

# 1

## Introdução

### 1.1

#### Considerações Iniciais

O setor de energia elétrica em diferentes países do mundo, assim como no Brasil, está passando por grandes mudanças estruturais e de regulamentação. Os sistemas elétricos estão migrando de uma estrutura onde as empresas eram integradas verticalmente para uma estrutura empresarial “desverticalizada”. É essencial para o desenvolvimento de qualquer país uma indústria elétrica competitiva e eficiente, e possíveis limitações na cobertura e qualidade do serviço de energia representarão um obstáculo em longo prazo. Portanto, não é de surpreender que transformações estruturais profundas na indústria elétrica sejam feitas para lograr sua modernização, fortalecer sua competitividade e brindar melhores serviços aos usuários [BANCOMER, 2002].

O processo de reestruturação tem-se mostrado de maneira particular em cada país, com diferente grau de competição e de participação do Estado. A reestruturação do setor elétrico envolve basicamente **a separação de serviços de eletricidade, acesso aberto à rede de transmissão e abertura de mercados de energia elétrica** [Huneault, 1999].

A separação de serviços de eletricidade refere-se à atribuição de distintas funções da indústria elétrica para as diferentes entidades corporativas (concessionárias). Isto é, a separação do setor elétrico em concessionárias de **geração, transmissão e de distribuição**, que serão tratados como negócios diferentes, as quais devem ser gerenciadas por empresas distintas (estrutura desverticalizada). Além disso, deveria haver forte competição em alguns pontos da cadeia fornecedora de energia elétrica (geração e comercialização de energia elétrica). Assim sendo, o agente comercializador foi criado para intermediar negociações de compra e venda de energia elétrica até chegar ao consumidor final, sendo a transmissão e distribuição consideradas monopólios naturais.

O sistema de transmissão deixou de ser propriedade de um único agente e passou a ser uma via de acesso para efetuar as transações ocorridas no

mercado. O acesso aberto à rede de transmissão tem um papel importante porque viabiliza a competição entre as empresas de geração, as quais não têm que se preocupar com a questão de “como a energia vai ser transportada até o consumidor final”. Por isso, o sistema de transmissão não pode estar sujeito ao controle de uma empresa ou um grupo de empresas que poderiam exercer este controle de forma discriminatória. Desta forma, as empresas de transmissão são tratadas como um monopólio, sujeitas à regulação de tarifas de transmissão que são usadas para cobrar o acesso à rede [Rudnick, 1996].

Em muitas partes do mundo, há competição no fornecimento da energia elétrica, o que traz como consequência a diminuição dos preços ao consumidor. Devido a isso, tornou-se importante determinar quanto do fornecimento dos geradores chega a uma determinada carga, e quanto deste fornecimento é perdido no sistema de transmissão [Thukaram, 2006].

Outros desafios são a determinação das capacidades ótimas de transferência, alocação de custos de congestionamento, determinação da responsabilidade das perdas elétricas para geradores e cargas, e a alocação de custos de vários serviços de uma forma justa e transparente.

## 1.2

### Objetivo

Nos últimos anos, poucos trabalhos têm sido propostos objetivando a determinação da responsabilidade pelas perdas ativas e reativas (perdas complexas) de uma maneira conjunta, e um número superior de trabalhos para determinar a responsabilidade pelas perdas ativas entre os agentes. Contudo, apesar de haver muitos métodos que poderiam ser considerados como “exatos”, a questão da equidade ainda continua em aberto, sendo, portanto, um problema ainda sem solução amplamente aceita. Do mesmo modo, a determinação das contribuições dos geradores para as cargas tem sido abordada de diferentes formas, apresentando diferentes fórmulas e mecanismos, sendo a maioria dos trabalhos baseada no método de seguimento dos fluxos (*flow tracing*).

A questão da influência das potências ativa e reativa na determinação das contribuições de cada um dos geradores para as perdas, fluxos e cargas, é um problema difícil, porque o fluxo de potência ativa (reativa) pode causar não apenas perda ativa (reativa), mas também perda reativa (ativa). Portanto, a

influência mútua entre os fluxos de potência ativa e reativa vem a ser um fator importante a ser levado em conta para determinar as contribuições de cada um dos geradores nas perdas, fluxo e demanda da carga [Peng, 2002].

O objetivo desta tese é propor dois métodos: um para a alocação de perdas de potência ativa e reativa (perdas complexas) e outro para determinar as contribuições dos geradores às cargas, procurando um tratamento semelhante para ambos os problemas. A chave para resolver estes problemas está em revelar a relação entre as perdas complexas da linha, o fluxo na linha, o consumo da carga e uma fonte qualquer. Para determinar essas relações, esta tese formula um método que permite uma análise separada dos efeitos de correntes reais e imaginárias (chamados também de componentes de correntes) nas perdas do sistema, enquanto fluem dos geradores até as cargas. Em seguida, a teoria de Aumann-Shapley é usada para resolver o problema da responsabilidade pelas perdas elétricas.

