

4 Método Proposto

4.1 Introdução

A formulação do método proposto para determinação das contribuições das fontes no suporte de potência reativa para cada carga, e para as perdas reativas em cada ramo de transmissão é detalhada neste capítulo. Suas principais características são:

- Modelagem de cargas como admitâncias equivalentes: Esta abordagem reduz a presença do efeito “counter-flow” na análise da superposição, de forma que as correntes fluem dos geradores para as cargas;
- Modelo de tensão: Ao invés do modelo de correntes (Unsihuay, 2006), nesta proposta é utilizado o modelo de tensões, que captura naturalmente a natureza local da potência reativa em relação à tensão.

Com a aplicação do teorema da superposição, um dado ponto de operação com diversas fontes operando é dividido em cenários, analogamente ao apresentado por Unsihuay e Saavedra (2006). Com isto, em cada cenário existe apenas a atuação de uma fonte de tensão, onde são verificados seus efeitos no perfil de tensão do sistema.

A partir da separação do circuito em cenários, e do conhecimento das tensões nodais, para a atuação individual de cada fonte, são derivadas as expressões de alocação de demandas e perdas reativas para cada fonte. Na alocação das demandas, cada carga é considerada individualmente, e deduz-se a expressão que considera as contribuições próprias de cada fonte. A partir destas alocações, é adicionalmente proposto um algoritmo que determina as áreas de influência das fontes no sistema para o suporte de potência reativa.

Neste contexto, assumindo que os custos associados a cada tipo de fonte para produção de potência reativa sejam previamente conhecidos, é proposta uma repartição de custos proporcional à alocação de demanda descrita anteriormente.

Adicionalmente, conhecendo-se as contribuições de tensão de cada fonte para as barras terminais de cada ramo, é derivada a expressão das alocações das perdas reativas.

Nas seções seguintes, primeiramente é apresentada a formulação para cálculo das contribuições de tensão de cada fonte para as barras do sistema. Em seguida, são apresentados os desenvolvimentos para se chegar às expressões das contribuições de potência reativa das fontes para cada barra de carga. Adicionalmente, são apresentados desenvolvimentos semelhantes para as alocações perdas reativas para cada ramo de transmissão entre as fontes do sistema.

4.2 Aplicação do Teorema da Superposição – Separação do Ponto de Operação por Fontes de Tensão Equivalentes

A motivação principal da utilização da estratégia de separação do ponto de operação em fontes de tensão equivalentes atuando individualmente está no forte acoplamento entre tensão e potência reativa, que pode proporcionar uma alocação de suporte de potência reativa mais aceitável. Desta forma, espera-se que a alocação das demandas e perdas reflita um aspecto de concordância entre os montantes de demanda supridos pelas fontes e as tensões provocadas por estas no sistema.

Para isto se fez necessária a determinação das contribuições de tensão de cada fonte para as barras de carga do sistema com a utilização do princípio da superposição. Este princípio é ilustrado em um sistema simplificado de quatro barras, dois geradores e duas cargas:

