

## CONTROLO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE ENERGIA

### 1 Introdução

Um dos principais objetivos do controlo de um Sistema Eléctrico de Energia (SEE) interligado com sistemas vizinhos são os de escalonar as unidades de produção, estabelecer um despacho ótimo e garantir um eficaz equilíbrio entre a produção e o consumo, considerando as perdas na rede e os valores contratualizados para as interligações. Isto não será viável se não existir um método eficaz de controlo sobre os geradores, sobre a frequência e a tensão na rede e, também, sobre o transito de energia nas linhas de interligação.

De facto, no passado, o controlo dos geradores foi o primeiro problema existente no controlo das redes eléctricas. Os métodos desenvolvidos para controlo automático dos geradores, assim como o controlo da energia que transita nas interligações, têm atualmente um papel fundamental nos modernos centros de controlo dos SEE.

Um gerador acionado por uma turbina pode ser representado como uma grande massa rotativa, com dois binários que atuam em oposição. Como se pode ver na figura 1,  $T_{mec}$ , o binário mecânico, atua de modo a aumentar a velocidade angular, enquanto  $T_{elec}$ , o binário eletromagnético elétrico, ou resistente, atua de modo a reduzir essa mesma velocidade.

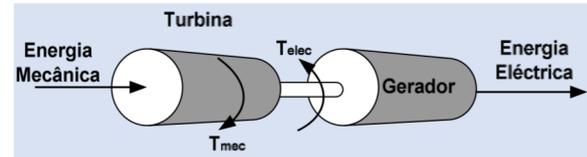


Figura 1: Binário mecânico e elétrico num grupo de produção

Quando o binário mecânico iguala em magnitude o binário eletromagnético, a velocidade angular  $\omega$  será constante. Se a carga eléctrica aumentar de modo que  $T_{el}$  seja maior que  $T_{mec}$ , todo o sistema vai reduzir a sua velocidade. Como seria desastroso para a estabilidade da frequência deixar o sistema diminuir a sua velocidade, alguma coisa deve ser feita de modo a aumentar o binário mecânico  $T_{mec}$ , para que o equilíbrio seja restabelecido, isto é, voltar a colocar o sistema a girar à velocidade nominal e igualar os binários, para que a velocidade volte a ser estabilizada e se mantenha constante.

Este processo deve ser efetuado sistematicamente devido às constantes variações da carga. Atendendo ao elevado número de geradores existentes num SEE, existem soluções que permitem distribuir as variações de carga por todos eles. Para isso, os geradores são equipados com sofisticados sistemas de controlo. Um controlador em cada unidade mantém constante a velocidade, enquanto o controlo

suplementar, normalmente efetuado por teleregulação a partir de um centro de controlo remoto, atua para distribuir a produção entre todos os geradores em serviço.

A figura 2 representa esquematicamente o princípio em que se baseia atualmente o controlo dos SEE.

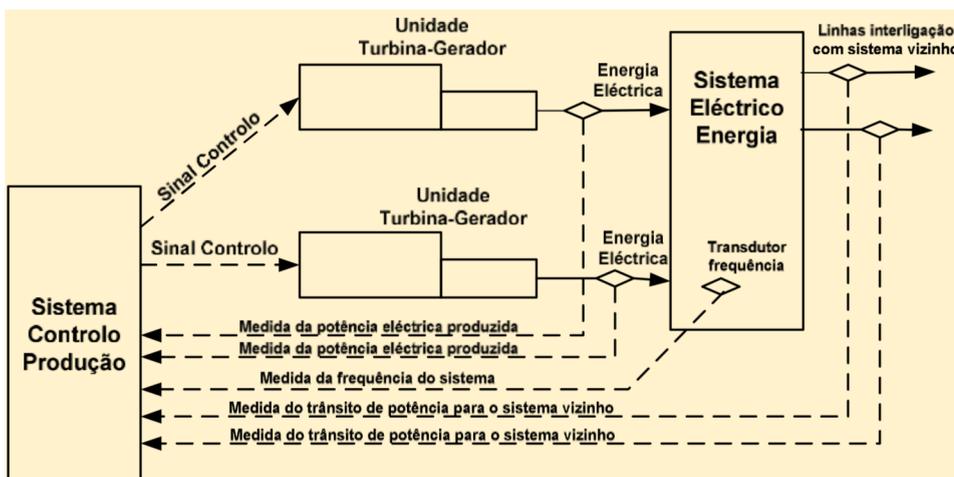


Figura 2: Controlo da produção em sistemas eléctricos de energia interligados

## 2 Modelização dos geradores

Na teoria dos sistemas de controlo, é fundamental modelizar todos os equipamentos intervenientes. No caso dos SEE, para que as ações de controlo sejam efetuadas com sucesso, é de extrema importância conhecer com exatidão o modelo dos equipamentos sujeitos a ações de controlo com vista ao funcionamento estável e seguro dos SEE. Neste âmbito, inicialmente é importante definir-se alguns termos.

|            |   |
|------------|---|
| $\omega$   | Velocidade angular (rad/seg)                      |
| $\alpha$   | Aceleração angular                                |
| $\delta$   | Ângulo de fase da máquina                         |
| $T_a$      | Binário de aceleração da máquina                  |
| $T_{mec}$  | Binário mecânico exercido na máquina pela turbina |
| $T_{elec}$ | Binário elétrico exercido na máquina pelo gerador |
| $P_a$      | Potência de aceleração                            |
| $P_{mec}$  | Potência mecânica (entrada)                       |
| $P_{elec}$ | Potência elétrica (saída)                         |
| $J$        | Momento de inércia da máquina                     |
| $M$        | Momento angular da máquina                        |

Todas as quantidades, exceto o ângulo de fase, estão em “pu” do valor de base da máquina, ou, no caso de  $\omega$ , na frequência nominal do sistema.

No desenvolvimento a seguir, interessa considerar os desvios das grandezas do sistema em regime permanente. Os valores nominais ou de regime permanente têm o sobrescrito “0”.

Os desvios vão ser designados por  $\Delta$ .

Seguidamente, apresentam-se algumas relações fundamentais entre estas grandezas:

$$J \cdot \alpha = T_a \quad (1)$$

$$M = J \cdot \omega \quad (2)$$

$$P_a = \omega \cdot T_a = \omega(J\alpha) = M \cdot \alpha \quad (3)$$

Inicialmente considera-se apenas uma máquina rotativa.

