

1 Introdução

1.1 Generalidades

Visando o aumento da eficiência econômica dos sistemas de potência no âmbito mundial, durante a década de noventa, se deu o processo de descentralização econômica. Este processo consistiu na separação das empresas de energia elétrica, dividindo-as em companhias de transmissão, geração e distribuição, seguida da criação de ambientes competitivos de comercialização de energia (Dismukes, 2002; Hainault, 1999).

Neste modelo de mercado, são definidas seis entidades principais, as quais representam os agentes nas operações comerciais de energia. A seguir é descrita resumidamente cada uma (Bhattacharya, 2001a):

- **Companhias de geração:** Consistem de uma unidade ou conjunto de geradores com objetivo comum de produzir e comercializar energia elétrica;
- **Companhias de transmissão:** São as empresas proprietárias e que operam as linhas de transmissão. Sua principal responsabilidade é transportar eletricidade dos geradores para os consumidores, mantendo a rede disponível para todas as entidades do sistema;
- **Companhias de distribuição:** São usualmente as empresas proprietárias e operadoras das redes locais de distribuição em determinada área. Elas compram energia por atacado no mercado “spot” ou por contratos bilaterais diretamente das companhias geradoras e suprem os consumidores finais;
- **Consumidores:** São as entidades que adquirem energia elétrica por meio de “mercados spot”, ou diretamente das companhias geradoras, ou ainda comprando das companhias de distribuição;
- **Operador Independente do Sistema (OIS):** É a entidade responsável pela operação e manutenção da confiabilidade em todo o sistema. Trata-se de uma autoridade independente e que não participa das negociações no

mercado de eletricidade. No Brasil, este papel é desempenhado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS);

- Operador do Mercado: É a entidade responsável pelas operações no mercado de eletricidade. Ele recebe as ofertas e demandas de energia dos participantes do mercado e estabelece o preço para negociação.

Neste cenário, assim como no passado, a função dos sistemas de potência não se restringe à geração, transmissão e distribuição de energia. Também são requeridos padrões de qualidade e segurança no provimento de energia, evitando eventuais contingências. Para que estes padrões sejam alcançados, é necessário o uso de serviços auxiliares à operação, chamados serviços ancilares (Bhattacharya, 2001a).

Os serviços ancilares são definidos como todas as atividades desempenhadas em um sistema interconectado, que são necessárias para o suporte dos fluxos de potência enquanto mantêm a operação confiável, assegurando um determinado grau de qualidade pelo fornecimento de eletricidade.

A seguir são citados os tipos de serviços ancilares mais importantes (Bhattacharya, 2001a):

- Controle de frequência, necessário para a regulação de frequência durante a operação do sistema;
- Reserva operativa, necessária para restabelecer o equilíbrio entre carga e geração durante a ocorrência de contingências;
- Suporte de potência reativa, necessário para manutenção do perfil de tensão nas barras do sistema;
- Partida autônoma (“black-start”), necessária para restabelecer o funcionamento normal do sistema após situação de colapso (“black-out”);
- Serviços de programação de despacho, necessário para gerenciar os montantes de oferta de potência dos geradores.

Contudo, com o advento da descentralização dos sistemas de potência, os custos associados pela produção da energia passaram a ser divididos entre produtores e consumidores. Esta característica também engloba os custos dos serviços ancilares, pois se torna necessária a identificação destes custos e sua justa repartição entre os usuários.

Dentre os serviços ancilares descritos, este trabalho enfatiza o suporte de potência reativa para assegurar níveis de tensão adequados, de forma a identificar as contribuições individuais das fontes para os consumidores e alocar os respectivos custos.

1.2 Suporte de Potência Reativa como Serviço Ancilar

Em um sistema de potência, a garantia do perfil de tensão nas barras em uma faixa especificado é um requisito básico. Isto se faz necessário pelo fato de todos os equipamentos a ele ligados funcionarem adequadamente à tensão nominal. Outro aspecto relevante é o aumento da capacidade do sistema de suportar distúrbios operando em limites aceitáveis de tensão (Bhattacharya, 2001b; Nogueira, 2003).

A determinação do perfil adequado de tensão também favorece a minimização das perdas ativas e aumento de capacidade de transmissão. Desta forma, o controle de tensão se torna uma ferramenta inerente à operação dos sistemas de potência.

Em sistemas elétricos de potência, observa-se a existência de um forte acoplamento entre potência reativa e a magnitude da tensão. Logo, o meio mais utilizado para manutenção do perfil adequado de tensão é o suporte de potência reativa, assegurando níveis aceitáveis de tensão em todas as barras do sistema frente a condições normais, ou de contingências (Rodriguez, 2005). Este suporte é realizado comumente com a instalação de diversos equipamentos, tais como capacitores e/ou reatores em derivação, geradores, compensadores síncronos e compensadores estáticos. Tais equipamentos atuam então como fontes de potência reativa e dividem-se em dois níveis hierárquicos, segundo sua velocidade de atuação no controle de tensão.