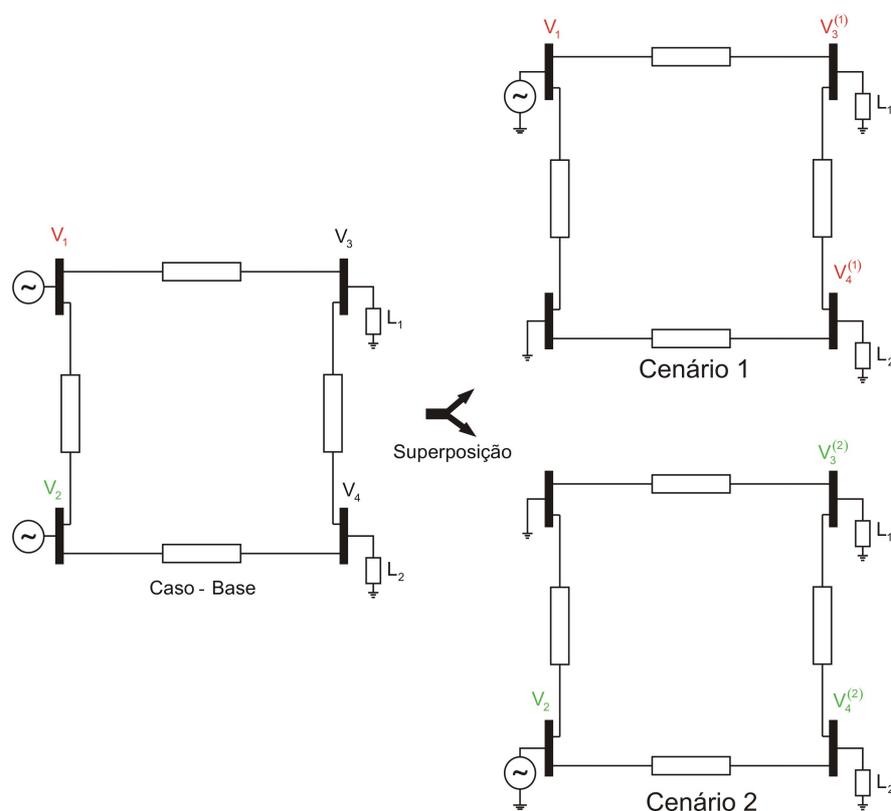


Figura 4.1 – Separação do Circuito em Cenários

Na Figura 4.1, é mostrada a aplicação do teorema da superposição em uma rede linear, de forma que as tensões nas barras de carga 3 e 4 sejam decompostas em contribuições das fontes das barras 1 e 2. Desta forma, estando o sistema operando apenas com a atuação da fonte 1, têm-se as tensões $V_3^{(1)}$ e $V_4^{(1)}$, enquanto que a atuação da fonte da barra 2 resultam as tensões $V_3^{(2)}$ e $V_4^{(2)}$. Para que o princípio seja satisfeito: $V_3 = V_3^{(1)} + V_3^{(2)}$ e $V_4 = V_4^{(1)} + V_4^{(2)}$. Vale ressaltar que as fontes de tensão equivalentes que não estão atuando no cenário em questão, são representadas como curtos-circuitos para a terra.

Uma maneira simples de calcular estas contribuições é descrita no capítulo 3, seção 3.4, e também apresentada por Barthold et al. (1978). Trata-se de manipulações algébricas das equações nodais de corrente e tensão de forma a estabelecer a relação entre as tensões das barras de carga e geração.

Considerando-se um ponto de operação de um sistema com NB barras, as equações nodais de corrente podem ser escritas matricialmente segundo:

$$[I] = [Y_{\text{barra}}][E] \quad (4.1)$$

Onde $[I]$ representa o vetor de injeções nodais de corrente, $[E]$ é o vetor de tensões nodais, e $[Y_{\text{barra}}]$ é a matriz de admitâncias do sistema.

A representação matricial das equações nodais pode ser arranjada da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} I_G \\ I_L \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GL} \\ Y_{LG} & Y_{LL} \end{bmatrix}}_{Y_{\text{Permutada}}^{\text{Barra}}} * \begin{bmatrix} E_G \\ E_L \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Onde I_G e E_G são os vetores de corrente e tensão apenas das barras de geração, e I_L e E_L são os vetores de corrente e tensão apenas das barras de carga.

Como dito anteriormente, as cargas são representadas como admitâncias equivalentes, das quais podem ser calculadas como:

$$Y_n = -\frac{I_n}{E_n} \quad (4.3)$$

Onde Y_n é a admitância equivalente da n-ésima barra de carga do sistema, I_n é a injeção de corrente complexa da barra n , obtida a partir da equação (4.1), e E_n é a tensão da barra n .

Após calculadas as admitâncias equivalentes para todas as barras de carga, estas são inseridas na sub-matriz Y_{LL} da equação (4.2). Logo, esta passa a ser escrita como:

$$\begin{bmatrix} I_G \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GL} \\ Y_{LG} & Y'_{LL} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} E_G \\ E_L \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Onde $[Y'_{LL}]$ é a sub-matriz de $Y_{Barra}^{Permutada}$ com a inserção das admitâncias equivalentes nos elementos da diagonal principal referentes às barras de carga.

Observa-se que após a consideração das cargas como elementos passivos da rede, (admitâncias equivalentes) suas respectivas injeções de corrente são nulas.

