

1 Introdução

1.1. Considerações Gerais

Uma das principais metas de um sistema de potência é o atendimento aos consumidores finais com o menor custo possível, dentro de padrões de confiabilidade e segurança pré-estabelecidos [1]. Para que estes padrões sejam alcançados, torna-se necessário o uso de serviços auxiliares à operação do sistema, conhecidos como serviços ancilares.

Existe uma grande diversidade de tipos de serviços ancilares, que podem ser reunidos em quatro grupos principais: [2]

- controle de frequência, necessário para controlar as variações de frequência durante a operação do sistema;
- reserva de potência, necessária para restabelecer o equilíbrio entre carga e geração durante a ocorrência de contingências no sistema;
- suporte de potência reativa, necessário para manter o perfil de tensão nas barras do sistema;
- partida autônoma (“black-start”), necessária para reiniciar o sistema após uma situação de colapso (“blackout”).

Devido à complexidade e às características técnicas dos serviços ancilares, é desejável que sua aquisição seja realizada por um órgão central, caracterizado pelo Operador Independente do Sistema (OIS). No Brasil, o OIS está representado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), órgão responsável pela operação e controle do Setor Elétrico Brasileiro (SEB), e conseqüentemente pela administração dos serviços ancilares.

O SEB, assim como outros sistemas de diferentes países do mundo, vem passando por longo processo de reestruturação. Um dos alicerces deste processo é a desverticalização das empresas de energia elétrica, dividindo-as em empresas específicas de geração, transmissão e distribuição. A desverticalização está associada ao incentivo à concorrência entre as empresas, buscando elevar a eficiência econômica do setor.

Neste novo ambiente, onde as empresas de energia são desverticalizadas, é desejável que o produto energia elétrica seja adquirido de forma separada dos serviços ancilares. Até a presente data, entretanto, a comercialização dos serviços ancilares no SEB não tem se realizado de forma distinta da venda de energia, sendo que os custos correspondentes ao provimento destes serviços estão embutidos na tarifa de venda de energia elétrica.

Contudo, para que a eficiência econômica no setor de serviços ancilares seja alcançada, é necessário que os seus custos de fornecimento sejam separados da tarifa de venda de energia. Esta separação é alcançada por meio de arranjos econômicos específicos para estes produtos, de forma que o custo de aquisição destes produtos seja mínimo e a eficiência econômica possa ser alcançada.

Torna-se necessário, portanto, definir o valor justo de remuneração a ser pago às empresas que fornecem serviços ancilares, tendo-se em vista que as tarifas repassadas aos consumidores finais sejam as menores possíveis.

1.2. Objetivo

Uma forma de definir o valor de remuneração para os serviços ancilares é por meio de um mercado competitivo, onde o OIS é responsável por selecionar as empresas que ofereçam a menor tarifa de venda. Entretanto, devido à característica local de alguns serviços ancilares e sua complexidade técnica, o número de empresas capacitadas a prestar o serviço pode ser limitado, criando condições de monopólio em determinados pontos da rede elétrica. Empresas localizadas nestes pontos poderiam manipular a formação da tarifa de venda do serviço ancilar, elevando artificialmente a sua remuneração.

Uma alternativa seria remunerar as empresas de acordo com os seus custos incorridos durante o fornecimento dos serviços ancilares. Esta remuneração poderia ser calculada pelo OIS em função dos custos fixos, variáveis e de oportunidade incorridos pelas empresas ao prestarem o serviço. Contudo, esta alternativa esbarra na dificuldade que o OIS encontraria em calcular estes custos de forma precisa, em especial para o caso dos geradores.

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia de remuneração para os serviços ancilares de suporte de potência reativa e reserva de potência quando providos por geradores. Em lugar de se utilizar os custos incorridos

pelos geradores, que em geral são desconhecidos pelo OIS, a metodologia proposta trabalha com o benefício proporcionado pelos geradores ao sistema de potência.

O valor deste benefício será calculado para o serviço ancilar de suporte de potência reativa como função do custo evitado de instalação de novas fontes de potência reativa no sistema. Para o serviço ancilar de reserva de potência, o benefício será função da redução observada no valor esperado de energia não suprida, calculado em um estudo de confiabilidade composta, multiplicado pelo custo unitário de interrupção do sistema de potência.

O benefício proporcionado por cada gerador é determinado pelo método de partição de custos de Aumann-Shapley, oriundo da Teoria dos Jogos Cooperativos. A aplicação do método de Aumann-Shapley garante que a repartição do benefício entre os geradores seja realizada de forma justa e eficiente.

