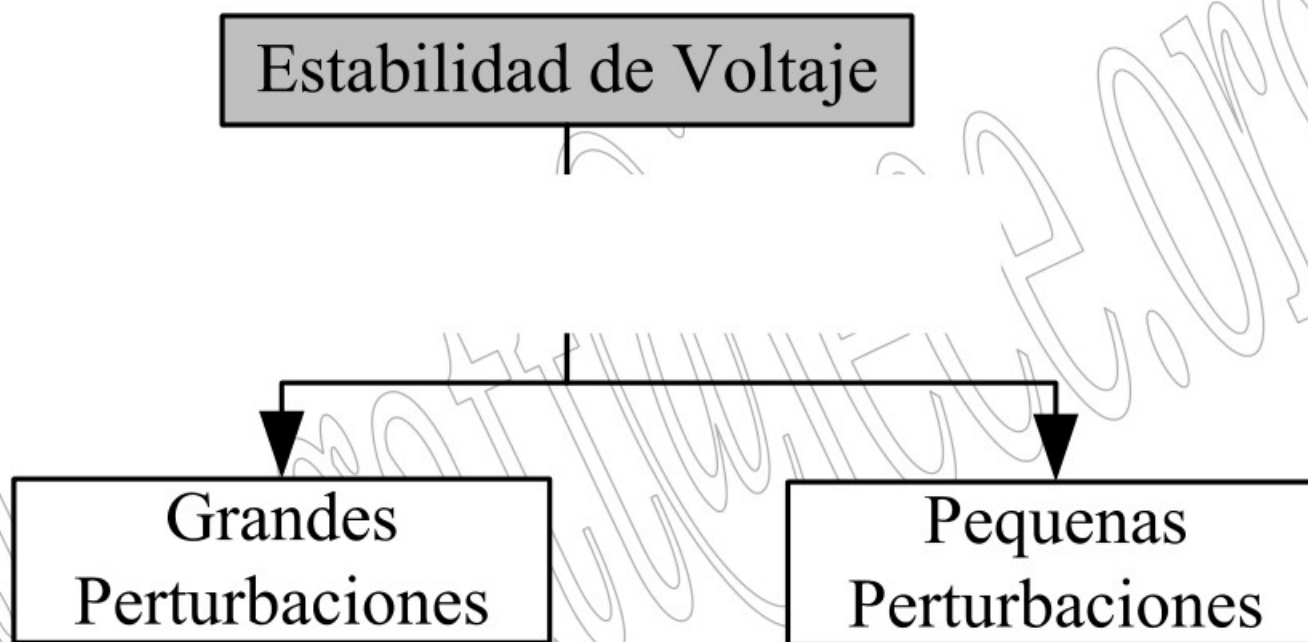
# Clasificación de Estabilidad







# Clasificación de Estabilidad



-H<sub>2</sub>

ener el volt

aceptable.

-Balance de potencia reactiva.







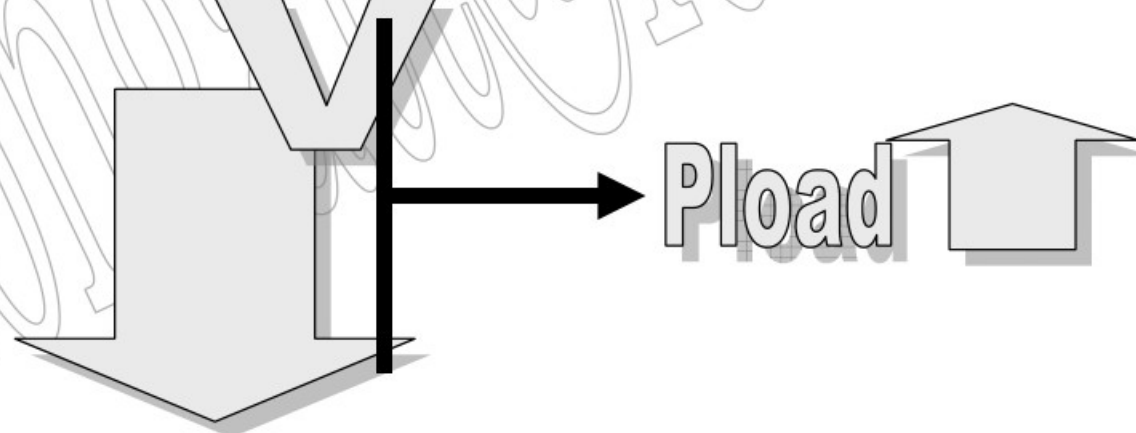
# Estabilidad de Voltaje

- Es la habilidad de un sistema de mantener voltajes estables aceptables en todas las barras en el sistema bajo condiciones operativas normales, y después de ser sujeto a una perturbación.
- Un sistema entra en un estado de inestabilidad de voltaje cuando *una perturbación, incremento en la carga demandada, o cambio en las condiciones del sistema causa un progresivo e incontrolable caída de voltaje.*



# Estabilidad de Voltaje

- El principal factor causante de la inestabilidad de voltaje de los sistemas es *satisfacer las exigencias de la demanda de potencia reactiva*.
- El corazón del problema es usualmente *la caída de voltaje que ocurre cuando la potencia activa y reactiva fluye a través de reactancias inductivas asociadas con las redes de transmisión*.





# Estabilidad de Voltaje

- Un criterio para la estabilidad de voltaje es que, a una condición operativa para cada barra en el sistema, *la magnitud del voltaje de barra incrementa con la inyección de potencia reactiva en la misma barra que es incrementada.*
- Un sistema es *inestable en voltaje* si, por al menos una barra en el sistema, la magnitud del voltaje de la barra ( $V$ ) *decrece* con la inyección con la inyección de potencia reactiva ( $Q$ ) es *incrementada*.