Tal como proposto por When-Chen Chu et al. (2004), e descrito nas equações (3.17) a (3.19) do capítulo anterior, o sistema de equações lineares que relaciona as tensões das barras de geração e carga é dado por:

$$[E_L] = [YA][E_G] \quad (4.5)$$

Onde $[YA] = -[Y'_{LL}]^{-1} [Y_{LG}]$.

Pode-se verificar que as tensões de barras de carga e geração estão relacionadas pelos elementos da matriz $[YA]$, que por sua vez agregam informações das admitâncias que interligam estas barras, através de $[Y_{LG}]$. Este aspecto é importante, pois implicará na coerência entre as alocações finais de demandas reativas e as impedâncias equivalentes entre as barras.

Com isto, aplicando o princípio da superposição a um sistema com NG fontes de tensão, a contribuição individual de tensão de um gerador b para as barras de carga pode ser calculada sistematicamente da seguinte forma:

$$E_L^b = \begin{bmatrix} E_1^b \\ \vdots \\ \vdots \\ E_L^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} YA_{1b} \\ \vdots \\ \vdots \\ YA_{Lb} \end{bmatrix} \cdot E_G^b = [YA] \cdot [E_G]; \forall E_G^m = 0, m \neq b, b = 1, \dots, NG \quad (4.6)$$

Onde:

E_L^b : Vetor de tensões de barras carga quando da atuação apenas da fonte b ;

E_G^b : Tensão complexa da barra onde está situada a fonte b .

Com a equação (4.6), ficam conhecidas as composições das tensões nodais devidas a cada fonte atuando separadamente, e o perfil de tensão do caso-base é reproduzido pela soma de todas as contribuições das NG fontes:

$$E_L = \sum_{b=1}^{NG} E_L^b \quad (4.7)$$

4.3 Alocação de Demandas de Potência Reativa

Nesta seção, são descritos os desenvolvimentos algébricos para se chegar à expressão de alocação das demandas de potência reativa de cada barra de carga para as fontes. Tal como mencionado previamente, neste estudo as cargas são representadas como admitâncias equivalentes, às quais são calculadas a partir um resultado de fluxo de carga. A partir dos valores de tensões e correntes nodais e admitâncias equivalentes, tem-se início o desenvolvimento da formulação.

Dada uma barra de carga L representada tal como a figura a seguir:

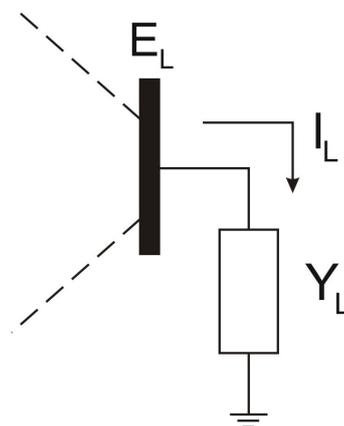


Figura 4.2 – Representação da Barra de Carga L

O consumo de potência é dado por:

$$S_L = E_L I_L^* \quad (4.8)$$

Onde:

S_L : Potência aparente consumida pela barra L ;

E_L : Tensão complexa da barra L ;

I_L : Corrente complexa consumida pela carga L ;

Y_L : Admitância equivalente da barra L , calculada por (4.3).

Sendo $Y_L = I_L/E_L$, a equação (4.8) pode ser escrita como:

$$S_L = E_L (E_L Y_L)^* = Y_L^* E_L (E_L)^* \quad (4.9)$$

Substituindo a equação (4.7) em (4.9), tem-se:

$$S_L = Y_L^* \left[\left(\sum_{b=1}^{NG} E_L^b \right) \left(\sum_{b=1}^{NG} (E_L^b)^* \right) \right] \quad (4.10)$$

A equação (4.10) pode ser escrita como:

$$S_L = Y_L^* \left\{ \sum_{b=1}^{NG} \left[E_L^b (E_L^b)^* + E_L^b \sum_{m=1, m \neq b}^{NG} (E_L^m)^* \right] \right\} \quad (4.11)$$

$$S_L = Y_L^* \sum_{b=1}^{NG} |E_L^b|^2 + Y_L^* \sum_{b=1}^{NG} E_L^b \sum_{m=1, m \neq b}^{NG} (E_L^m)^* \quad (4.12)$$

