

3 Métodos de Alocação de Perdas e Demandas de Potência Baseados em Leis de Circuitos

3.1 Introdução

Na literatura são propostos diversos métodos de partição de responsabilidades dos geradores sobre o atendimento das demandas de potência, e também das contribuições dos agentes para as perdas sistêmicas. Dentre estes, diferentes abordagens que se baseiam na lei de Kirchhoff apresentam soluções práticas para o problema, utilizando adicionalmente os princípios da superposição e divisão proporcional. Este capítulo realiza uma análise de alguns destes métodos, dos quais serviram como embasamento teórico para o desenvolvimento do método proposto neste trabalho.

3.2 Alocação de Perdas Ativas Baseada em Injeções de Correntes (Unsihuay; Saavedra, 2006)

O problema da alocação de perdas ativas de transmissão entre geradores e cargas tem sido vastamente estudado após a reestruturação dos sistemas de potência, com o intuito de otimizar o particionamento dos custos destas perdas entre os agentes. Neste trabalho, os autores propõem a decomposição do ponto de operação via teorema da superposição em cenários, onde em cada um existe apenas a injeção de corrente equivalente de um agente (gerador ou carga). A partir do conhecimento das correntes de ramo em cada cenário, são derivadas expressões para as alocações das perdas ativas para cada agente. O desenvolvimento matemático das expressões encontra-se no Apêndice A e a seguir é apresentada a expressão final de alocação das perdas.

Dado um sistema de potência com NB barras, as perdas ativas associadas a uma barra b , com injeção equivalente de corrente I^b , em um ramo de transmissão r são calculadas por (vide equação A.16):

$$P_{Loss_r^b} = r_r |I_r^b|^2 + 2 \cdot r_r \cdot |I_r^b| \sum_{m=b+1}^{NB} |I_r^m| \cos(\phi_r^{bm}) \quad (3.1)$$

Onde:

r_r : resistência elétrica no ramo r ;

I_r^b : Corrente complexa no ramo r devido à injeção individual de corrente na barra b (I_r^b);

I_r^m : Corrente complexa no ramo r devido à injeção individual de corrente na barra m (I_r^m);

$\phi_r^{bm} = \phi_r^b - \phi_r^m$: diferença angular entre correntes complexas I_r^b e I_r^m .

Nota-se na expressão (3.1), a existência de dois termos compondo a alocação de perdas para a barra b . O primeiro termo do lado direito da equação é a contribuição própria de I_b para as perdas no ramo r , ao passo que o segundo termo representa as contribuições mútuas de I_b com as demais $NB - 1$ injeções de corrente (agentes do mercado). Ainda no segundo termo, aparece sugestivamente o fator “2”, que induz à divisão “meio a meio” das contribuições mútuas entre os agentes envolvidos. Desta hipótese, a componente de perda do ramo r alocada para o agente b é calculada por:

$$P\text{Loss}_r^b = r_r |I_r^b|^2 + r_r |I_r^b| \sum_{m=b+1}^{NB} |I_r^m| \cos(\phi_r^{bm}) \quad (3.2)$$

Em um sistema com NL ramos de transmissão, o montante de perdas alocado para o agente b é calculado por:

$$P\text{TLoss}^b = \sum_{r=1}^{NL} P\text{Loss}_r^b \quad (3.3)$$

Como se pode constatar, este método baseia-se fundamentalmente nos impactos de injeções de corrente no sistema para determinar as contribuições nas perdas dos ramos de transmissão para cada agente. Sua abordagem inclui aspectos inerentes da rede de transmissão, e portanto tende a refletir corretamente o uso da mesma pelos agentes envolvidos.

Entretanto, a consideração de injeções de correntes em cada cenário (um agente de cada vez), ocasiona o aparecimento do efeito “counter-flow”, caracterizado por valores demasiado incoerentes de tensões e correntes de ramo na análise dos cenários individuais. Isto é causado pela inexistência de caminhos naturais para a corrente fluir para a terra estando apenas uma injeção de corrente atuando no sistema.

