



# **EL 57A SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA**

## **Clase 25: Control de Carga Frecuencia: Control Primario de Frecuencia (CPF)**

**Luis Vargas  
AREA DE ENERGIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA**



# Contenido (VII)

## 8. Control de frecuencia-carga

8.1 Introducción

8.2 Control Primario de Frecuencia CPF

8.3 Equipo BESS



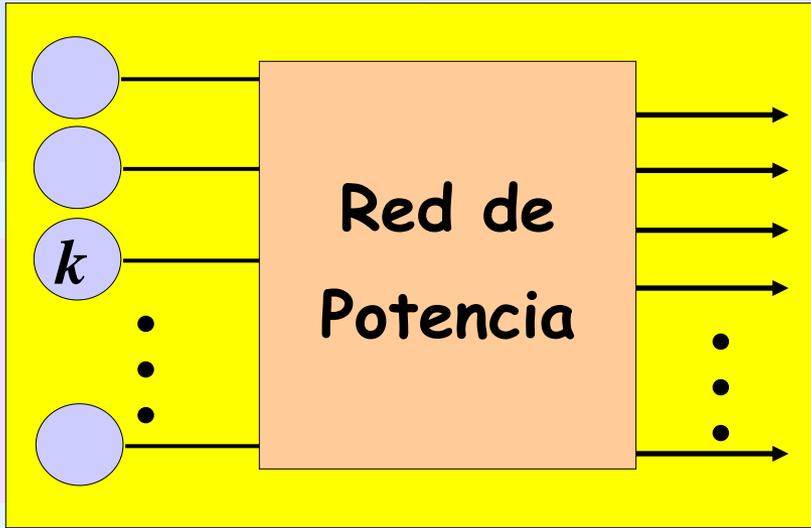
# Introducción (I)

## Definición del Problema

En general, la frecuencia de la tensión generada aumenta cuando disminuye la carga y vice versa --> la caída brusca de la carga del sistema tiende a aumentar la velocidad de los generadores y por ello aumenta la frecuencia. Debido a que la carga varía a través del tiempo, se tiene que la frecuencia también lo hace, pese a todos los sistemas de control existentes.

$$\frac{2H_k}{\omega_s} \frac{d^2 \delta_k}{dt^2} = P_{mk(pu)} - P_{ek(pu)}$$

$$\frac{2H_k}{\omega_s} \frac{d^2 \Delta \delta_k}{dt^2} = \Delta P_{mk(pu)} - \Delta P_{ek(pu)}$$



Sistema Interconectado SI

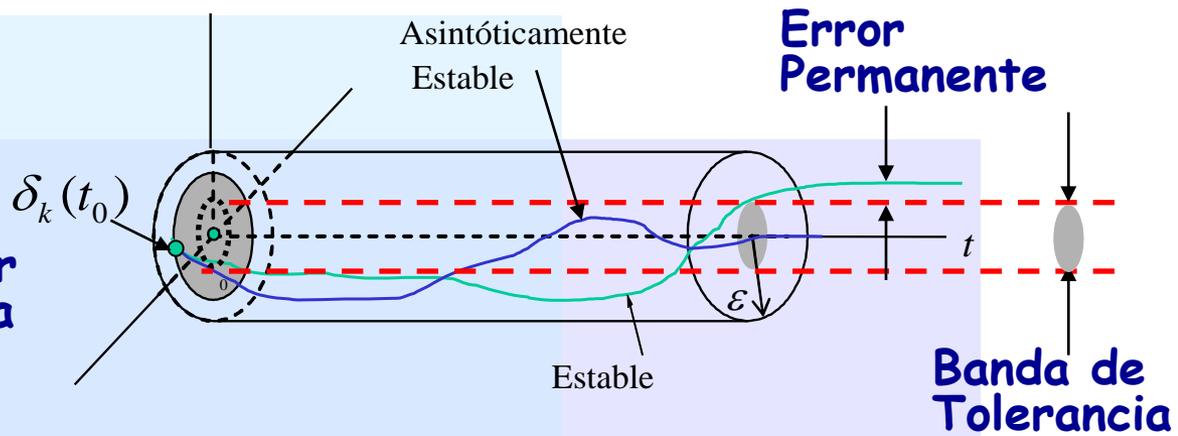


# Introducción (I)

## Definición del Problema

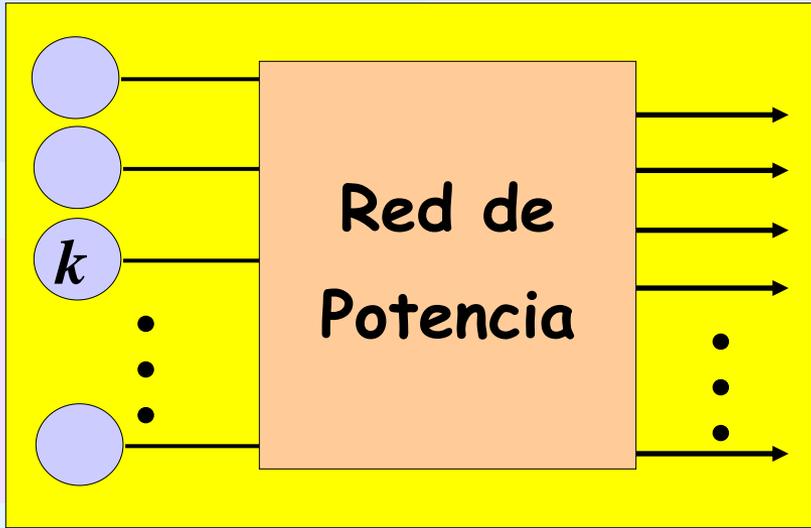
Supondremos que luego de cualquier perturbación el sistema es estable.

El problema consiste en lograr que la frecuencia vuelva a una vecindad del valor nominal (Banda de Tolerancia)



$$\frac{2H_k}{\omega_s} \frac{d^2 \delta_k}{dt^2} = P_{mk(pu)} - P_{ek(pu)}$$

$$\frac{2H_k}{\omega_s} \frac{d^2 \Delta \delta_k}{dt^2} = \Delta P_{mk(pu)} - \Delta P_{ek(pu)}$$



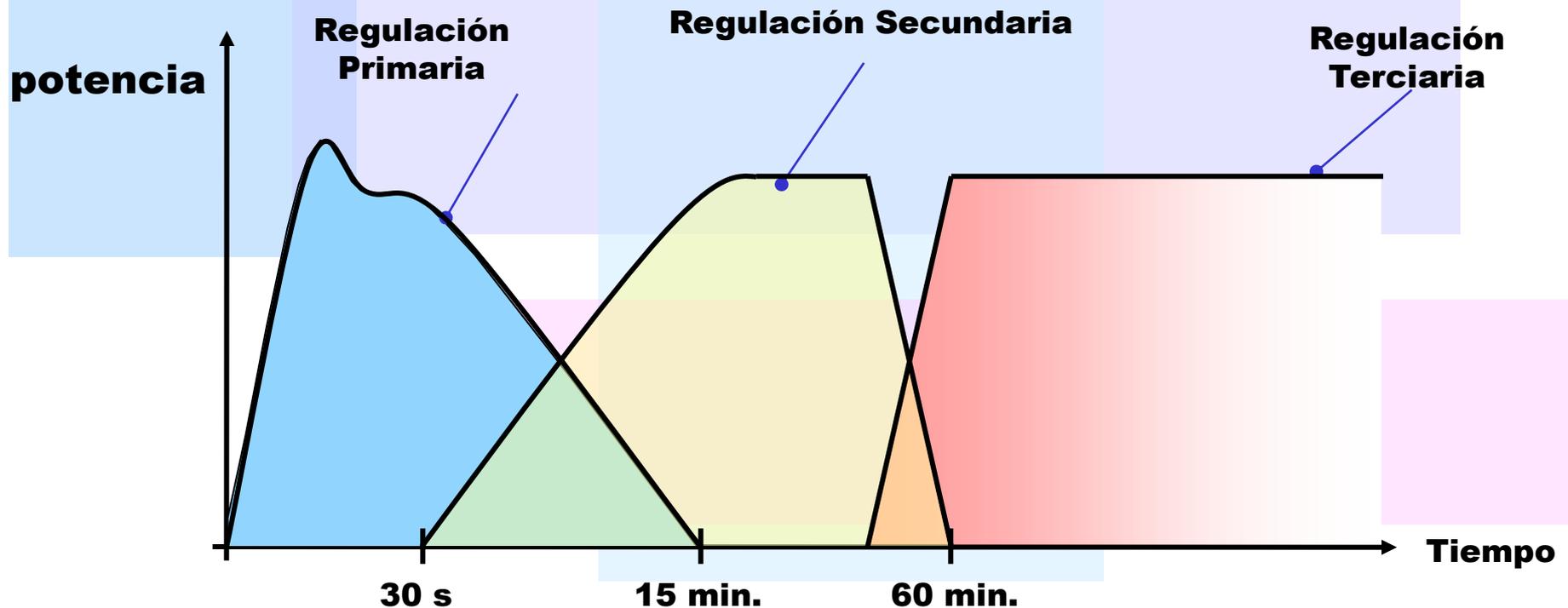
Sistema Interconectado SI



# Introducción (II)

## Etapas en el proceso de Control/Regulación de Frecuencia

- Regulación Primaria (ejem. 30 seg) Existencia de reserva en giro.  
(acción de reguladores de velocidad (válvulas, álabes, deflectores, etc. ))
- Regulación Secundaria (ejem. 15 min)
- Regulación Terciaria