- Serviços de Controle Primário: atuam compensando rapidamente flutuações ocorridas em uma escala de tempo de poucos minutos. Enquadram-se neste grupo:
 - Geradores;
 - Compensadores Síncronos;
 - SVC, LTC.
- Serviços de Controle Secundário: atuam compensando flutuações de tensão ocorridas em uma escala de tempo de algumas horas. Enquadram-se neste grupo:

- Geradores;
- Compensadores Síncronos;
- Reatores / capacitores em paralelo;
- LTC, Capacitores em série.

Os equipamentos descritos possuem características próprias no tocante a regime de operação, aplicação e custos de implantação. Os capacitores e indutores fornecem e absorvem, respectivamente, potência reativa continuamente, destinando-se a manter o perfil de tensão durante a operação normal do sistema. Os geradores e compensadores síncronos e estáticos, além de fornecer e absorver potência reativa continuamente, também funcionam como fontes reserva, podendo vir a operar em situações de contingência controlando variações rápidas de tensão.

Sendo estas formas diversas de suporte, os custos incorridos pela sua implantação e produção se dão de forma específica para cada tipo. Desta forma, torna-se necessário definir o valor justo a ser pago às empresas que fornecem este suporte, de modo que as tarifas repassadas para os consumidores finais sejam as menores possíveis.

1.3 Objetivo do Trabalho

Muitas propostas objetivando uma remuneração justa pelo provimento de serviços ancilares têm sido apresentadas nos últimos anos. Entretanto, não há um consenso sobre qual atende melhor aos requisitos técnicos de cada sistema, sendo, portanto um problema ainda sem solução amplamente aceita. Tratando-se de suporte de potência reativa, é de grande interesse que as características de utilização da rede de transmissão, o forte acoplamento entre as magnitudes das tensões nas barras e a natureza local da potência reativa sejam levados em conta.

Desta forma, uma partição dos custos justa entre os beneficiários deste suporte traz vantagens sobre a eficiência econômica na operação e planejamento dos sistemas de potência.

Neste contexto, este trabalho apresenta uma proposta para o problema de alocação dos custos pelo suporte de potência reativa tomando como base as leis de circuitos. Ao invés

da utilização da abordagem clássica correntes, é sugerida uma modelagem de fontes de tensão, que permite naturalmente levar em conta a natureza local da relação Q-V. Esta estratégia tem sua motivação na fácil compreensão que este tratamento proporciona, buscando identificar as contribuições de potência reativa que cada fonte provê para as cargas. O enfoque é dado para as tensões de barra frente à atuação individual das fontes (geradores / compensadores), donde são propostos particionamentos nas demandas reativas das barras de carga e nas perdas reativas dos ramos. Esta abordagem proporciona uma alocação justa do custo do suporte de potência reativa sob o ponto de vista das características elétricas dos sistemas e traduz uma ferramenta eficiente no estudo da influência das fontes no suporte de potência reativa global.

1.4 Estado da Arte

A alocação dos custos do suporte de potência reativa é um tema que vem sendo estudado por diversos autores, na busca de soluções para a formação de uma estrutura eficiente de remuneração que atenda aos novos requisitos do ambiente competitivo. Na seqüência serão descritos alguns trabalhos voltados para a avaliação dos custos pela produção de potência reativa, bem como alguns métodos propostos para a partição destes custos entre os agentes.

Um dos primeiros estudos relacionados ao assunto data de 1997, quando são apresentados métodos para precificar este serviço ancilar baseado nos custos incorridos pelos geradores ao prover o serviço (Shangyou Hao, Papalexopoulos, 1997). Entre a composição do preço estavam os custos por reserva de potência reativa, capacidade de geração e custo para produção.

Marzano (1998) apresenta posteriormente um estudo comparativo entre vários métodos para repartição de custos de equipamentos de suporte de potência reativa, derivados da Teoria de Jogos Cooperativos. Nesta análise conclui-se que o método de Aumann-Shapley fornece uma alocação justa por ressaltarem-se a recuperação total do custo do serviço, justiça no processo de repartição e a ausência de subsídios cruzados entre os agentes.

Outra alternativa para precificar o serviço ancilar em questão quando provido por agentes de geração e transmissão foi proposta por Lamont e Fu (1999). Tal estudo propõe que os

geradores sejam remunerados pelos custos explícitos e implícitos. Os custos explícitos caracterizam os encargos de operação e manutenção e os custos de capital associados, enquanto os implícitos são os custos de oportunidade referentes à restrição de potência ativa para produção de potência reativa. Por outro lado, os agentes de transmissão são remunerados apenas pelos custos explícitos de depreciação dos equipamentos de compensação.

No Brasil, apenas em 2003 se deu a regulamentação dos serviços ancilares através da resolução nº 265 da ANEEL (ANEEL, 2003). Nesta, são classificados os serviços ancilares utilizados no Sistema Elétrico Brasileiro (SEB). Posteriormente, fica estabelecido que a remuneração para os geradores operando como compensador síncrono seja calculada pela Tarifa de Serviços Ancilares (TSA) definida em resolução própria (ANEEL, 2005).

