



Taller virtual: “Elaboración de Estudio de Estabilidad”

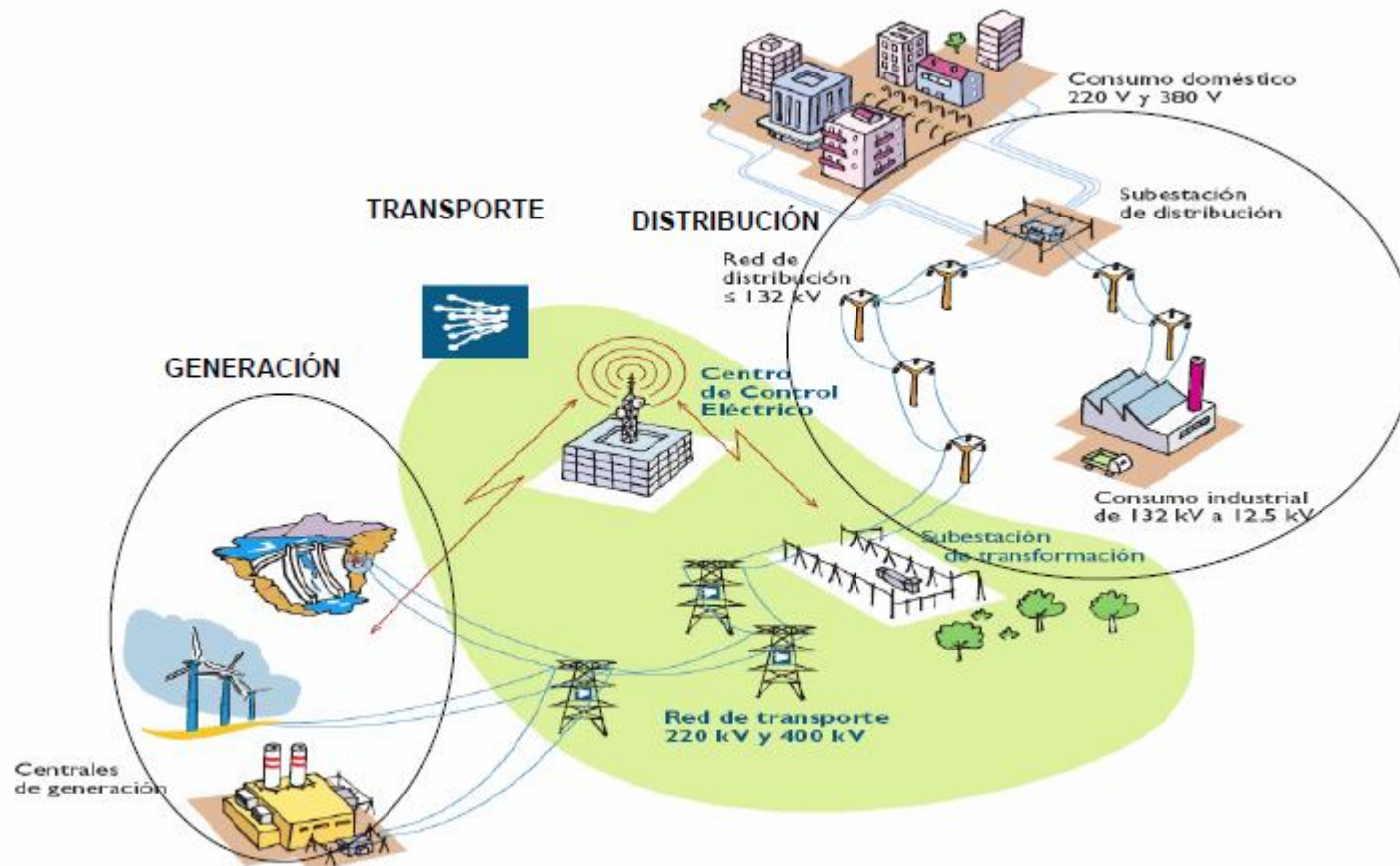
ESTABILIDAD DE SISTEMAS DE POTENCIA



Elaboración de Estudio de Estabilidad

© Inel
inel@inelinc.com

SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA (SEP)



<http://www.energiaysociedad.es/manenergia/1-1-aspectos-basicos-de-la-electricidad/>



DEFINICIONES

Punto de Operación de un SEP

- Es un conjunto de magnitudes que pueden ser medidas o calculadas y que permiten describir o caracterizar al SEP.

Condición de Operación en Estado Estacionario

- Es un estado de operación en el cual todas las magnitudes que caracterizan al sistema pueden ser consideradas constantes.

Operación Síncrona

- Una máquina está en operación síncrona si su velocidad angular eléctrica promedio es igual a la frecuencia angular eléctrica de la tensión de la red.

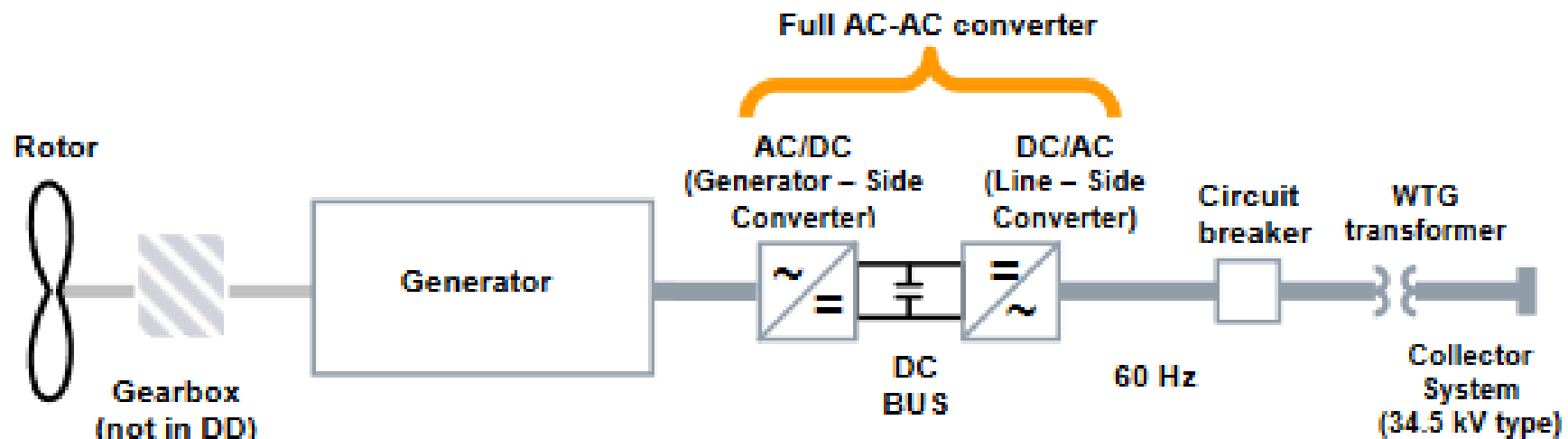


GENERACIÓN TIPOS

TIPO DE CENTRAL	¿GENERADOR SÍNCRONO CONECTADO A LA RED?
HIDROELÉCTRICA – TÉRMICA	SI
BIOMASA	SI
GEOTÉRMICA	SI
EÓLICA	NO
SOLAR FOTOVOLTAICA	NO



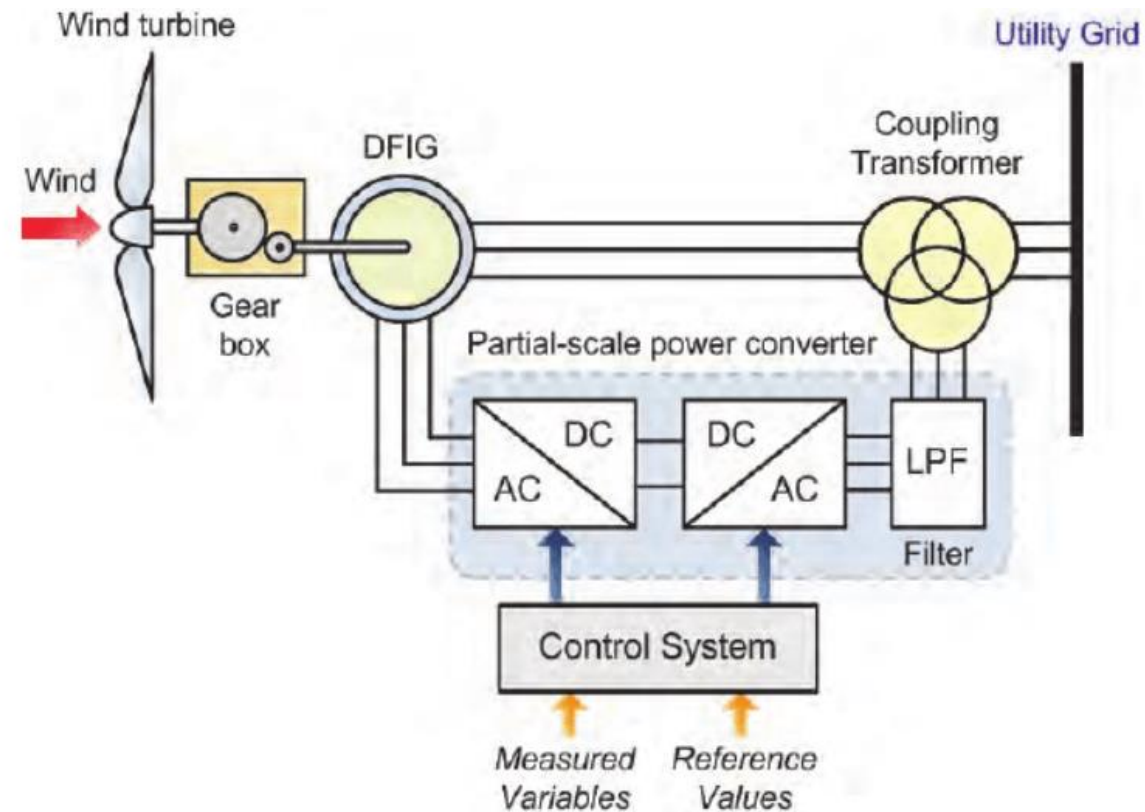
CENTRAL EÓLICA (SFC)



