

Punto P2.

$$R_{1,2,5} = 0.05 \frac{50 \text{ Hz}}{300 \text{ MW}}$$

$$R_{3,4} = 0.05 \frac{50 \text{ Hz}}{500 \text{ MW}}$$

$$D_1 = 0.01 \cdot \frac{500}{50} = 0.1 \frac{\text{MW}}{\text{Hz}}$$

$$D_2 = 0.01 \cdot \frac{1000}{50} = 0.2 \frac{\text{MW}}{\text{Hz}}$$

a) Desconexión intempestiva del generador 1

$$\Delta P_{m1} = \underline{-200 \text{ MW}}$$

potencia despachada

Hay que aumentar la potencia, pero G3 y G4 están al máximo
∴ $\Delta P_{m3} = \Delta P_{m4} = 0$

Dado que solo actúa el control primario, planteamos el equilibrio carga - generación.

$$\Delta P_m = \Delta P_e \quad 0 \quad 0$$

$$\Delta P_{m1} + \Delta P_{m2} + \Delta P_{m3} + \Delta P_{m4} + \Delta P_{m5} = \Delta P_L + D \Delta f$$
$$-200 - \frac{\Delta f}{R_2} - \frac{\Delta f}{R_5} = \cancel{\Delta P_L} 0 + (D_1 + D_2) \Delta f$$

$$-200 = \Delta f \left(D_1 + D_2 + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5} \right)$$

$$\Delta f = \frac{-200}{\left(D_1 + D_2 + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5} \right)} = \frac{-200}{\left(0.1 + 0.2 + \frac{300}{50 \cdot 0.05} + \frac{300}{50 \cdot 0.05} \right)}$$

$$\Delta f = 0.832293 \text{ Hz}$$

Calculamos la variación de generación y la variación de carga

$$\Delta P_{m2} = \Delta P_{m5} = -\frac{\Delta f}{R} = \frac{-0.832293}{\frac{0.05 \cdot 50}{300}} = 99.8752 \text{ MW}$$

Esto es factible ya que ambos generadores cuentan con las reservas suficientes para efectuar CPF (100 MW).

$$\Delta P_{LD1} = D_1 \cdot \Delta f = 0.1 \cdot 0.832293 = 0.0832 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{LD2} = D_2 \cdot \Delta f = 0.2 \cdot 0.832293 = 0.1665 \text{ MW}$$

Resumen

	Variación	Valor final
G1	-200	0
G2	99.8752	299.8752
G3	0	500
G4	0	500
G5	99.8752	199.8752
L1	-0.0832	499.9168 (500 - 0.0832)
L2	0.1665	999.8335 (1000 - 0.1665)

La frecuencia alcanza un valor de $f = 49.1677 \text{ Hz}$

El flujo por el enlace es de:

• Calculando c/r al área 1

$$\begin{aligned} \Delta P_{12} &= \text{Carga A1} - \text{Generación A1} \\ &= 499.9168 - 299.8752 \\ &= + 200.042 \text{ MW} \quad G1 + G2 \end{aligned}$$

Calculando c/r al área 2

$$\begin{aligned}\Delta P_{12} &= \text{Carga AZ} - \text{Generación AZ} \\ &= 999.8335 - (500 + 500 + 199.8752) \\ &= -200.042 \text{ MW} \quad 63 + 64 + 65\end{aligned}$$

Se puede apreciar que ambos módulos son iguales. Sin embargo, más allá del signo, lo importante es comprender que hay un intercambio 200.042 MW DESDE EL ÁREA 2 HACIA EL ÁREA 1.

b) Desconexión intempestiva del generador 4
 $\Delta P_{m4} = -500 \text{ MW}$

Nuevamente debemos recordar que el generador 3 está al máximo, por lo que no puede aportar ante este desprendimiento de generación

$$\Delta P_{m1} + \Delta P_{m2} + \Delta P_{m3} + \Delta P_{m4} + \Delta P_{m5} = \Delta P_L + (D_1 + D_2) \Delta f$$

$$-\Delta f \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5} \right) - 500 = \Delta f (D_1 + D_2)$$

$$\Delta f = \frac{-500}{(D_1 + D_2 + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5})}$$

$$\Delta f = \frac{-500}{(0.1 + 0.2 + \frac{300}{50 \cdot 0.05} + \frac{300}{50 \cdot 0.05} + \frac{300}{50 \cdot 0.05})}$$

$$\Delta f = -1.397732 \text{ Hz}$$

Calculamos la variación de generación y la variación de carga

$$\Delta P_{m1} = \Delta P_{m2} = \Delta P_{m5} = \frac{-\Delta f}{R_{1,2,5}} = \frac{+1.387732}{\frac{50 \cdot 0.05}{300}} = +166.5278 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{LD1} = D_1 \cdot \Delta f = 0.1 \cdot -1.387732 = -0.1388 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{LD2} = D_2 \cdot \Delta f = 0.2 \cdot -1.387732 = -0.2775$$