Explicitando as tensões em partes real e imaginária:

$$S_L = Y_L^* \sum_{b=1}^{NG} |E_L^b|^2 + Y_L^* \left[\sum_{b=1}^{NG} |E_L^b| \sum_{m=1, m \neq b}^{NG} |E_L^m| \cos(\theta_L^{bm}) + j \sum_{b=1}^{NG} |E_L^b| \sum_{m=1, m \neq b}^{NG} |E_L^m| \text{sen}(\theta_L^{bm}) \right] \quad (4.13)$$

Onde $\theta_L^{bm} = \theta_L^b - \theta_L^m$ representa a diferença angular entre os fasores E_L^b e E_L^m .

Pode-se provar que (Apêndice B):

$$\sum_{b=1}^{NG} |E_L^b| \sum_{m=1, m \neq b}^{NG} |E_L^m| \operatorname{sen}(\theta_L^{bm}) = 0 \quad (4.14)$$

A expressão (4.13) pode ser reescrita para:

$$S_L = Y_L^* \sum_{b=1}^{NG} |E_L^b|^2 + Y_L^* \sum_{b=1}^{NG} |E_L^b| \sum_{m=1, m \neq b}^{NG} |E_L^m| \cos(\theta_L^{bm}) \quad (4.15)$$

Tal como as grandezas estão dispostas na equação (4.15), a contribuição de potência aparente da fonte da barra b para a carga L pode ser individualizada segundo:

$$S_L^b = Y_L^* |E_L^b|^2 + Y_L^* |E_L^b| \sum_{m=1, m \neq b}^{NG} |E_L^m| \cos(\theta_L^{bm}) \quad (4.16)$$

Sendo $Y_L = G_L + jB_L$, a contribuição de demanda reativa da fonte da barra b para a barra de carga L é calculada por:

$$Q_L^b = -B_L |E_L^b|^2 - B_L |E_L^b| \sum_{m=1, m \neq b}^{NG} |E_L^m| \cos(\theta_L^{bm}) \quad , \quad b = 1 \dots NG \quad (4.17)$$

Na expressão (4.17), pode-se observar a contribuição de dois termos para a demanda da carga L alocada para a fonte b . O primeiro termo refere-se à contribuição própria da fonte b , enquanto que o segundo termo representa as contribuições mútuas entre a fonte b e as demais fontes. O termo mútuo atesta a natureza não linear da potência reativa, e verifica-se a impossibilidade de separação linear das contribuições das fontes.

A alocação dos custos é então proposta de acordo com os resultados de contribuição de demandas das fontes calculadas por (4.17). Pressupondo conhecidos os custos para produção de potência reativa para cada tipo de fonte (gerador e compensador síncrono, capacitor, reator, etc.) no mercado de serviços ancilares, tem-se:

$$CQ_L^b = C_b \cdot Q_L^b \quad (4.18)$$

Onde:

CQ_L^b : Custo alocado à carga L pelo suporte de potência reativa da fonte b ;

C_b : Custo em \$/MVA r da fonte b .

Para se estabelecer uma comparação teórica entre o método proposto e o apresentado por When-Chen Chu et al., a fórmula de alocação deste pode ser escrita em função das tensões segundo:

$$S_L^b = E_{LL}^{b*} = E_L^b (E_L Y_L)^* \quad (4.19)$$

Substituindo (4.7) em (4.19):

$$S_L^b = E_k^b \left[\sum_{b=1}^{NG} (E_k^b)^* Y_k^* \right] = Y_k^* \left[E_k^b \sum_{b=1}^{NG} (E_k^b)^* \right] \quad (4.20)$$

Separando os termos próprios e mútuos:

$$S_k^b = Y_k^* \left[|E_k^b|^2 + E_k^b \sum_{m=1, m \neq b}^{NG} (E_k^m)^* \right] \quad (4.21)$$

Explicitando as tensões em parte real e imaginária:

$$S_L^b = Y_L^* \left[|E_L^b|^2 + |E_L^b| \sum_{m=1, m \neq b}^{NG} |E_L^m| \cos(\theta_L^{bm}) + j |E_L^b| \sum_{m=1, m \neq b}^{NG} |E_L^m| \text{sen}(\theta_L^{bm}) \right] \quad (4.22)$$