R. J. Nelson "Short-Circuit Contributions of Full Converter Wind Turbines."



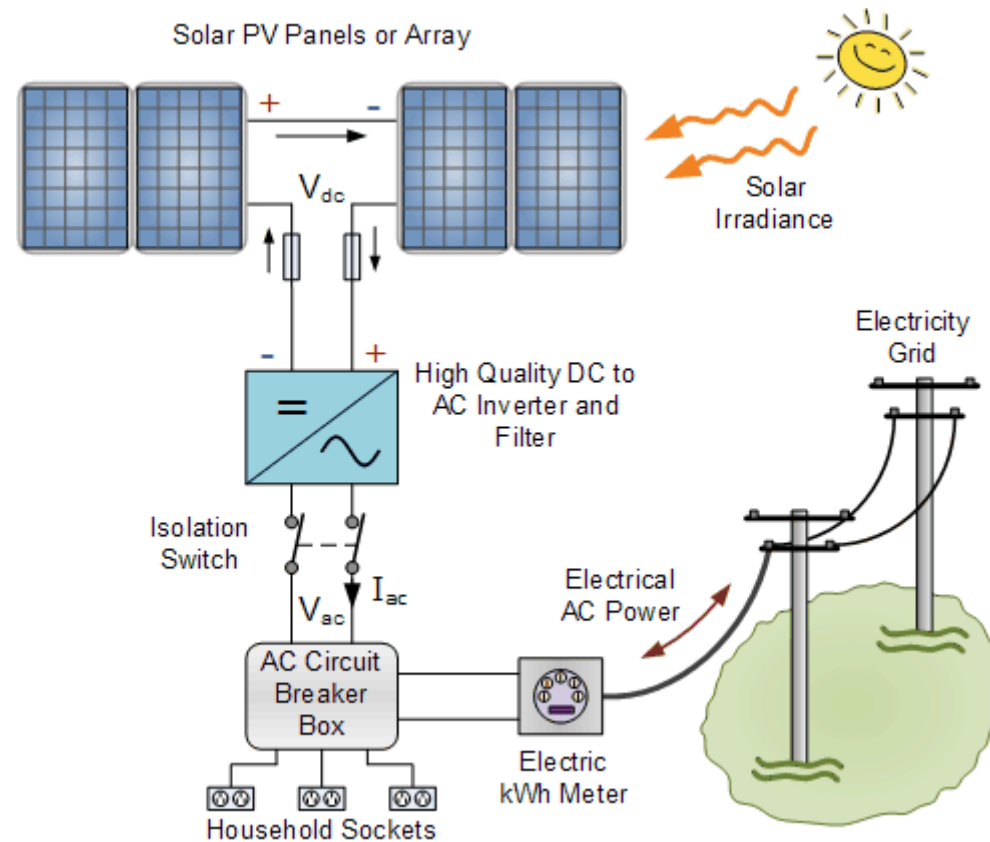
CENTRAL EÓLICA (DFIG)



Marcelo Gustavo Molina¹ and Juan Manuel Gimenez Alvarez "Technical and Regulatory Exigencies for Grid Connection of Wind Generation



CENTRAL SOLAR FOTOVOLTAICA (FV)



<http://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-power/grid-connected-pv-system.html>

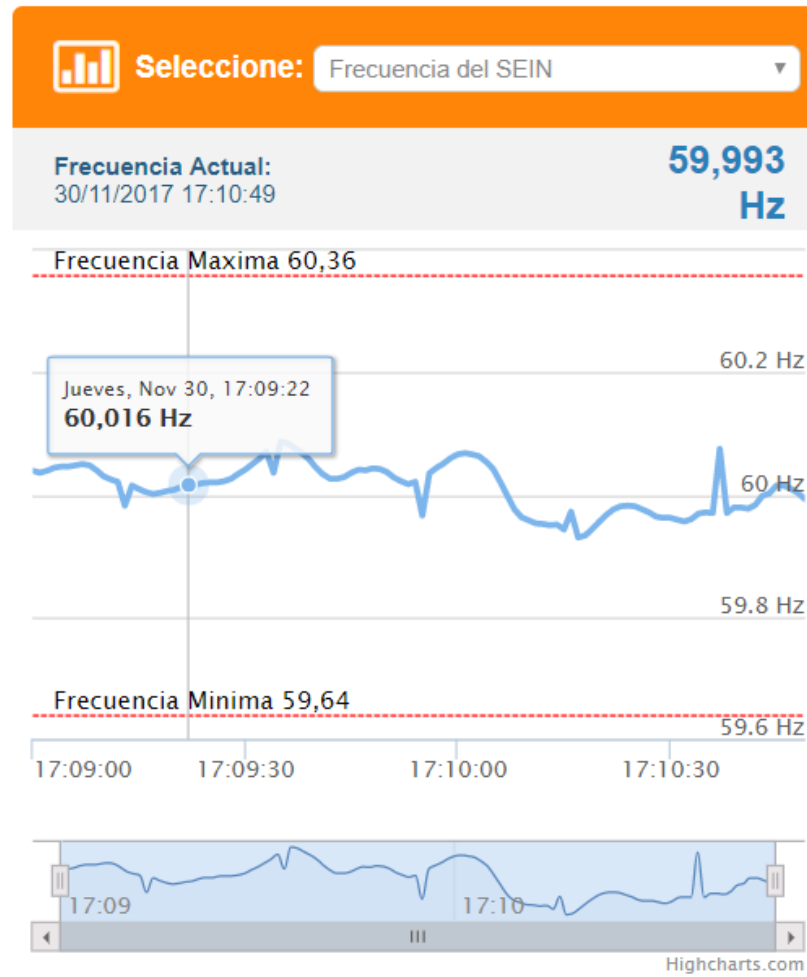


SEP EN OPERACIÓN SÍNCRONA

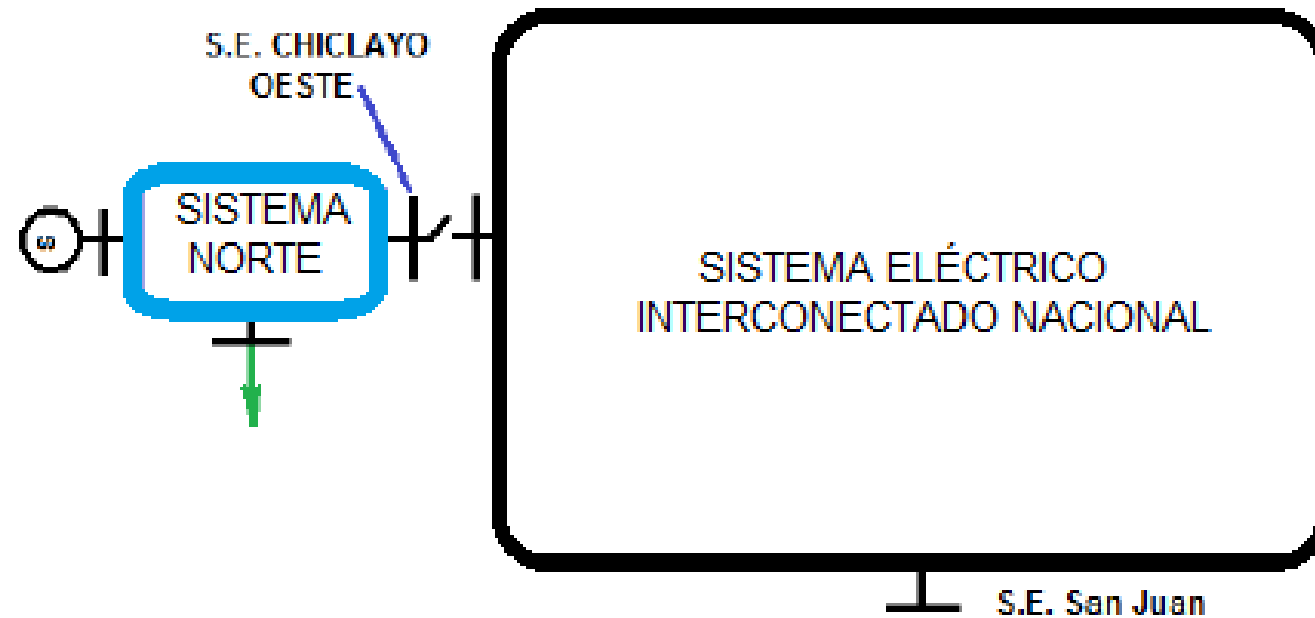
Cuando todas las máquinas síncronas (conectadas directamente a la red de alterna o mediante un transformador) están en operación síncrona con la red alterna.