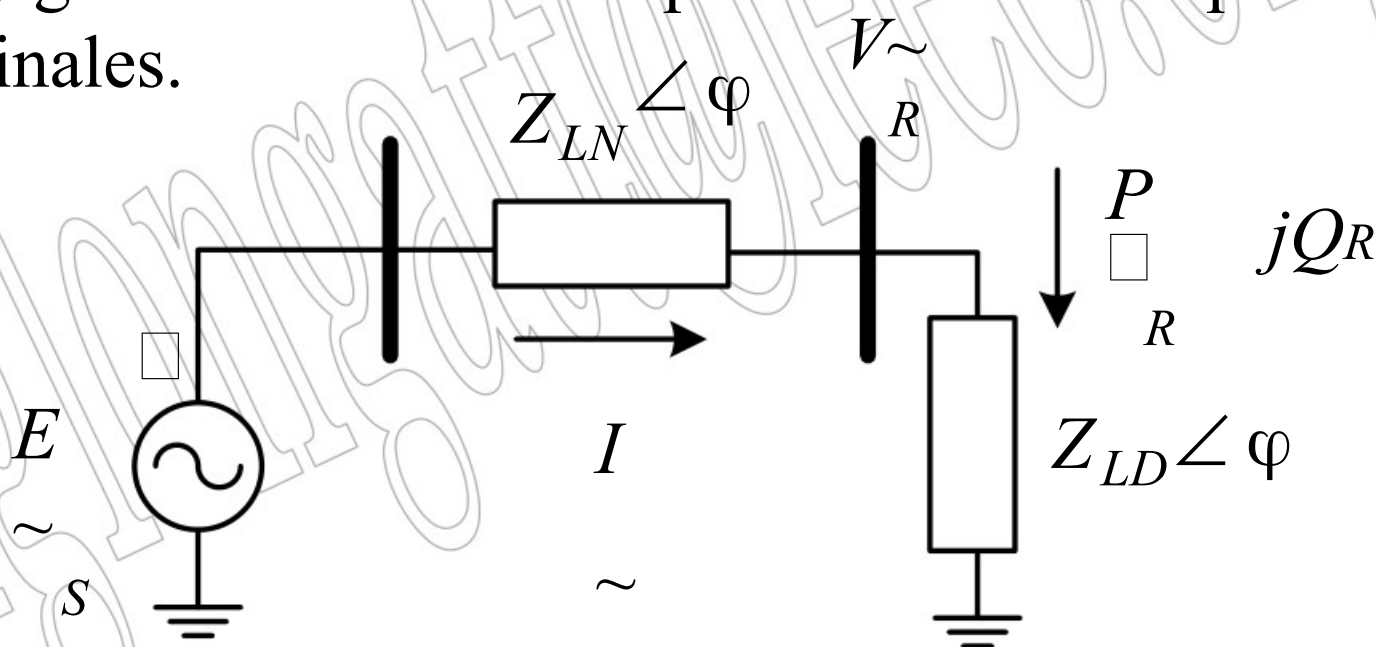
# Estabilidad de Voltaje

- En otras palabras, un sistema es estable en voltaje, si la sensibilidad  $V-Q$  es positiva para cada barra y es inestable en voltaje si la sensibilidad  $V-Q$  es negativa al menos en una barra.
- La *inestabilidad de voltaje es esencialmente un fenómeno local*, sin embargo, estas consecuencias pueden poseer un impacto de extensión amplia.
- El *colapso de voltaje* es más complejo que una inestabilidad de voltaje y es usualmente el resultado de una secuencia de eventos acompañando la inestabilidad de voltaje a un bajo perfil de tensiones en una parte significativa del sistema de potencia.



# Estabilidad de Voltaje

- La inestabilidad de voltaje puede ocurrir por algunas diferentes vías.
- Una vía para entender la inestabilidad de voltaje, se plantea una red simple constituida por dos terminales.