No mesmo ano, Nogueira (2003) propôs que os agentes beneficiários com a instalação de novas fontes de potência reativa deveriam ser selecionados segundo seu grau de “responsabilidade” sobre o impacto de tensão causado na rede elétrica. Esta graduação seria mensurada através dos Multiplicadores de Lagrange associados às restrições do fluxo de potência ótimo, que utiliza como função objetivo o mínimo custo de injeção de potência reativa.

No tocante aos métodos de partição dos custos do suporte de potência reativa baseadas em leis de circuitos, uma importante contribuição se deu por When-Chen Chu et al. (2004), em que é proposta uma alocação segundo as contribuições de cada fonte para as tensões de barra do sistema. Estas contribuições são calculadas segundo o princípio da superposição e levam em consideração as características elétricas da rede de transmissão.

Com a descentralização dos sistemas de potência, algumas publicações com enfoque em determinação de contribuições das fontes para os fluxos e as demandas de potência ativa e reativa surgiram. Seu objetivo comum é prover ferramentas de alocação de potência justa sob o ponto de vista de utilização da rede de transmissão e do posicionamento geográfico dos agentes.

Bialek (1996, 1997, 2004) propõe o cálculo das proporções de potência ativa e reativa de cada fonte no atendimento das cargas, bem como as proporções de cada fonte para os fluxos nos ramos baseando-se no princípio da divisão proporcional, e na lei de Kirchhoff. Neste trabalho também é apresentado um algoritmo para alocação das perdas na transmissão entre os agentes segundo o mesmo princípio. Referente à alocação dos fluxos de potência reativa nos ramos, as injeções de potência das linhas são representadas por barras fictícias podendo gerar ou absorver potência.

Kirschen (1997) descreve uma ferramenta que, dado uma solução de fluxo de carga, determina quais geradores estão suprindo uma carga particular, de quanto cada gerador está utilizando uma dada linha de transmissão e qual sua participação nas perdas sistêmicas. Seu embasamento teórico aborda os princípios de divisão proporcional e a representação dos sistemas por grafos de estado. Destas considerações são identificadas áreas comuns de atuação de geradores e suas respectivas participações no atendimento das cargas e nos fluxos de potência dos ramos pertencentes a estas áreas.

Propondo uma simplificação no método apresentado por Bialek (1996), Velasco et al. (2001) sugerem um algoritmo de alocação de demandas e fluxos de potência reativa também baseado em divisão proporcional. Sua particularidade é a desconsideração dos nós fictícios na representação da absorção/geração de potência reativa dos ramos de transmissão. Um novo algoritmo é apresentado levando em conta as condições específicas de operação dos ramos de transmissão.

Este trabalho apresenta uma abordagem da determinação de contribuições de potência reativa das fontes para as cargas, agregando aspectos teóricos considerados por When-Chen Chu et al. (2004).

1.5 Organização da Dissertação

Neste primeiro capítulo, foram revisadas as características básicas do atual modelo econômico dos sistemas de energia elétrica. Maior ênfase foi dada à importância dos serviços ancilares neste cenário, em especial o suporte de potência reativa. Adicionalmente foi apontada como foco principal deste trabalho a determinação de uma partição de custos pelo provimento deste serviço. Foi apresentada também uma sucinta

revisão bibliográfica sobre o tema. No restante do trabalho, esta dissertação está organizada como segue:

- No Capítulo 2, é apresentado o problema da alocação dos custos pelo suporte de potência reativa segundo aspectos técnicos e econômicos e ressalta sua importância no atual modelo econômico dos sistemas de energia elétrica. Posteriormente são descritos alguns exemplos de países que já regulamentaram mecanismos próprios de remuneração.
- No Capítulo 3, são apresentados alguns trabalhos que tratam da alocação de perdas e demandas de potência baseando-se em leis de circuitos. Alguns destes métodos serviram como embasamento teórico para o desenvolvimento do método proposto, os quais serão mais enfatizados. Ao final, é realizada uma discussão acerca das características comuns e particulares de cada um.
- No Capítulo 4, são apresentados os desenvolvimentos algébricos do método proposto para alocação das perdas e demandas de potência reativa. De maneira complementar, é apresentado o conceito de áreas de influência das fontes e sua contribuição para a interpretação dos resultados.
- No Capítulo 5, estão os resultados numéricos de estudos de casos realizados em três sistemas-teste padrão: sistema 5 barras, IEEE 30 barras e IEEE 118 barras. A avaliação das alocações de demanda calculadas pelo método é realizada a partir de uma comparação com as distâncias elétricas entre as barras do sistema. Também são realizadas análises do comportamento das alocações frente a alterações nas tensões de geradores, no carregamento do sistema e com a inserção de novas fontes de potência reativa.
- Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e considerações finais do trabalho, acompanhadas com sugestões para trabalhos futuros.