FRECUENCIA EN UN SISTEMA DE POTENCIA: EJEMPLO 1



FRECUENCIA EN UN SISTEMA DE POTENCIA: EJEMPLO 2



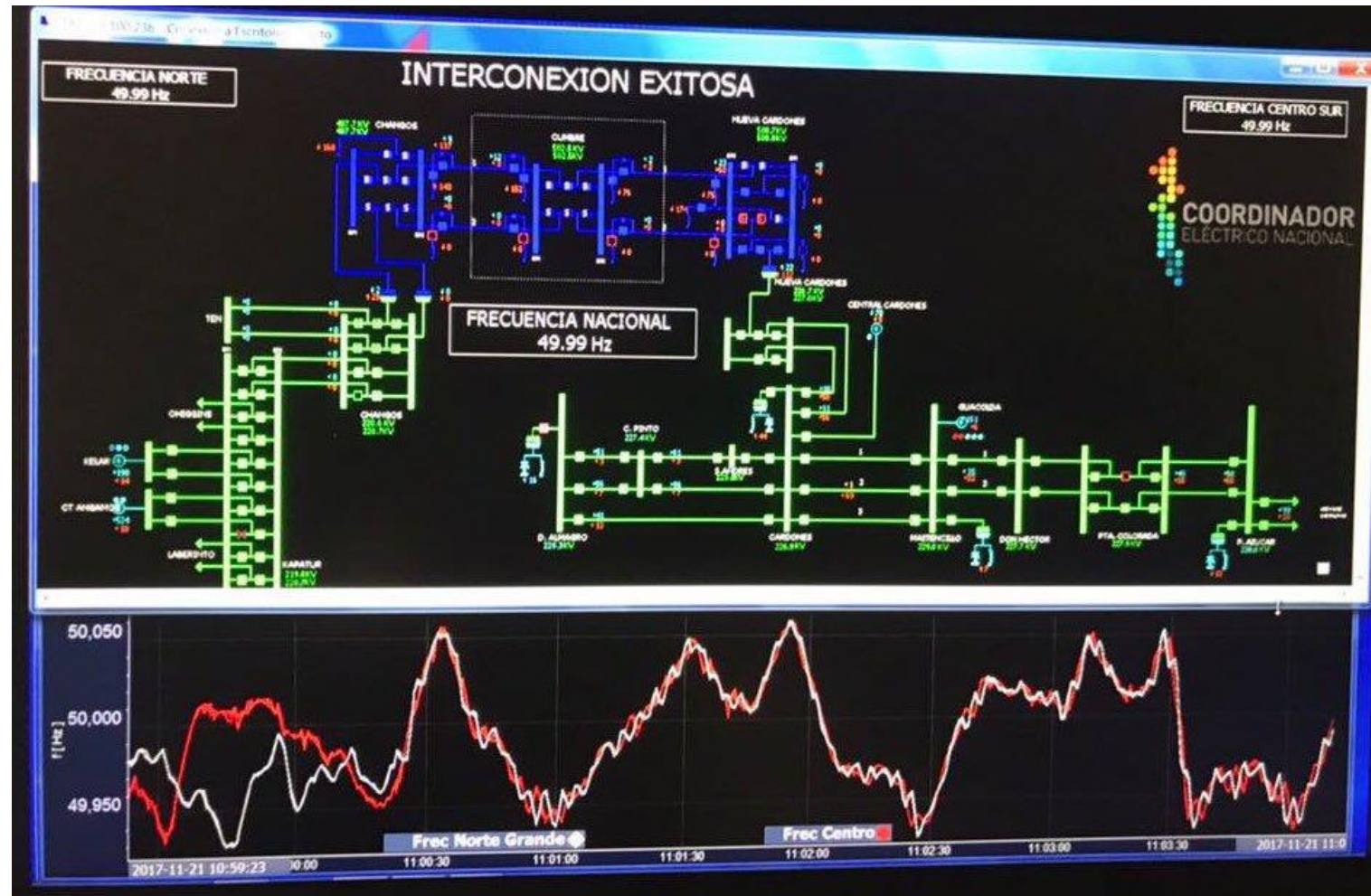
FRECUENCIA EN UN SISTEMA DE POTENCIA: EJEMPLO 2



FRECUENCIA EN UN SISTEMA DE POTENCIA: EJEMPLO 2



FRECUENCIA EN UN SISTEMA DE POTENCIA: EJEMPLO 3



PERTURBACIÓN

Es un cambio o una serie de cambios en un SEP.

Pequeñas perturbaciones

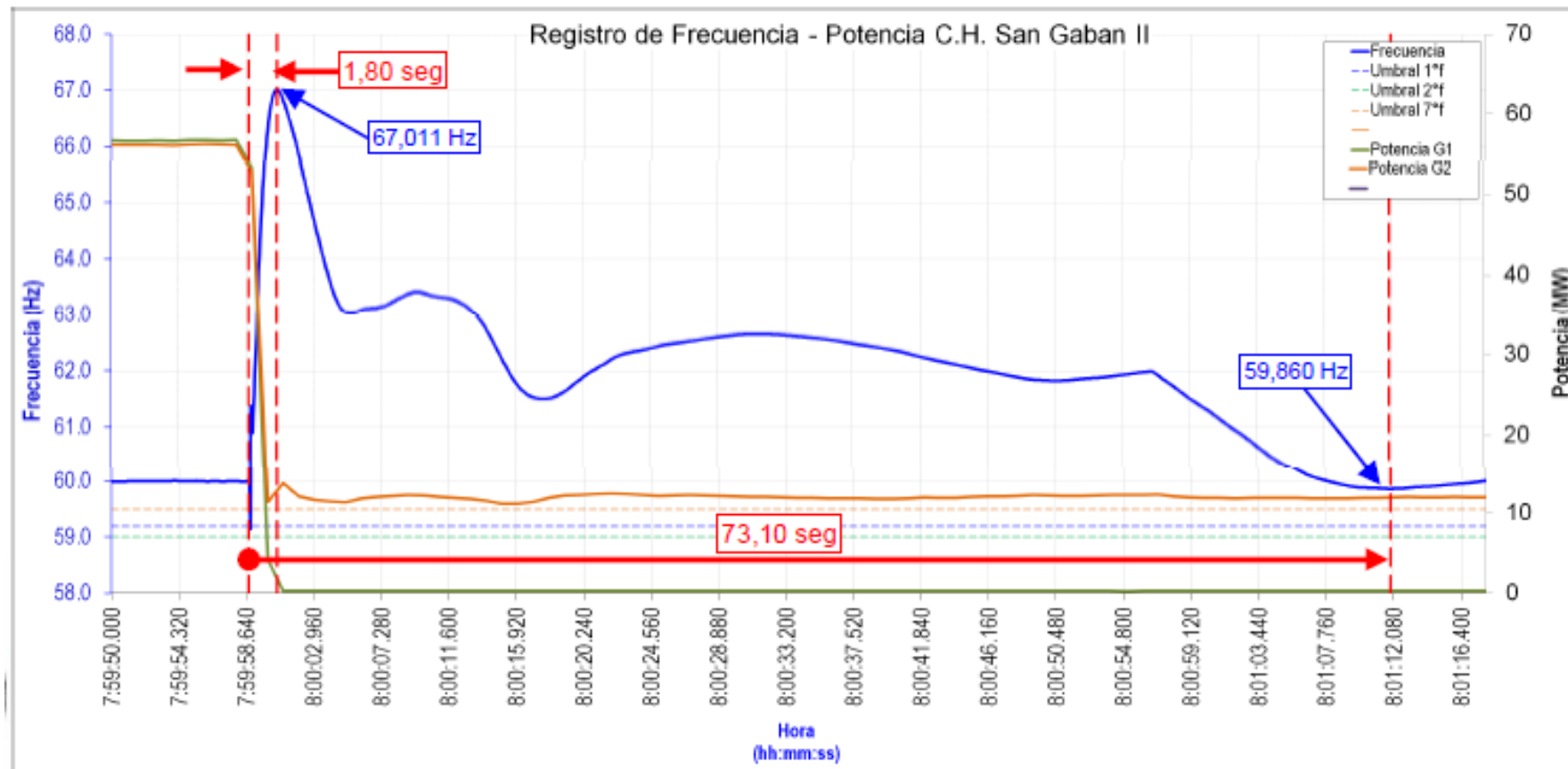
Eventos de pequeña magnitud. Por ejemplo cambios en la demanda. Es posible linealizar las ecuaciones diferenciales que describen al SEP.

Grandes perturbaciones

Eventos de gran magnitud. Cortocircuitos, desconexión de líneas, pérdidas de enlaces de interconexión, pérdidas de generación. No es posible linealizar las ecuaciones diferenciales que describen al SEP.



EVENTO: DESCONEXIÓN GRUPO G1 CH SAN GABÁN II, ACTUACIÓN EDAGSF



INFORME TÉCNICO COES/D/DO/SEV/IT-052-2017



EVENTO: DESCONEXIÓN LÍNEA L-5034, PROTECCIÓN 50BF REACTOR DE LÍNEA

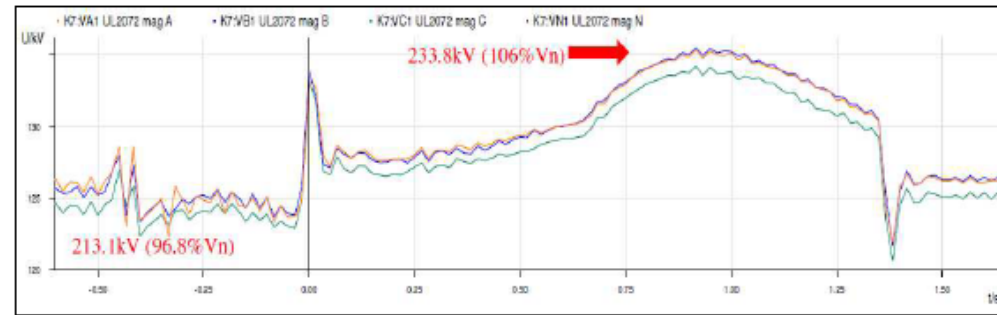


Figura 8 Registro de tensión en la S.E. San Luis 220 kV (Fuente: Cerro Verde)

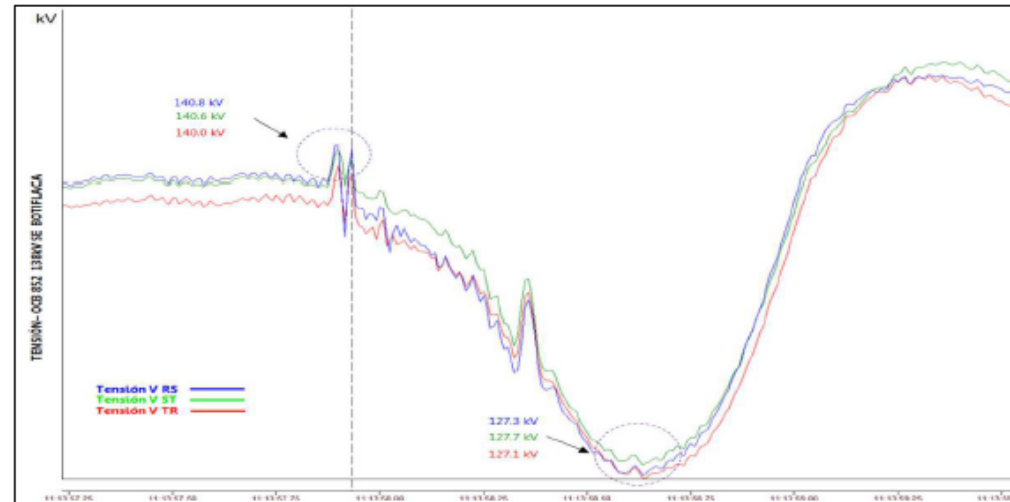


Figura 9 Registro de tensión en la S.E. Botiflaca 138 kV (Fuente: SPCC)