## Introducción (III)

### Características de Etapas del Control/Regulación de Frecuencia

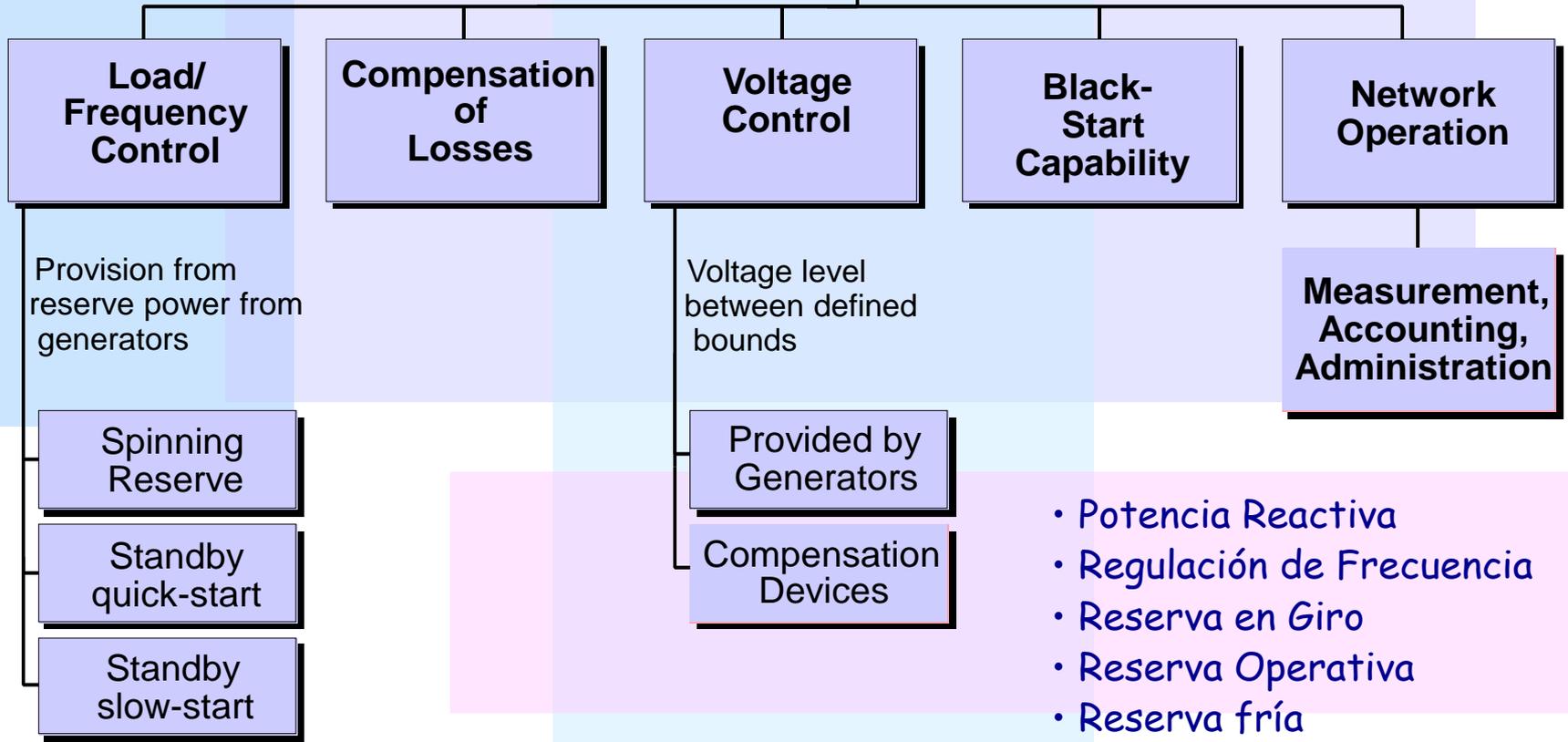
- **Regulación Primaria**  
Cada máquina responde de acuerdo a sus características y acción del regulador (consigna, estatismo)  
Individual para cada unidad de generación  
La respuesta tiene error permanente dependiendo del estatismo
- **Regulación Secundaria**  
Manual - automática (AGC)  
Seguimiento de la carga  
Control de enlaces  
Restitución de reservas primarias  
Corrección de error permanente de frecuencia del sistema
- **Regulación Terciaria o Económica**  
Manual - automática (AGC)  
Ajuste de valores de las máquinas a valores económicos (de mercado)



# Introducción (IV)

## Servicios Complementarios

### Ancillary Services



- Potencia Reactiva
- Regulación de Frecuencia
- Reserva en Giro
- Reserva Operativa
- Reserva fría
- Capacidad de Almacenamiento



# Introducción (V)

	<b>S</b>	Svenska Kraftnät	<b>Automatical:</b> <i>Primary Regulation;</i> <b>Manual:</b> <i>Secondary Regulation</i> (i.e. Tertiary Regulation)
	<b>N</b>	Statnett	<b>Automatical:</b> <i>Frequency Response</i> <b>Manual:</b> <i>Secondary Regulation</i>
	<b>GB</b>	National Grid Company (NGC)	<b>Automatical:</b> <i>Primary-, Secondary-, High Frequency Response</i> <b>Manual:</b> <i>Emergency Reserve; Regulation Reserve-NETA</i> (daily); <i>Standing Reserve</i> (yearly); <i>Fast Reserve</i> (monthly).
	<b>E</b>	Red Eléctrica de España (REE)	<b>Automatical:</b> <i>Primary Regulation, Secondary Regulation</i> <b>Manual:</b> <i>Tertiary Regulation, Deviation management</i>
	<b>A</b>	Verbund-APG TIWAG, VKW	<b>Automatical:</b> <i>Primary Regulation, Secondary Regulation</i> <b>Manual:</b> <i>Minute Reserve, Unplanned Exchange</i>
	<b>NL</b>	TenneT	<b>Automatical:</b> <i>Primary Response, Secondary Regulation</i> <b>Manual:</b> <i>Reserve, Emergency Reserve</i>
	<b>D</b>	BEWAG    E.On EnBW    Hew RWE    VEAG	<b>Automatical:</b> <i>Primary Regulation</i> <i>Secondary Regulation</i> <b>Manual:</b> <i>Minutenreserve</i>