### 1.2.1

#### **Motivação**

O problema de alocação consiste, basicamente, em determinar a responsabilidade dos agentes (participantes) em cada um dos serviços oferecidos ou requeridos por eles. Todos, sem exceção, são responsáveis em maior ou menor grau pelos custos adicionais decorrentes de oferecer ou requerer um serviço. Por exemplo, considere-se o sistema simples de duas barras apresentado na Figura 1.1, composto de um gerador, uma linha e uma carga. O gerador oferece o serviço de fornecimento de energia e a carga requer energia. É evidente que a energia requerida pela carga será fornecida pelo gerador, mas para isso é necessária uma linha de transmissão que fará o papel intermediário, transmitindo a energia do gerador até a carga.

Depois de realizada a transmissão de energia elétrica surge um novo desafio. O gerador que fornece uma potência de 100 MW durante uma hora exige que a carga pague por seus serviços. Por outro lado, a carga argumenta que somente recebeu 95 MW na mesma hora e não é responsável pela diferença. Então, surge uma pergunta. Quem é responsável pelas perdas na linha de transmissão? A resposta mais aceita pelos agentes do sistema é que tanto os geradores quanto as cargas são responsáveis pelas perdas (binômio gerador-carga), coexistindo numa espécie de cooperação elétrica mutuamente

vantajosa, implicando uma inter-relação que os torna mutuamente indispensáveis. Isto se baseia no princípio de que sem carga não há perdas, assim como sem geração também não há.

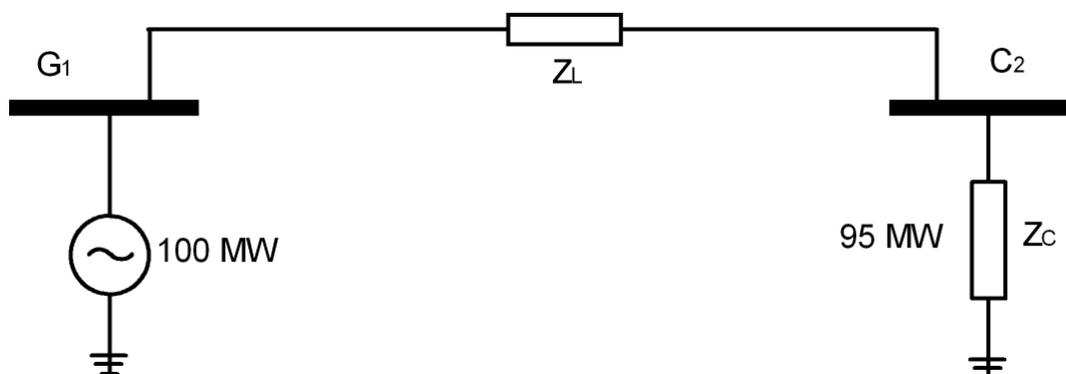


Figura 1.1 - Sistema de Duas Barras

Estendendo a análise para um sistema maior, onde se tem um sistema com  $(N_G + N_C)$  barras, dos quais  $N_G$  barras são de geração e  $N_C$  barras de carga, metade da responsabilidade pelas perdas do sistema é atribuída às  $N_G$  barras de geração e a outra metade às  $N_C$  barras de cargas. Assim sendo, aparece um novo desafio, que é a determinação da responsabilidade de cada gerador e carga nas perdas atribuídas a cada categoria.

Outro desafio a ser abordado nesta tese é a determinação da contribuição da potência fornecida pelos geradores para as cargas. Isto é, determinar quanto da potência consumida por uma carga provém de cada gerador. Nos sistemas elétricos atuais, os consumidores podem escolher seus fornecedores de energia. Assim, é importante saber a parcela de potência que um gerador fornece para uma determinada carga. A carga pode optar por outro gerador que possa ajudá-la a reduzir outros custos, tal como o custo pela utilização do sistema de transmissão.

Para o sistema apresentado na Figura 1.1 a solução é simples, já que toda a potência consumida pela carga foi fornecida pelo gerador. Num sistema maior, onde a rede de transmissão é malhada, esta tarefa não é simples, devido à relação não-linear existente entre a potência fornecida por um gerador e a consumida por uma carga.

Para sistemas maiores é necessário um método para distribuir entre os agentes envolvidos a responsabilidade pelos custos adicionais decorrentes dos serviços oferecidos ou requeridos, de uma forma justa. Embora existam vários métodos de alocação propostos na literatura para resolver estes problemas, ainda não existe um consenso sobre o melhor critério a ser seguido, sendo que atualmente cada país utiliza um método diferente com maior ou menor grau de aproximação.