Assume-se que inicialmente a máquina tem uma velocidade constante  $\omega_0$  e ângulo de fase  $\delta_0$ . Devido a efeitos de natureza elétrica, ou perturbações de natureza mecânica, a máquina vai estar sujeita a diferenças nos binários elétrico e mecânico, implicando uma aceleração ou desaceleração. O que vai interessar são os desvios da velocidade  $\Delta\omega$  e os desvios de fase  $\Delta\delta$  relativamente aos seus valores nominais. O desvio do ângulo de fase  $\Delta\delta$  é igual à diferença do ângulo de fase entre a máquina sujeita a uma aceleração  $\alpha$  e o eixo de referência da velocidade  $\omega_0$ . Se a velocidade da máquina em aceleração for  $\omega = \omega_0 + \alpha t$ , então:

$$\Delta\delta = \underbrace{\int (\omega_0 + \alpha t) dt}_{\text{ângulo de fase absoluto}} - \underbrace{\int \omega_0 dt}_{\text{ângulo de fase referência}} = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 - \omega_0 t = \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad (4)$$

O desvio da velocidade nominal,  $\Delta\omega$ , pode ser apresentado como:

$$\Delta\omega = \alpha t = \frac{d}{dt}(\Delta\delta) \quad (5)$$

A relação entre o desvio do ângulo de fase, o desvio de velocidade e o binário de aceleração é:

$$T_a = J\alpha = J \frac{d}{dt}(\Delta\omega) = J \frac{d^2}{dt^2}(\Delta\delta) \quad (6)$$

A seguir vai-se relacionar os desvios das potências elétricas e mecânicas com os desvios da velocidade de rotação e binário mecânico.

A relação entre a potência de aceleração e a potência elétrica e mecânica é:

$$P_a = P_{mec} - P_{elec} \quad (7)$$

Que pode ser escrita como a soma do seu valor em regime permanente com o valor do desvio:

$$P_a = P_{a0} + \Delta P_a \quad (8)$$

Onde:

$$P_{a0} = P_{mec0} - P_{elec0}$$

$$\Delta P_a = \Delta P_{mec} - \Delta P_{elec}$$

Então

$$P_a = (P_{mec0} - P_{elec0}) + (\Delta P_{mec} - \Delta P_{elec}) \quad (9)$$

De igual modo para os binários:

$$T_a = (T_{mec0} - T_{elec0}) + (\Delta T_{mec} - \Delta T_{elec}) \quad (10)$$

Usando a equação (3) pode-se obter:

$$P_a = P_{a0} + \Delta P_a = (\omega_0 + \Delta\omega)(T_{a0} + \Delta T_a)$$

Substituindo em (8) e (10), obtém-se:

$$(P_{mec0} - P_{elec0}) + (\Delta P_{mec} - \Delta P_{elec}) =$$

$$= (\omega_0 + \Delta\omega)[(T_{mec0} - T_{elec0}) + (\Delta T_{mec} - \Delta T_{elec})]$$

Assumindo que os valores permanentes podem ser fatorizados desde que:

$$P_{mec0} = P_{elec0}$$

$$T_{mec0} = T_{elec0}$$

E assumindo também que os termos de segunda ordem que envolvem produtos de  $\Delta\omega$  com  $T_{mec}$  e que  $\Delta T_{elec}$  podem ser desprezados, então:

$$\Delta P_{mec} - \Delta P_{elec} = \omega_0 (\Delta T_{mec} - \Delta T_{elec}) \quad (11)$$

Como se pode ver na equação (6), o binário de aceleração está relacionado com o desvio de velocidade da seguinte forma:

$$(T_{mec0} - T_{elec0}) + (\Delta T_{mec} - \Delta T_{elec}) = J \frac{d}{dt} (\Delta\omega) \quad (12)$$

Então como  $T_{mec0} = T_{elec0}$ , pode-se combinar as equações (11) e (12) para encontrar:

$$\Delta P_{mec} - \Delta P_{elec} = \omega_0 J \frac{d}{dt} (\Delta\omega) = M \frac{d}{dt} (\Delta\omega) \quad (13)$$

Aplicando a Transformada de Laplace obtém-se para a equação:

$$\Delta P_{mec} - \Delta P_{elec} = M s \Delta\omega \quad (14)$$

Esta equação e o respetivo sistema de controlo realimentado está representada no diagrama de blocos da figura 3.

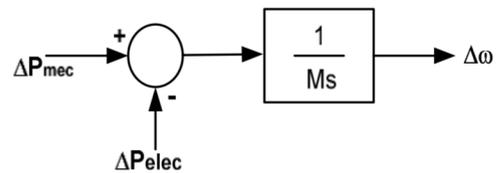


Figura 3: relação entre a potência mecânica e a potência elétrica e a variação de velocidade

As unidades de M são em Watt por radiano por segundo. Vai usar-se sempre a potência em “pu” face à velocidade em “pu” por segundo (“pu” nos valores de base da máquina).

### 3 Modelização da carga alimentada pelos geradores

As cargas ligadas a um sistema elétrico consistem num conjunto de equipamentos elétricos, alguns puramente resistivos, outros são motores com relações potência-frequência variáveis e, outros, apresentam as mais diversas características. Como os motores são a maioria das cargas de um SEE, há necessidade de modelizar o efeito das variações da frequência da rede nessas cargas. A relação entre as variações de carga com origem em desvios de frequência é obtida por:

$$\Delta P_{L(freq)} = D \Delta\omega$$

$$D = \frac{\Delta P_{L(freq)}}{\Delta\omega}$$

onde D representa o desvio da carga em percentagem, dividido por o desvio da frequência também em percentagem.

Por exemplo, se a carga variar 2% quando se verifica um desvio de 1% na frequência, D seria igual a 2. Contudo o valor de D usado para resolver respostas dinâmicas do sistema deve ser alterado se o valor de base MVA for diferente do valor nominal da carga. Por exemplo, D era referido para uma carga nominal de 1200 MVA e o problema dinâmico estava referido a uma base de 1000 MVA. Notar que D=2 diz que a carga varia em 2 pu para um desvio de 1 pu verificado na frequência. Isto é, a carga pode variar em  $2 \times 1200$  ou 2400 MVA para um desvio de 1% na frequência.

Quando expresso numa base de 1000 MVA, D fica igual a:

$$D_{1000MVA} = 2 * \left( \frac{1200}{1000} \right) = 2,4$$

O desvio de  $P_{elec}$  na figura 3, equação (15) é:

$$\Delta P_{elec} = \underbrace{\Delta P_L}_{\text{desvio insensível à frequência}} + \underbrace{D \cdot \Delta \omega}_{\text{desvio sensível à frequência}}$$

Incluindo esta abordagem no diagrama de blocos da figura 3 resulta num novo diagrama de blocos que se apresenta na figura 4.