O método é apropriado para alocação de perdas, porém ele é inadequado para alocação de suporte de potência reativa, devido a não reproduzir a natureza local do fenômeno.

De qualquer forma, é um método que apresenta alocações claras sobre as participações das correntes dos agentes na composição das perdas sistêmicas.

3.3 Alocação de Demandas pelo Princípio da Divisão Proporcional (Bialek, 1996)

Este trabalho apresenta um método fundamentalmente baseado na lei de correntes de Kirchhoff para calcular as participações dos geradores no atendimento das cargas e nos fluxos de potência dos ramos de transmissão.

O princípio fundamental utilizado para determinar as alocações de fluxos e demandas é o da divisão proporcional, que permite assumir que as barras em uma rede de transmissão são distribuidores perfeitos de potência. Por este princípio, é possível identificar qual a proporção do fluxo que chega a uma barra está seguindo por um ramo que deixa esta mesma barra. De forma a clarificar o princípio, é apresentado a seguir um exemplo:

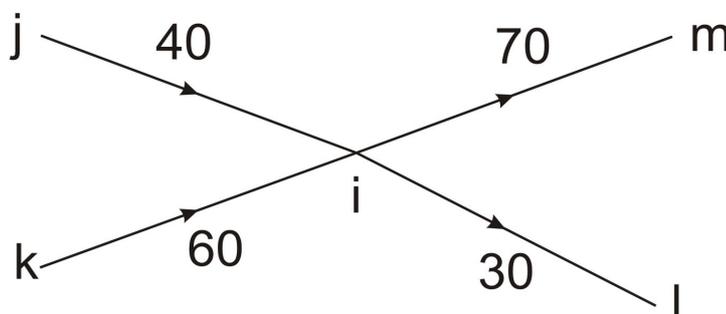


Figura 3.1 – Princípio da Divisão Proporcional do Fluxo de Potência Ativa

Na Figura 3.1, quatro linhas estão conectadas ao nó i , sendo que duas barras (j e k) fornecem potência enquanto que as demais (m e l) recebem potência do nó i . O fluxo total entrando no nó i é $P_i = 40 + 60 = 100\text{MW}$, sendo que 40% são providos pela linha $j-i$, e 60% são provenientes da linha $k-i$. Presume-se que cada MW que deixa o nó i contenha a mesma proporção dos fluxos que entram neste mesmo nó. Por esta razão, os 70MW da linha $i-m$ consistem em 28MW $\left(70 \cdot \frac{40}{100}\right)$ fornecidos pelo ramo $j-i$ e 42MW $\left(70 \cdot \frac{60}{100}\right)$ que são supridos pelo ramo $k-i$. Da mesma maneira, para a linha $i-l$, dos 30MW que fluem por ele, 12MW vêm do ramo $j-i$, e 18MW vêm do ramo $k-i$. Portanto, o princípio da divisão proporcional determina uma fração (escalar entre 0 e 1) dos fluxos que entram em uma barra com o fluxo de um ramo que deixa esta barra.

A aplicação inicial do algoritmo supõe sistemas sem perdas, ou seja, onde os fluxos nos terminais de um ramo de transmissão são os mesmos. Para a consideração das perdas sistêmicas, é proposto o cálculo dos fluxos dos ramos como a média entre os valores nos terminais. Neste contexto, para o desenvolvimento do método, são derivadas duas versões:

- Algoritmo *upstream-looking*: leva em conta os fluxos de potência que entram nas barras;
- Algoritmo *downstream-looking*: leva em conta os fluxos de potência que saem das barras.

A seguir, é apresentado o desenvolvimento do algoritmo *downstream-looking* e sua extensão para a alocação de fluxos de potência reativa.