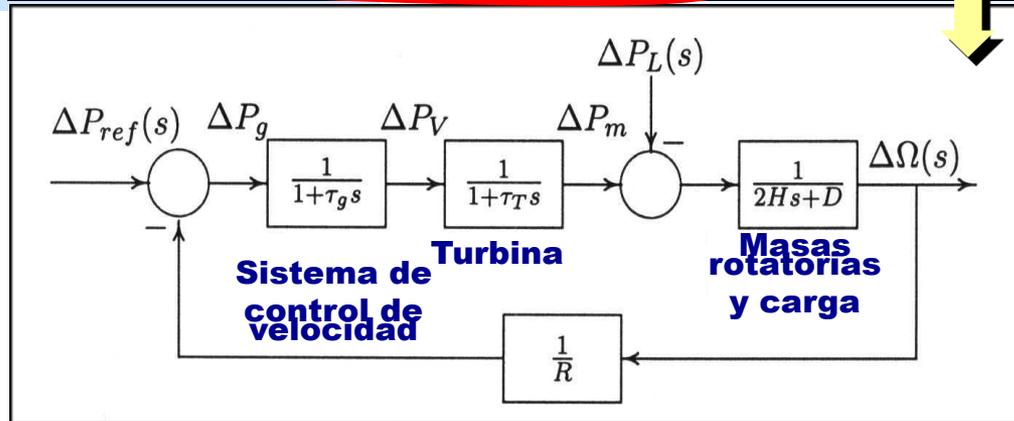
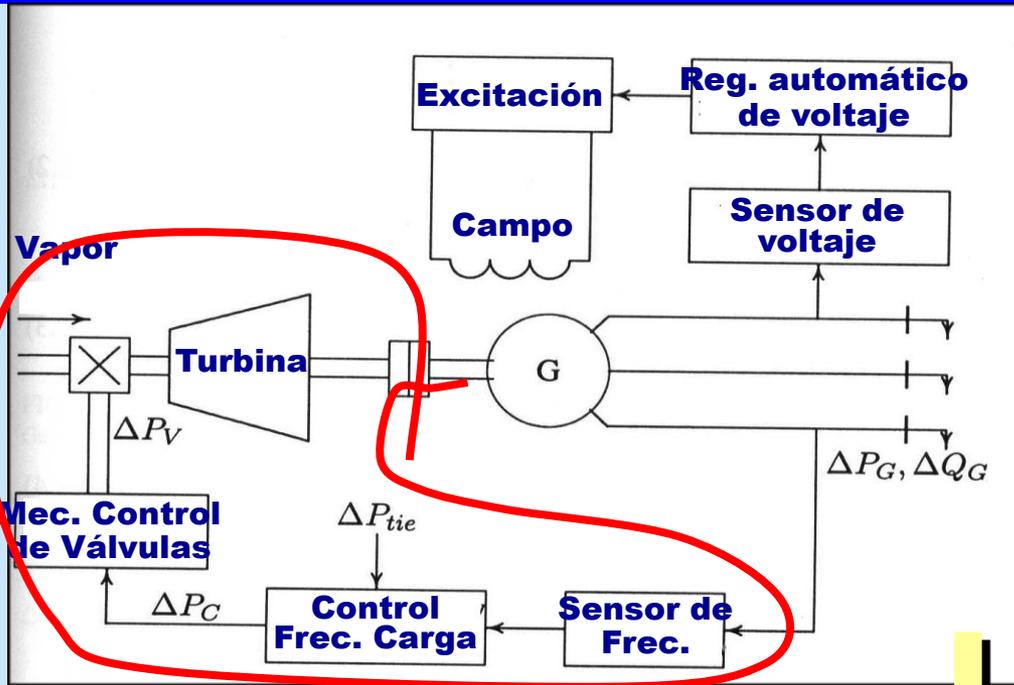


# Características del análisis de Control de Frecuencia

- Aprovechamiento de desacoplamiento natural entre potencia activa y módulo de tensión; y Potencia reactiva y frecuencia,
- Necesidad de modelo matemático del sistema: generador, consumo, potencia mecánica, control de velocidad,
- Énfasis en modelos de control automático,
- Uso de modelos de simulación en línea interactuando con sistemas SCADA.

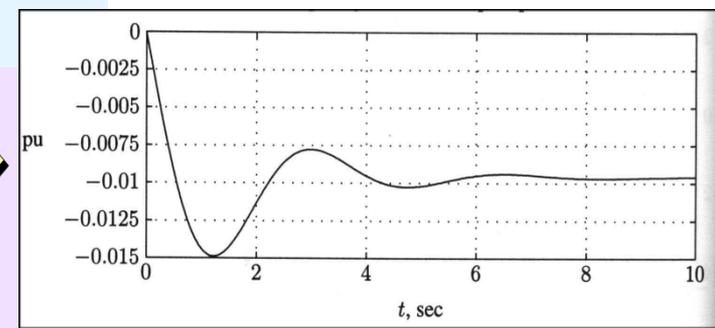


# Modelo General



**Modelo esquemático de un sistema de control**

**Necesidad de Modelo del Sistema**



**Desviación de frecuencia**

Fuente: Power System Analysis, Saadat



# Modelo General Máquina Síncrona

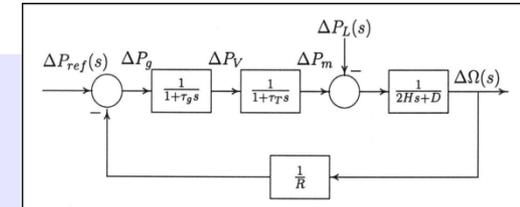
## Modelo del Generador

**Ecuación de oscilación de máquina síncrona para pequeñas perturbaciones**

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = \Delta P_{m(pu)} - \Delta P_{e(pu)}$$

**Cambio de variable + Laplace**

$$\Delta \Omega(s) = \frac{1}{2Hs} [\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s)]$$

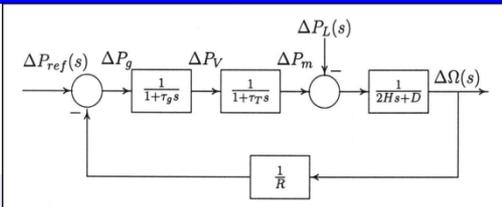
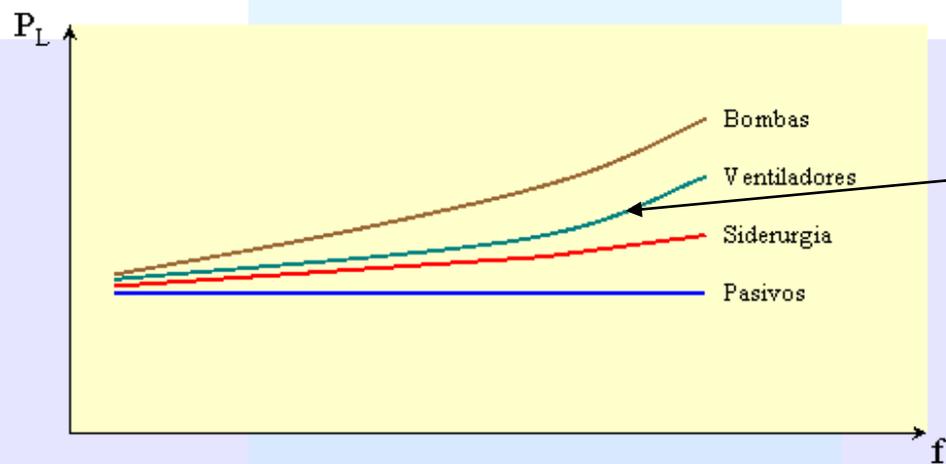


Fuente: Power System Analysis, Saadat



# Variaciones de las Cargas

## Modelo de Carga



Sensibilidad carga-frecuencia

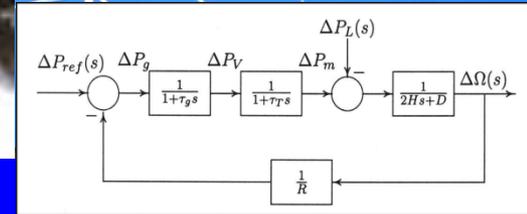
## Modelo de Rotor

Modelo simple: cambio en potencia mecánica en función de variación en válvula (ej. vapor)

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_v(s)} = \frac{1}{1 + \tau_T s}$$

Constante de tiempo

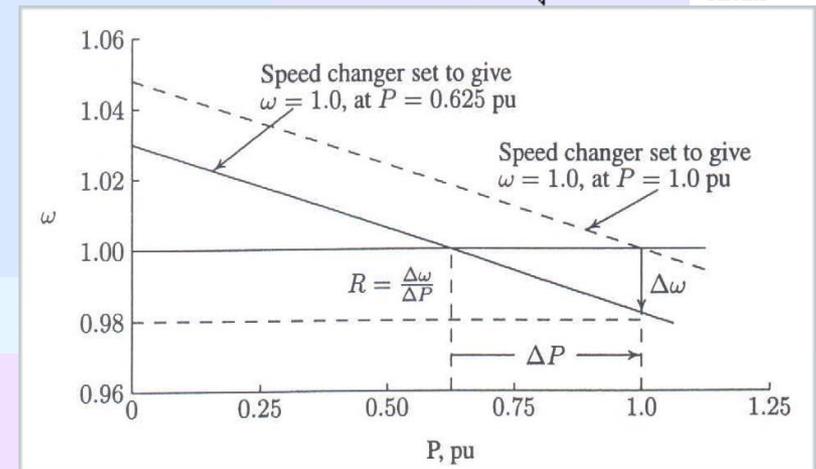
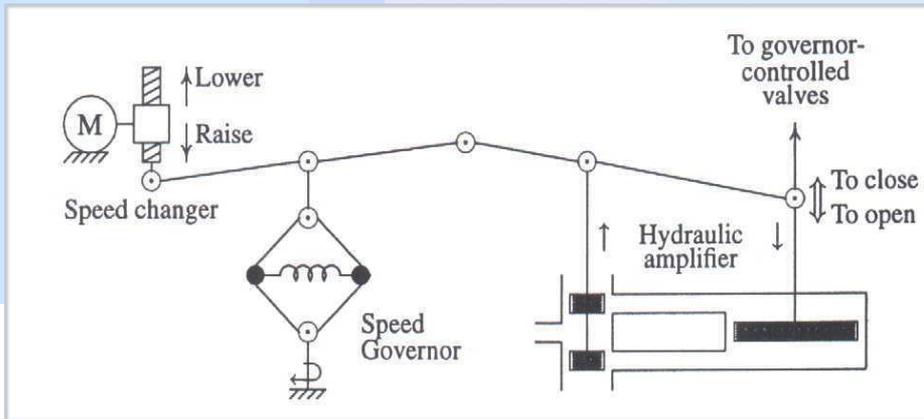
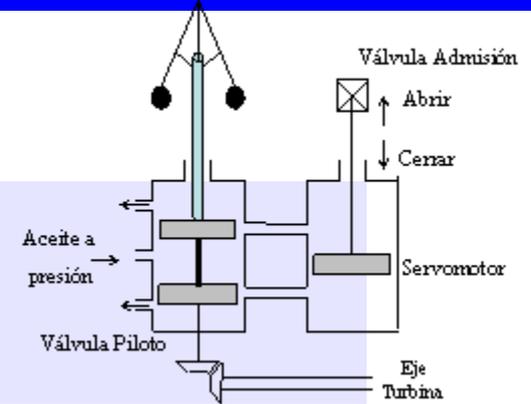
Fuente: Power System Analysis, Saadat



# Estatismo

## Modelo del Controlador (controlador proporcional)

Sistema de control de velocidad tradicional.