Resumen régimen permanente

	Variación	Valor final [MW]	Reserva de subida [MW]
G1	166.5278	366.5278	100
G2	166.5278	366.5278	100
G3	0	500	0
G4	-500	0	0
G5	166.5278	266.5278	200
L1	-0.1388	499.8612	
L2	-0.2775	999.7225	

A partir de la tabla corroboramos que este resultado es infactible, ya que G1 y G2 llegan al límite de su reserva (su máximo es 100 MW no puede aumentar 166.5278 MW) por lo que G5 debe hacerse de la potencia faltante en el sistema a través de su CPF y de sus reservas.

↳ Fijamos G1 y G2 en su máximo $\Delta P_{m1} = \Delta P_{m2} = 100 \text{ MW}$
 Debemos despejar el nuevo aporte de G5.

$$\Delta P_{m1} + \Delta P_{m2} + \Delta P_{m3} + \Delta P_{m4} + \Delta P_{m5} = \Delta P_1 + (D_1 + D_2) \Delta f$$

$$100 + 100 + 0 - 500 - \frac{\Delta f}{R_5} = \Delta f (D_1 + D_2)$$

$$-300 = \Delta f \left(D_1 + D_2 + \frac{1}{R_5} \right)$$

$$\Delta f = \frac{-300}{D_1 + D_2 + \frac{1}{R_5}} = \frac{-300}{0.1 + 0.2 + \frac{1}{0.05 \cdot 50}} = -2.4938 \text{ Hz}$$

Calculamos el aumento de generación requerido en la unidad 5

$$\Delta P_{m5} = \frac{-\Delta f}{R_5} = \frac{+2.4938}{0.05 \cdot 50} = 299.26 \text{ MW}$$

Sin embargo, el generador 5 solo posee 200 MW de reserva. Por lo tanto, no tiene reservas suficientes para compensar la pérdida de generación de la unidad 4.

En consecuencia, aunque todas las unidades (salvo la 4) aumenten su generación al máximo se mantiene el desbalance de carga.
 \Rightarrow BLACK OUT (caída de la frecuencia hasta 0 Hz).

c) Disminución intempestiva de la carga del área B en 900 MW
 $\Rightarrow \Delta P_{L2} = -900 \text{ MW}$

Ahora actúa el control primario y secundario, donde este último es realizado por G1 y G5.

$$\Rightarrow \Delta P_{m1} = \frac{CSF}{R_1} \Delta f - \frac{CPF}{R_1} \Delta f$$

$$\Delta P_{m5} = \Delta P_{ref5} - \frac{\Delta f}{R_5}$$

Primero corroboramos si el CSF es capaz de llevar el error de frecuencia a cero. Sin embargo:

$$\frac{\Delta P_{ref1}}{200} + \frac{\Delta P_{ref5}}{100} = 300 \text{ MW} < 900 \text{ MW}$$

Entre ambas máquinas sólo existen 300 MW de reservas de bajado para efectuar el CSF, por lo tanto, no es posible reestablecer la frecuencia a su valor nominal. En su lugar G1 y G5 van a disminuir su generación al mínimo ($\Delta P_{m1} = -200 \text{ MW}$ y $\Delta P_{m5} = -100 \text{ MW}$) y el resto de las centrales se harán cargo del desbalance remanente de acuerdo a sus estatismos.

Calculamos el nuevo error de frecuencia y el aporte del resto de las máquinas (disminución de generación).

$$\Delta P_{m1} + \Delta P_{m2} + \Delta P_{m3} + \Delta P_{m4} + \Delta P_{m5} = \Delta P_L + (D_1 + D_2)\Delta f$$

$$-200 - \frac{\Delta f}{R_2} - \frac{\Delta f}{R_3} - \frac{\Delta f}{R_4} - 100 = -900 + (D_1 + D_2)\Delta f$$

$$900 - 300 = \Delta f \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + D_1 + D_2 \right)$$

$$\Delta f = \frac{600}{\left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + D_1 + D_2 \right)}$$

$$\Delta f = \frac{600}{\left(\frac{0.1 + 0.2 + 500}{50 \cdot 0.05} + \frac{500}{50 \cdot 0.05} + \frac{300}{50 \cdot 0.05} \right)} = 1.15318 \text{ Hz}$$