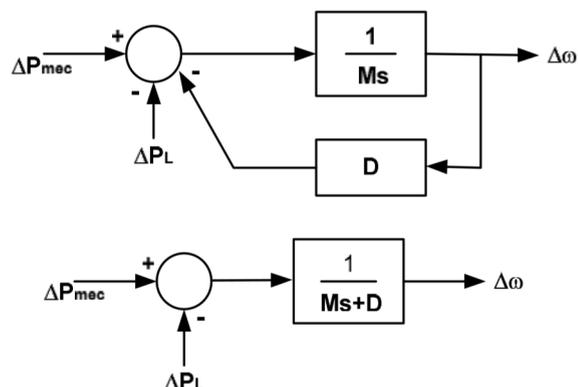


Figura 4: diagrama de blocos das massas girantes e da carga na forma como é visto pela máquina primária

Quando dois ou mais geradores estão ligados em paralelo num sistema, deve-se ter em consideração as diferenças angulares de fase ao longo da rede e analisar os respetivos desvios de frequência.

No entanto, para facilitar análise do funcionamento do controlador, assume-se que a frequência é igual em toda a rede. Assim, pode-se agrupar as massas rotativas das turbinas dos geradores num sistema equivalente, que é obtido pela soma das potências de saída das unidades individuais.

Isto é apresentado na figura 5, onde todas as unidades são agrupadas numa única massa rotativa equivalente,  $M_{equiv}$ .

De igual modo, todas as cargas individuais do sistema são agrupadas numa carga equivalente com coeficiente de amortecimento  $D_{equiv}$ .

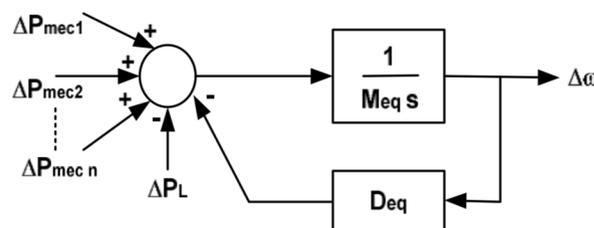


Figura 5: sistema equivalente a vários grupos geradores acionados por múltiplas turbinas

#### 4 Modelização das turbinas

O sistema que aciona o gerador pode ser uma turbina a vapor ou hidráulica. Os modelos para estes sistemas têm que ter em consideração o fornecimento de vapor e as características de controlo do sistema da caldeira, no caso da turbina a vapor, ou as características do distribuidor das turbinas hidráulicas. Vai-se considerar os sistemas mais simples.

O modelo destes sistemas mais simples, apresentado na figura 6, relaciona a posição da válvula que controla o fluxo de admissão de combustível, água, ou vapor, com a potência de saída da máquina, onde TCH é a constante de tempo, “tempo de carga” e  $\Delta P_{valv}$  é igual ao desvio da válvula do valor nominal em p.u..

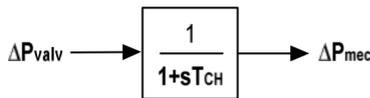


Figura 6: modelo das turbinas ou máquina primária

O modelo do sistema máquina primária – gerador – carga para um grupo gerador, pode ser construído juntando as figuras 4 e 6, como se apresenta na figura 7.

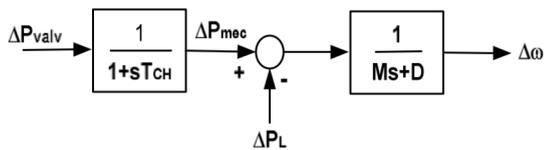


Figura 7: modelo da máquina primária, gerador e carga

## 5 Modelização do sistema de controlo

Supor uma unidade de produção a trabalhar com valor constante da potência mecânica fornecida pela turbina. Qualquer variação na carga resultará numa variação da velocidade, o que seria suficiente para que a carga sensível à frequência compensasse exatamente essa variação na carga.

Esta condição originará que a frequência do sistema possa desviar-se para além dos limites que estava sujeita. Este problema pode ser ultrapassado adicionando um mecanismo controlador que “mede” a velocidade da máquina e ajusta a válvula de admissão de fluido na turbina de modo a alterar a potência mecânica fornecida, compensando as variações da carga e restaurando a frequência para os valores nominais.

No passado usava-se um mecanismo com esferas em extremidades de hastes (regulador centrífugo de ação direta) que giravam e “sentiam” a velocidade da máquina e forneciam um movimento mecânico de resposta as variações da velocidade (reguladores centrífugos).

Os controladores modernos usam meios eletrónicos para medir desvios na velocidade e normalmente usam combinações de sistemas eletrónicos, mecânicos e meios hidráulicos para regular a posição da válvula de admissão.

O controlador mais simples “ISÓCRONO”, ajusta a posição da válvula para um valor que mantém a frequência sempre no seu valor nominal. Este sistema só é eficaz se controlar uma máquina isoladamente, caso contrário, os controladores vão “lutar” entre si. Por outro lado, os controladores não isócronos originam um desvio de frequência diferente de zero. Para forçar o erro da frequência para zero, é necessário efetuar uma ação de reposicionamento. Esta ação é conseguida integrando o erro de frequência (ou velocidade) que é a diferença entre a velocidade atual e a desejada ou de referência (nominal). Este mecanismo está representado na figura 8.

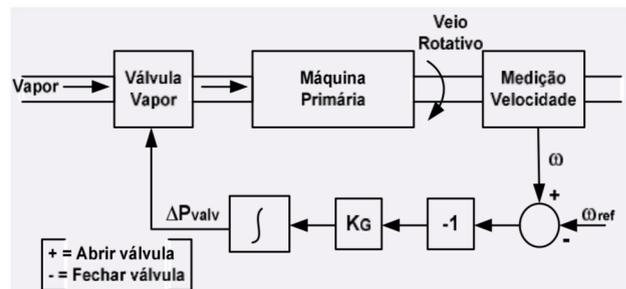


Figura 8: modelo do controlador isócrono

A saída do sistema de medição da velocidade,  $\omega$ , é comparado com a referência  $\omega_{ref}$  para produzir o sinal de erro  $\Delta\omega$ .

Este erro  $\Delta\omega$  é negado e amplificado com um ganho  $KG$  e integrado para produzir um sinal de controlo,  $\Delta P_{válv}$ , que faz com que a válvula de admissão abra ( $\Delta P_{posição\ válvula}$ ) quando  $\Delta\omega$  é negativo. Se, por exemplo, a máquina está a girar à velocidade nominal e a carga eléctrica aumenta,  $\omega$  vai baixar para valores inferiores a  $\omega_{ref}$  e  $\Delta\omega$  vai ser negativo.