1.3. Estado da Arte

A preocupação com os serviços ancilares começou a pouco mais de uma década. Um dos primeiros artigos nesta área foi publicado por Shirmohammadi e Vojdani [3] em 1996, onde se propunha uma classificação de diversos serviços ancilares. Neste mesmo ano, Alvarado [4] analisou os serviços ancilares de suporte de potência reativa, regulação de frequência e reserva de potência, propondo métodos quantificar o valor desses serviços em função do seu impacto nos custos e na qualidade do fornecimento de energia elétrica ao sistema. Hao e Papalexopoulos [5] apresentaram métodos para precificar o serviço ancilar de suporte de potência reativa, baseados no custo incorrido pelos geradores ao prover o serviço. Siddiqi e Baughman [6] propuseram que o serviço ancilar de reserva de potência seja função do benefício proporcionado aos consumidores, mensurado pela redução no custo de interrupção do sistema.

A partir da década de 90 diversos países passaram por uma reestruturação em seus setores de energia elétrica e passaram a considerar os serviços ancilares de forma independente do fornecimento de energia elétrica. Destacam-se entre os países que optaram pela reestruturação a Inglaterra [7], a Argentina [8], a Espanha [9] e o Canadá [10].

A classificação dos serviços ancilares no Brasil somente ocorreu recentemente, no ano de 2003, por meio da resolução nº 265 da ANEEL [11]. Contudo isto não impediu que trabalhos fossem publicados no Brasil com relação aos serviços ancilares.

Em 1998, o trabalho de Marcato [12] apresentou diversas metodologias para o pagamento da reserva de potência dos geradores. Neste trabalho foi salientada a importância de estudos de confiabilidade na definição de uma estrutura de remuneração para este serviço ancilar, devido a sua forte ligação com o desempenho do sistema.

Neste mesmo ano, Marzano [13] apresentou um estudo comparativo entre vários métodos para repartição dos custos de equipamentos de suporte de potência reativa, oriundos da Teoria dos Jogos Cooperativos. Concluiu-se neste trabalho que o método de Aumann-Shapley foi o mais indicado para a alocação de custos de serviços ancilares. Dentre as características que justificam a aplicação deste método, pode-se ressaltar a recuperação total do custo do serviço, justiça no processo de repartição e a ausência de subsídios cruzados entre os agentes.

Uma alternativa para precificar o serviço ancilar de suporte de potência reativa foi proposta por Lamont e Fu [14] em 1998, quando provido por agentes de geração e de transmissão. Este trabalho propõe que os agentes de geração sejam remunerados em função dos seus custos explícitos, referentes aos custos incorridos pelo agente ao prover o serviço, e dos seus custos implícitos, referentes ao custo de oportunidade verificado quando a geração de potência ativa do agente é restringida. Os agentes de transmissão seriam remunerados em função dos custos de investimento verificados para a aquisição de novos equipamentos de suporte de potência reativa.

Em 1999, uma força tarefa do Cigré [15] reuniu em um documento os requisitos básicos que definem os serviços ancilares de controle de frequência, reserva de potência e controle de tensão. Foram apresentados diversos métodos de repartição de custos para os serviços ancilares, concluindo-se novamente que o método de Aumann-Shapley é o mais eficiente. Foi proposta ainda uma estrutura de remuneração para o serviço ancilar de reserva de potência e controle de frequência, baseado em ofertas realizadas por geradores em um mercado competitivo.

Uma proposta para o cálculo dos custos incorridos pelos agentes durante o fornecimento do serviço ancilar de suporte de potência reativa é apresentada em 1999 no artigo de Silva [16]. Os custos incorridos foram classificados em fixos e variáveis. Os custos fixos referem-se à amortização dos custos de aquisição do equipamento de suporte de potência reativa, enquanto que os custos variáveis estão associados ao custo de oportunidade perdida de venda de energia por parte dos geradores e a depreciação dos equipamentos.

Entre os anos de 2000 e 2001, a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) manteve um grupo de estudos de serviços ancilares, que produziu diversos trabalhos ao longo deste período. Os primeiros relatórios publicados destinavam-se a realizar um levantamento do estado da arte dos serviços ancilares na literatura [17,18] e como se realizou a implantação destes serviços ancilares nos diversos países que optaram pela reestruturação de seus setores de energia elétrica [19].

Em 2001, Vieira [20] apresentou métodos de repartição de custos de fontes de suporte de potência reativa calcados em medidas corretivas. A metodologia define um fator de alocação de custos proporcional ao benefício que o suporte de potência reativa traz para cada barra do sistema, quando adotada uma das medidas corretivas, mínimo corte de carga ou mínima injeção de potência reativa, na ocorrência das contingências. Este benefício é medido comparando o corte de carga e/ou a injeção de potência reativa nas barras com e sem o equipamento de compensação de potência reativa. Somente as barras que efetivamente sofreram cortes de carga ou injeção de potência reativa são apontadas para repartir os custos do suporte de potência reativa.

Durante os anos de 2002 e 2003, o grupo de trabalho da PUC-Rio retomou uma segunda fase nos estudos dos serviços ancilares, focando o suporte de potência reativa e a reserva de geração. Foi realizado um levantamento mais aprofundado do funcionamento destes serviços ancilares nos diversos países do mundo, analisando também as situações onde foram implementados mercados específicos para sua contratação por parte dos agentes consumidores [20]. Seguindo esta linha de pesquisa, foram propostos mecanismos para a alocação do serviço ancilar de suporte de potência reativa e reserva de potência [22].