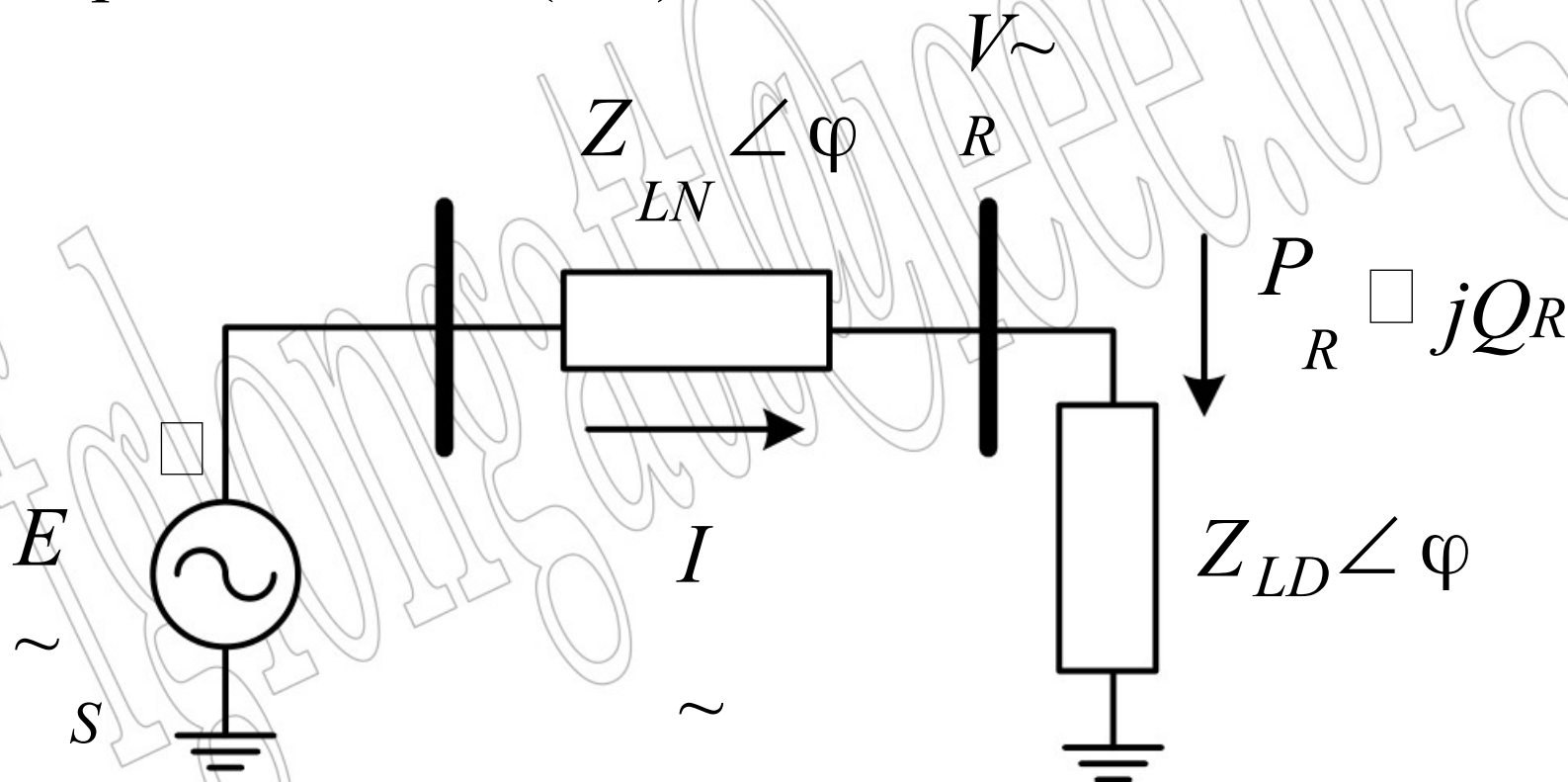






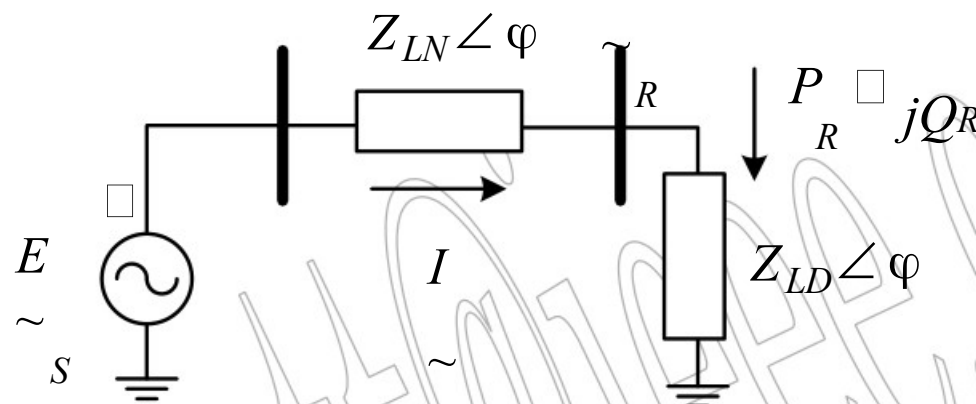
# Estabilidad de Voltaje

- Este consiste de una fuente constante de voltaje ( $E_s$ ), que alimenta una carga ( $Z_{LD}$ ) a través de una impedancia serie ( $Z_{LN}$ ).





# Estabilidad de Voltaje



- La expresión de la corriente es:

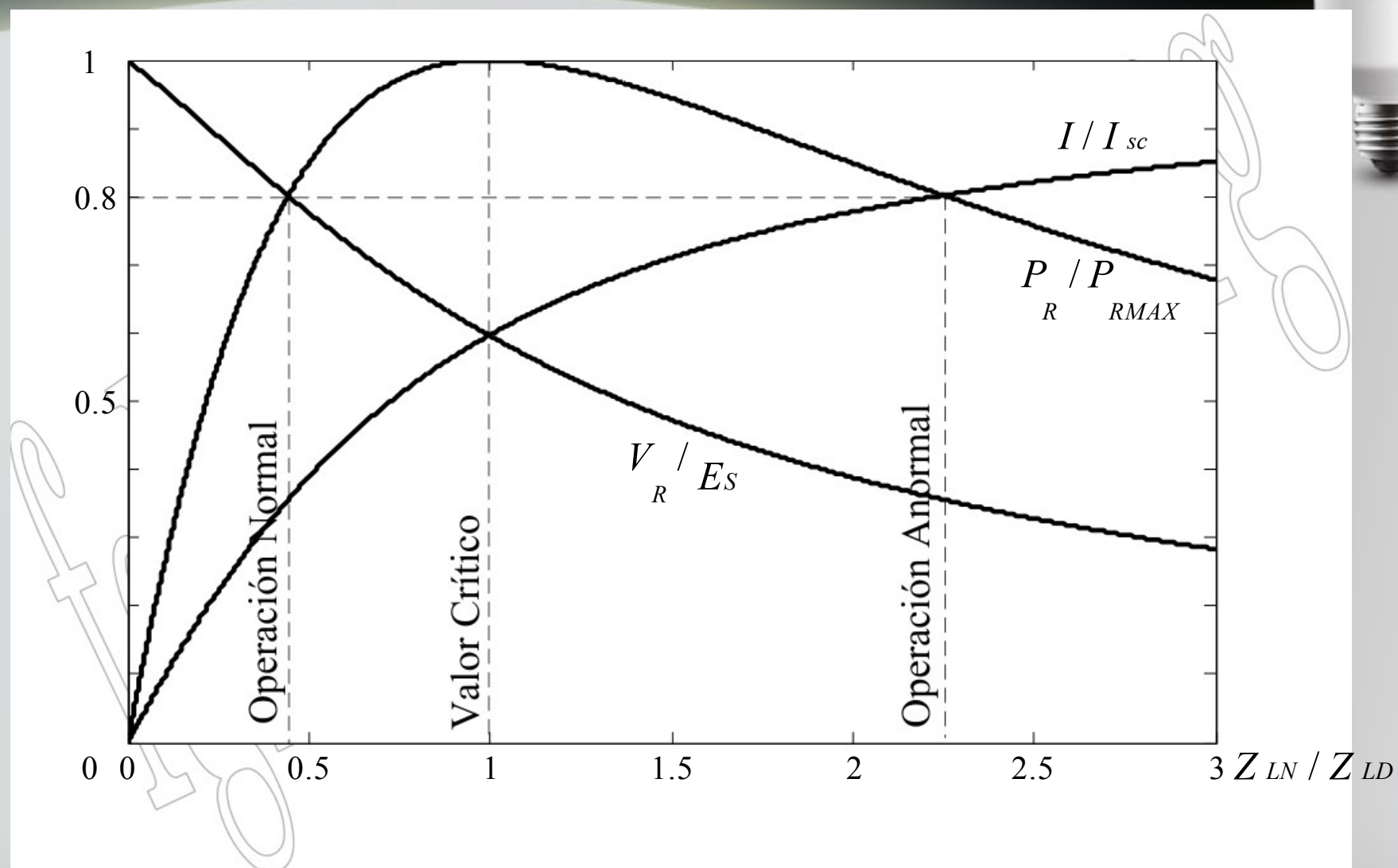
$$\tilde{I} = \frac{\tilde{E}_s}{\tilde{Z}_{LN} + \tilde{Z}_{LD}}$$