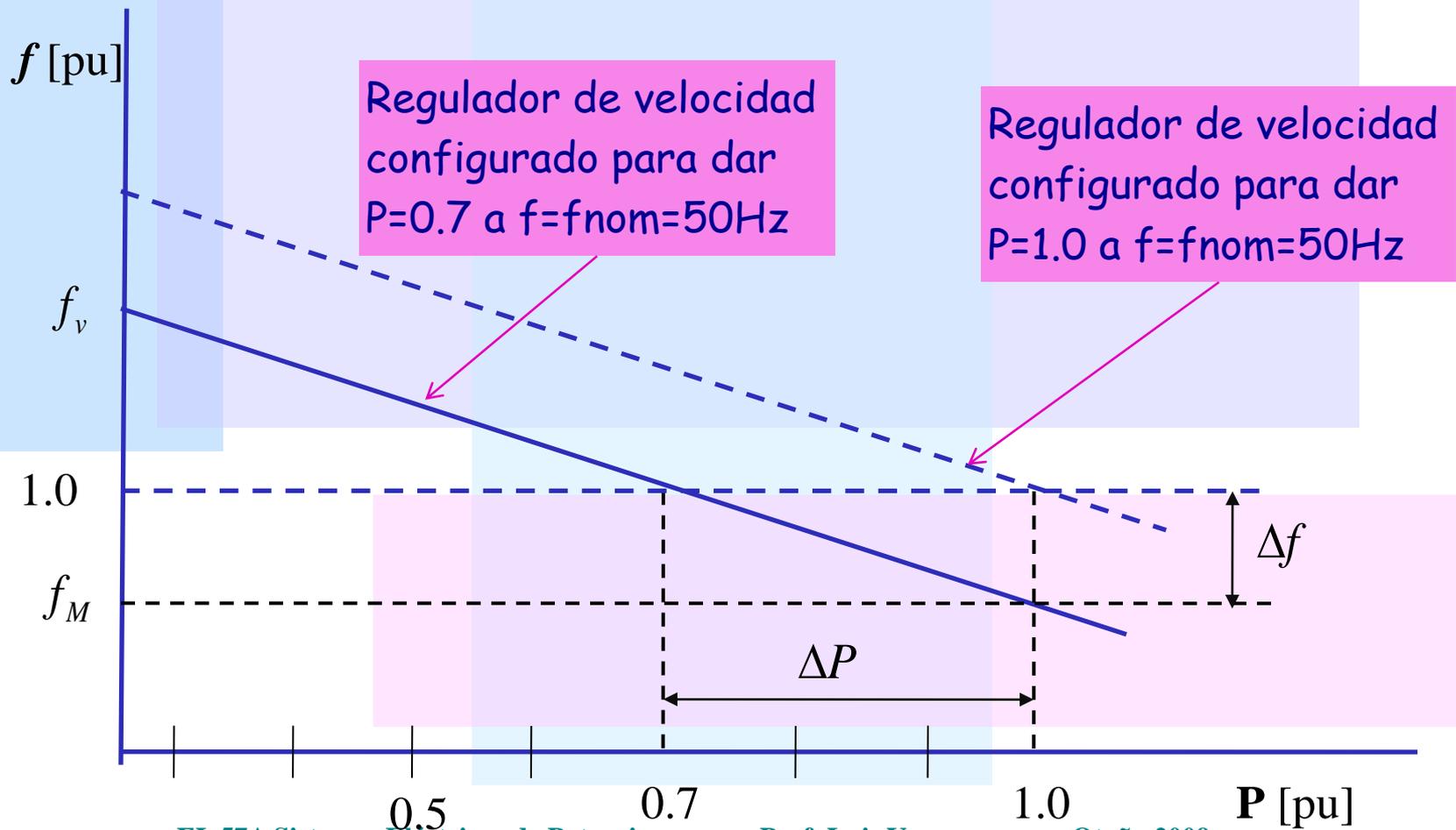
$$\Delta P_g = \Delta P_{ref} - \frac{1}{R} \Delta \omega$$

$$\Delta P_V(s) = \frac{1}{1 + \tau_g s} \Delta P_g(s)$$



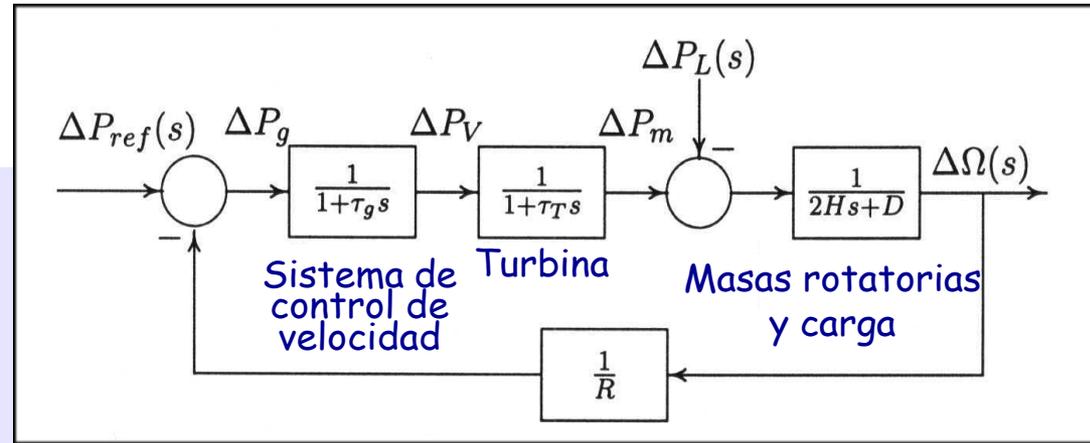
# Estatismo

$\sigma = \frac{f_v - f_M}{f_{nom}}$  Estatismo de la máquina : cambio de velocidad al pasar desde el vacío a plena carga (2% a 8%)





# Modelo General Resultante



$$\frac{\Delta\Omega(s)}{-\Delta P_L(s)} = \frac{(1 + \tau_g s)(1 + \tau_T s)}{(1 + \tau_g s)(1 + \tau_T s)(2Hs + D) + \frac{1}{R}}$$

- Respuesta a escalón
- Teorema del valor final

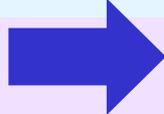
$$\Rightarrow \Delta P_L(s) = \frac{\Delta P_L}{s} \Rightarrow \Delta\omega_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} (s \Delta\Omega(s)) = (-\Delta P_L) \frac{1}{D + \frac{1}{R}}$$



# Control Primario de Frecuencia (CPF)

- Hay dos tipos de perturbación:
  - Pequeña. Variaciones de la demanda en condiciones normales de la operación. Típicamente produce un efecto acotado sobre la frecuencia que se mantiene en un rango aceptable (por ejemplo 49.8-50.2 Hz)
  - Grande. Salida intempestiva de una unidad de generación, salida de línea, etc.
- El desbalance de la energía generada y la demandada en el sistema produce una modificación creciente en la frecuencia del sistema.