Calculamos la variación de generación y la variación de carga

$$\Delta P_{m2} = -\frac{\Delta f}{R_2} = -\frac{1.15318}{\frac{50 \cdot 0.05}{300}} = -138.3816 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{m3,4} = -\frac{\Delta f}{R_{3,4}} = -\frac{1.15318}{\frac{50 \cdot 0.05}{500}} = -230.636 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{L1} = D_1 \cdot \Delta f = 0.1 \cdot 1.15318 = 0.1153 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{L2} = D_2 \cdot \Delta f = 0.2 \cdot 1.15318 = 0.2306 \text{ MW}$$

	Variación	Valor final [MW]
G1	- 200	0
G2	- 138.3816	61.6184
G3	- 230.636	269.364
G4	- 230.636	269.364
G5	- 100	0
L1	0.1153	500.1153
L2	- 900 + 0.2306 = 899.7694	1000 - 899.7694 = 100.2306

d) Aumento intempestivo de la carga en el área A en 600 MW.

$$\hookrightarrow \Delta P_{L1} = 600 \text{ MW}$$

Dado que los generadores 1 y 5 no participan ni del CPF ni del CBF, y además el generador 3 y el generador 4 están al máximo ($\Delta P_{m3} = \Delta P_{m4} = 0$)

\hookrightarrow El único que responde es G2.

$$\Delta P_{m1} + \Delta P_{m2} + \Delta P_{m3} + \Delta P_{m4} + \Delta P_{m5} = \Delta P_L + (D_1 + D_2) \Delta f$$
$$-\frac{1}{R_2} = 600 + (D_1 + D_2) \Delta f$$

$$\Delta f = \frac{-600}{\left(\frac{1}{R_2} + D_1 + D_2\right)} = \frac{-600}{\frac{300}{50 \cdot 0.05} + 0.1 + 0.2} = -4.987531 \text{ Hz}$$

Calculamos la variación de generación y la variación de carga

$$\Delta P_{m2} = -\frac{\Delta f}{R_2} = \frac{+4.987531}{\frac{50 \cdot 0.05}{300}} = 598.5037 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{LD1} = D_1 \cdot \Delta f = 0.1 \cdot 4.987531 = 0.4988 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{LD2} = D_2 \cdot \Delta f = 0.2 \cdot 4.987531 = 0.9975 \text{ MW}$$

Resumen régimen permanente

	Variación	Valor final [MW]
G1	0	200
G2	599.5037	798.5037
G3	0	500
G4	0	500
G5	0	100
L1	$600 - 0.4988 = 599.5012$	1099.5012
L2	-0.9975	999.0025

Este resultado es infactible ya que el G2 solo posee una reserva de subida de 200 MW para suministrar el desbalance. \Rightarrow El generador 2 se satura alcanzando su máxima capacidad y la frecuencia continúa su descenso hasta 0 Hz.

e) Se pierde el enlace $\Delta P_{12} = +100$ MW (donde el área 2 envía 100 MW al área 1 esto se puede ver analizando sus generaciones y sus cargas).

Dado que solo actúa el CPF, hacemos el balance carga-generación para cada área (están desacoplados).

Área 1:

$$\begin{aligned} \Delta P_{m1} + \Delta P_{m2} &= \Delta P_{L1} + D_1 \Delta f + \Delta P_{12} \\ -\frac{\Delta f}{R_1} - \frac{\Delta f}{R_2} &= D_1 \Delta f + 100 \end{aligned}$$

$$\Delta f = \frac{-100}{\frac{300}{50 \cdot 0.05} + \frac{300}{50 \cdot 0.05} + 0.1} = -0.416493 \text{ Hz}$$

$$\Delta P_{m1,2} = \frac{-\Delta f}{R_{1,2}} = \frac{0.416493}{\frac{50 \cdot 0.05}{300}} = 49.9792$$

$$\Delta P_{LD1} = D_1 \cdot \Delta f = 0.1 \cdot 0.416493 = -0.0416$$

Area 2:

$$\Delta P_{m3} + \Delta P_{m4} + \Delta P_{m5} = \overset{0}{\Delta P_{LD2}} + D_2 \Delta f + \Delta P_{12} - \Delta f \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \right) = D_2 \Delta f - 100$$

$$\Delta f = \frac{100}{\left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + D_2 \right)}$$

$$\Delta f = \frac{100}{\left(\frac{500}{50 \cdot 0.05} + \frac{500}{50 \cdot 0.05} + \frac{300}{50 \cdot 0.05} + 0.2 \right)} = 0.192234 \text{ Hz}$$

$$\Delta P_{m3,4} = \frac{-\Delta f}{R_{3,4}} = \frac{-0.192234}{\frac{50 \cdot 0.05}{500}} = -38.4468 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{m5} = \frac{-\Delta f}{R_5} = \frac{-0.192234}{\frac{50 \cdot 0.05}{300}} = -23.0681 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{LD2} = D_2 \cdot \Delta f = 0.2 \cdot 0.192234 = 0.0384 \text{ MW}$$