$$\tilde{Z}_{LN} = Z_{LN} \angle \theta$$

$$\tilde{Z}_{LD} = Z_{LD} \angle \varphi$$



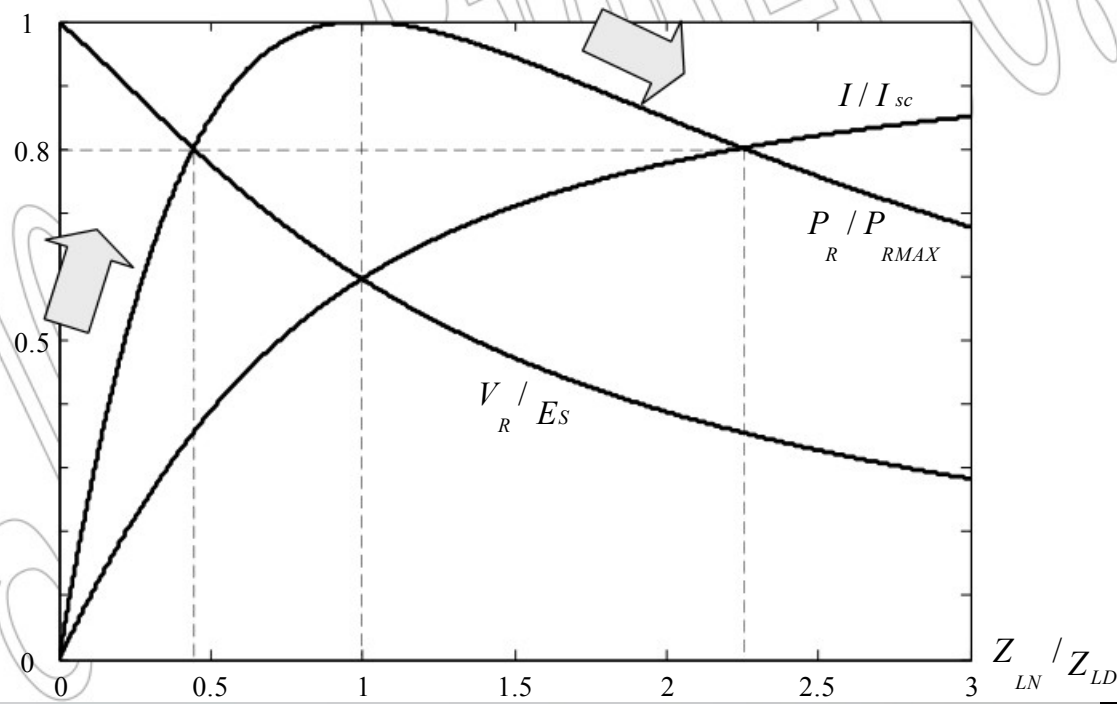
# Estabilidad de Voltaje





# Estabilidad de Voltaje

- Con la demanda de carga es incrementada por el decremento de  $Z_{LD}$ ,  $P_R$  es incrementada rápidamente inicialmente y entonces lentamente hasta alcanzar el máximo, luego de lo cual decrece.