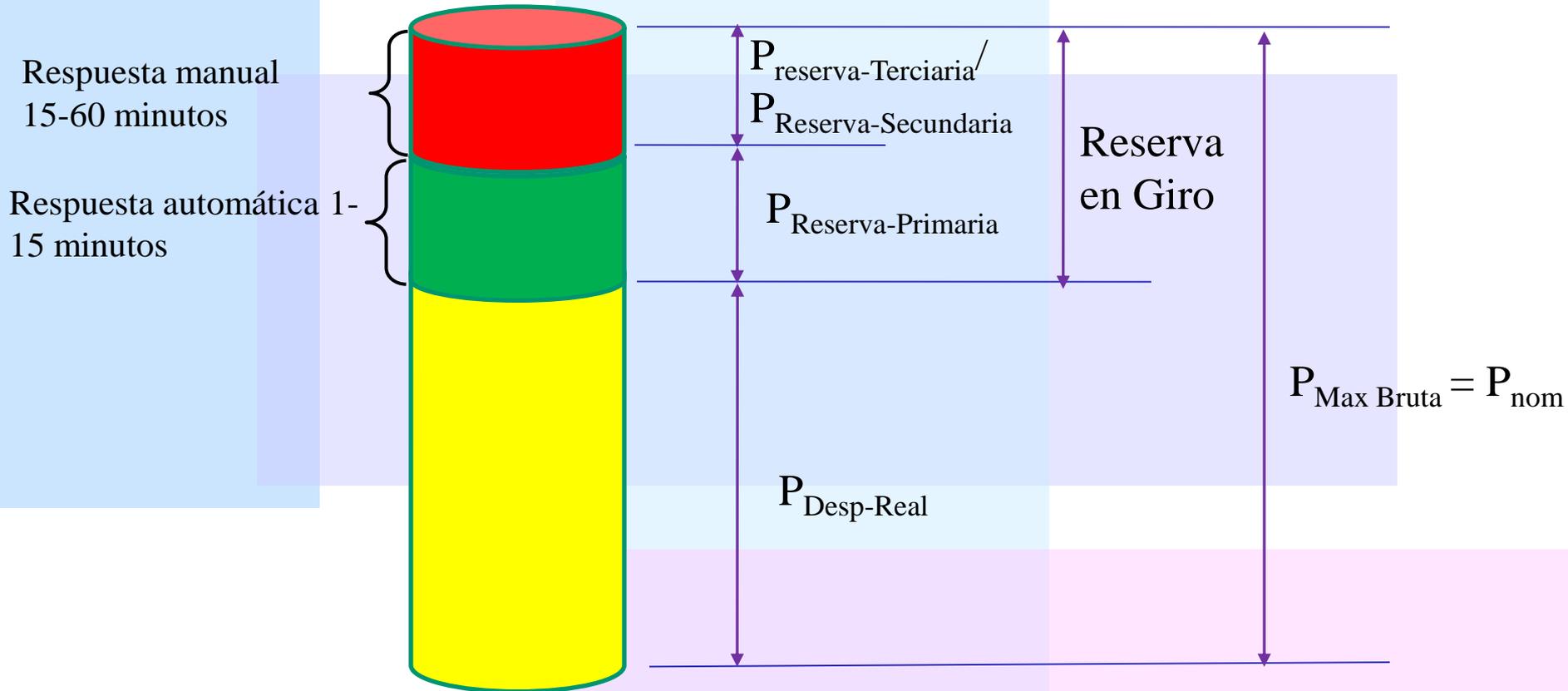
$$\frac{2H_k}{\omega_s} \frac{d\omega_k}{dt} = P_{mk(pu)} - P_{ek(pu)}$$

Dado que  $P_{mk(pu)} - P_{ek(pu)} \neq 0$    $\frac{d\omega_k}{dt} > 0$  ó  $\frac{d\omega_k}{dt} < 0$

- En los primeros segundos el sistema responde con regulación primaria. Energía que pueden inyectar unidades con toma de carga rápida



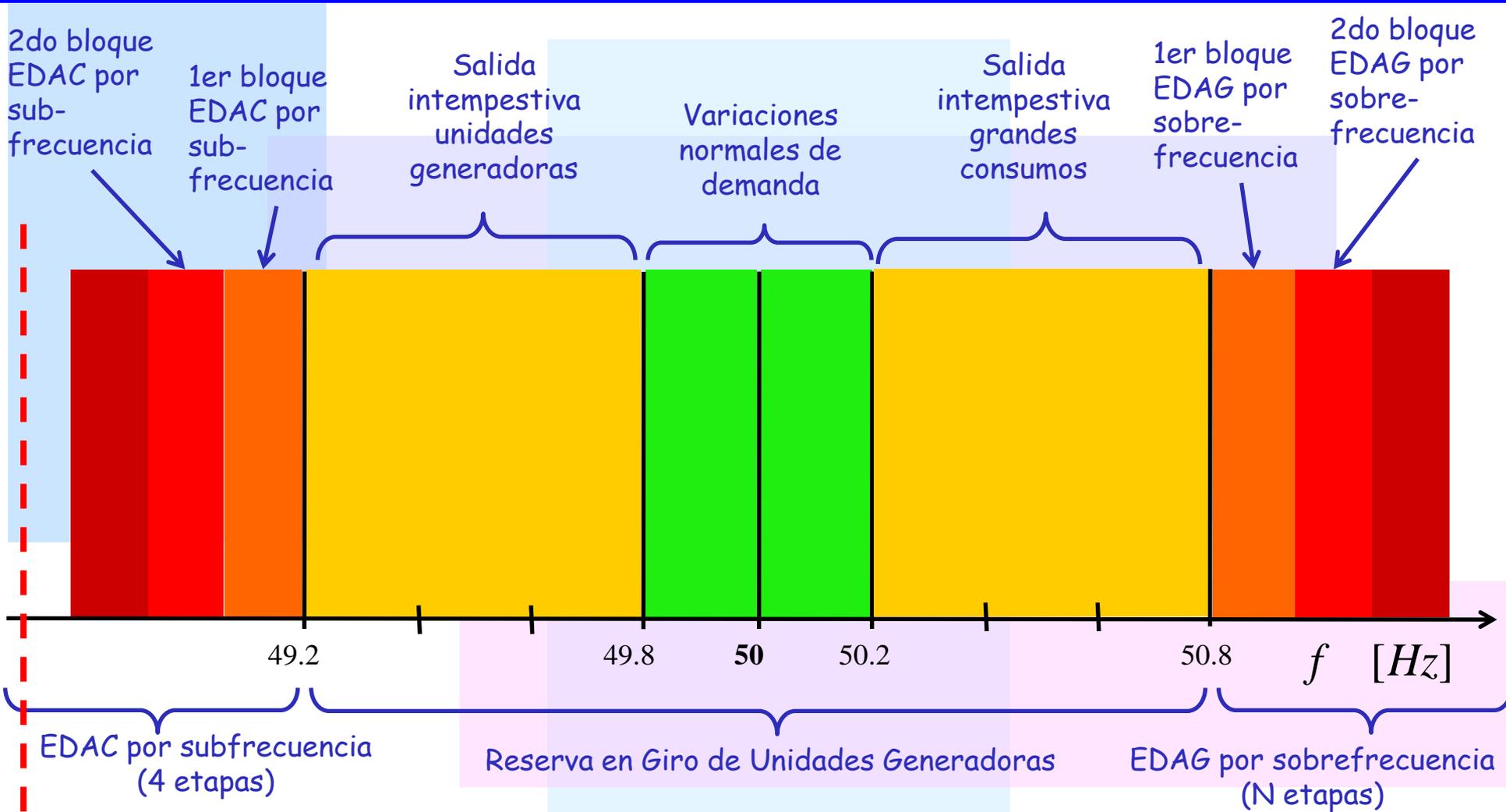
# Caracterización de Unidades de Generación



Para el sistema SING la mínima reserva primaria es del orden de 70 MW



# Control Primario de Frecuencia (CPF)

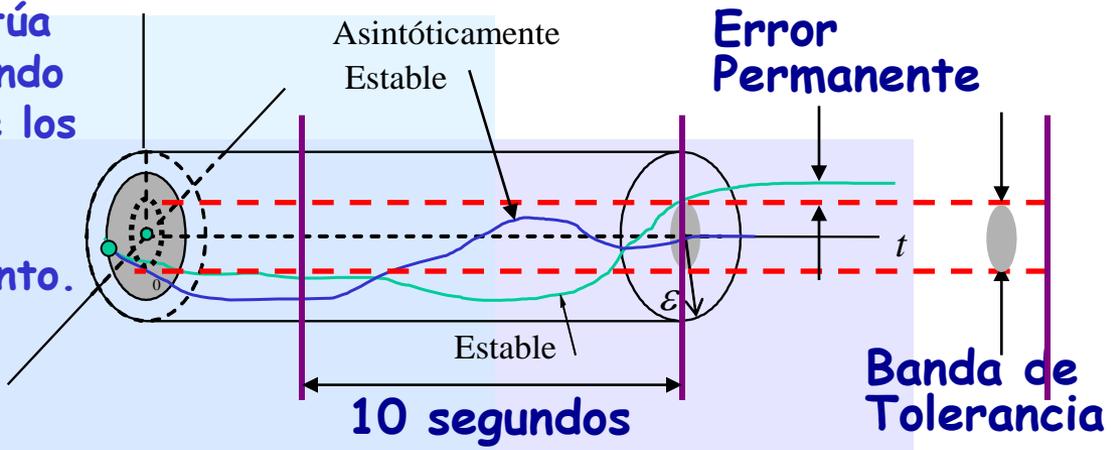


$f_{\min} = 48.3 [Hz]$  frecuencia mínima admitida en instalaciones del Sistema Interconectado



# Medición de la Frecuencia

La medición de la frecuencia se efectúa en intervalos de 10 segundos, realizando a continuación un promedio horario de los valores registrados, con los cuales se efectúan los cálculos estadísticos que permitan representar su comportamiento.