Logo, a alocação de potência se dá pela parte imaginária da equação (4.22):

$$Q_L^b = \underbrace{-B_L \left[|E_L^b|^2 + |E_L^b| \sum_{m=1, m \neq b}^{NG} |E_k^m| \cos(\theta_L^{bm}) \right]}_H + \underbrace{G_L \left[|E_L^b|^2 + |E_L^b| \sum_{m=1, m \neq b}^{NG} |E_k^m| \text{sen}(\theta_L^{bm}) \right]}_M \quad (4.23)$$

Da equação (4.23) pode-se verificar que a diferença com relação ao método proposto é o termo adicional M . De fato, para cada barra de carga, a potência reativa total

contabilizada pela soma das alocações das fontes é a mesma por ambos os métodos. Porém, as alocações individuais podem diferir consideravelmente, introduzindo uma distorção no processo de alocação de custos, onde o termo M assumirá valores negativos para alguns agentes e positivos para outros.

4.4 Alocação de Perdas Reativas

Em um sistema de potência, pelas características de projeto da rede de transmissão, as perdas de potência reativa se dão em escala maior que as perdas de potência ativa. Além disto, a potência reativa gerada nas fontes é usualmente consumida localmente. Daí a necessidade da localização estratégica destas fontes.

Dito isto, este trabalho apresenta de forma complementar um algoritmo para partição das perdas reativas entre as fontes (geradores / compensadores) de forma a proporcionar alternativamente uma informação de uso da rede de transmissão por parte destas fontes. Os desenvolvimentos algébricos são semelhantes aos apresentados para alocação de demandas, embora sejam levados em conta neste caso os parâmetros π dos ramos de transmissão.

Dado um ramo pertencente ao sistema, ligando as barras i e j tal como a figura a seguir:

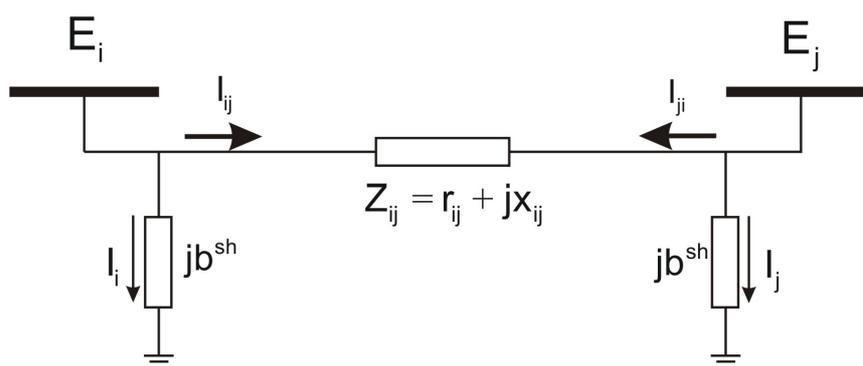


Figura 4.3 – Ramo de Transmissão i - j

As correntes no ramo podem ser expressas em função das tensões terminais segundo:

$$I_{ij} = \frac{E_i - E_j}{Z_{ij}} = \frac{E_{ij}}{Z_{ij}} \quad (4.24)$$

$$I_i = j b^{sh} \cdot E_i \quad (4.25)$$

$$I_j = j b^{sh} \cdot E_j \quad (4.26)$$

Pode-se verificar pelo princípio da superposição que a queda de tensão no ramo $i-j$ (E_{ij}) pode ser expressa por:

$$E_{ij} = \sum_{b=1}^{NG} E_{ij}^b \quad (4.27)$$

Onde NG corresponde ao número de fontes de potência reativa.