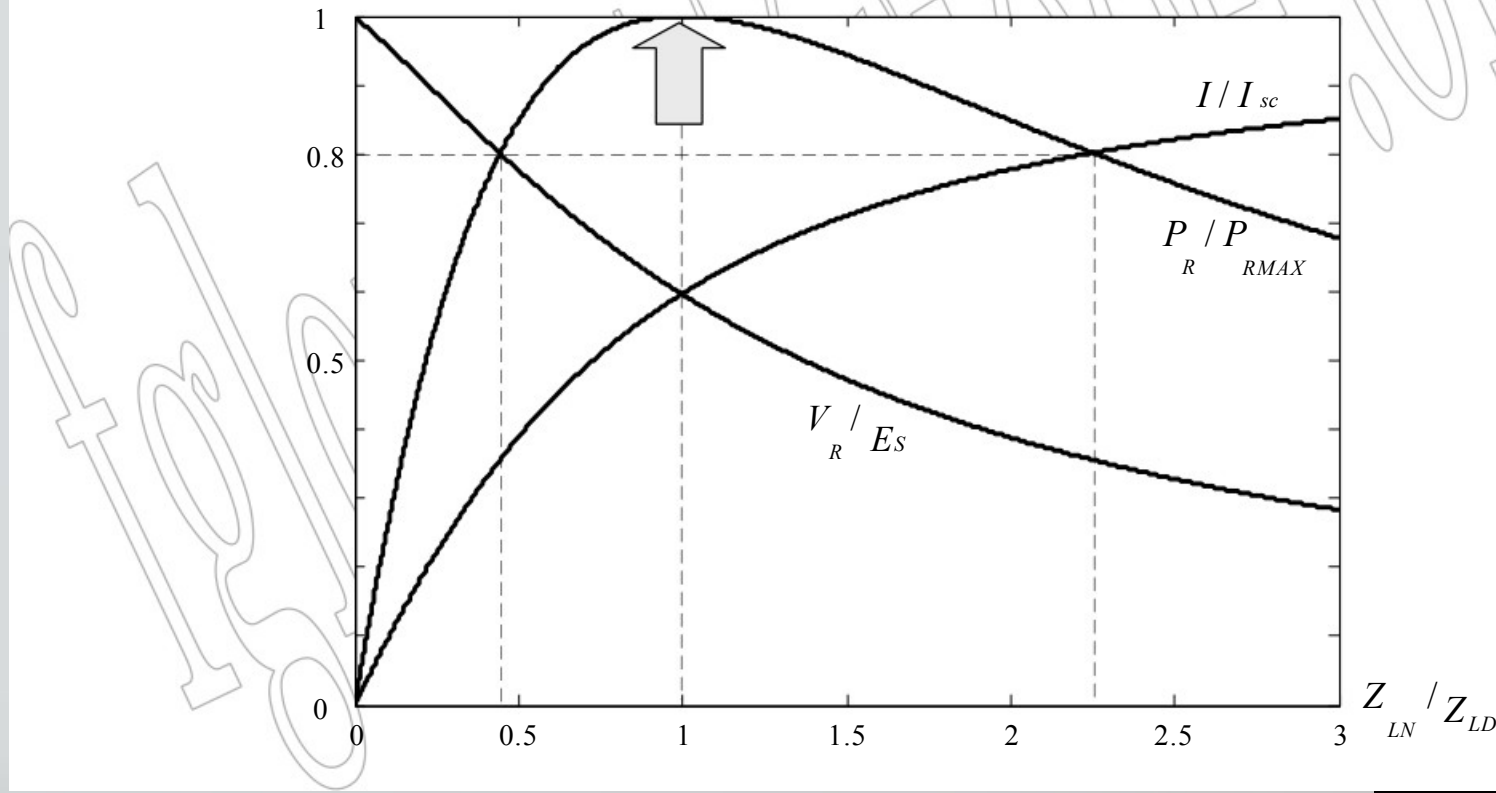






# Estabilidad de Voltaje

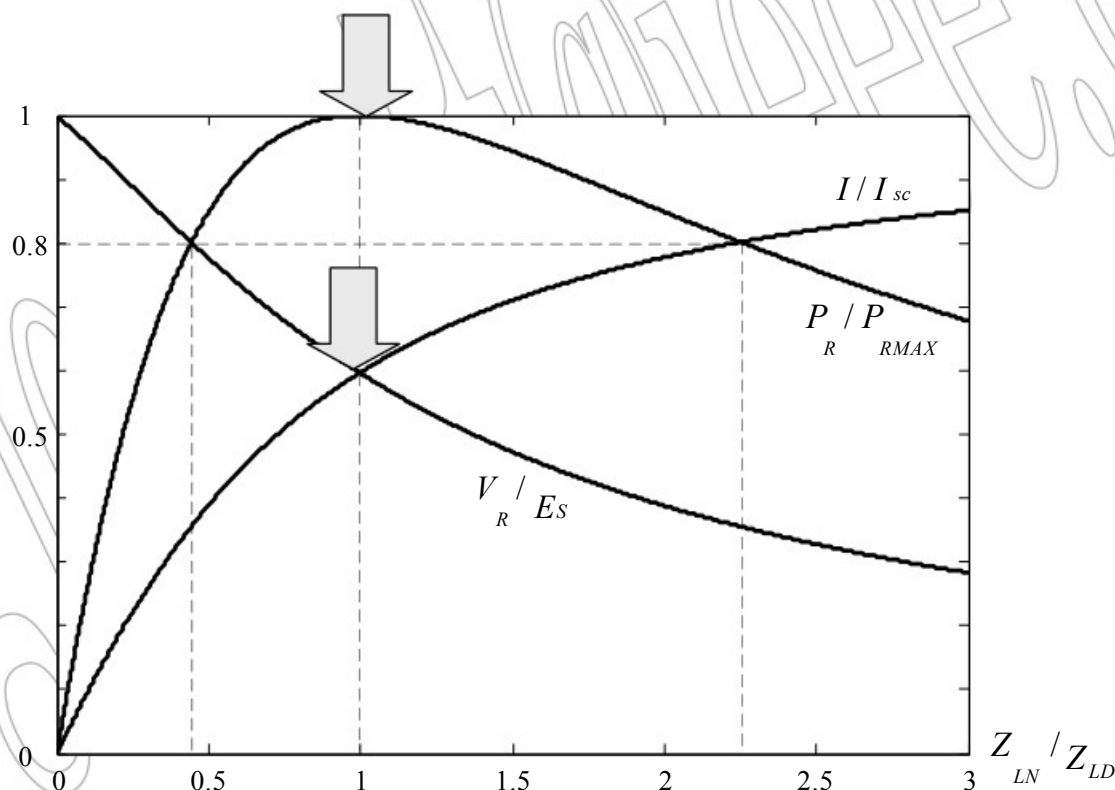
- Esto es entonces un máximo valor de potencia activa que puede ser transmitido a través de una impedancia desde una fuente constante de voltaje.







- La potencia transmitida es máxima cuando la caída de voltaje en la línea es igual a la magnitud  $V_R$ , que es cuando  $Z_{LN}/Z_{LD} = 1$ .