INFORME TÉCNICO COES/D/DO/SEV/IT-049-2017

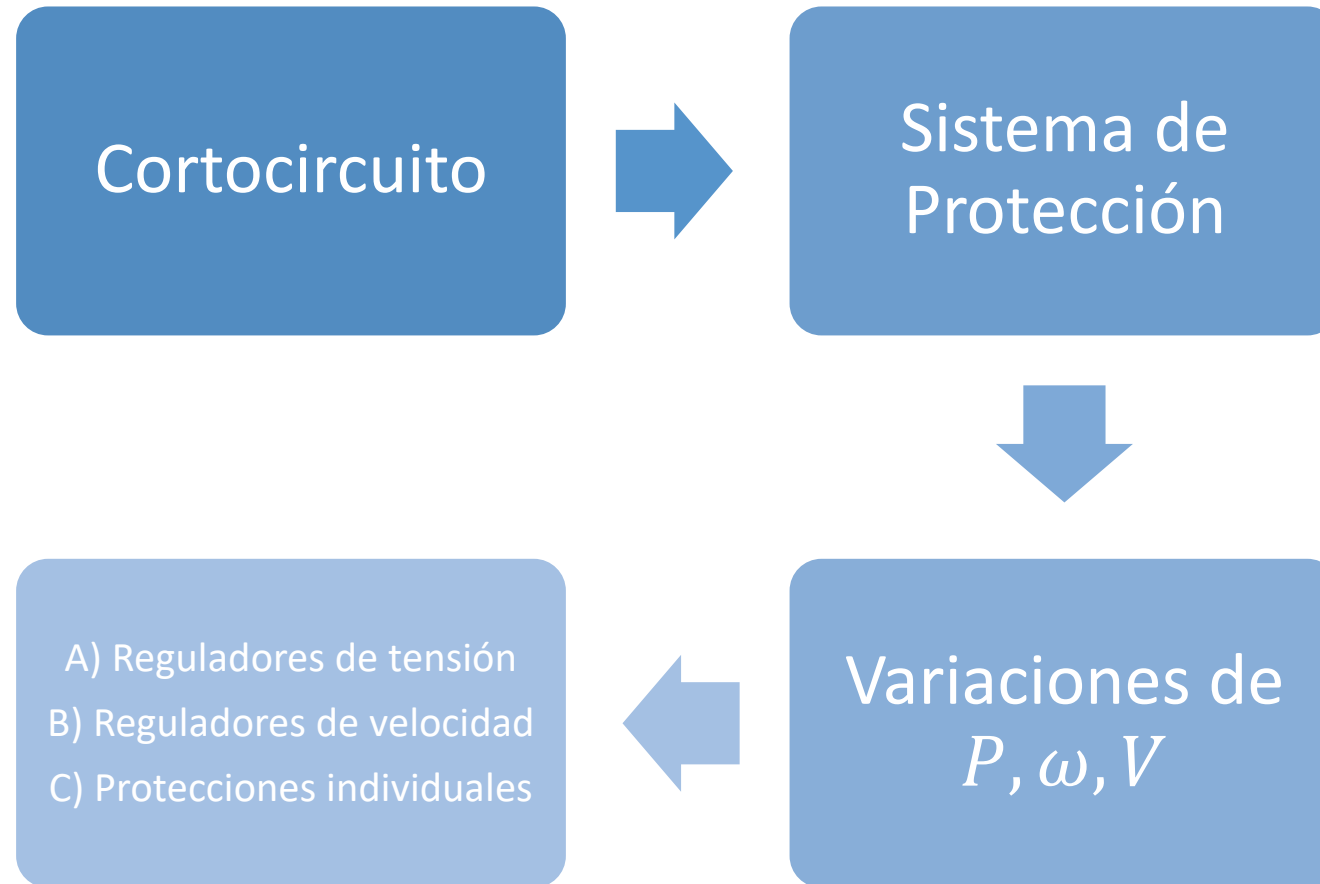


DEFINICIÓN DE ESTABILIDAD

Estabilidad de un Sistema de Potencia es la propiedad de un SEP que le permite mantenerse en una condición en equilibrio bajo condiciones de operación normal y de recuperar un aceptable estado de equilibrio después de haber sido sometido a una perturbación.



RESPUESTA DEL SISTEMA A UNA PERTURBACIÓN



RESPUESTA DEL SISTEMA A UNA PERTURBACIÓN

Variaciones de P , θ , V

Variaciones de tensión provocarán actuación de los AVR y equipos de compensación reactiva.

Variaciones de velocidad provocarán la acción de los gobernadores de las turbinas

Las variaciones de frecuencia y tensión afectarán a las cargas de acuerdo a sus características.

Las protecciones de equipos individuales pueden responder a variaciones de frecuencia y tensión.



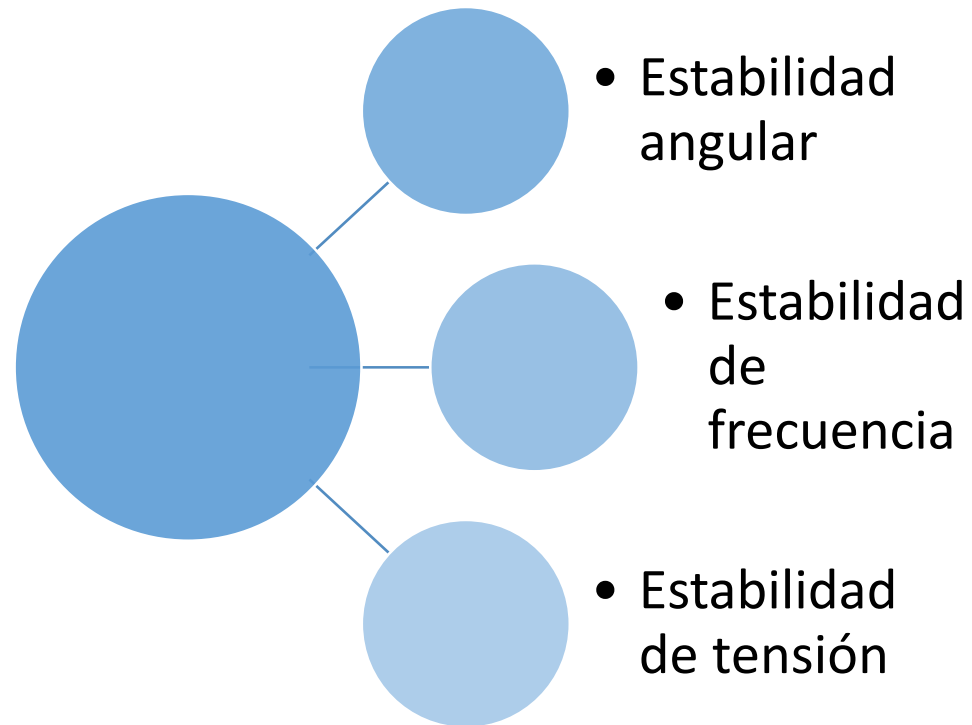
RESPUESTA DEL SISTEMA A UNA PERTURBACIÓN

Sin embargo, en cualquier situación, algunas asunciones se pueden hacer para simplificar el problema y enfocarnos solamente en los factores influenciando el tipo de problema de estabilidad.