O mesmo se aplica às tensões terminais:

$$E_k = \sum_{b=1}^{NG} E_k^b, \quad k = i, j \quad (4.28)$$

As perdas de potência aparente no ramo $i-j$ podem ser calculadas por:

$$S_{loss_{ij}} = S_{ij} + S_{ji} \quad (4.29)$$

Substituindo os fluxos de potência pelos produtos entre as tensões e correntes de ramo complexo conjugadas (Monticelli, 1983) :

$$S_{loss_{ij}} = E_i(I_{ij} + I_i)^* + E_j(I_{ji} + I_j)^* \quad (4.30)$$

Ou ainda:

$$S_{loss_{ij}} = (E_i - E_j)I_{ij}^* + E_i I_i^* + E_j I_j^* = E_{ij} I_{ij}^* + E_i I_i^* + E_j I_j^* \quad (4.31)$$

Substituindo as equações (4.24), (4.25) e (4.26) em (4.31), tem-se:

$$\text{Sloss}_{ij} = \underbrace{\frac{E_{ij} (E_{ij})^*}{Z_{ij}^*}}_{(i)} + \underbrace{E_i (j b^{sh} E_i)^*}_{(ii)} + \underbrace{E_j (j b^{sh} E_j)^*}_{(iii)} \quad (4.32)$$

Desenvolvendo parcialmente o termo (i) da equação (4.32), com a consideração da equação (4.27):

$$(i) = \frac{1}{Z_{ij}^*} \sum_{b=1}^{NG} E_{ij}^b \sum_{b=1}^{NG} (E_{ij}^b)^* = \sum_{b=1}^{NG} \left[\frac{1}{Z_{ij}^*} E_{ij}^b (E_{ij}^b)^* + \frac{1}{Z_{ij}^*} E_{ij}^b \sum_{m=1, m \neq b}^{NG} (E_{ij}^m)^* \right] \quad (4.33)$$

$$(i) = \sum_{b=1}^{NG} \left[\frac{1}{Z_{ij}^*} |E_{ij}^b|^2 + \frac{1}{Z_{ij}^*} E_{ij}^b \sum_{m=1, m \neq b}^{NG} (E_{ij}^m)^* \right] \quad (4.34)$$

Expandindo nas partes real e imaginária:

$$(i) = \frac{1}{Z_{ij}^*} \sum_{b=1}^{NG} |E_{ij}^b|^2 + \frac{1}{Z_{ij}^*} \left[\sum_{b=1}^{NG} |E_{ij}^b| \sum_{m=1, m \neq b}^{NG} |E_{ij}^m| \cos(\theta_{ij}^{bm}) + j \sum_{b=1}^{NG} |E_{ij}^b| \sum_{m=1, m \neq b}^{NG} |E_{ij}^m| \text{sen}(\theta_{ij}^{bm}) \right] \quad (4.35)$$

Onde $\theta_{ij}^{bm} = \theta_{ij}^b - \theta_{ij}^m$ representa a diferença angular dos fasores das quedas de tensão E_{ij}^b e E_{ij}^m no ramo ij .

Pode-se provar que:

$$\sum_{b=1}^{NG} |E_{ij}^b| \sum_{m=1, m \neq b}^{NG} |E_{ij}^m| \text{sen}(\theta_{ij}^{bm}) = 0 \quad (4.36)$$

Logo, fazendo $\frac{1}{Z_{ij}} = A_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$:

$$(i) = A_{ij}^* \sum_{b=1}^{NG} |E_{ij}^b|^2 + A_{ij} \sum_{b=1}^{NG} |E_{ij}^b| \sum_{m=1, m \neq b}^{NG} |E_{ij}^m| \cos(\theta_{ij}^{bm}) \quad (4.37)$$

Desenvolvendo parcialmente o termo (ii) da equação (4.32), com a consideração da equação (4.28):

$$(ii) = (jb^{sh})^* \sum_{b=1}^{NG} E_i^b \sum_{b=1}^{NG} (E_i^b)^* \quad (4.38)$$

$$(ii) = \sum_{b=1}^{NG} \left[-jb^{sh} E_i^b (E_i^b)^* - jb^{sh} E_i^b \sum_{m=1; m \neq b}^{NG} (E_i^m)^* \right] \quad (4.39)$$

$$(ii) = -jb^{sh} \sum_{b=1}^{NG} |E_i^b|^2 - jb^{sh} \sum_{b=1}^{NG} \left[E_i^b \sum_{m=1; m \neq b}^{NG} (E_i^m)^* \right] \quad (4.40)$$

Expandindo em partes real e imaginária:

$$(ii) = -jb^{sh} \sum_{b=1}^{NG} |E_i^b|^2 - jb^{sh} \sum_{b=1}^{NG} \left[|E_i^b| \sum_{m \neq b}^{NG} |E_i^m| \cos(\theta_i^{bm}) \right] - b^{sh} \sum_{b=1}^{NG} \left[|E_i^b| \sum_{m=1; m \neq b}^{NG} |E_i^m| \sen(\theta_i^{bm}) \right] \quad (4.41)$$

Onde $\theta_i^{bm} = \theta_i^b - \theta_i^m$ representa a diferença angular dos fasores E_i^b e E_i^m .