# Estabilidad de Voltaje

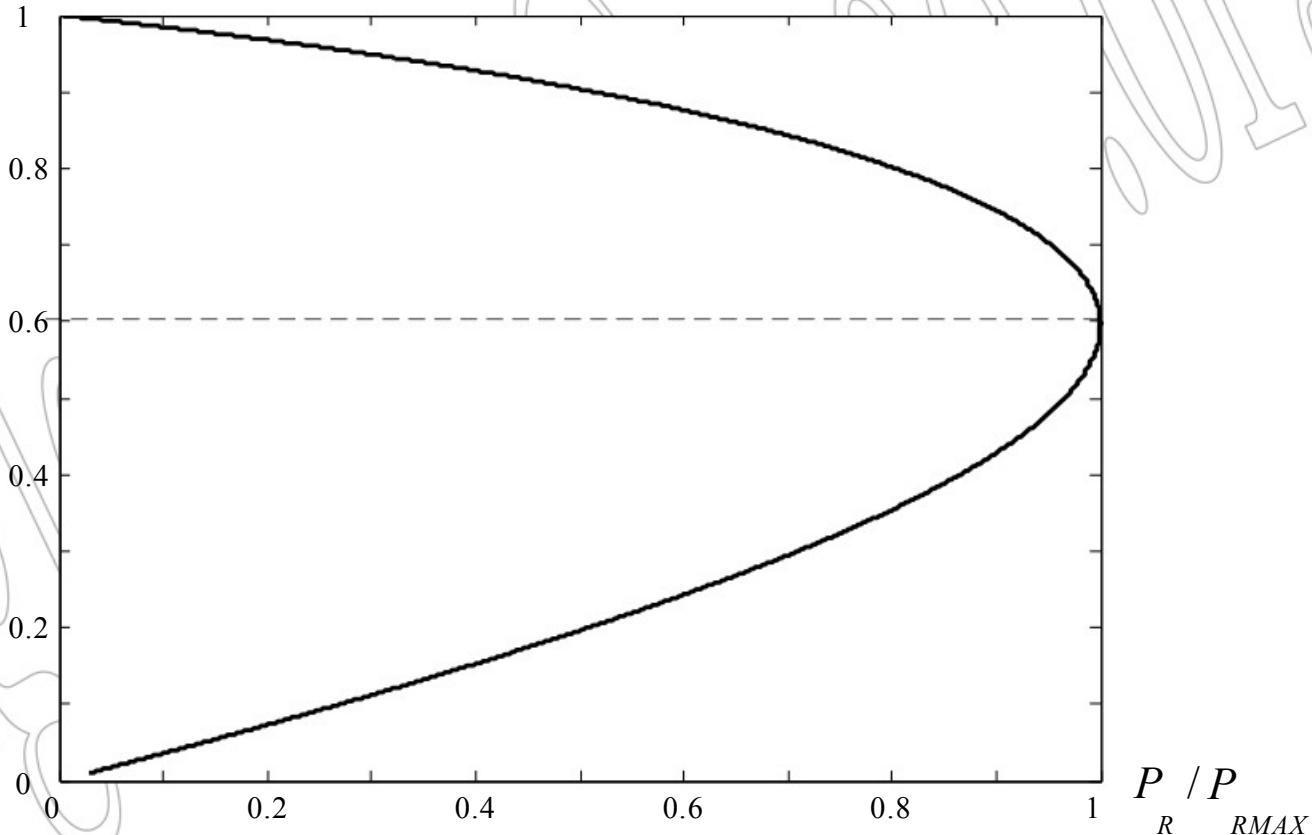
- La *operación crítica* correspondiente a la máxima potencia, representa el límite de operación satisfactoria.
- Para *valores mayores de demanda*, el control de la potencia por variaciones de carga puede ser inestable,
- Una disminución en la impedancia de carga reduce la potencia.
- Sin embargo el voltaje progresivamente disminuirá y el sistema se hará inestable dependiendo de las características de la carga.



# Estabilidad de Voltaje

- Desde el punto de vista de la estabilidad de voltaje, la relación entre  $P_R$  y  $V_R$  es de interés.

$$\frac{V_R}{E_S}$$

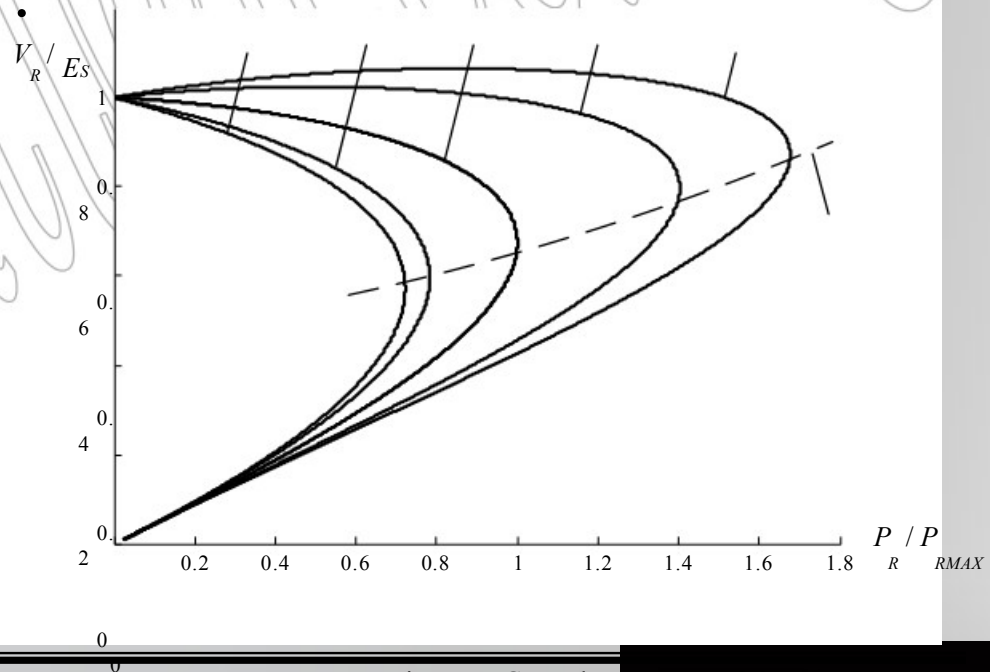




# Estabilidad de Voltaje

- La caída de voltaje en la línea de transmisión sea una función de la potencia activa y también de la potencia reactiva transferida.
- La estabilidad de voltaje, de hecho, depende de la relación entre  $P$ ,  $Q$  y  $V$ .