3.3.1 Algoritmo *downstream-looking*

A potência ativa total P_i de uma barra i , observando os fluxos que saem, pode ser expressa por:

$$P_i = \sum_{\ell \in \alpha_i^{(d)}} |P_{i-\ell}| + P_{L_i}, \quad i = 1, \dots, n \quad (3.4)$$

Onde:

$\alpha_i^{(d)}$: representa o conjunto de barras alimentadas pela barra i , ou seja, barras cujos fluxos de potência são injetados pela barra i ;

$P_{i-\ell}$: representa o fluxo de potência entre as barras i e ℓ ;

P_{L_i} : representa a carga ativa da barra i .

Com a consideração da eliminação das perdas, tem-se que $|P_{i-\ell}| = |P_{\ell-i}|$. Desta forma, o fluxo no ramo pode ser relacionado com o a potência líquida P_ℓ da barra j segundo:

$$|P_{i-\ell}| = c_{\ell i} P_\ell, \text{ onde } c_{\ell i} = |P_{i-\ell}|/P_\ell \quad (3.5)$$

Substituindo (3.5) em (3.4):

$$P_i = \sum_{\ell \in \alpha_i^{(d)}} c_{\ell i} P_\ell + P_{L_i} \quad (3.6)$$

Reescrevendo a equação (3.6):

$$P_i - \sum_{\ell \in \alpha_i^{(d)}} c_{\ell i} P_\ell = P_{L_i}, \text{ ou ainda: } A_d P = P_L \quad (3.7)$$

Onde:

A_d : matriz de distribuição “*downstream-looking*” de dimensão $(n \times n)$;

P_L : vetor de barras de carga.

Os elementos de A_d são calculados como:

$$[A_d]_{i-\ell} = \begin{cases} 1 & \text{para } i = \ell \\ -c_{\ell i} = -\frac{|P_{\ell-i}|}{P_\ell} & \text{para } \ell \in \alpha_i^{(d)} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.8)$$

Pode-se notar que a matriz A_d é esparsa e assimétrica. Com isto, caso a matriz $[A_d^{-1}]$ seja definida, então $P = [A_d^{-1}]P_L$ e o i -ésimo elemento de P será:

$$P_i = \sum_{k=1}^n [A_d^{-1}]_{ik} P_{L_k}, \text{ para } i = 1, \dots, n \quad (3.9)$$

A equação (3.9) mostra como a potência P_i que sai da barra i é distribuída entre as barras de carga do sistema. Por outro lado, esta mesma potência P_i é igual à soma de todos os fluxos que chegam à barra i mais a geração desta barra (se houver). Por esta razão, o fluxo que entra na barra i vindo da barra j através da linha $j-i$ pode ser calculado pelo princípio da divisão proporcional conforme:

$$|P_{j-i}| = \frac{|P_{j-i}|}{P_i} P_i = \frac{|P_{j-i}|}{P_i} \sum_{k=1}^n [A_d^{-1}]_{ik} P_{L_k} = \sum_{k=1}^n D_{i-j,k}^L P_{L_k}, \quad \forall j \in \alpha_i^{(u)} \quad (3.10)$$

Onde $D_{i-j,k}^L = |P_{i-j}| [A_d^{-1}]_{ik} / P_i$ representa um fator de distribuição de cargas que proporção de fluxo da k -ésima barra de carga que flui pela linha $j-i$. A equação (3.10) permite determinar o quanto os fluxos nas linhas de transmissão são distribuídos em cada barra de carga do sistema.

A geração na barra i também é considerada um fluxo de potência que entra na barra i e pode ser calculada pelo princípio de divisão proporcional:

$$P_{G_i} = \frac{P_{G_i}}{P_i} P_i = \frac{P_{G_i}}{P_i} \sum_{k=1}^n [A_d^{-1}]_{ik} P_{L_k}, \quad i = 1, \dots, n \quad (3.11)$$

Na equação (3.11) mostra-se que a parcela da geração da i -ésima barra que é utilizada para alimentar a k -ésima barra de carga é igual a $P_{G_i} P_{L_k} [A_d^{-1}]_{ik} / P_i$ e pode ser utilizada para determinar-se qual o caminho de uma barra de geração qualquer.