A ação do amplificador e integrador vai ser a de abrir a válvula de admissão, fazendo com que a turbina aumente a potência mecânica, aumentando a velocidade  $\omega$  e, assim, aumentando a  $P_{elec}$  do gerador.

Quando  $\omega$  for igual a  $\omega_{ref}$  a válvula fica numa nova posição (mais aberta) permitindo ao grupo turbina-gerador produzir o suficiente para fazer face ao aumento da carga.

O controlador “isócrono” (velocidade constante) da figura 8 não pode ser utilizado se dois ou mais geradores estiverem eletricamente ligados ao mesmo sistema, visto que ambos teriam que ter a mesma velocidade ou “lutariam” para tentar trazer a frequência do sistema para o seu valor nominal.

Para ser possível ter dois ou mais geradores ligados em paralelo, os controladores estão equipados com uma malha de realimentação que faz com que o erro de velocidade seja anulado para os diferentes valores de produção do gerador. Isto pode ser realizado adicionando uma malha de realimentação à volta do integrador, como se apresenta na figura 9.

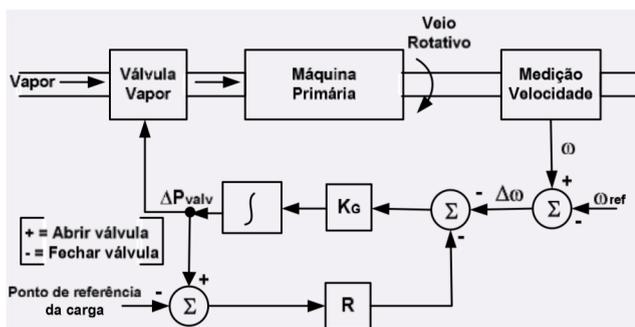


Figura 9: modelo do controlador com realimentação da queda de velocidade

Notar que se inseriu uma nova entrada, chamada “ponto de referência da carga”, que se abordará mais à frente. O diagrama de blocos deste controlador é mostrado na figura 10, onde se pode verificar a existência de um andar ganho de  $1/R$  e uma constante de tempo  $T_G$ .

O resultado de adicionar a malha de retorno com ganho  $R$  é uma característica como se apresenta na figura 11.

O valor de  $R$  determina o declive da característica. Isto é,  $R$  determina as alterações na saída da unidade para um determinado desvio na frequência. Prática comum é regular  $R$  em cada unidade de modo que a alteração de 0 a 100% da saída resulte na mesma variação da frequência em cada unidade de produção.

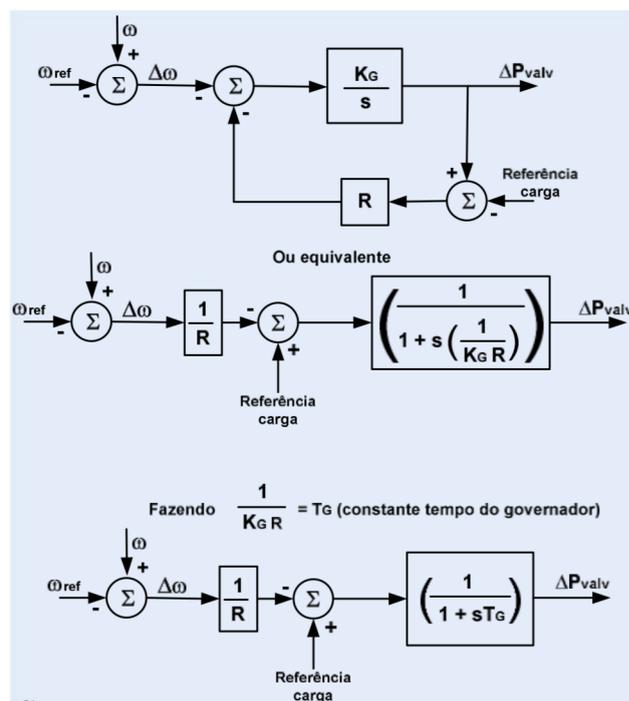


Figura 10: diagrama de blocos do modelo do controlador com queda de velocidade

Como resultado, alterações na carga elétrica do sistema serão compensadas por alterações na saída das unidades produtoras, proporcionais à potência nominal de cada uma delas.

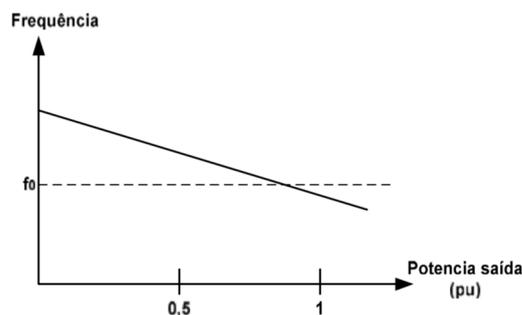


Figura 11: característica de velocidade dos grupos geradores

Se dois geradores com as respectivas características de velocidade apresentadas na figura 11 forem ligados a uma rede, a frequência será sempre constante e igual nos dois, pelo que eles irão partilhar a carga entre si. Isto é apresentado na figura 12, que apresenta duas unidades com características diferentes partilhando a carga entre si.

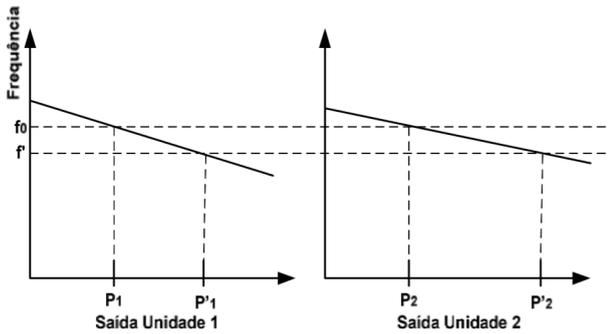


Figura 12: Distribuição da carga por dois grupos geradores

Como apresentado na figura 12, as duas unidades estão inicialmente à frequência nominal de valor  $f_0$ .

Quando a carga aumenta  $\Delta PL$ , a tendência é que cada unidade baixe a velocidade. Os controladores vão atuar aumentando a produção da unidade até encontrar uma nova frequência comum  $f'$ .

O valor de carga assumido por cada unidade é proporcional ao declive da sua característica.