Em 2002, Soares et al. [23] apresentaram uma proposta de serviços ancilares para o SEB. Neste artigo foram descritos arranjos técnicos e comerciais para os serviços ancilares de controle de frequência, reserva de

potência, controle de tensão e capacidade de auto-restabelecimento. Os autores defendem que a remuneração do serviço ancilar de suporte de potência reativa seja realizado por meio dos custos fixos e variáveis incorridos pelos geradores durante a prestação do serviço. Para o serviço ancilar de reserva de potência, a remuneração dos geradores deve ser definida em função de seus custos de oportunidade, de manutenção e de operação.

O problema de alocação de custos de fontes de potência reativa foi novamente abordado por Soto [24] em 2002. Neste trabalho o custo do serviço ancilar é repartido entre os agentes beneficiados com a instalação de um novo equipamento de potência reativa. Os agentes beneficiados são identificados por meio de um fluxo de potência ótimo com função-objetivo de mínima injeção de potência reativa, que visa eliminar as violações de tensão nas barras de carga do sistema durante a ocorrência de contingências no sistema.

Em 2003, Nogueira propôs em sua dissertação de mestrado que os agentes beneficiados com a instalação das novas fontes de potência reativa deveriam ser selecionados de acordo com o seu grau de “responsabilidade” sobre o impacto de tensão causado na rede elétrica. Este grau de responsabilidade é mensurado por meio 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.

Na tese de doutorado de Vellasco [26], publicada em 2004, é apresentada uma metodologia para o cálculo da remuneração dos agentes prestadores de reservas operativas. Dentre os aspectos desta metodologia, destaca-se o conceito de benefício proporcionado pelos geradores ao proverem o serviço ancilar de reserva de potência, mensurado em função do aumento de confiabilidade no sistema de potência. O valor deste aumento de confiabilidade é calculado para cada unidade adicional de reserva de potência como função da redução observada no valor esperado de perda de carga, multiplicado pelo custo unitário de interrupção do sistema de potência.

A proposta de se remunerar os geradores que provêm os serviços ancilares de suporte de potência reativa e reserva de geração foi apresentada inicialmente por Ribeiro [27]. Neste trabalho o cálculo da remuneração dos geradores era função do seu benefício proporcionado ao sistema de potência, calculado em função da redução nos custos de investimento do sistema para as situações onde o serviço ancilar era ou não provido pelos geradores. A

remuneração que cabe a cada gerador é definida por meio dos métodos de repartição de custos de Shapley e Aumann-Shapley, que pertencem à Teoria dos Jogos Cooperativos.

Recentemente, os métodos de repartição de custos da Teoria dos Jogos Cooperativos foram empregues em outros problemas relacionados à energia elétrica. Em 2004, Barros aplicou o conceito repartição de custos aos problemas de custo de uso do sistema de transmissão [28] e custo de perdas ativas [29]. Faria, em sua dissertação de mestrado, aplicou a técnicas de repartição de benefícios da Teoria dos Jogos Cooperativos ao problema de repartição de energia firme em um sistema hidrotérmico [30].

1.4. Estrutura da Dissertação

Neste capítulo foram apresentadas algumas características dos serviços ancilares de suporte de potência reativa e reserva de potência, cuja estrutura de remuneração é o principal objetivo desta dissertação. Foi apresentada também uma breve revisão bibliográfica sobre o tema a ser desenvolvido.

Para se determinar o valor justo de remuneração que cabe a cada gerador no sistema de potência, é imprescindível o estudo de metodologias que realizem a repartição de custos ou de benefícios entre os diversos agentes. No capítulo 2 mostra-se que o problema de repartição de custos pode ser solucionado pela Teoria dos Jogos Cooperativos.

O capítulo 3 apresenta o problema de fluxo de potência ótimo e sua solução pelo algoritmo de pontos interiores. Este capítulo fornece a fundamentação teórica e matemática para o cálculo dos custos de instalação de potência reativa e de corte de carga para um sistema de potência.

O capítulo 4 apresenta os conceitos fundamentais de confiabilidade, como o valor esperado de uma função teste e os métodos de simulação de estados. É apresentado também o módulo de análise de desempenho utilizado pelo programa computacional NH2 [48], desenvolvido pelo CEPEL, utilizado como ferramenta básica para o desenvolvimento desta dissertação.

Nos capítulos 5 e 6 são apresentadas as metodologias propostas para remunerar os serviços ancilares de suporte de potência reativa e reserva de potência, respectivamente. É apresentado ainda um algoritmo de resolução para

cada metodologia proposta, juntamente com os resultados numéricos obtidos com sua aplicação a dois sistemas distintos.

Finalmente no capítulo 7 são apresentadas as conclusões obtidas neste trabalho, juntamente com sugestões para desenvolvimentos futuros.