3.3.2 Extensão para alocação de potência reativa

Devido às perdas reativas na rede de transmissão serem consideráveis quando comparadas com os fluxos, algumas adequações no algoritmo são necessárias, pois as considerações de fluxos médios são inviáveis. O autor então propõe a inserção de barras fictícias intermediárias nos ramos de transmissão, representando a absorção e geração de potência reativa pela rede de transmissão. O exemplo da Figura 3.2 ilustra esta adequação:

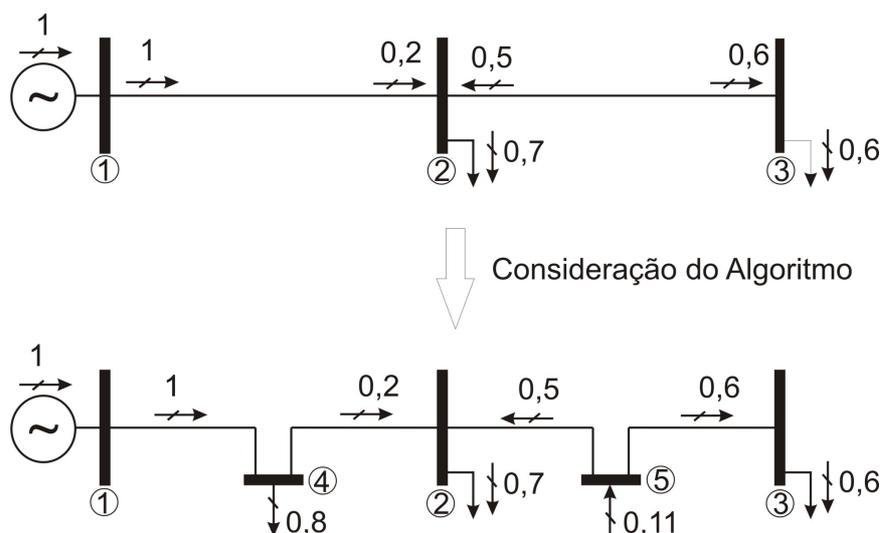


Figura 3.2 – Adequações dos Ramos de Transmissão Como Receptores / Fornecedores de Potência Reativa (valores em p.u.)

De acordo com esta abordagem, os ramos de transmissão são tratados como fontes ou cargas no sistema. Com isto, repetindo o algoritmo *downstream-looking* para potência reativa, a equação (3.11) pode ser reescrita para:

$$Q_{G_i} = \frac{Q_{G_i}}{Q_i} Q_i = \frac{Q_{G_i}}{Q_i} \sum_{k=1}^n [A_{dq}^{-1}]_{ik} Q_{L_k}, \quad i = 1, \dots, n \quad (3.12)$$

Onde os elementos da matriz $[A_{d_o}]$ são determinados substituindo potência ativa por reativa em (3.8).

Portanto, a contribuição de potência reativa da i -ésima fonte para a k -ésima barra de carga é dada por: $Q_{G_i} Q_{L_k} [A_{d_o}^{-1}]_{ik} / Q_i$.

3.4 Método da Matriz Ybarra Modificada (When-Chen Chu et al., 2004)

Este trabalho propõe a alocação dos custos pelo fornecimento de potência reativa levando em conta uma consideração básica da teoria de circuitos: a tensão de uma barra de carga é resultado das contribuições de todas as fontes do sistema. Neste contexto, é então deduzida a relação funcional entre as tensões de carga (E_L) e as tensões de fonte (EG) de maneira a serem decompostas as tensões de todas as barras de carga em parcelas (ΔEL), resultantes da atuação de apenas um gerador. Então, estas contribuições de tensão serão utilizadas juntamente com as correntes nas barras de carga, obtidas a partir de um resultado de fluxo de carga, para se determinar o valor de potência reativa que cada carga recebe individualmente de cada gerador. Posteriormente, os custos para produção de potência reativa para os diversos tipos de fontes serão alocados para as cargas segundo a lógica proposta para a partição da potência reativa.