A unidade 1 aumenta a sua produção de  $P_1$  para  $P'1$ , a unidade 2 aumenta a produção de  $P_2$  para  $P'2$ , de modo que a produção aumente  $P'1-P_1+P'2-P_2$ , igual a  $\Delta PL$ .

Notar que a frequência atual depende também da característica de regulação de cada unidade de produção.

A figura 9 apresenta uma entrada chamada “ponto de referência da carga”. Alterando este ponto de referência da carga, a característica do controlador pode ser ajustada de forma a obter a frequência de referência para qualquer valor de produção. Isto é apresentado na figura 13.

O ponto fundamental do controlo de uma unidade de produção é o ponto de referencia da carga. Ajustando este ponto de regulação em cada unidade, o despacho desejado para cada unidade pode ser mantido enquanto a frequência do sistema se mantiver próxima do valor desejado.

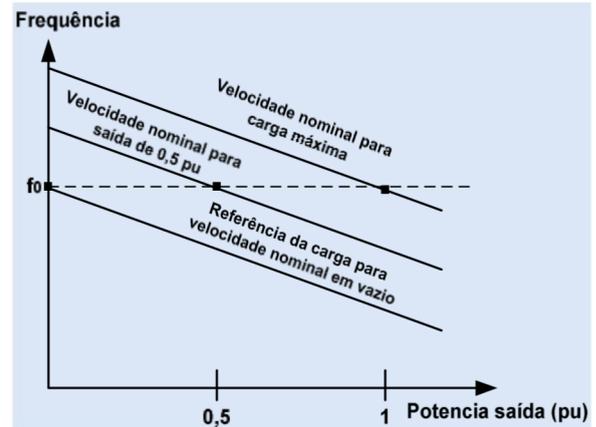


Figura 13: parâmetros para regulação da velocidade

Em regime permanente uma alteração em  $\Delta P_{v\grave{a}lvula}$  de 1 pu necessita de uma variação de  $R$  pu no valor da frequência. Por exemplo, uma regulação de 3% de uma unidade indica que a uma alteração na válvula de 100% (1 pu ou alteração de 100% na saída da unidade) corresponde uma alteração de 3% na frequência.

Então,  $R$  é igual ao desvio da frequência (pu) dividida pelo desvio da saída (pu). Isto é:

$$R = \frac{\Delta \omega}{\Delta P} \text{ [pu]}$$

Assim, pode-se construir um diagrama de blocos da unidade de produção e do respetivo controlador da máquina primária/carga como apresentado na figura 14.

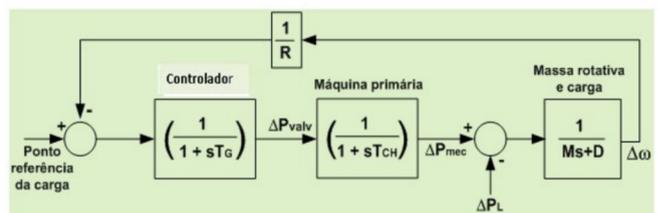


Figura 14: Diagrama de blocos, controlador, turbina e massas girantes

Supondo que o gerador sofre um aumento de carga  $\Delta PL(s)=\Delta PL/s$ , a função de transferência que relaciona a alteração da carga  $\Delta PL$ , com a variação da frequência  $\Delta \omega$  é:

$$\Delta\omega(s) = \Delta P_L(s) \left[ \frac{\frac{-1}{Ms+D}}{1 + \frac{1}{R} \left( \frac{1}{1+sT_G} \right) \left( \frac{1}{1+sT_{CH}} \right) \left( \frac{1}{Ms+D} \right)} \right]$$

O valor de  $\Delta\omega(s)$  em regime permanente pode ser encontrado por:

$$\Delta\omega_{regime\ permanente} = \lim_{s \rightarrow 0} [s\Delta\omega(s)] = \frac{-\Delta P_L \left( \frac{1}{D} \right)}{1 + \left( \frac{1}{R} \right) \left( \frac{1}{D} \right)} = \frac{-\Delta P_L}{\frac{1}{R} + D}$$

Notar que se  $D=0$  o desvio da velocidade seria simplesmente  $\Delta\omega = -R\Delta P_L$ .

Se vários geradores (cada com seu controlador e máquina primária) estiverem ligados à rede, o desvio da frequência será:

$$\Delta\omega = \frac{-\Delta P_L}{\frac{1}{R_1} + \dots + \frac{1}{R_n} + D}$$

## 6. Modelização das linhas de interligação

O trânsito de potência numa linha pode ser equacionado de uma forma simples usando o modelo DC. A equação seguinte permite obter o fluxo de potência numa linha de interligação em regime permanente.

$$P_{fluxo\ linha} = \frac{1}{X_{linha}} (\theta_1 - \theta_2)$$

Para efeito de análise, pode-se ajustar a equação de forma que esta traduza os desvios do valor da potência especificada (ou de referência), em função dos desvios dos respetivos ângulos de fase.

$$\begin{aligned} P_{f.linha} + \Delta P_{f.linha} &= \frac{1}{X_{linha}} [(\theta_1 + \Delta\theta_1) - (\theta_2 + \Delta\theta_2)] = \\ &= \frac{1}{X_{linha}} (\theta_1 - \theta_2) + \frac{1}{X_{linha}} (\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2) \end{aligned}$$

Assim, a variação da potência numa linha de interligação pode ser obtida pela seguinte equação:

$$\Delta P_{f.linha} = \frac{1}{X_{linha}} (\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2)$$

onde  $\Delta\theta_1$  e  $\Delta\theta_2$  são equivalentes a  $\Delta\delta_1$  e  $\Delta\delta_2$  definidos e apresentados na equação 5. Então, usando a relação apresentada na equação 5, obtém-se:

$$\Delta P_{f.linha} = \frac{T}{S} (\Delta\omega_1 - \Delta\omega_2)$$

Onde:

$$T = 377 \times 1 / X_{linha} \text{ (para 60Hz).}$$

$\Delta\theta$  tem que estar expresso em radianos para  $\Delta P_{linha}$  estar em “pu” de MW, mas  $\Delta\omega$  está em pu do desvio de velocidade. Por isso, tem-se que multiplicar  $\Delta\omega$  por 377 rad/seg (frequência de base em rad/seg a 60Hz,  $2\pi f$ ).  $T$  é o coeficiente de rigidez da linha, ou “stiffness”.

