



FACULTAD DE
INGENIERIA



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY

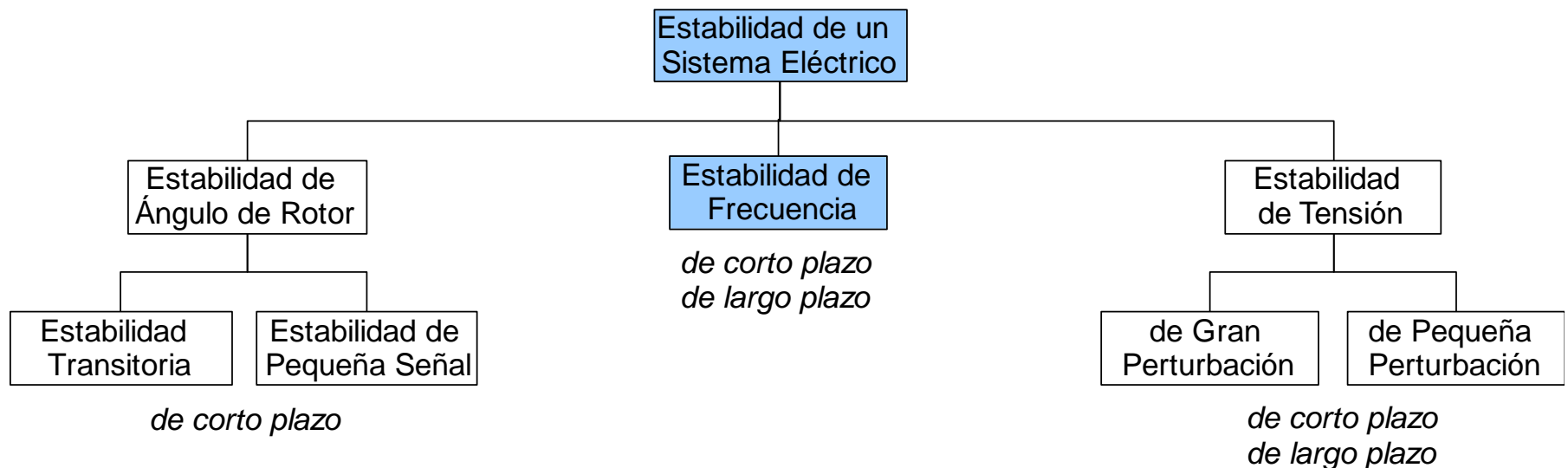
Protección Sistémica Estabilidad en Frecuencia

Curso CAPSEP

Año 2019

Estabilidad en frecuencia

Habilidad de un SEP
de restablecer la frecuencia
luego de una perturbación severa
de desbalance entre generación y carga.



Inestabilidad en frecuencia

Asociada a:

- inadecuada respuesta de los equipos
- coordinación insuficiente de controles y protecciones
- insuficiente reserva de generación

Estabilidad en frecuencia

Lograrla con mínima pérdida de carga

Pérdida de carga:

- indeseado
- pero a veces inevitable

Estabilidad en frecuencia

Fenómenos de corto plazo

(segundos o fracciones de segundos)

Tienen que ver con

- los controles de los generadores
- disparo por frecuencia

Estabilidad en frecuencia

Fenómenos de largo plazo

(decenas de segundos hasta minutos)

Tienen que ver con

- plantas motrices de los generadores (turbinas, calderas, etc.)
- reguladores de tensión

Estabilidad en frecuencia de corto plazo

Las acciones típicamente son:

- Disparos de carga por subfrecuencia (*underfrequency load shedding*)
- Disparos de generación
- Otros métodos tradicionales NO son útiles pues se requieren acciones rápidas

Acciones más modernas (electrónica de potencia):

- Acumuladores de energía (“gran UPS”) (*Energy Storage Technologies*, un tipo de recurso Distribuido DR)
- Conversores AC-DC-AC

Estabilidad en frecuencia de corto plazo

Ecuación de swing de un área A del SEP

$$\frac{2H_A}{\omega_0} \frac{d\omega_A}{dt} + \frac{K_D}{\omega_0} \omega_A = P_{mA} - P_{eA} = P_{Acelerante}$$