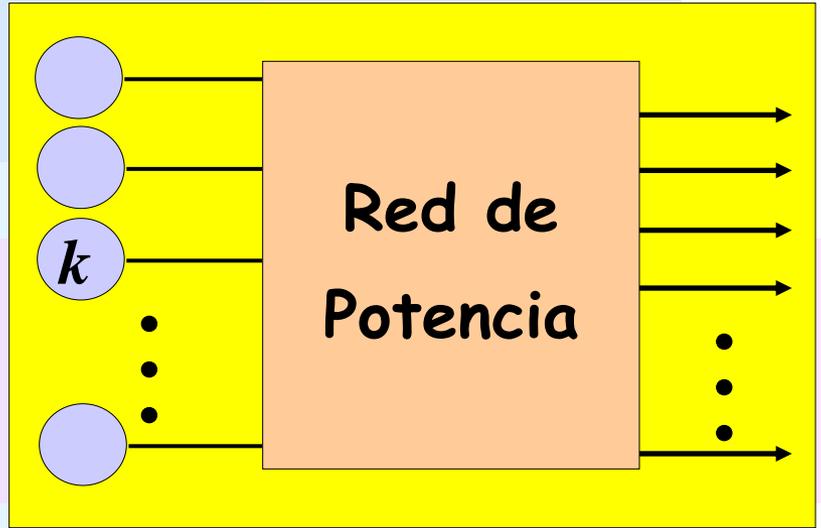


$$FECF(k) = 1 - \frac{|\Delta f_{m\acute{a}x}^*(k)|}{\Delta f_{MAX}} \geq 0,45$$

Donde:

$\Delta f_{m\acute{a}x}^*(k)$  corresponde a la desviación máxima instantánea del valor filtrado de medición de la frecuencia.

$\Delta f_{MAX}$  corresponde a la desviación máxima de frecuencia en estado permanente que agota la totalidad de la reserva asociada al CPF.



Sistema Interconectado SI



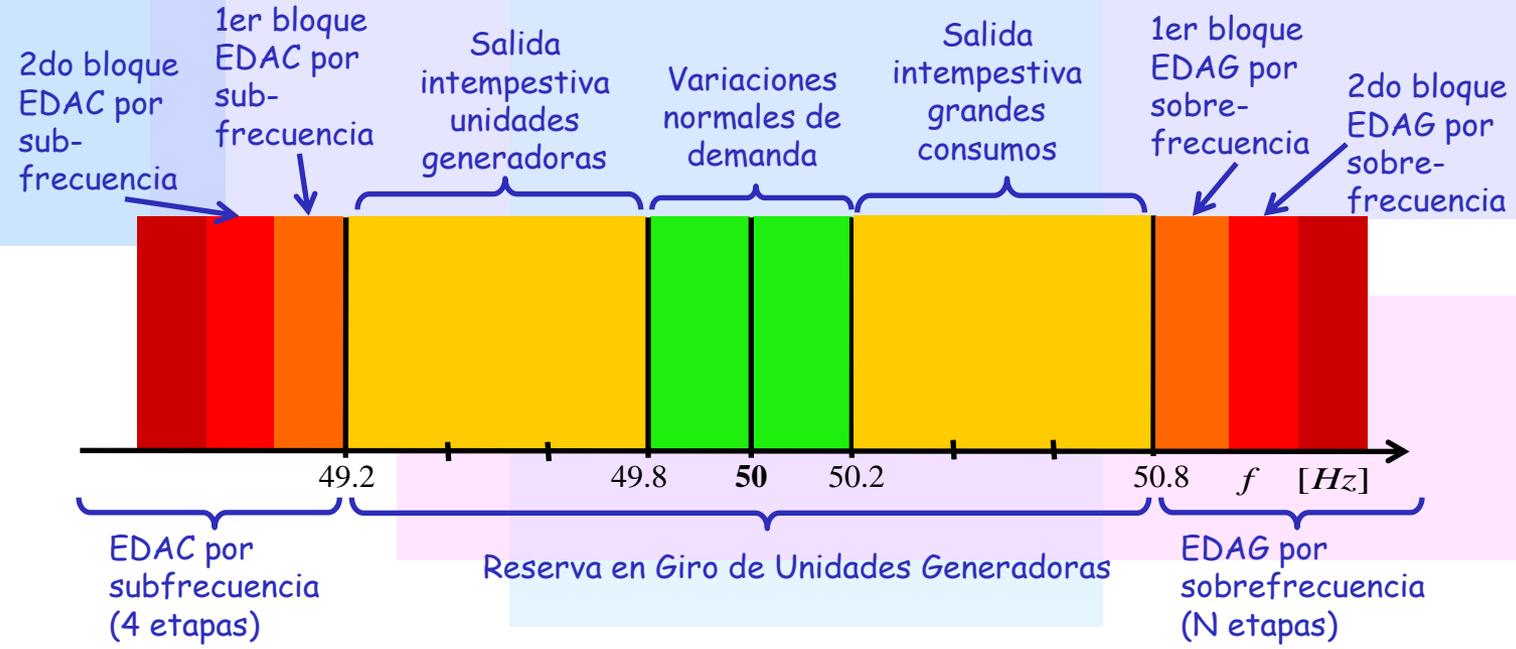
# Control Primario de Frecuencia (CPF)

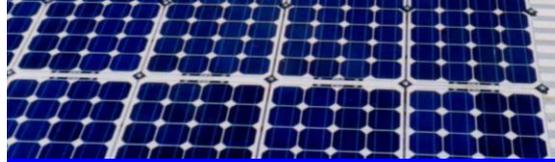
$$FECF(k) = 1 - \left| \frac{\Delta f_{m\acute{a}x}^*(k)}{\Delta f_{MAX}} \right|$$

Medición del desempeño del Control de Frecuencia para cada hora  $k$

$\Delta f_{m\acute{a}x}^*(k)$  Corresponde a la desviación máxima instantánea (del valor filtrado de medición) de la frecuencia.

$\Delta f_{MAX}$  Corresponde a la desviación máxima de frecuencia en estado permanente que agota la totalidad de la reserva asociada al CPF.





# Tecnologías de Reserva Rápida: BESS (Battery Energy Storage System)

Tecnología de punta. Baterías de litio que pueden entregar energía por un lapso breve (15 minutos)