Dado um sistema com NB barras, sendo NG barras de geração e NL barras puramente de carga, o sistema de equações nodais que relacionam corrente e tensão é representado matricialmente como:

$$[I] = [Y_{barra}] [E] \quad (3.13)$$

Onde:

$[I]$ representa o vetor de injeções de corrente complexas em cada barra;

$[Y_{barra}]$ é a matriz de admitâncias de barra, calculada a partir dos parâmetros π dos ramos de transmissão;

$[E]$ é o vetor de tensões complexas de barra;

Fazendo uma permutação de linhas e colunas na matriz $[Y_{\text{barra}}]$, de maneira que sejam separadas as barras de carga e geração, a equação (3.13) pode ser reescrita para:

$$\begin{bmatrix} IG \\ IL \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GL} \\ Y_{LG} & Y_{LL} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} EG \\ EL \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Para se obter a relação funcional $EL = f(EG)$, e por consequência as componentes (ΔEL), o princípio da superposição é aplicado. Para isto é necessário que as cargas sejam representadas como admitâncias em paralelo de modo que tenham injeção de corrente nula. A partir do resultado de fluxo de carga, estas admitâncias são calculadas como:

$$Y_{L_j} = \frac{1}{EL_j} \left(\frac{SL_j}{EL_j} \right)^* \quad (3.15)$$

Onde Y_{L_j} é a admitância conectada à barra de carga j . EL_j é a tensão complexa da barra j , e $SL_j = PL_j + jQL_j$ é dado como o consumo de potência complexa na barra j .

Depois de calculadas as admitâncias equivalentes de todas as barras de carga, é executada a modificação na sub-matriz $[Y_{LL}]$ adicionando o Y_{L_j} correspondente ao j -ésimo elemento da diagonal principal. Então esta matriz é modificada para $[Y'_{LL}]$, e a (3.14) é reescrita para:

$$\begin{bmatrix} I_G \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GL} \\ Y_{LG} & Y'_{LL} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} EG \\ EL \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Considerando a parte inferior da equação matricial (3.16):

$$[0] = [Y_{LG}] [EG] + [Y'_{LL}] [EL] \quad (3.17)$$

Resolvendo (3.17) em relação a $[E_L]$, tem-se:

$$[Y'_{LL}][EL] = -[Y_{LG}][EG] \therefore [EL] = -[Y'_{LL}]^{-1}[Y_{LG}][EG] \quad (3.18)$$

Fazendo $[YA] = -[Y'_{LL}]^{-1}[Y_{LG}]$, tem-se:

$$[EL] = [YA][EG] \quad (3.19)$$

A tensão de cada barra de carga é resultado das contribuições de todos os geradores, e pode ser representada pela expansão da seguinte equação:

$$EL_j = \sum_{i=1}^g YA_{ji} * EG_i \quad (3.20)$$

Pode-se então inferir que:

$$\Delta EL_{ij} = YA_{ji} * EG_i \quad (3.21)$$

Onde ΔEL_{ij} é a contribuição de tensão que a carga da barra j recebe do gerador da barra

i . Fica claro que o princípio da superposição é satisfeito segundo:

$$EL_j = \sum_{i=1}^g \Delta EL_{ij} \quad (3.22)$$

Os autores deste artigo propõem então uma heurística para o cálculo da contribuição de potência reativa que cada barra de carga recebe de cada gerador:

$$QL_{ij} = \text{Im}\{\Delta EL_{ij} * IL_j^*\} \quad (3.23)$$

Onde QL_{ij} é a contribuição do gerador i para a carga j , IL_j é a corrente complexa consumida pela barra de carga, obtida pelo resultado do fluxo de carga.