El andamiento de la frecuencia de un área A (inicialmente o despreciando K_D) es:

$$\frac{d\omega_A}{dt} \approx \frac{P_{mA} - P_{eA}}{M_A} \quad f = \frac{\omega}{2\pi} + f_0$$

$$\frac{df_A}{dt} \approx \frac{P_{mA} - P_{eA}}{2H_A} f_0 \Rightarrow \boxed{f_A \approx \left(1 + \frac{P_{mA} - P_{eA}}{2H_A} t \right) f_0}$$

Estabilidad en frecuencia de corto plazo

CASO 1.

$$\frac{2H_A}{\omega_0} \frac{d\omega_A}{dt} + \frac{K_D}{\omega_0} \omega_A = P_{mA} - P_{eA}$$

$$f_A \approx \left(1 + \frac{P_{mA} - P_{eA}}{2H_A} t \right) f_0$$

Si sale de servicio en forma intempestiva una unidad generadora se pierde el balance entre potencias

$$P_{mA} < P_{eA}$$

Estabilidad en frecuencia de corto plazo

CASO 1.

La frecuencia del sistema comienza a disminuir

$$f_A \approx \left(1 + \frac{P_{mA} - P_{eA}}{2H_A} t \right) f_0 \quad (P_{mA} - P_{eA} = P_{Acelerante} < 0)$$

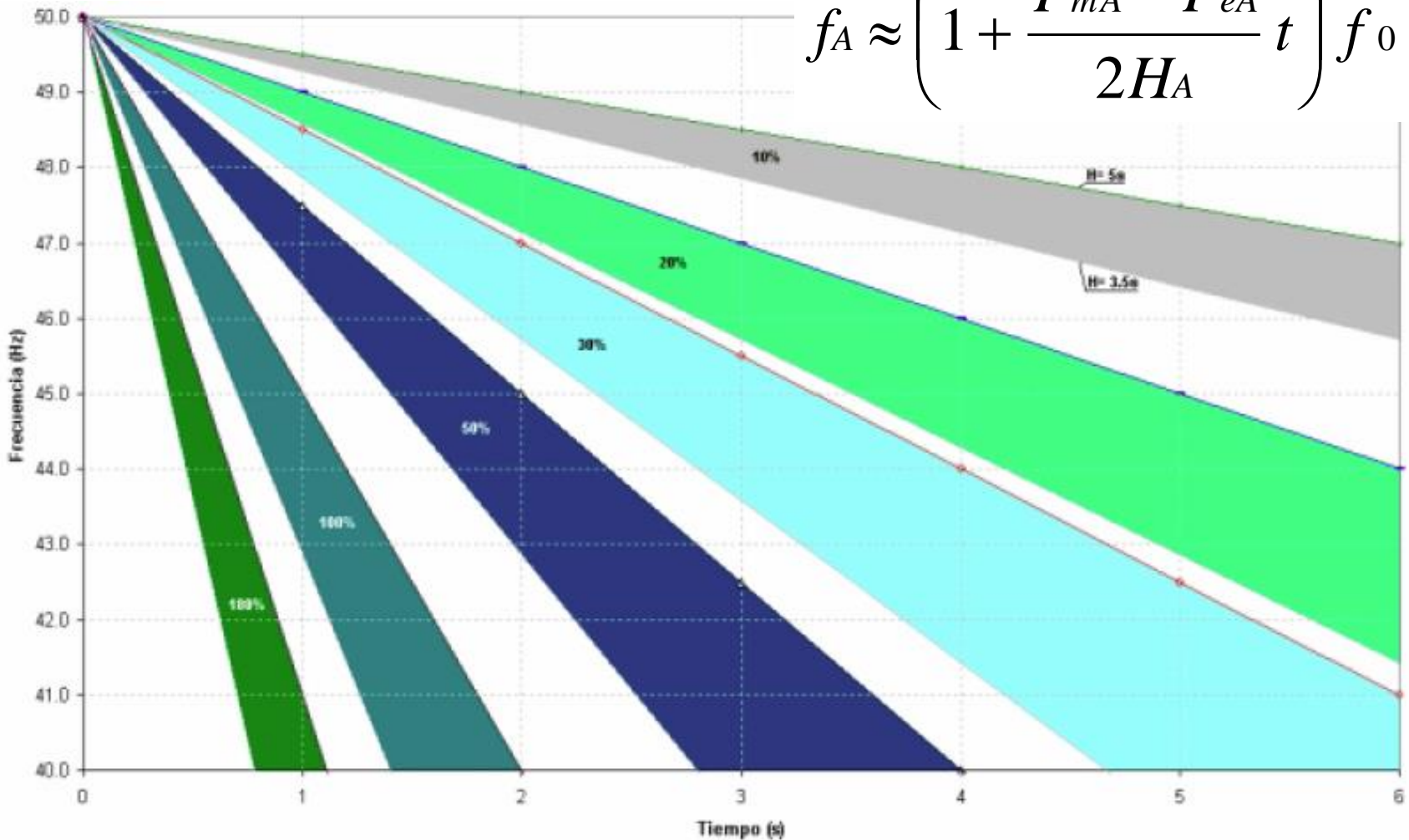
La variación de la frecuencia tiene pendiente negativa, paramétrica en:

- la inercia H_A
- la sobrecarga $P_{eA} - P_{mA}$

Estabilidad en frecuencia de corto plazo

CASO 1.

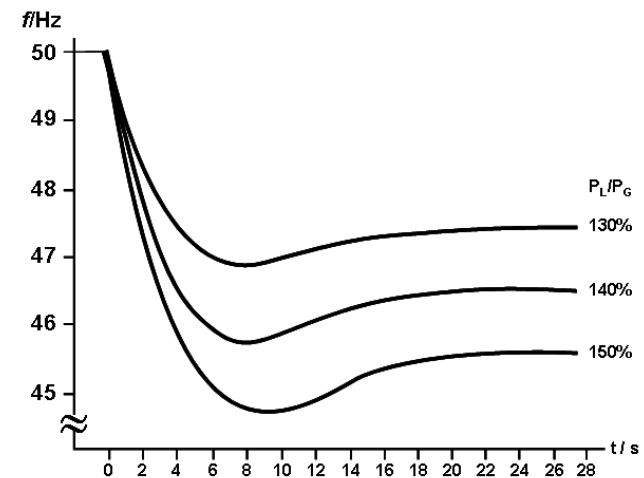
$$f_A \approx \left(1 + \frac{P_{mA} - P_{eA}}{2H_A} t \right) f_0$$



Estabilidad en frecuencia de corto plazo

Caso 1.

Un sistema con un desbalance entre generación y carga, si no pierde estabilidad llega a una frecuencia mínima y posteriormente recupera una frecuencia estable.