Considere-se agora um sistema interligado dividido em duas áreas, cada uma com seus geradores. As áreas estão interligadas por uma linha comum. O fluxo de potência na linha vai manifestar-se como uma carga positiva para uma área e carga igual, mas negativa para a outra área, ou vice-versa dependendo do sentido do fluxo de energia. O sentido do fluxo é determinada pelo ângulo de fase entre as áreas, que é determinado pelos desvios relativos da “velocidade elétrica” em ambas as áreas. Um diagrama de blocos representando esta ligação é apresentado na figura 15.

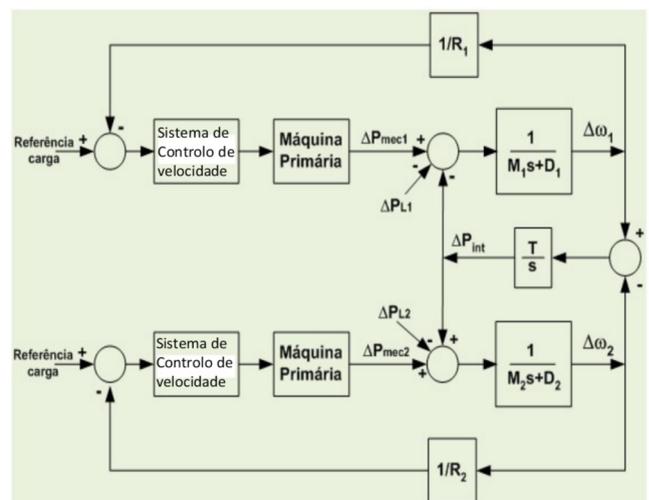


Figura 15: Diagrama de blocos de duas áreas interligadas

Notar que o fluxo de potência na linha foi definido ir da área 1 para a 2, então, o fluxo aparece como carga para a área 1 e como produção (carga negativa) para a área 2.

Assumindo que as potências mecânicas são constantes, as massas rotativas e a linha de interligação apresentam características oscilatórias amortecidas, conhecidas como oscilações de sincronização.

É muito importante analisar o desvio da frequência em regime permanente, os desvios do fluxo de potência nas linhas de interligação e a produção dos geradores depois de se manifestar variações na carga de qualquer uma das áreas. Supor uma variação na carga da área 1 de  $\Delta P_{L1}$ . Em regime permanente, depois das oscilações de sincronização terem sido amortecidas, a frequência será constante e de igual valor nas duas áreas. Então:

$$\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 = \Delta\omega \quad e \quad \frac{d(\Delta\omega_1)}{dt} = \frac{d(\Delta\omega_2)}{dt} = 0$$

$$\Delta P_{mec1} - \Delta P_{linha} - \Delta P_{L1} = \Delta\omega D_1 \quad (15)$$

$$\Delta P_{mec2} + \Delta P_{linha} = \Delta\omega D_2$$

Sendo:

$$\Delta P_{mec1} = \frac{-\Delta\omega}{R_1}$$

$$\Delta P_{mec2} = \frac{-\Delta\omega}{R_2}$$

Fazendo as substituições adequadas obtém-se:

$$-\Delta P_{linha} - \Delta P_{L1} = \Delta\omega \left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right)$$

$$\Delta P_{linha} = \Delta\omega \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)$$

Ou, finalmente obtém-se a equação:

$$\Delta\omega = \frac{-\Delta P_{L1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2}$$

A partir da qual pode-se encontrar o desvio do fluxo de potência na linha de interligação:

$$\Delta P_{linha} = \frac{-\Delta P_{L1} \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \quad (16)$$

Notar que as condições consideradas nas equações anteriores são para as novas condições em regime permanente, após as variações verificadas na carga. O novo fluxo de energia na linha de interligação é determinado pelo desvio médio da carga e a produção de cada área. Não é necessário conhecer a rigidez da linha T para determinar o novo trânsito na linha, embora a rigidez determine a variação do ângulo de fase resultante do novo trânsito de potência na linha.

Caso seja pretendido analisar dinamicamente o comportamento nas 2 áreas, verificava-se que um desvio na carga resulta num erro de frequência. Isto é apresentado na figura 16, que mostra a resposta em frequência do sistema para um desvio da carga. Notar que a figura 16 apresenta apenas valores médios, omitindo qualquer oscilação de elevada frequência.

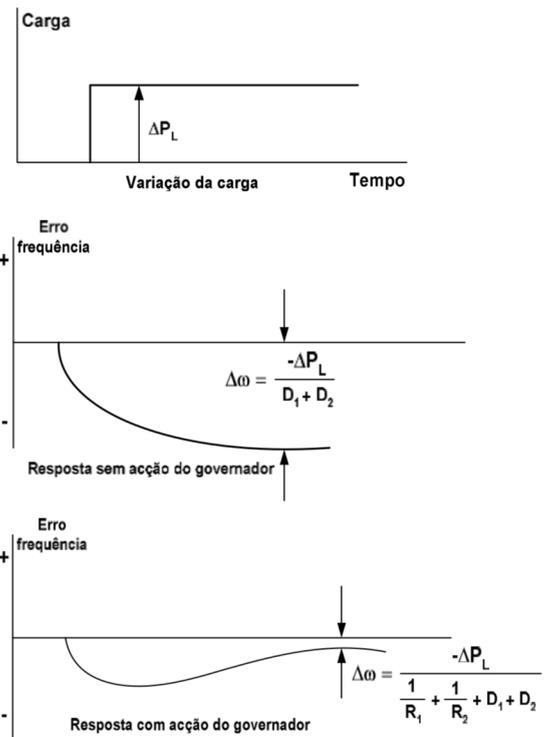


Figura 16: Resposta em frequência para uma variação de carga

## 7. Controlo automático da produção

Controlo Automático da Produção, ou *Automatic Generation Control (AGC)* é o nome atribuído a um sistema de controlo que tem três objetivos fundamentais

1. Manter a frequência do sistema dentro dos limites estabelecidos;
2. Manter os intercâmbios de potência entre áreas dentro dos valores estabelecidos;
3. Manter a produção de cada grupo no valor mais económico.

### 7.1 Controlo Suplementar

Para compreender cada um dos objetivos apresentados, vai assumir-se inicialmente que se tem apenas uma única unidade de produção a alimentar uma carga de um sistema isolado.

Como na figura 5, alterações na carga produzirão alterações na frequência, com uma amplitude que depende da característica de regulação do controlador e da sensibilidade das cargas à variação da frequência. Desde que ocorra uma alteração na carga, um controlo suplementar deve atuar para restaurar a frequência para o valor nominal.

Isto pode ser implementado adicionando um controlo de *reset* no controlador, como apresentado na figura 17.