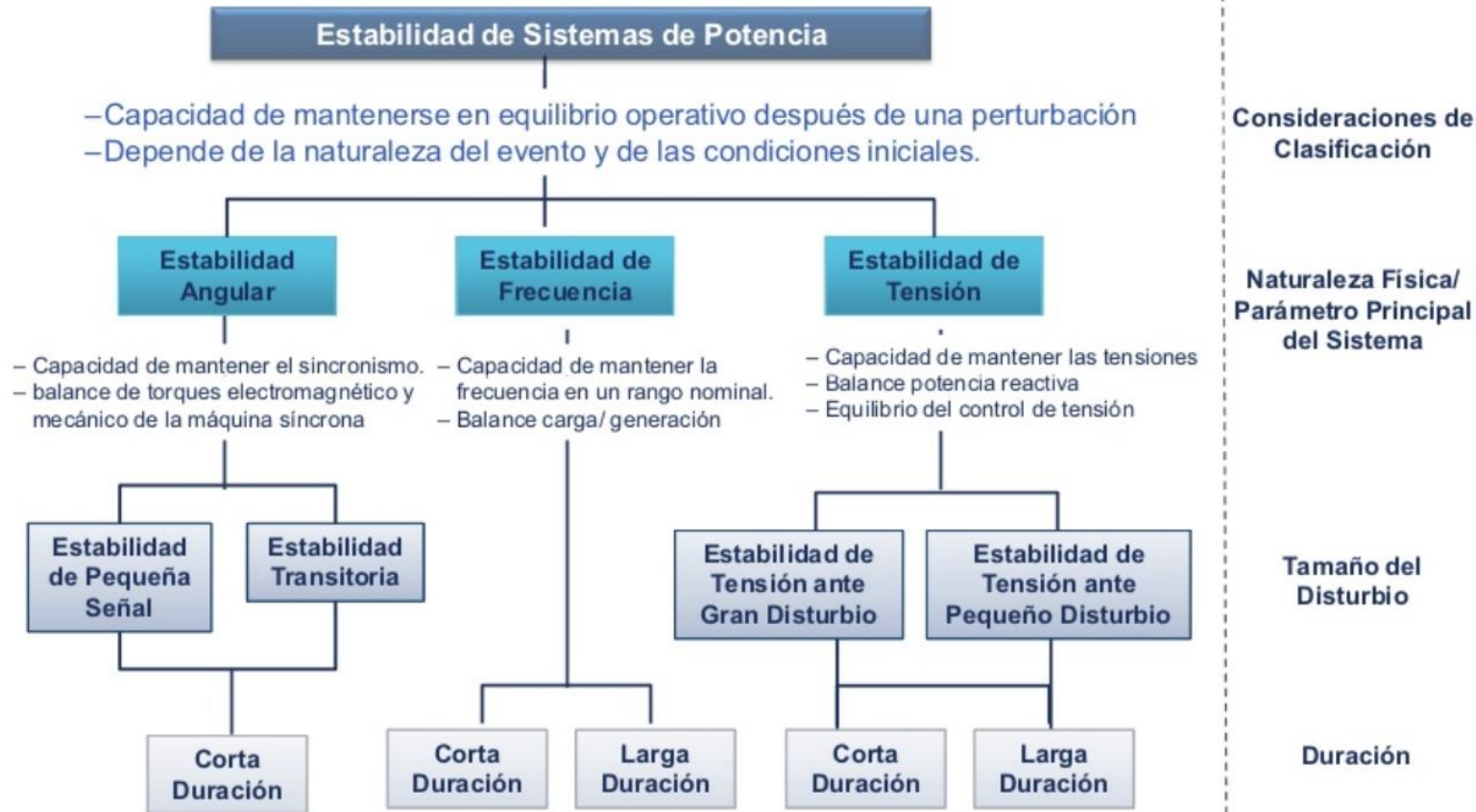


CLASIFICACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE SEP

La comprensión de los problemas de estabilidad se facilitan clasificando a la estabilidad en varias categorías.



CLASIFICACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE SEP



Análisis de Fallas en Sistemas de Transmisión, Red de Energía del Perú



ESTABILIDAD ANGULAR

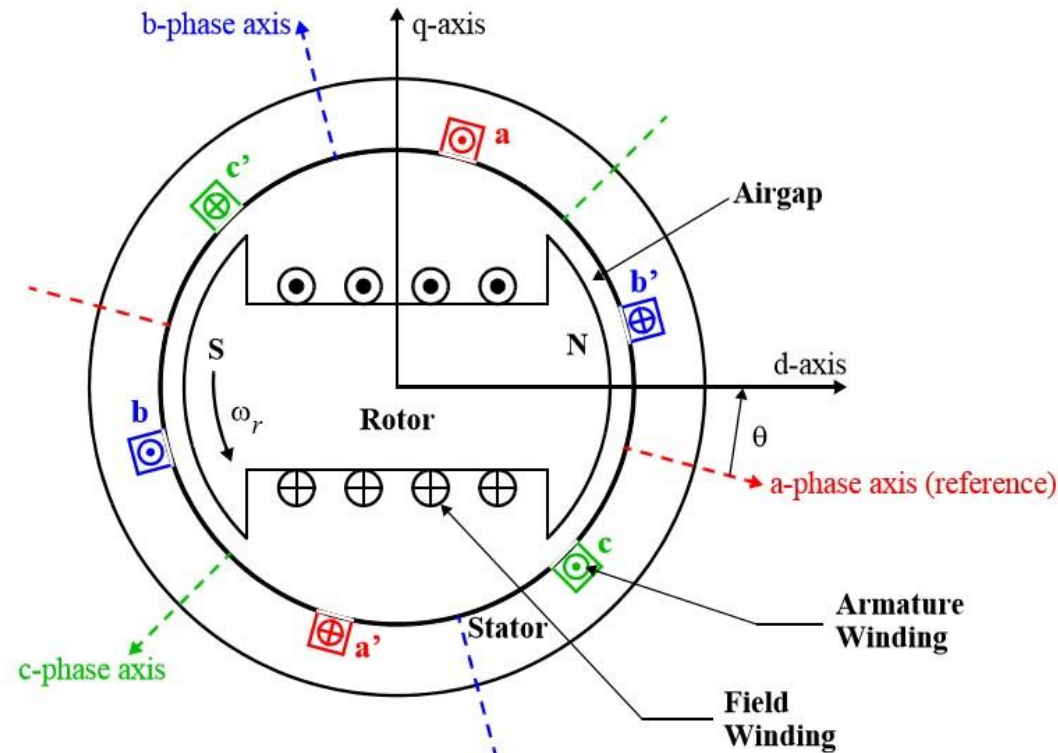
Capacidad o habilidad de las máquinas síncronas interconectadas en un sistema de potencia para mantenerse en sincronismo después de verse afectado por una perturbación.

Un factor fundamental en este problema es la forma en que las potencias de las máquinas síncronas varían a medida que su rotor oscila.



CARACTERÍSTICAS DE UNA MÁQUINA SÍNCRONA

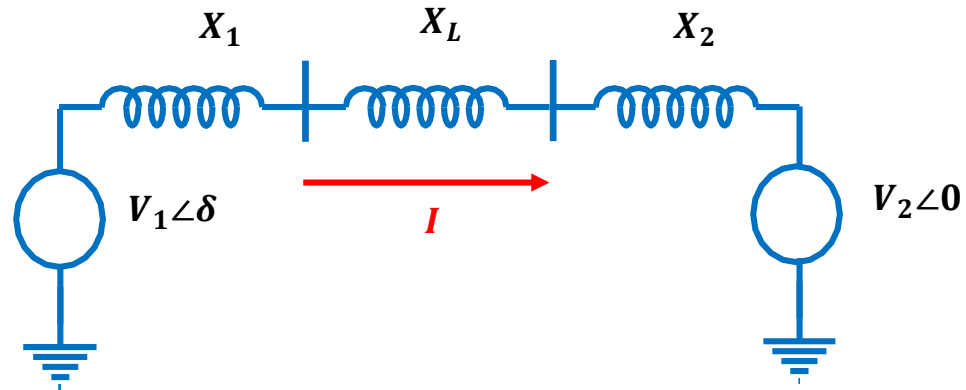
Una máquina síncrona tiene dos partes fundamentales: el rotor y el estator.



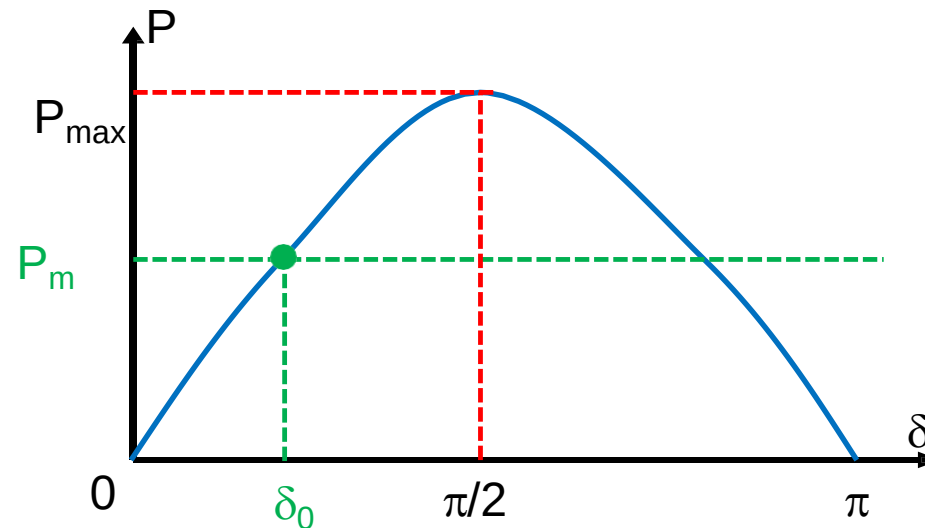
https://www.eleceng.adelaide.edu.au/students/wiki/projects/index.php/Projects:2018s1-190_Dynamical_Modelling_of_Synchronous_Machines



RELACIÓN POTENCIA - ÁNGULO



- $$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta$$



EL FENÓMENO DE ESTABILIDAD

En SEPs, el cambio de torque eléctrico en una máquina síncrona luego de una perturbación puede ser resuelta en dos componentes:

$$\Delta T_e = T_S \Delta \delta + T_D \Delta \omega$$

Donde:

$T_S \Delta \delta$ es el componente de torque en fase con la perturbación del ángulo del rotor, y es llamado componente de torque sincronizante.

$T_D \Delta \omega$ es el componente de torque en fase con la desviación de la velocidad, y es llamado componente de torque amortiguante.



ESTABILIDAD PERMANENTE

Es la habilidad del sistema de potencia de mantener el sincronismo después de verse afectado por pequeñas perturbaciones.

La inestabilidad angular suele presentarse en dos formas:

- 1) Crecimiento sostenido del ángulo del rotor por falta de torque sincronizante.
- 2) Oscilaciones con amplitudes crecientes del ángulo del rotor debido a la falta de torque amortiguante.