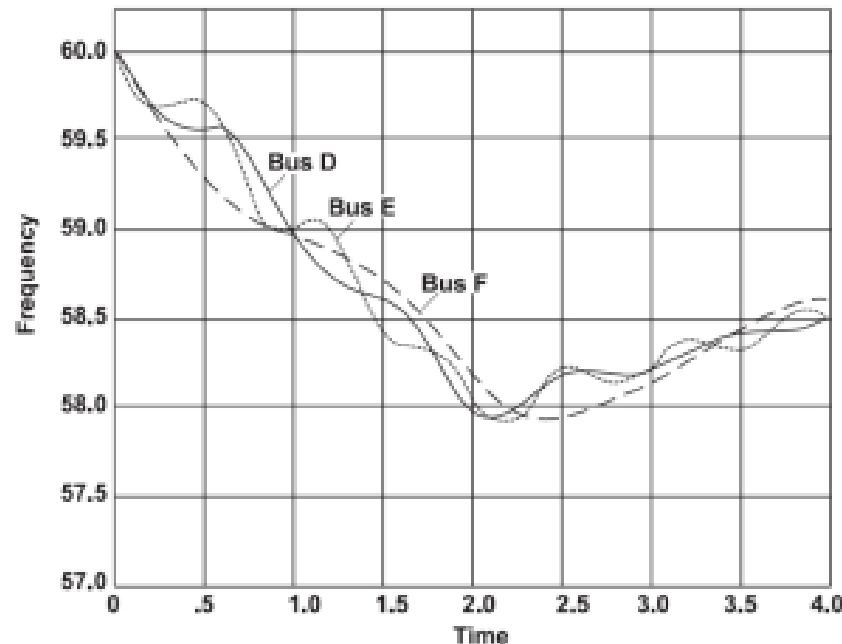


Frequency behaviour depends on P_L/P_G
 P_L = load
 P_G = generation

Estabilidad en frecuencia de corto plazo

CASO 1.

La frecuencia no es única en todo el sistema



$$f_{bus}(t) = f_{nom} + \left(\frac{df}{dt}, sys. avg. \right) t + (A \cdot \sin(2\pi f_a t + \alpha) + B \cdot \sin(2\pi f_b t + \beta) + \dots)$$

por ej. f_a , f_b , etc. entre 0,2 y 5 Hz

Estabilidad en frecuencia de corto plazo

CASO 2.

$$\frac{2H_A}{\omega_0} \frac{d\omega_A}{dt} + \frac{K_D}{\omega_0} \omega_A = P_{mA} - P_{eA}$$

$$f_A \approx \left(1 + \frac{P_{mA} - P_{eA}}{2H_A} t \right) f_0$$

Si sale de servicio en forma intempestiva una carga

se pierde el balance entre potencias

$$P_{mA} > P_{eA}$$

Estabilidad en frecuencia de corto plazo

CASO 2.

La frecuencia del sistema comienza a aumentar

$$f_A \approx \left(1 + \frac{P_{mA} - P_{eA}}{2H_A} t \right) f_0 \quad (P_{mA} - P_{eA} = P_{Acelerante} > 0)$$

La variación de la frecuencia tiene pendiente positiva, paramétrica en:

- la inercia H_A
- la sobre-generación $P_{mA} - P_{eA}$

Protección de frecuencia del SEP

Si se desconecta intempestivamente importante generación en un SEP, la frecuencia del SEP comienza a disminuir (por desbalance de potencias).

$$P_{mA} < P_{eA} \quad f_A \approx \left(1 + \frac{P_{mA} - P_{eA}}{2H_A} t \right) f_0$$

Si por esta razón salen de servicio otros generadores, disparados por sus relés de subfrecuencia, la situación empeora (más desbalance de potencias).

⇒ Coordinar con Protección de frecuencia de los generadores.

Protección de frecuencia del SEP

La principal protección sistémica (WAP o SPS), ante salidas intempestivas de generadores son:

- Esquemas de disparo de carga por subfrecuencia (*underfrequency load shedding*) para recobrar el balance de potencias (y la estabilidad en frecuencia)

$$\frac{2H_A}{\omega_0} \frac{d\omega_A}{dt} + \frac{K_D}{\omega_0} \omega_A = P_{mA} - P_{eA}$$

Protección de frecuencia del SEP

Disparo de carga por subfrecuencia.

- Disparar carga en la cantidad mínima necesaria y no más.
 - Disparo insuficiente
no evitará que la caída de la frecuencia continúe
 - Disparo excesivo
producirá cortes innecesarios a ciertas cargas

$$\frac{2H_A}{\omega_0} \frac{d\omega_A}{dt} + \frac{K_D}{\omega_0} \omega_A = P_{mA} - P_{eA}$$