A ação de *reset* do controlo suplementar vai forçar o erro de frequência para zero, ajustando o valor de referência da velocidade. Por exemplo, o erro ilustrado na figura 16 seria forçado para zero, ou anulado.

### 7.2 Controlo da potência nas linhas de interligação

Quando duas áreas interligam os seus sistemas fazem-no por várias razões. A primeira é permitir comprar ou vender energia ao sistema vizinho que permita custos de operação mais rentáveis.

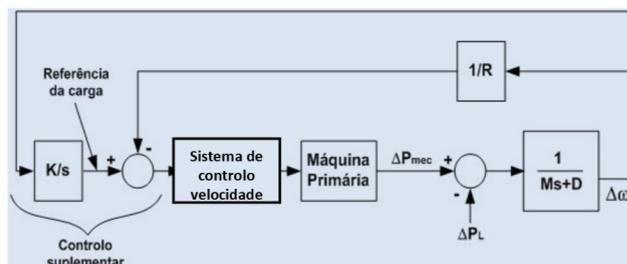


Figura 17: Controlo suplementar adicionado à produção dos geradores

Depois, mesmo que não haja fluxo de potência na linha, se um sistema sofrer uma perda repentina de uma unidade de produção, as unidades dos sistemas interligados irão sentir desvios na frequência, e podem ajudar a restaurar esse valor para o nominal.

As interligações apresentam um problema de controlo interessante no que diz respeito à distribuição da carga pelos geradores. A situação hipotética da figura 18 será usada para ilustrar o problema. Supor que os dois sistemas da figura têm características de produção e carga iguais ( $R_1=R_2$  e  $D_1=D_2$ ).

Assumir que o sistema 1 envia 100 MW para o sistema 2 sob um acordo feito entre os operadores dos dois sistemas. Agora, supor que o sistema 2 sofre um repentino aumento de carga de 30 MW.

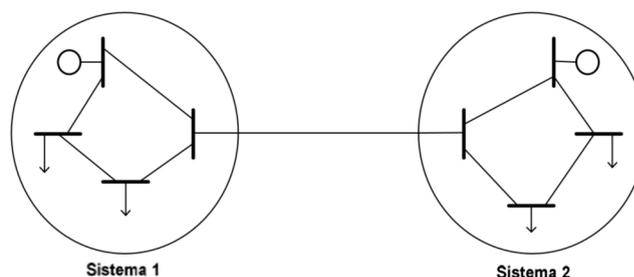


Figura 18: Sistema de duas áreas interligadas

Como as unidades têm características iguais, ambas vão sentir um aumento de 15 MW na carga, e a linha de interligação vai sofrer um aumento no trânsito de energia de 100 MW para 115 MW. Ou seja, o aumento de 30 MW na carga do sistema 2 vai ser compensado com um aumento na produção do sistema 2 de 15 MW mais um aumento do trânsito na linha de 15 MW para o sistema 2.

Isto seria bom, só que o sistema 1 tinha contratado vender apenas 100 MW e não 115 MW, e os seus custos de produção aumentaram sem que ninguém pague o extra produzido. Assim, torna-se necessário um sistema de controlo que reconheça que os 30 MW de aumento de carga ocorreram no sistema 2 e, por isso, aumente a produção do sistema 2 em 30 MW, restabelecendo a frequência do sistema no seu valor nominal. O controlo do sistema 1 também alteraria a produção do sistema 1 para a que tinha antes de se verificar o aumento repentino de 30 MW na carga do sistema 2.

Tal sistema de controlo deve usar dois circuitos de informação:

- A frequência do sistema;
- O fluxo de potência na linha de interligação.

Este esquema de controlo deveria, se necessário, reconhecer o seguinte:

1. Se a frequência baixar e se o trânsito de potência a sair do sistema aumentar, um aumento de carga ocorreu no sistema vizinho;
2. Se a frequência baixar e se o trânsito de potência a sair do sistema diminuir, um aumento de carga ocorreu no próprio sistema.

Isto também pode ser estendido para casos em que a frequência aumente.

Considerar o seguinte:

$P_{int}$  = Intercâmbio de potência na linha de interligação  
 (“+” para fluxo a sair da área, “-” para fluxo a entrar)

$P_{intcontratado}$  = Intercâmbio contratado.

$$\Delta P_{int} = P_{int} - P_{intcontr}$$

As ações de controlo podem ser resumidas na tabela 1.

Tabela 1: Ações de controlo

| $\Delta\omega$ | $\Delta P_{int}$ | Alteração carga                    | Ação de controlo resultante |
|----------------|------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| -              | -                | $\Delta PL_1 +$<br>$\Delta PL_2 0$ | Aumento Pger sistema 1      |
| +              | +                | $\Delta PL_1 -$<br>$\Delta PL_2 0$ | Diminuição Pger sistema 1   |
| -              | +                | $\Delta PL_1 0$<br>$\Delta PL_2 +$ | Aumento Pger sistema 2      |
| +              | -                | $\Delta PL_1 0$<br>$\Delta PL_2 -$ | Diminuição Pger sistema 2   |

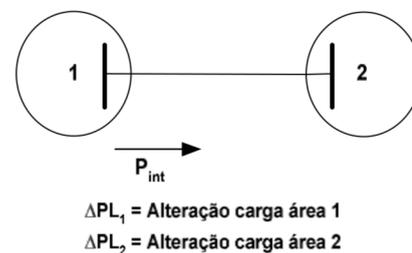


Figura 19: Ações de controlo na linha de interligação

Define-se controlo de área de um sistema interligado o local onde a produção e a carga são controlados como as regras apresentadas na tabela anterior.

As fronteiras do controlo da área são simplesmente as linhas de interligação, onde o fluxo de potência está a entrar ou a sair.

Todas as linhas que interligam áreas de diferentes SEE devem ser monitorizadas, para que o intercâmbio total entre áreas de controlo possa ser conhecido e contribuir para a estabilidade no controlo dos sistemas.

As regras aplicadas na tabela podem ser implementadas por um mecanismo de controlo que mede o desvio na frequência  $\Delta\omega$  e os desvios no valor do intercâmbio  $\Delta P_{int}$ .

A resposta da frequência e dos trânsitos de potência nas linhas de interligação resultantes de uma variação na carga  $\Delta PL_1$ , no sistema de 2 áreas da figura 15 são encontrados nas equações (15) a (16).