Característica  $V_R$ - $P_R$  del sistema de la Figura con diferentes factores de potencia de la carga

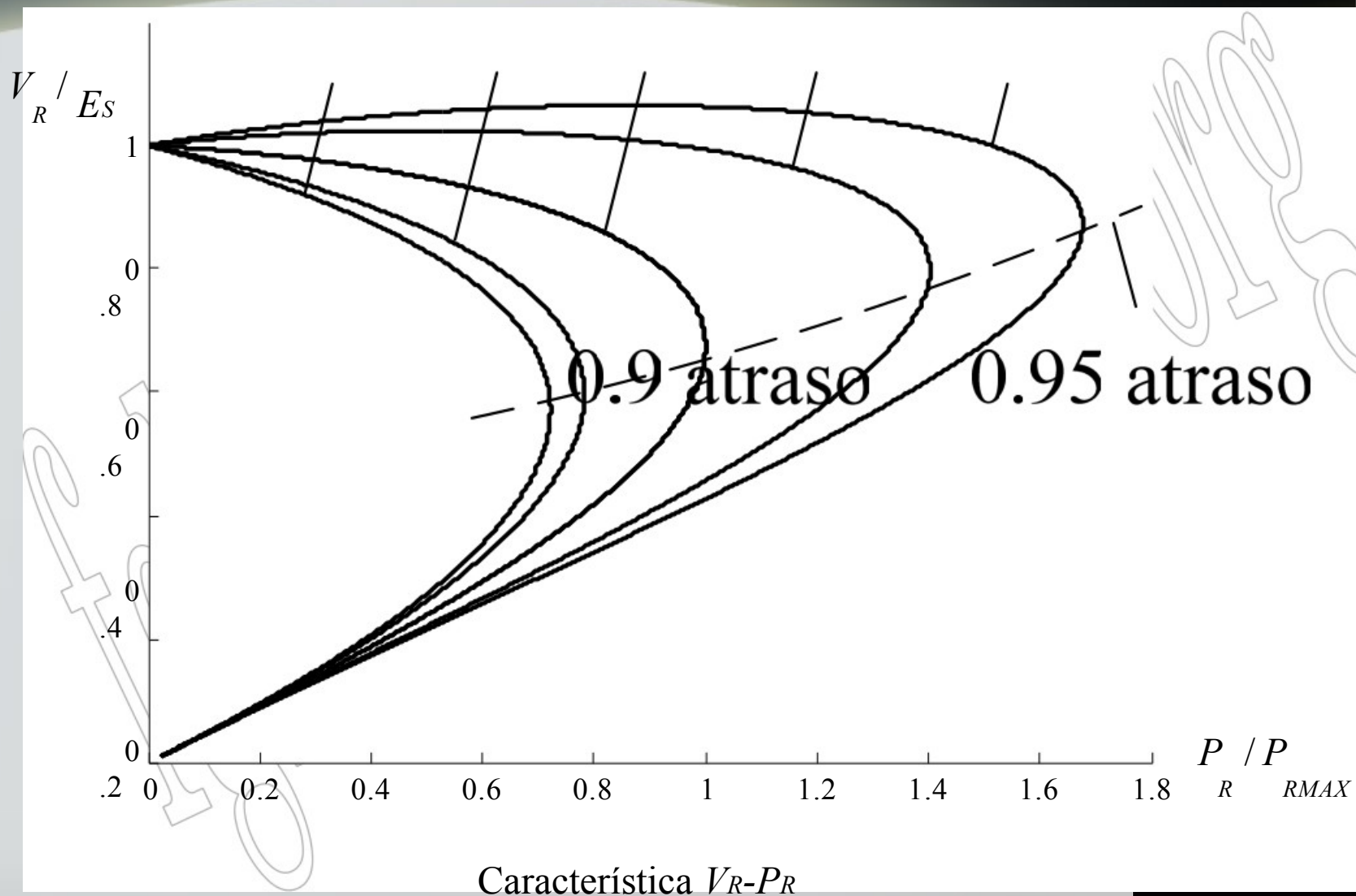






1

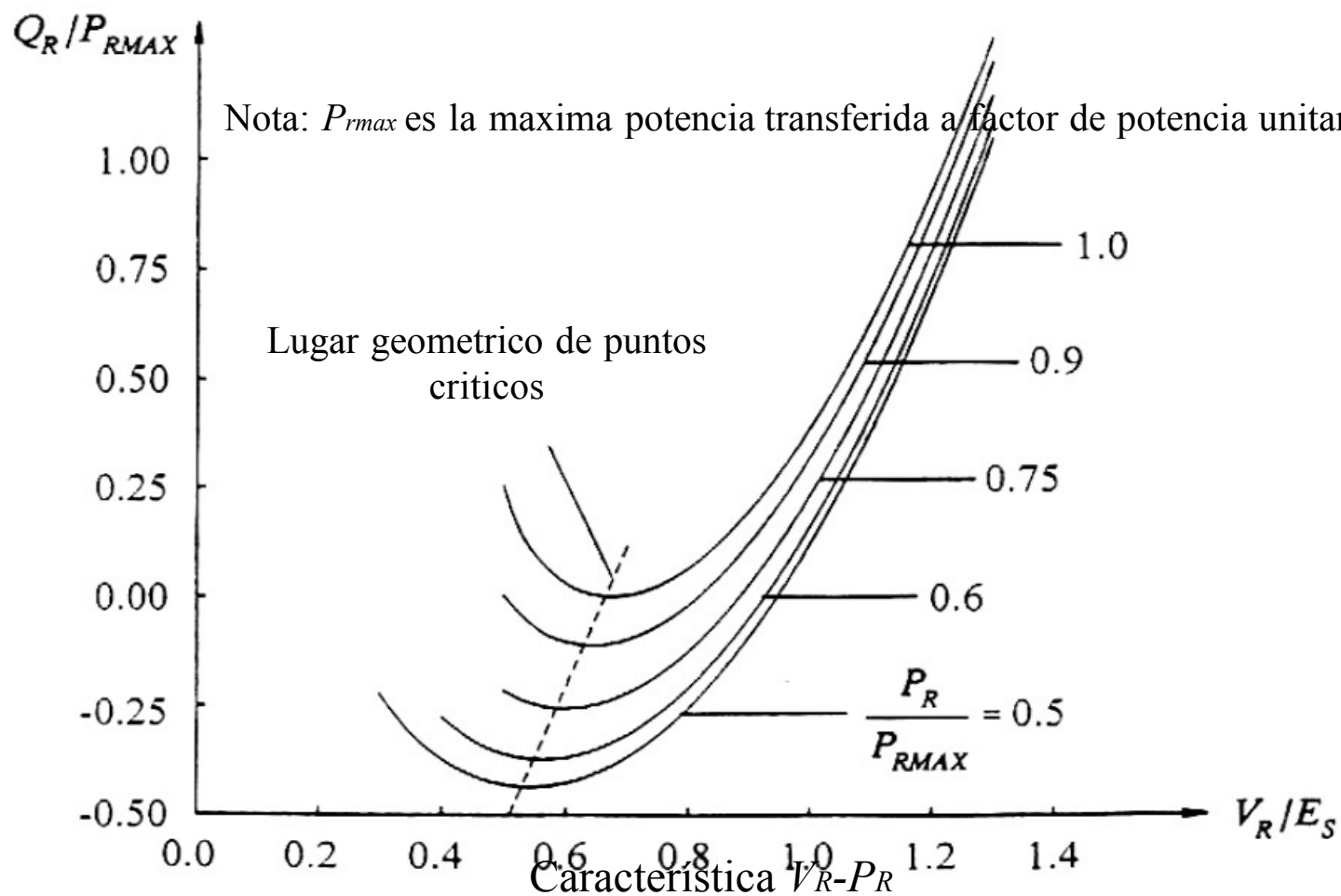
# Estabilidad de Voltaje







# Estabilidad de Voltaje





# Clasificación de Estabilidad

Estabilidad de Voltaje

Grandes  
Perturbaciones

Pequeñas  
Perturbaciones

-Habilitar el voltaje  
aceptable

el voltaje

-Balance de potencia reactiva.



# Estabilidad de Voltaje de Grandes Perturbaciones



- Esta relacionada con una *habilidad del sistema para controlar los voltajes siguientes a grandes perturbaciones*
- Tales como:
  - *fallas del sistema,*
  - *perdidas de generación, o*
  - *contingencia de circuito.*
- Esta habilidad es determinada por las *características sistema-carga y la interacción de controles tanto continuos como discretos y protecciones.*



# Estabilidad de Voltaje de Grandes Perturbaciones

- La determinación de estabilidad de grandes perturbaciones requiere el *examen del comportamiento dinámico no lineal* de un sistema sobre un periodo de tiempo suficiente para capturar las interacciones de equipos tales como ULTC y limitadores de corriente de campo de los generadores.
- El periodo de estudio de interés puede extender desde *pocos segundos a diez minutos*.
- Entonces, *simulaciones dinámicas de periodos largos son requeridos para el análisis*.



# Estabilidad de Voltaje para Perturbaciones Pequeñas

- Esta relacionada con la *habilidad del sistema para controlar los voltajes* siguientes a *pequeñas perturbaciones*.
- Tales como:
  - *cambios incrementales en carga del sistema.*
- Esta forma de estabilidad es determinadas por la *característica de la carga, controles continuos, y controles discretos* a un instante de tiempo dado.





# Estabilidad de Voltaje para Perturbaciones Pequeñas

- Este concepto es útil en determinar, en algún instante, como el voltaje del sistema responderá ante pequeños cambios del sistema.
- Un sistema es *inestable en voltaje si*, para al menos una barra en el sistema, la magnitud del voltaje de barra ( $V$ ) decrece cuando la inyección de potencia reactiva ( $Q$ ) en la misma barra es incrementada.