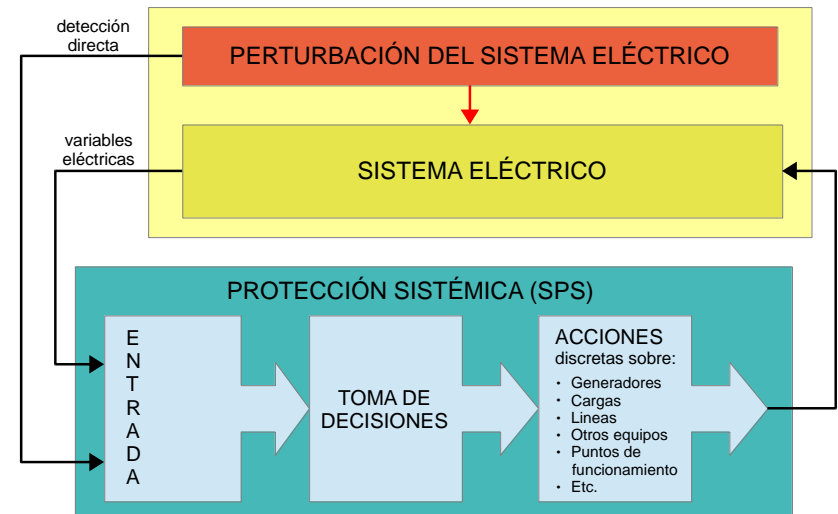
Protección de frecuencia del SEP

Para disparar carga

En forma clásica se usan relés de protección en distintos puntos (SSEE) del SEP

Principios de operación para detección de subfrecuencia:

- nivel o frecuencia absoluta ($f <$), o
- derivada o pendiente de la frecuencia ($df/dt <$)



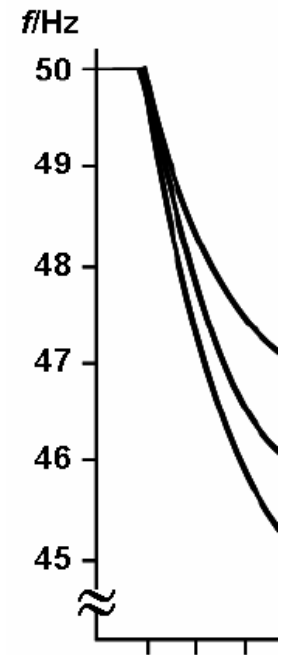
Protección de frecuencia del SEP

Protección por subfrecuencia ($f <$)

- Puede ser temporizada o instantánea
- La frecuencia debe haber descendido hasta el umbral ajustado $f = f_{aj}$ (se detecta ya avanzado el fenómeno)

Protección por derivada de frecuencia ($df/dt <$)

- Puede ser temporizada o instantánea
- Se detecta en etapas tempranas del fenómeno



Estabilidad en frecuencia

Carga > Generación \Rightarrow subfrecuencia

- Subfrecuencia es crítica en turbinas de vapor.
- Si las protecciones de subfrecuencia del generador lo sacan de servicio, el déficit de generación es mayor y el problema empeora.
- La subfrecuencia puede disminuir el rendimiento de servicios auxiliares de generadores (ventiladores, bombas) y hacer que los generadores también salgan de servicio.

Generación > Carga \Rightarrow sobrefrecuencia

- La sobrefrecuencia no es tan crítica para el sistema, en el sentido de que si un generador sale de servicio por su protección de sobrefrecuencia, la generación total disminuye.
- Pero si esa disminución de generación es demasiado grande (salida de varios generadores), puede ocurrir que Carga > Generación \Rightarrow subfrecuencia.

Estabilidad en frecuencia

Acciones posibles

- *Load shedding*. Coordinado con las funciones $f <$ de los generadores
- Disparo de líneas de interconexión ($f <$)
- Arranque de generadores hidráulicos si la frecuencia cae un poco
- Pasar los generadores hidráulicos de modo compensador a generador
- Formar islas “locales” para los generadores térmicos (preservarlos en servicio).
- Disparo de generadores hidráulicos ante $f >$ (*generator rejection*), para evitar la salida de generadores térmicos (preservarlos en servicio).
- Conexión de carga si hay *overshot* (sobrefrecuencia) luego de las acciones por una subfrecuencia.
- Acciones más modernas (usando electrónica de potencia) para inyectar potencia activa adicional:
 - Conectar acumuladores de energía (“gran UPS”) (Energy Storage Technologies, DR).
 - Mediante Conversores AC-DC-AC.