Resumen Área 1

	Variación	Valor final [MW]
G1	49.9792	249.9792
G2	49.9792	249.9792
L1	-0.0416	$500 - 0.0416 = 499.9584$
P12	100	0
f1 [Hz]	-0.4165	49.5835

Resumen Área 2

	Variación	Valor final [MW]
G3	-38.4468	461.5532
G4	-38.4468	461.5532
G5	-23.0681	76.9319
L2	0.0384	1000.0384
$\Delta P12$	-100	0
f2 [Hz]	0.1922	50.1922

f) Se pierde el enlace, pero ahora actúa el CSF.

En este caso es directo, dado que G1 tiene reservas de subida de 100 MW para efectuar CSF y restablecer la frecuencia a su valor nominal. Del mismo modo, G5 tiene 100 [MW] de reservas de bajada para efectuar CSF y restablecer la frecuencia a su valor nominal. Ambos sistemas quedan sin error de frecuencia en régimen permanente.

Anexo

Resolveremos la primera parte de la pregunta en p.u solo para mostrar una manera alternativa de abordar el problema. Sin embargo, con cualquiera de los 2 métodos se llega a resultados similares (hay diferencias por las aproximaciones usadas).

Primero calculamos R y D

$$R_{bc} = R_{bp} \cdot \frac{P_{bc}}{P_{bp}} \quad P_{bc} = \text{potencia base común, corresponde a la potencia demandada + reserva.}$$

P_{bp} : potencia base propia, es la potencia máxima de generación del área o generadores en el problema.

$$D_{bc} = D_{bp} \cdot \frac{P_{bp}}{P_{bc}} \quad P_{bc}: \text{potencia base común, corresponde a la misma que para el caso de estatismo.}$$

P_{bp} : potencia base propia, es la potencia demandada.

$$P_{bc} = \frac{\text{Potencia demandada}}{1500} + \frac{\text{Reservas}}{100 + 100 + 200} = 1900 \text{ MW}$$

• G1, G2 y G5 (tienen la misma potencia máxima o capacidad nominal P_{bp} estatismo).

$$R_{1,2,5} = 0.05 \cdot \frac{1900}{300} = 0.3167 \text{ p.u}$$

• G3 y G4

$$R_{3,4} = 0.05 \cdot \frac{1900}{500} = 0.19 \text{ p.u}$$

$$D_1 = 0.01 \cdot \frac{\text{Demanda 1}}{1900} = 0.01 \cdot \frac{500}{1900} = 0.0026 \text{ p.u.}$$

$$D_2 = 0.01 \cdot \frac{\text{Demanda 2}}{1900} = 0.01 \cdot \frac{1000}{1900} = 0.0053 \text{ p.u.}$$

Replicando la desconexión intempestiva del generador 1 (a2)

$$\Delta f = \frac{+\Delta P_{m1}}{(D_1 + D_2 + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5})}$$

$$\text{Donde } \Delta P_{m1} = -200 \text{ MW} = \frac{-200}{1900} \text{ p.u.} = -0.1053 \text{ p.u.}$$

$$\Delta f = \frac{-0.1053}{0.0026 + 0.0053 + \frac{1}{0.3167} + \frac{1}{0.3167}}$$

$$\Delta f = -0.01665 \text{ p.u.} = -0.01665 \cdot 50 \text{ Hz} = -0.8325 \text{ Hz}$$

* Análogo resultado anterior, con leves diferencias por decimales.

Calculamos la variación de generación y la variación de carga.

* R y D están en pu, por lo tanto hay que seguir trabajando con Δf en pu.

$$\Delta P_{m2} = \Delta P_{m5} = \frac{-\Delta f}{R_{2,5}} = \frac{-0.01665}{0.3167} = 0.0526 \text{ p.u.}$$

Para pasar a MW: $0.0526 \cdot 1900 = 99.94 \text{ MW}$

$$\Delta P_{LD1} = 0.0026 \cdot 0.01665 = 4.33 \cdot 10^{-5} \text{ p.u.} \\ = 0.0823 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{LD2} = 0.0053 \cdot 0.01665 = 8.82 \cdot 10^{-5} \text{ p.u.} \\ = 0.1676 \text{ MW}$$

Dado las aproximaciones usadas, el resultado numérico difiere. Sin embargo, ambos procedimientos son válidos.