500kW Power Quality - 100kW Peak Shaving

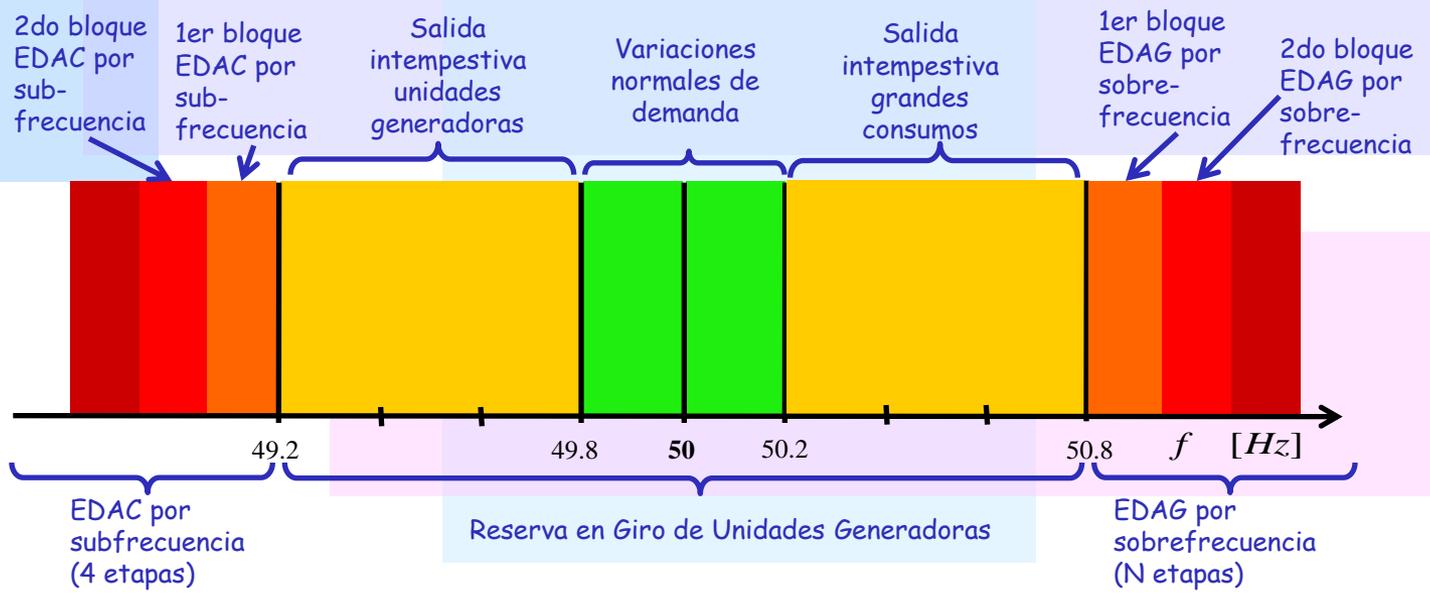




# Tecnologías de Reserva Rápida: BESS (Battery Energy Storage System)

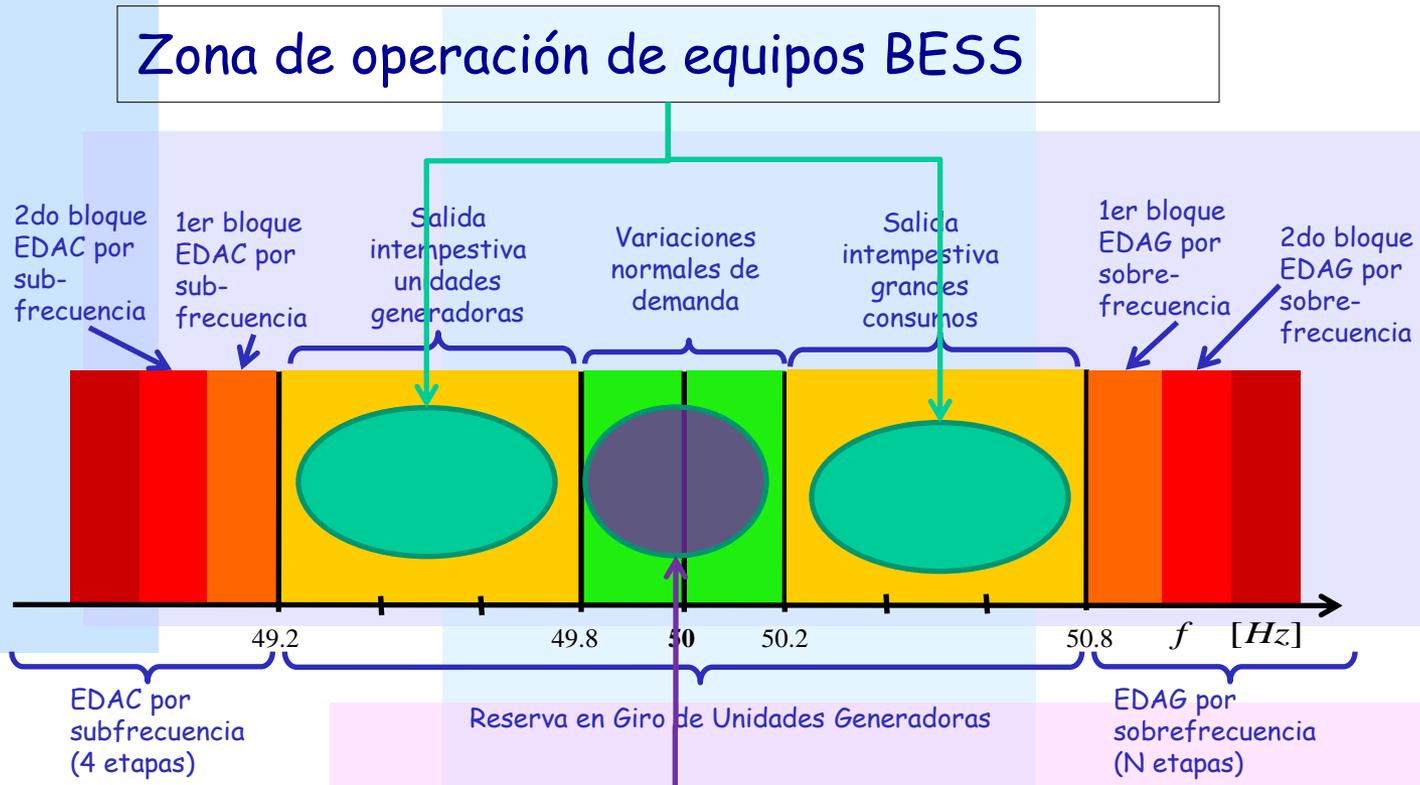
¿Son los equipos BESS exactamente el mismo servicio que la Reserva en Giro de los generadores?

Vale decir, ¿Es lo mismo para el sistema si el CPF se realiza sólo con reserva en giro o si se usa una combinación de RG mas equipos BESS?





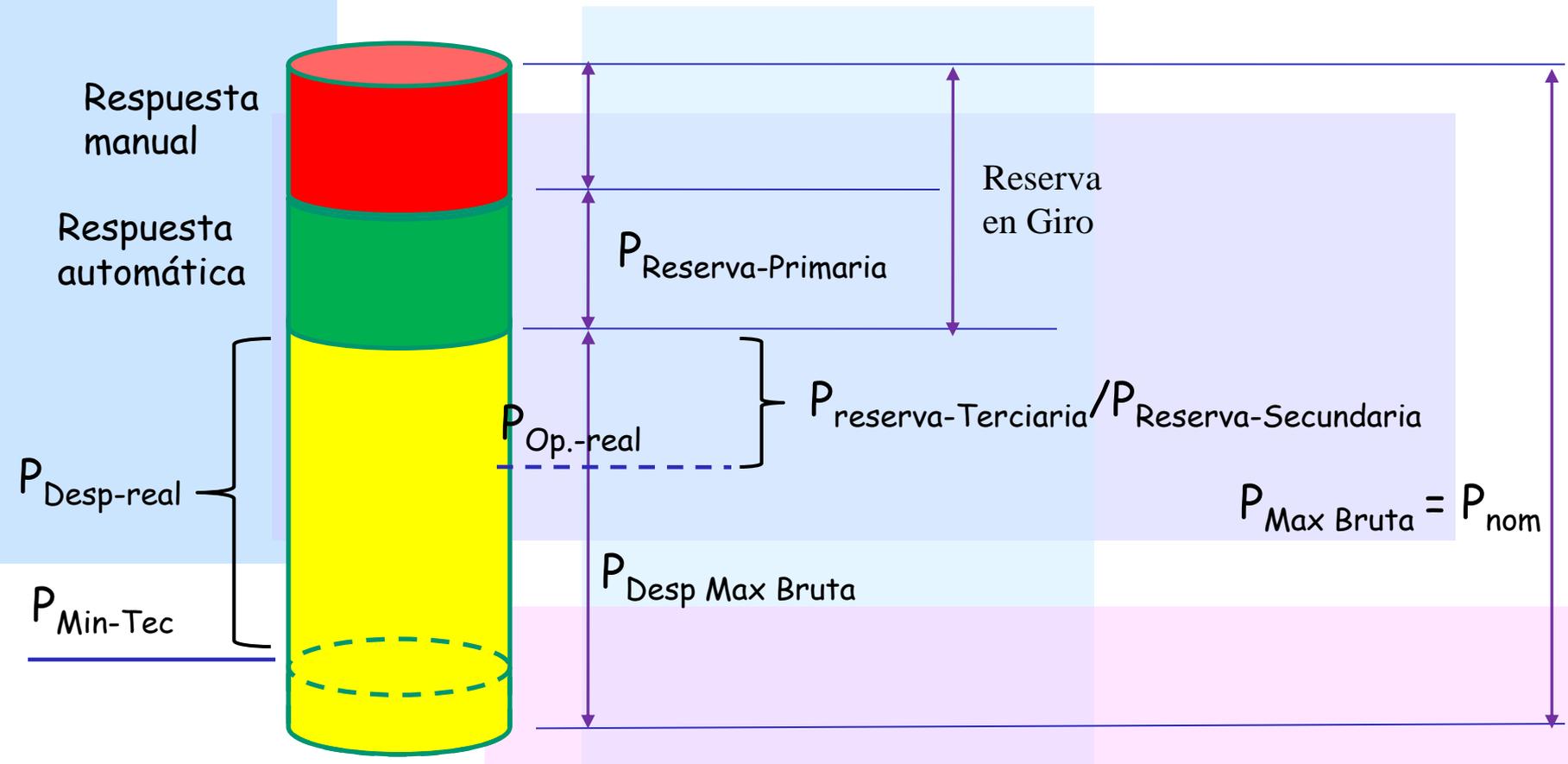
# Tecnologías de Reserva Rápida: BESS (Battery Energy Storage System)