- En otras palabras, un sistema es estable en voltaje si la sensibilidad  $V-Q$  es positiva para cada barra, y si la sensibilidad  $V-Q$  es negativa al menos es una barra el sistema es inestable



# Sistemas de Potencia II

---



## Estabilidad

### ESTABILIDAD TERMINO MEDIO Y LARGO



# Clasificación de Estabilidad

## Estabilidad en Sistemas de Potencia

Estabilidad de  
Termino Medio

Estabilidad de  
Tiempo Largo

mantener e  
ntre fuerzas



# Estabilidad Termino Largo y Medio

---

- Los términos estabilidad de termino largo (*long-term*) y termino medio (*mid-term*) son relativamente nuevos en la literatura de la estabilidad de los sistemas de potencia.
- Ellos fueron introducidos por la necesidad de mediar con los *problemas asociados con la respuesta dinámica de los sistemas de potencia a los severos trastornos*.



# Estabilidad de Medio-Término

- *Medio-termino* representa la transición entre las respuesta de *corto-termino* y *de largo-termino*.
  - En los estudios de estabilidad de *medio-termino*, *el foco esta en las oscilaciones de potencia sincronizante entre máquinas*, incluyendo los efectos de algunos del fenómeno más lento, y posiblemente las excusiones grandes de voltaje y frecuencia.





# Estabilidad de Largo-Término

---

- Asume que las oscilaciones de potencia sincronizante entre maquinas se ha amortiguado, resultando en una frecuencia de sistema uniforme.
- El foco esta en los fenómenos muy lentos y de larga duración que acompañan los trastornos de gran escala y en el resultante grande y sostenido desequilibrio entre generación y consumo de potencia activa y reactiva.



# Estabilidad de Largo-Término

---

- Este fenómeno incluye: dinámica de caldera en unidades térmicas, la dinámica de la compuerta y conducto en las unidades hidráulicas, control automático de generación, y los efectos de salida de frecuencia fundamental en las cargas y redes.
  - Corto-termino o transitorio: 0 a 10 segundos.
  - Medio-termino: 10 segundos a pocos minutos.
  - Largo-termino: pocos minutos a 10 minutos