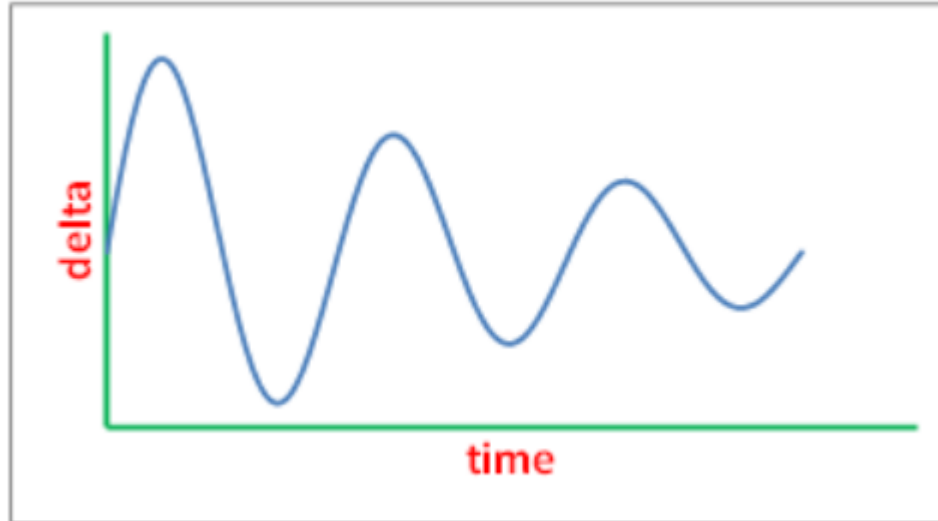
ESTABILIDAD PERMANENTE

La naturaleza de la respuesta del sistema a pequeñas perturbaciones depende de:

- Condición inicial de operación.
- Fortaleza del sistema de transmisión.
- Tipo de control de excitación de los generadores.

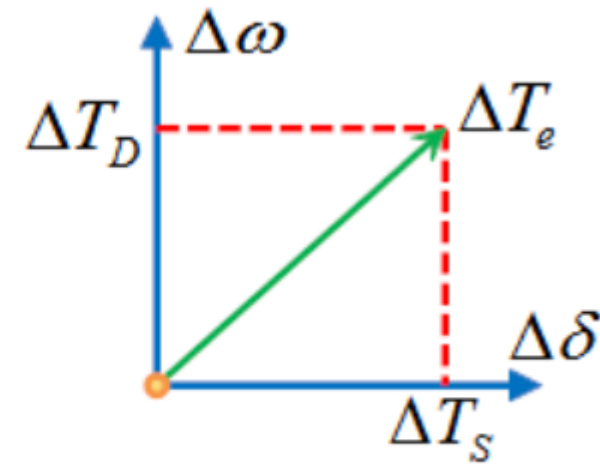


ESTABILIDAD PERMANENTE

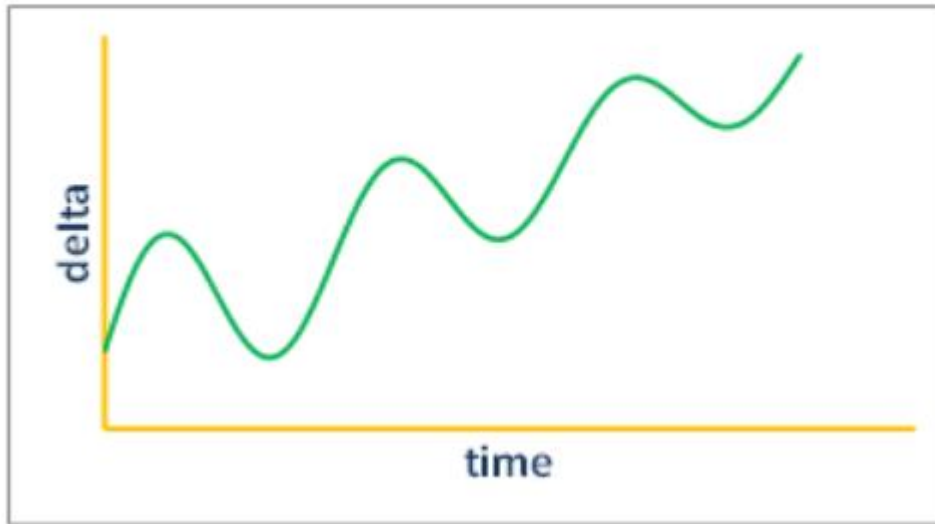


- Stable
- Positive T_S
 - Positive T_D

(a)



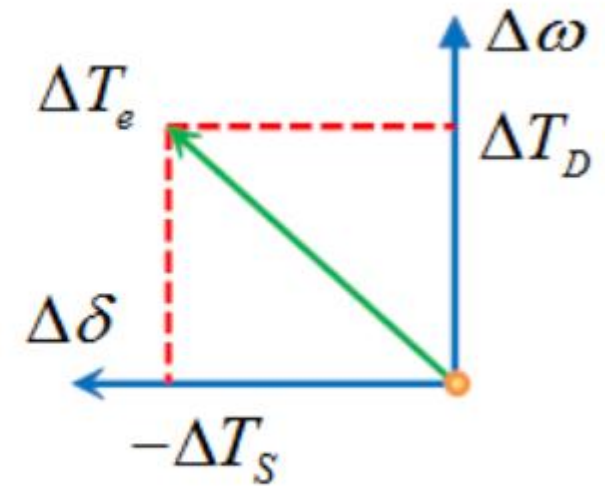
ESTABILIDAD PERMANENTE



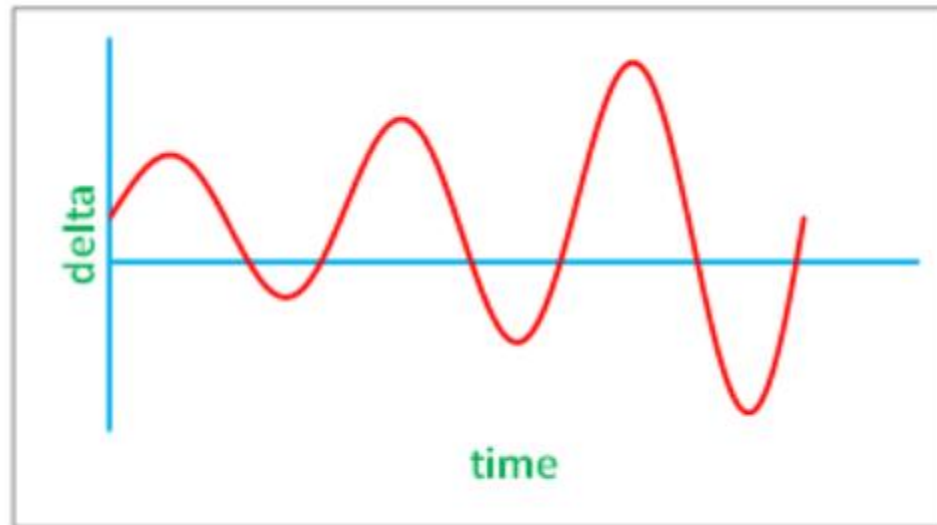
Non-oscillatory
Instability

- Negative T_S
- Positive T_D

(b)



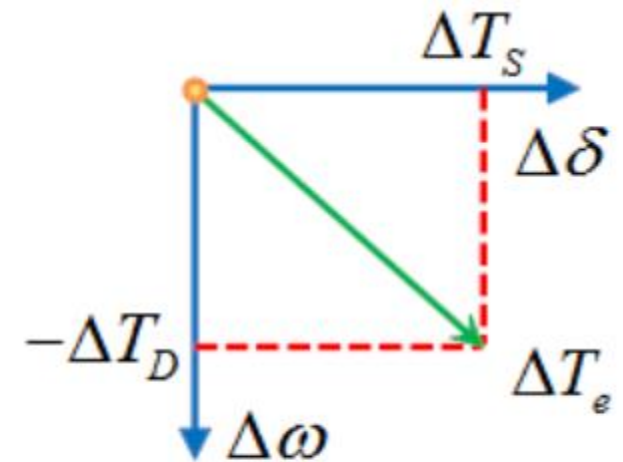
ESTABILIDAD PERMANENTE



Oscillatory Instability

- Positive T_S
- Negative T_D

(C)



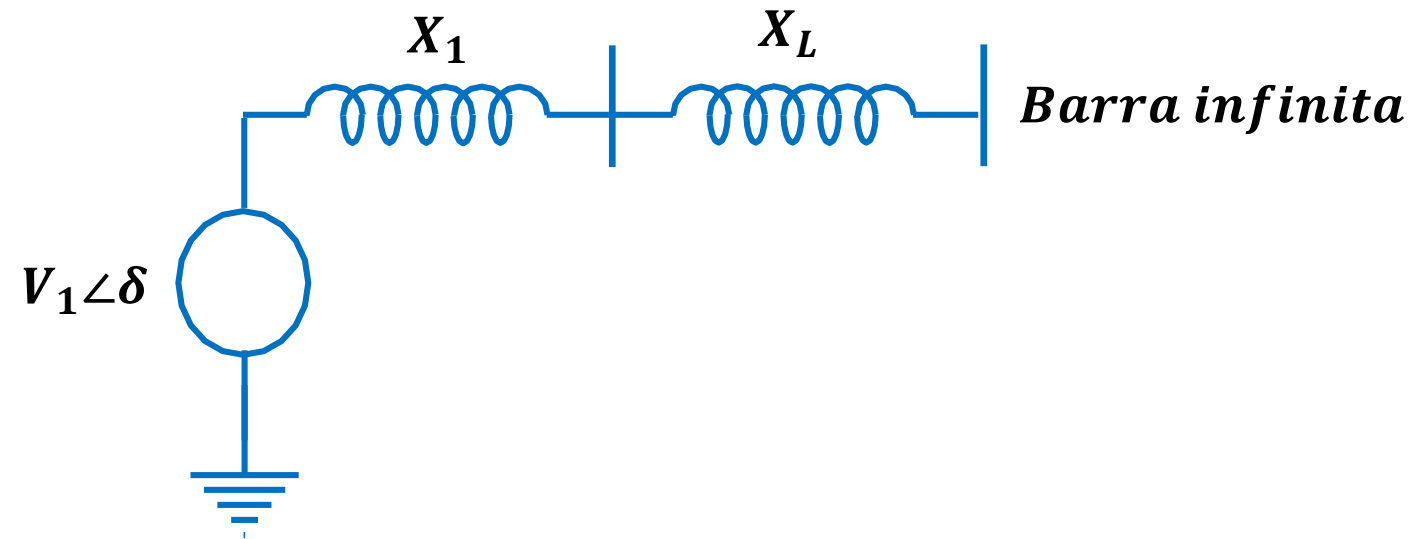
ESTABILIDAD PERMANENTE

Es de interés los siguientes tipos de oscilaciones:

- ❑ **Modos locales o modos de maquina – sistema**, son asociados con las oscilaciones de unidades en una central con respecto al resto del SEP.
- ❑ **Modos inter-área**, son asociados con las oscilaciones de muchas máquinas en una parte del sistema contra otras máquinas en otros lugares.
- ❑ **Modos de control**, son asociados con unidades de generación y otros controles. Excitadores, gobernadores, SVCs, etc mal ajustados.
- ❑ **Modos torsionales**, son asociados con los componentes rotativos del sistema de eje turbina-generador. Inestabilidad causada por compensadores serie, interacción con controladores, gobernadores.