Pode-se provar que:

$$\sum_{b=1}^{NG} \left[|E_i^b| \sum_{m=1; m \neq b}^{NG} |E_i^m| \sen(\theta_i^{bm}) \right] = 0 \quad (4.42)$$

Logo:

$$(ii) = -jb^{sh} \sum_{b=1}^{NG} |E_i^b|^2 - jb^{sh} \sum_{b=1}^{NG} \left[|E_i^b| \sum_{m=1; m \neq b}^{NG} |E_i^m| \cos(\theta_i^{bm}) \right] \quad (4.43)$$

Como se pode observar na equação (4.32), os termos (ii) e (iii) são semelhantes a menos dos índices i e j . Portanto, o desenvolvimento de (iii) se dá de forma equivalente

ao apresentado nas equações (4.38) a (4.43) efetuando apenas a troca do índice i por j . Desta forma, tem-se:

$$(iii) = -jb^{sh} \sum_{b=1}^{NG} |E_j^b|^2 - jb^{sh} \sum_{b=1}^{NG} \left[|E_j^b| \sum_{m=1; m \neq b}^{NG} |E_j^m| \cos(\theta_j^{bm}) \right] \quad (4.44)$$

Onde $\theta_j^{bm} = \theta_j^b - \theta_j^m$ representa a diferença angular dos fasores E_j^b e E_j^m .

Da equação (4.32), tem-se:

$$\begin{aligned} Sloss_{ij} = (i) + (ii) + (iii) = & A_{ij}^* \sum_{b=1}^{NG} |E_{ij}^b|^2 + A_{ij}^* \sum_{b=1}^{NG} |E_{ij}^b| \sum_{m=1; m \neq b}^{NG} |E_{ij}^m| \cos(\theta_{ij}^{bm}) - \\ & - jb^{sh} \sum_{b=1}^{NG} |E_i^b|^2 - jb^{sh} \sum_{b=1}^{NG} \left[|E_i^b| \sum_{m=1; m \neq b}^{NG} |E_i^m| \cos(\theta_i^{bm}) \right] - \\ & - jb^{sh} \sum_{b=1}^{NG} |E_j^b|^2 - jb^{sh} \sum_{b=1}^{NG} \left[|E_j^b| \sum_{m=1; m \neq b}^{NG} |E_j^m| \cos(\theta_j^{bm}) \right] \end{aligned} \quad (4.45)$$

Assim como proposto na alocação de demandas (seção 4.3), da expressão (4.45) propõe-se a individualização das perdas entre os geradores pela eliminação dos somatórios externos. Desta forma, as perdas de potência do ramo $i-j$ associadas a uma fonte b são individualizadas por:

$$\begin{aligned} Sloss_{ij}^b = & A_{ij}^* |E_{ij}^b|^2 + A_{ij}^* |E_{ij}^b| \sum_{m=1; m \neq b}^{NG} |E_{ij}^m| \cos(\theta_{ij}^{bm}) - jb^{sh} \left[|E_i^b|^2 + |E_j^b|^2 \right] \\ & - jb^{sh} |E_i^b| \sum_{m=1; m \neq b}^{NG} |E_i^m| \cos(\theta_i^{bm}) - jb^{sh} |E_j^b| \sum_{m=1; m \neq b}^{NG} |E_j^m| \cos(\theta_j^{bm}) \end{aligned} \quad (4.46)$$

Logo, as perdas reativas do ramo $i-j$ associadas à fonte b são calculadas por:

$$\begin{aligned} Qloss_{ij}^b = & -B_{ij} |E_{ij}^b|^2 - b^{sh} \left[|E_i^b|^2 + |E_j^b|^2 \right] - B_{ij} |E_{ij}^b| \sum_{m=1; m \neq b}^{NG} |E_{ij}^m| \cos(\theta_{ij}^{bm}) - \\ & - b^{sh} |E_i^b| \sum_{m=1; m \neq b}^{NG} |E_i^m| \cos(\theta_i^{bm}) - b^{sh} |E_j^b| \sum_{m=1; m \neq b}^{NG} |E_j^m| \cos(\theta_j^{bm}), \quad b = 1 \dots NG \end{aligned} \quad (4.47)$$