De acordo com a equação (3.23), é proposta uma repartição na demanda de potência reativa levando em conta o valor total da corrente complexa de carga, considerando a atuação de todas as fontes simultaneamente. Isto caracteriza uma interpretação

incompleta do efeito de cada fonte no sistema, e traduz-se em uma desvantagem deste método.

A partir da equação (3.23), é proposta a alocação dos custos para o suporte de potência reativa. A remuneração sugerida da carga j para o gerador i é igual ao produto da contribuição $QL_{i,j}$ pelo custo por MVar do gerador i .

3.5 Discussão Acerca dos Métodos e Conclusões

Neste capítulo, foram apresentados alguns métodos encontrados na literatura para partição de demandas, fluxos e perdas de potência nos sistemas. O aspecto comum a todas elas é o uso das leis de circuitos e de princípios fundamentais como de divisão proporcional e superposição.

Na seção 3.2, foi apresentada a alocação de perdas segundo um algoritmo que avalia o impacto da injeção individual de corrente de um agente no sistema. Neste método, a partição das perdas se dá de forma clara, explicitando a contribuição própria do agente e a contribuição mútua do agente com os demais do sistema. Em contrapartida, a presença do efeito counter-flow na análise dos cenários individuais pode provocar dificuldades de aceitação do método pelos usuários. Outro obstáculo na extensão desta abordagem para a alocação de custos de suporte de potência reativa, é que o modelo de injeção de correntes não consegue reproduzir a natureza local da relação Q-V. Entretanto, a análise de circuito desenvolvida neste trabalho serviu de ponto de partida para o desenvolvimento matemático do método de alocação de demandas e perdas de potência reativa proposta neste trabalho.

Na seção 3.3, é apresentado o método de alocação de fluxos e demandas de potência segundo o princípio da divisão proporcional. São propostos fatores de distribuição dos fluxos de potência nas linhas para as barras de carga, bem como fatores de distribuição da potência injetada pelos geradores para as cargas. No tocante à alocação de potência reativa, o algoritmo se dá de forma equivalente ao tratamento da potência ativa. Adicionalmente, o consumo / geração de potência reativa pelos ramos de transmissão é representado pela inserção de barras intermediária desempenhando função equivalente. Nesta análise, os ramos são tratados como agentes consumidores / geradores de

potência reativa, o que pode dificultar a valoração da remuneração do suporte de potência reativa.

Outra desvantagem do método apresentado nesta seção é a característica de esparsidade e assimetria da matriz $[A_{d_o}]$, que pode comprometer a robustez do método frente a pontos de operação diversos.

Na seção 3.4 é apresentado um método de alocação de custos de suporte de potência reativa baseada na determinação das contribuições das fontes para as cargas. Após a conversão de todas as cargas em admitâncias shunt, a partir do princípio da superposição, é calculada a contribuição de tensão de cada fonte para as demais barras de carga do sistema. Propõe-se então o cálculo da alocação de potência reativa de acordo com o produto destas contribuições de tensão pelo complexo conjugado da corrente da barra de carga. Esta heurística foi apresentada pelos autores devida inseparabilidade da potência consumida entre os geradores de maneira linear. Contudo, tal consideração constitui uma formulação incompleta, uma vez que considera o valor total da corrente, ao invés de parcelas de contribuição de cada fonte.

A respeito dos métodos de alocação de demandas e perdas apresentados neste capítulo, pode-se concluir que se tratam de ferramentas importantes para identificar a participação dos agentes no sistema, levando-se em conta que todos são coerentes com o princípio de justiça nas partições. Entretanto, não existe ainda o consenso de qual seja o mais adequado, visto que todos apresentem desvantagens a considerar.