Estes resultados são representados da seguinte forma:

$$\Delta\omega = \frac{-\Delta P_{L1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \quad (17)$$

$$\Delta P_{linha} = \frac{-\Delta P_{L1} \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \quad (18)$$

Relativamente à primeira linha da tabela tem-se:

$$\Delta P_{ger1} = \Delta P_{L1}$$

$$\Delta P_{ger2} = 0$$

A alteração necessária na produção, historicamente denominada Erro de Controlo de Área (ACE), representa o desvio na produção da área necessário para restaurar a frequência e o intercâmbio nas linhas de interligação para os valores desejados.

O Erro de Controlo da Área (ACE) pode ser expresso da seguinte forma:

$$ACE = (P_1 - P_0) - 10 \cdot B_f (f_1 - f_0) \pm B_t \Delta t$$

em que:

$P_1$  Intercâmbio que efetivamente se verifica (MW)

$P_0$  Intercâmbio previsto à frequência normal (MW)

$f_1$  Frequência que efetivamente se verifica (Hz)

$f_0$  Frequência desejada (Hz)

$B_f$  "Bias" da área (MW/0,1Hz): (variação da frequência com a carga)

$B_t$  "Bias" do erro temporal da área (MW/s)

$\Delta t$  Erro temporal (s), - para devagar e + para depressa

No caso dos dois sistemas interligados que estão a ser analisados, as equações para o ACE para cada área são:

$$ACE_1 = -\Delta P_{int1} - B_1 \Delta\omega$$

$$ACE_2 = -\Delta P_{int2} - B_2 \Delta\omega$$

Onde  $B_1$  e  $B_2$  são chamados fatores de influência da frequência "Bias". Pode-se ver a partir das equações (34) e (35) que estes valores podem obter-se da seguinte forma:

$$B_1 = \left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) \quad (19)$$

$$B_2 = \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)$$

Resultando:

$$ACE_1 = \left( \frac{+\Delta P_{L1} \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \right) - \left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) \left( \frac{-\Delta P_{L1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \right) = \Delta P_{L1}$$

$$ACE_2 = \left( \frac{-\Delta P_{L1} \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \right) - \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right) \left( \frac{-\Delta P_{L1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \right) = 0$$

Este controlo pode ser continuado usando o esquema da figura 20. Notar que os valores  $B_1=B_2$  teriam que mudar cada vez que a unidade fosse ligada/desligada, de modo a obter os valores exatos dados pelas equações (19). Atualmente, a ação integral de controlo suplementar garante uma reposição do ACE para zero, mesmo quando  $B_1$  e  $B_2$  tomam valores incorretos.

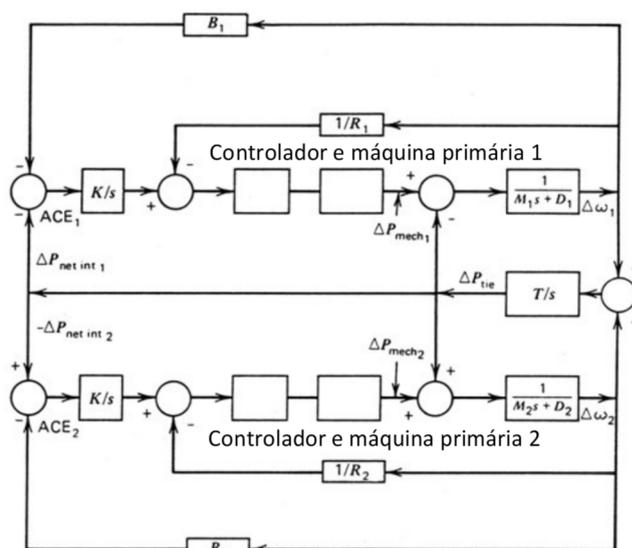


Figura 20: Controlo suplementar "Bias" na linha de interligação

### 8 Conclusão

Os sistemas elétricos de energia em corrente alternada constituem redes síncronas interligadas que funcionam com uma frequência comum que tem de ser regulada e controlada de uma forma rigorosa. Isto não será viável se não existir um método eficaz de controlo sobre os geradores, sobre a frequência e a tensão na rede e, também, sobre o transito de energia nas linhas de interligação. Este facto é tanto mais relevante quando se sabe que em corrente alternada a energia não pode ser eletricamente armazenada. Neste artigo, apresenta-se os conceitos fundamentais associados às ações de controlo dos sistemas elétricos de energia interligados. Baseia-se na modelização de todos os equipamentos constituintes aos quais se aplicam ações de controlo, com vista a garantir o equilíbrio entre a produção de energia e o consumo, as perdas nas redes de transmissão e a potência especificada para as linhas de interligação, garantindo-se assim a estabilidade da frequência e a exploração dos sistemas elétricos de uma forma segura.

## NOTAS DISPERSAS

---

**Massa:** Parte condutora de um equipamento elétrico suscetível de ser tocada, em regra, isolada das partes ativas mas podendo ficar em tensão em caso de defeito.

**Terra:** Massa condutora da Terra, cujo potencial elétrico é, em cada ponto, considerado, por convenção, igual a zero.

**Terra de proteção (Terra das massas):** Circuito de terra a que são ligados todos os elementos condutores da instalação normalmente sem tensão ou com tensões não perigosas, mas sujeitos a uma passagem fortuita de corrente que provoque diferenças de potencial perigosas e não previstas entre esses elementos (solo incluído).Comentário. - O presente regulamento permite que, em instalações que satisfaçam a condições especificadas, a terra de proteção possa desempenhar as funções de terra de serviço de alta ou de baixa tensão ou até de ambas, simultaneamente (terra geral). Fora de tais condições todas estas terras serão distintas.

**Terra de serviço (Terra da alimentação):** Circuito de terra a que são ligados unicamente pontos dos circuitos elétricos para influenciar as suas condições de exploração, quer limitando o potencial dos condutores em relação ao solo, quer permitindo o funcionamento das proteções

**Resistência de terra:** Resistência elétrica entre o eléctrodo de terra e a terra.

### Referências:

- [01] J. Sucena de Paiva, "Redes de Energia Eléctrica – uma análise sistémica", IST Press, 2014
- [02] J. Grainger, W. Stevenson, "Power System Analysis", McGraw-Hill International Editions, 1994
- [03] Rui Castro e Eduarda Pedro. "Redes e Sistemas de Energia Eléctrica", IST Press, 2014
- [04] Allen J. Wood; Bruce F. Wollenberg; Gerald B. Sheblé. "Power Generation, Operation, And Control". Third Edition. John Wiley & Sons, 2014
- [05] J. Beleza Carvalho, "O Controlo dos Sistemas Eléctricos de Energia", Apontamentos das aulas de Operação e Planeamento de Sistemas Eléctricos de Energia. ISEP, 2018.