Equipos BESS no operan para fluctuaciones normales de carga, poseen zon muerta

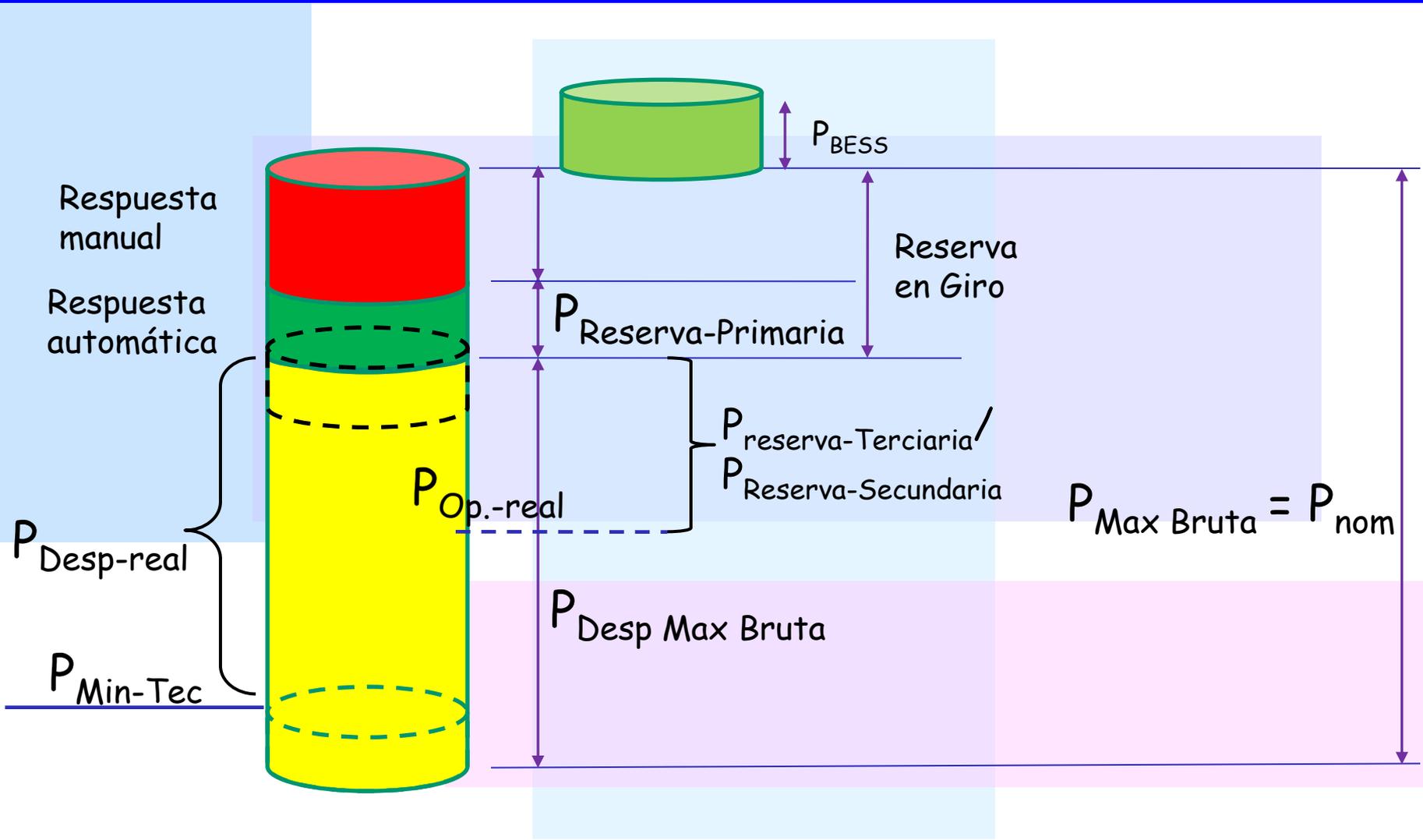


# Efecto de Equipo BESS en Reserva Primaria



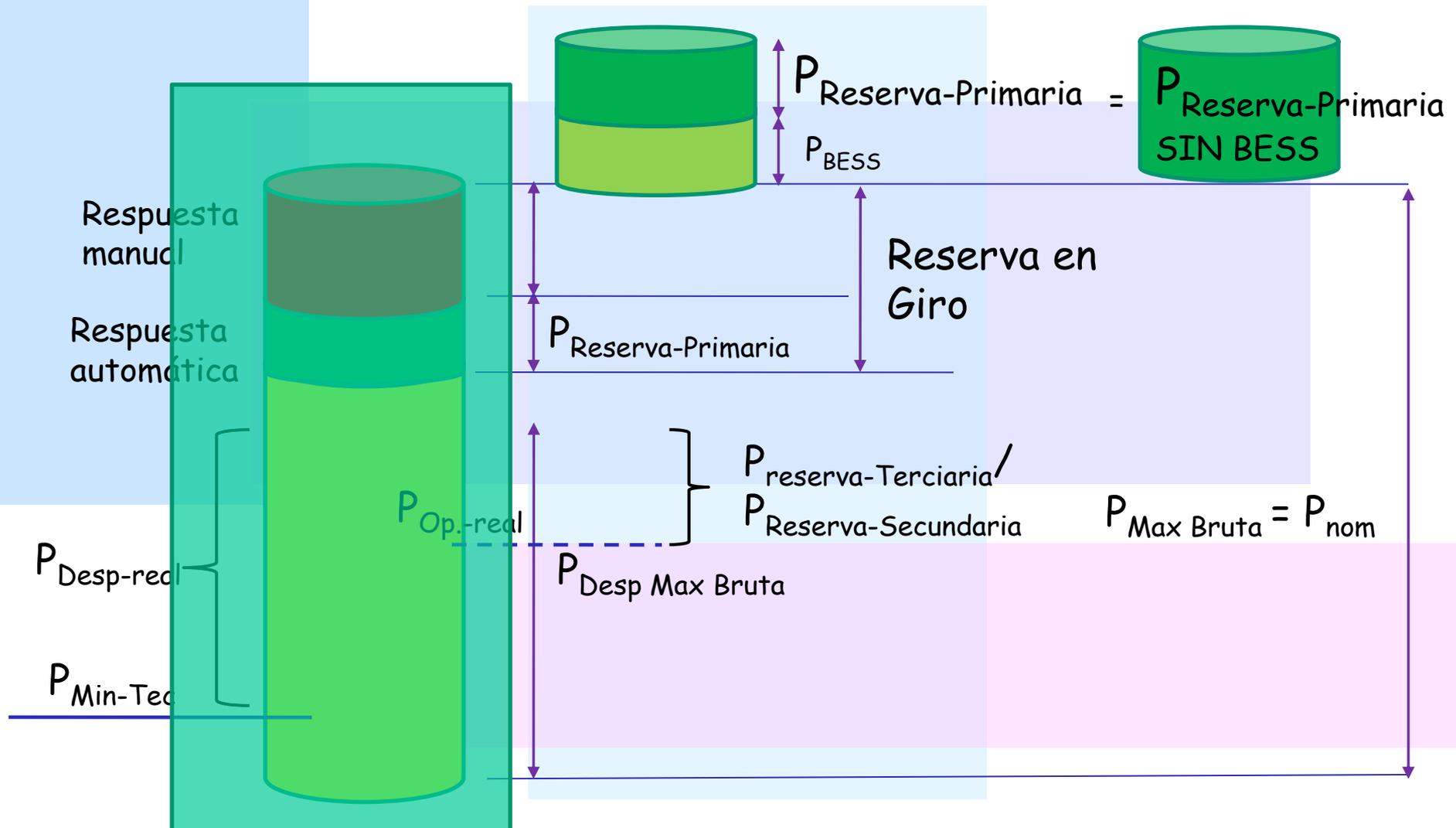


# Situación Con BESS: Aumento de Despacho Real





# Equivalencia de Equipo BESS





## CASO CENTRALES IDENTICAS CON DISTINTA RESERVA PRIMARIA

- Iguales costos Central 1 y Central 2
- Iguales Potencias máximas brutas de 100 MW c/u
- Mismo nivel de despacho máximo (90 MW)
- Mismo nivel de generación, o sea, igual reserva en giro 10%
- Para la seguridad del sistema Central 1 aporta 8 MW y Central 2 aporta 4 MW