É importante ressaltar que a expressão final de alocação das perdas entre as fontes, (4.47), explicita as admitâncias shunt e série do ramo $i-j$, e também as tensões provocadas nas barras terminais deste ramo pela atuação individual de cada fonte. Com isto, é mostrada a contribuição própria para as perdas de cada fonte (primeiros dois termos), e a contribuição mútua (três termos finais), que relaciona uma fonte em com as demais. Tais termos mútuos mostram a característica não linear das perdas.

4.5 Áreas de Influência de Geradores / Compensadores

Uma relevante análise dos resultados das alocações de demanda propostas na seção 4.3 é a verificação do alcance de cada fonte no suporte de potência reativa. Isto significa conhecer quais barras de carga estão se beneficiando deste suporte e em que proporção.

Trata-se também de um auxílio para as tomadas de decisão referentes à manutenção de um requerido perfil de tensão. Isto se justifica, pois uma eficiente estratégia de suporte de potência reativa com base no grau de influência que cada fonte exerce nas cargas é de grande valia.

Jin Zhong et al. (2004) propõem uma ferramenta de determinação de zonas de influência dos geradores de acordo com sua atuação sobre controle de tensão das barras do sistema. Para isto, é utilizada como critério de determinação das regiões a distância elétrica entre as barras (Lagonotte et al., 1983). Para o método proposto nesta dissertação, um algoritmo semelhante é proposto, de forma que ao invés de utilizar as distâncias elétricas, são usados os resultados de alocação de demandas como critério de determinação das regiões de influência.

Para cada barra de geração / compensação, são estabelecidas regiões de influência delimitadas por valores pré-estabelecidos, aqui denominados P_i , $P_i \in [0,1]$. Desta forma, dada uma barra de carga atendida pelo gerador em questão a uma dada proporção, tal barra é classificada como pertencente a uma das regiões, de acordo com os limites citados anteriormente. Genericamente, os limites das regiões de influência são caracterizados como:

$$1 \geq \text{Região}_i \geq P_i$$

$$P_1 > \text{Região}_2 \geq P_2$$

$$P_2 > \text{Região}_3 \geq P_3$$

...

$$P_{n-1} > \text{Região}_n \geq P_n$$

Com $P_1 > P_2 > P_3 > \dots > P_n$

Portanto, quanto maior a proporção que uma barra de carga recebe, mais próximo da região 1 ela estará, ou seja, mais influência ela recebe. Após a análise de todas as barras de carga em todos os cenários, ficam claramente evidenciados os grupos de cargas mais influenciados por certas barras de geração.

Com isto, aspectos de localização do consumo de potência reativa se tornam visíveis, e se tem uma noção mais clara da importância de cada fonte no controle de tensão no sistema.

4.6 Comentários do Capítulo

Neste capítulo, foi descrita o método proposto no trabalho. Primeiramente foi apresentado o algoritmo de cálculo das contribuições de tensão das fontes para as barras de carga aplicando o teorema da superposição. Em um segundo momento, foram apresentadas as formulações para o cálculo das contribuições das fontes para o atendimento das demandas reativas e das perdas na rede de transmissão. A repartição dos custos pelo suporte de potência reativa é então proposta de maneira diretamente proporcional à demanda alocada.

Concomitantemente é evidenciada a inseparabilidade da potência reativa e das perdas de forma linear, e as expressões das alocações explicitam este aspecto através dos termos próprios (contribuição da fonte em questão) e mútuos (contribuições das demais fontes).

É importante ressaltar que nos desenvolvimentos algébricos apresentados neste capítulo, não foram introduzidas quaisquer aproximação no cálculo das alocações. Logo, soma de todas as contribuições dos geradores deve reproduzir os valores totais de perdas e demandas para cada ramo e carga respectivamente.

No próximo capítulo, são apresentados os resultados numéricos da aplicação do método em sistemas-teste padrão.