ESTABILIDAD PERMANENTE



ESTABILIDAD PERMANENTE

Despreciando la resistencia del sistema de transmisión:

$$p\delta = w_r - w_0 \quad (a)$$

$$P_m = \frac{2H}{w_0} \frac{w_r}{w_0} p w_r + P_P + P_e \quad (b)$$

$$P_e = \frac{w_r}{w_0} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (c)$$

Las pérdidas mecánicas por fricción y ventilación pueden expresarse como:

$$P_P = K_D \frac{(w_r - w_0)}{w_0} \quad \text{Donde:} \quad K_D = \frac{k(w_0)^2}{S_B}$$



ESTABILIDAD PERMANENTE

Suponiendo que $\frac{w_r}{w_0} \cong 1$, entonces (b) y (c) se reducen a:

$$T_m = 2H p \frac{w_r}{w_0} + T_P + T_e \quad (d)$$

$$T_e = (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{E'_q V_s}{X'_d + X_E} \text{sen} \delta \quad (e)$$

Linealizando (a), (d) y (e) resulta:

$$p \Delta \delta = \Delta w_r = w_0 (\Delta \underline{w}_r)$$

$$\Delta T_m = 2H p (\Delta \underline{w}_r) + K_S \Delta \delta + \Delta T_P$$

Donde: $\Delta \underline{w}_r = \frac{w_r}{w_0}$; $K_S = \left(\frac{E'_q V_s}{X'_d + X_E} \right) \cos \delta_0$ Torque amortiguante: $\Delta T_P = K_D \Delta \underline{w}_r$



ESTABILIDAD PERMANENTE

Las ecuaciones linealizadas alrededor del punto de operación $\delta = \delta_o$ y ordenadas convenientemente resultan:

$$p \begin{bmatrix} \Delta w_r \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_D}{w_0} & -\frac{K_S}{(2H)} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta w_r \\ \Delta \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/(2H) \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m$$

Para este sistema de segundo orden, los eigenvalores resultan:

$$\lambda_{1,2} = -\zeta w_n \pm j w_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

Donde:

$$w_n = \sqrt{K_S w_0 / (2H)} \quad \text{y} \quad \zeta = K_D / (4H w_n)$$



ESTABILIDAD TRANSITORIA

Es la habilidad del sistema de potencia de mantener el sincronismo después de haber sido sometido a grandes perturbaciones.



ESTABILIDAD TRANSITORIA

La respuesta del sistema involucra grandes cambios en los ángulos del rotor y está influenciada por la relación no lineal de la característica potencia – ángulo.

- Condición inicial de operación.
- Tipo de perturbación (falla).
- Ubicación de la falla.



ESTABILIDAD TRANSITORIA

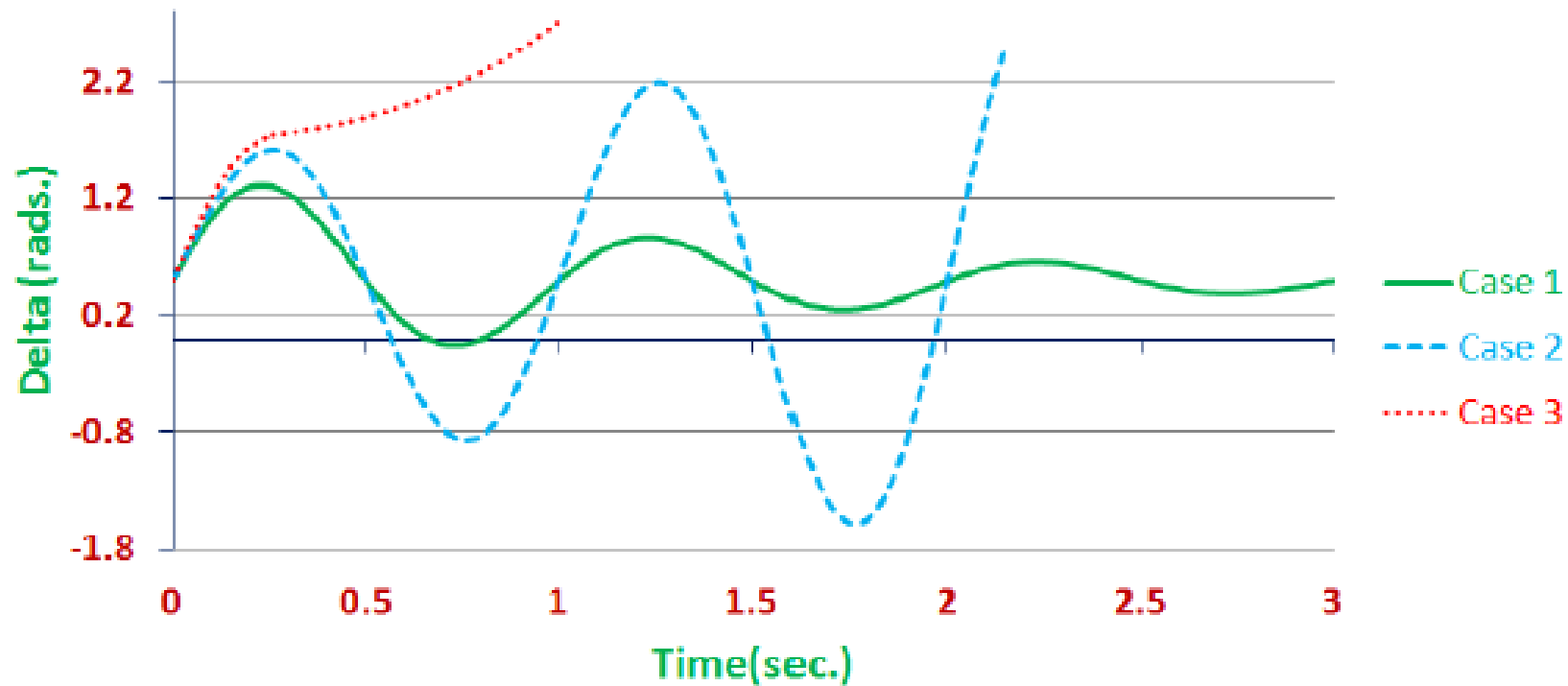
El sistema es diseñado y operado para ser estable para un cierto número de contingencias. Contingencias usualmente consideradas son cortocircuitos trifásicos, bifásicos, bifásicos a tierra, monofásicos.

Se asumen que los cortocircuitos ocurren en líneas de transmisión o cerca de barras. Y son despejados mediante la apertura de apropiados interruptores para aislar el elemento fallado.

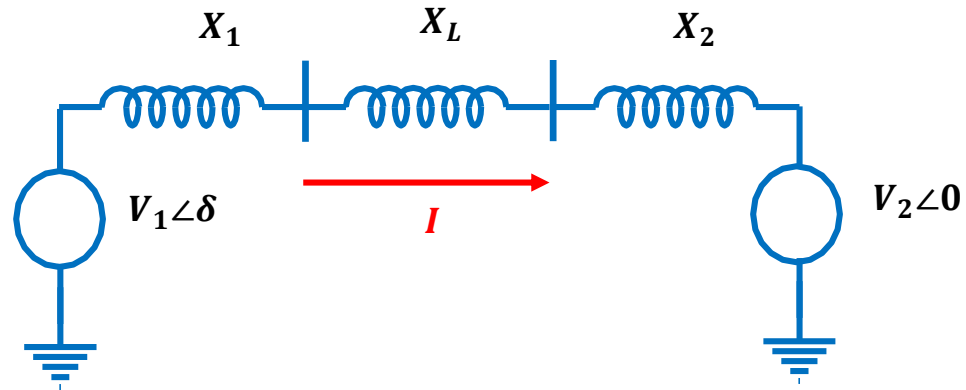
En algunos casos se utilizan operaciones de apertura y recierre monofásico.



ESTABILIDAD TRANSITORIA



ESTABILIDAD TRANSITORIA



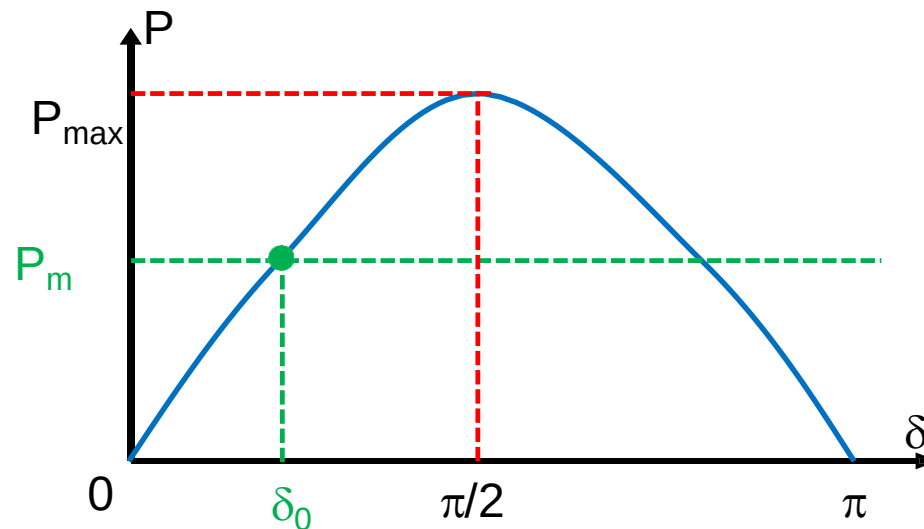
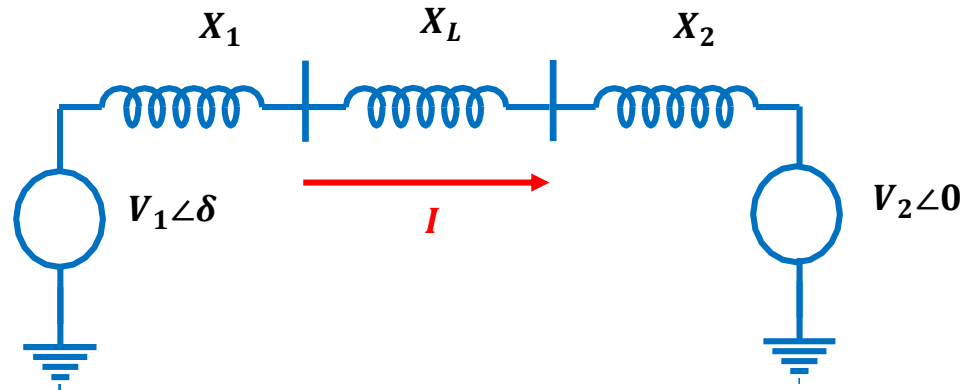
$$\bar{I} = \frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_2}{\bar{Z}} = \frac{V_1 \angle \delta - V_2 \angle 0}{\bar{Z}}$$

$$\bar{S} = \bar{P} + j\bar{Q} = \bar{V}_1 * \bar{I}^* = V_1 \angle \delta \left(\frac{V_1 \angle \delta - V_2 \angle 0}{\bar{Z}} \right)^* = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta + j \left(\frac{V_1 V_2}{X} \cos \delta - \frac{V_2^2}{X} \right)$$

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta$$



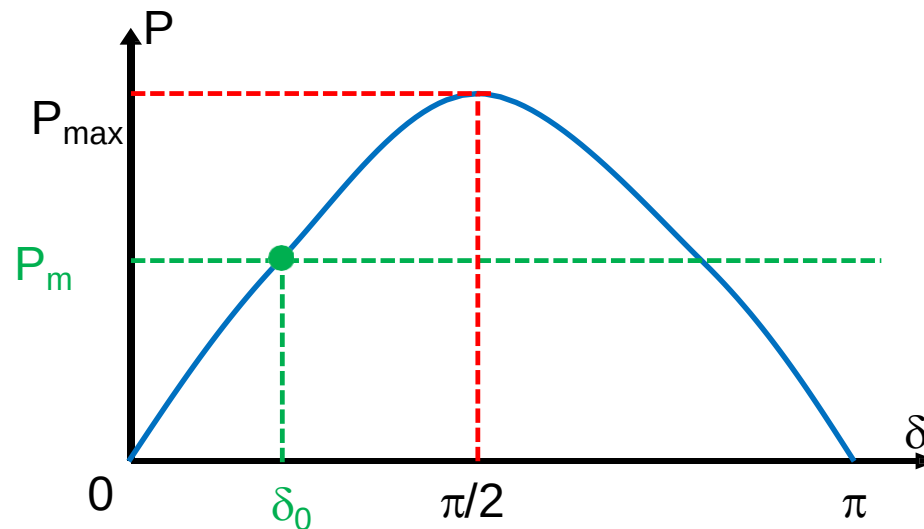
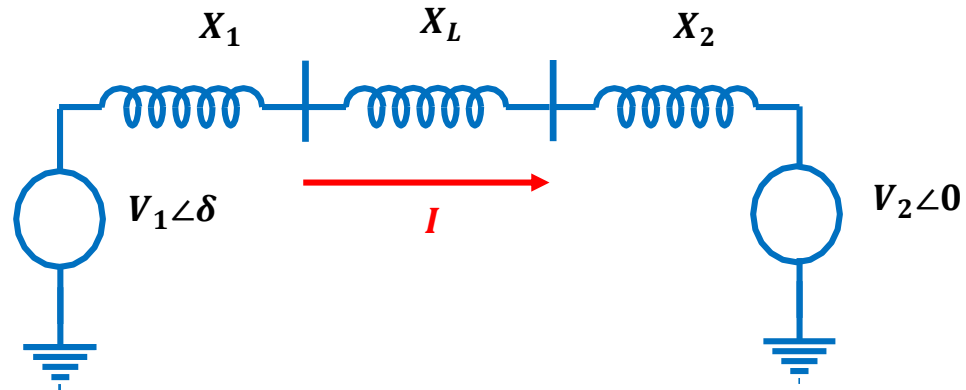
ESTABILIDAD TRANSITORIA



$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta$$



ESTABILIDAD TRANSITORIA

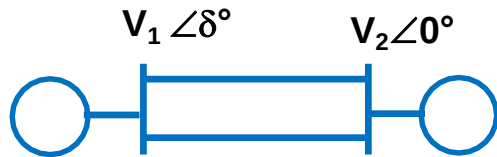


$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta$$



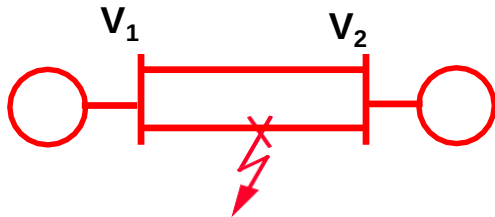
ESTABILIDAD TRANSITORIA

1) Antes de la falla



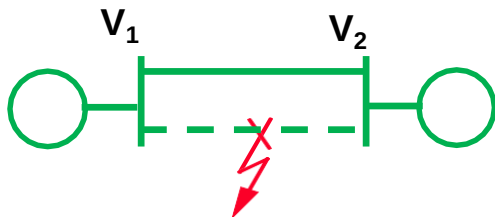
$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta$$

2) Cuando ocurre la falla

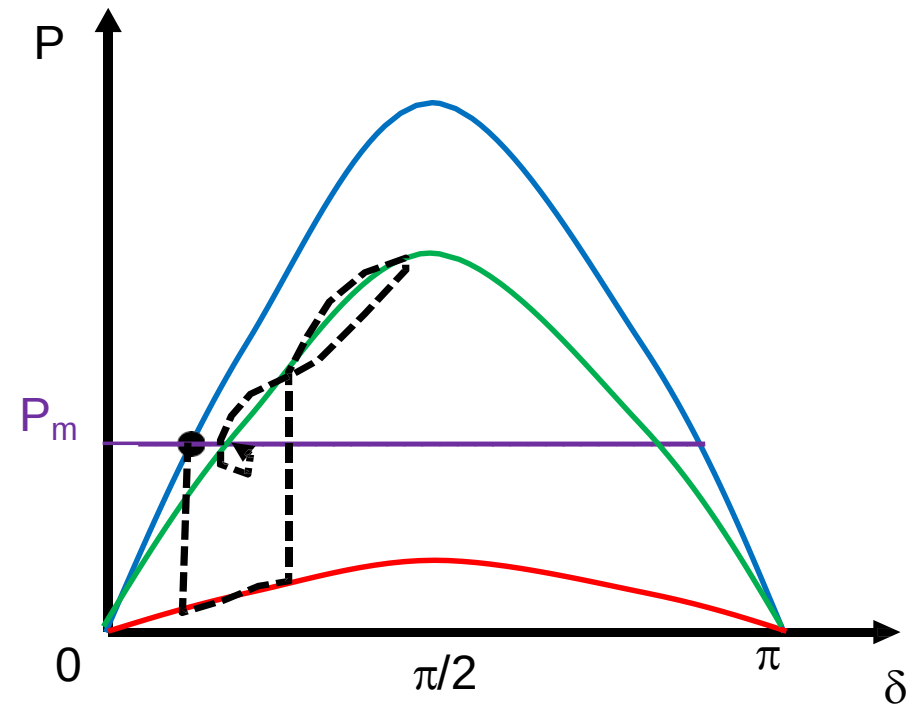


$$P = \frac{V_1 V_2}{X_f} \sin \delta$$

3) Después de la falla

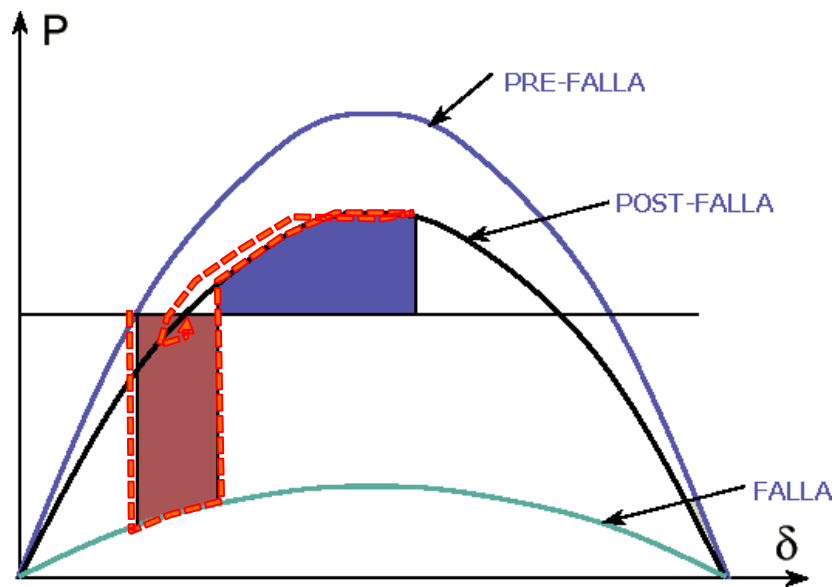


$$P = \frac{V_1 V_2}{X_p} \sin \delta$$



ESTABILIDAD TRANSITORIA

Caso estable $A1 < A2$



Caso Inestable $A1 > A2$