Outra questão importante a ser considerada é a alocação de perdas de potência reativa porque tem recebido uma maior atenção nos tempos atuais. Embora o custo de produção de potência reativa é muito pequeno comparado com o da potência ativa, a hipótese de custo zero não é aceitável em um mercado competitivo. No entanto, ainda não existem métodos de aquisição e pagamento de potência reativa, que sejam amplamente aceitos. Em vez disso, cada mercado elétrico usa estratégia de aquisição com base em suas próprias regras. Nos mercados emergentes as cargas pagam pela potência reativa consumida e assim, é de se esperar um pagamento pelas perdas de potência reativa porque as impedâncias das linhas têm características similares às cargas. É preciso recuperar os custos de suporte de potência reativa do sistema. Por outro lado, devido ao efeito capacitivo das linhas, existe uma diminuição nas perdas reativas do sistema. Esta compensação reativa deve ser considerada no processo de alocação, o que permite uma alocação de perdas reativas menor nas linhas.

A natureza não-linear da demanda de potência e das perdas elétricas é o principal problema. Ou seja, trata-se de grandezas que não estão relacionadas linearmente a nenhuma outra grandeza física (por exemplo: potências, tensões, correntes, etc.) do sistema elétrico. Entretanto, sabe-se que a localização de geradores e cargas na rede pode contribuir, de forma significativa, para o aumento ou diminuição das perdas elétricas do sistema. Além disso, a influência desses agentes (geradores e cargas), no aumento ou diminuição das perdas elétricas pode variar de acordo com sua potência gerada ou consumida. A partir dessas afirmações, formula-se um conjunto de características visando uma adequada alocação, mas não a ideal, o qual é apresentado em [Conejo, 2001] e [Fang, 2002], descritos com maior detalhe na Seção 3.1.

### 1.3

#### Estado da Arte

Determinar a responsabilidade pelas perdas elétricas do sistema de transmissão e as contribuições dos geradores para as cargas são temas que estão sendo estudados por diversos autores, na procura de soluções para determinar a responsabilidade dos agentes do sistema nestes dois problemas. Na seqüência, serão descritos os trabalhos mais relevantes voltados para a determinação da responsabilidade das perdas do sistema de transmissão e determinação da contribuição dos geradores para as cargas.

#### 1.3.1

##### Alocação de Perdas do Sistema de Transmissão

Na literatura técnica, muitos trabalhos têm sido dedicados ao problema de alocação de perdas ativas de transmissão e um número menor às perdas reativas e complexas. No entanto, em geral, os métodos propostos são dependentes do tipo ou modelo operacional do mercado elétrico. Nas referências, podem ser encontrados interessantes estudos comparativos, contendo breves revisões de métodos de alocação de perdas nos mercados elétricos [Lima, 2007] [Lima, 2004] [Conejo, 2002].

Em [Ilic, 1998] [Conejo, 2002] é tratado um dos métodos clássicos, simples de entender e fácil de implementar, denominado método *Pro Rata*. Caracteriza-se por alocar perdas elétricas proporcionalmente à potência de cada gerador ou de cada carga. Mas, para fazer a alocação de perdas deve-se arbitrar a proporção de perdas elétricas que serão alocadas aos geradores e às cargas, geralmente, 50% para cada categoria. Apesar de todos estes aspectos positivos, sua principal desvantagem é que “ignora” a rede. Isto é, duas demandas idênticas localizadas em pontos diferentes do sistema, por exemplo, uma próxima às barras geradoras e a outra distante delas, são tratadas da mesma forma.

Em [Bialek, 1998] e [Kirschen, 1997] são propostos métodos baseados em seguimento de fluxo de potência para alocar perdas na rede. Estes métodos, em geral, usam resultados do fluxo de potência, em combinação com o princípio da divisão proporcional. Adicionalmente, são requeridas técnicas de circuitos e

técnicas recursivas de rastreamento. Com isso, torna-se possível a alocação de perdas para geradores e consumidores, numa proporção de 50% das perdas para cada um deles. Os métodos para alocação de perdas e fluxos baseados no princípio da divisão proporcional usam diversas suposições e esquemas recursivos. Por exemplo, consideram linhas e barras fictícias, entre outros. Com isso, o resultado das alocações pode ser considerado inconsistente.

Os métodos baseados na teoria de circuitos elétricos apresentam uma característica peculiar. O fato de explorar as leis de circuitos elétricos, simples e de fácil entendimento, torna-os interessantes [Conejo, 2001], [Lo, 2006], [Reta, 2001], [Costa, 2004], [Daniel, 2005], [Unsihuay, 2006]. Embora se explorem as leis de circuito, há dificuldades em alocar as perdas para as cargas e geradores porque as funções das perdas são não-lineares. Várias suposições e aproximações foram feitas com a finalidade de alocar a parcela das perdas associadas aos termos cruzados. Na Seção 3.2 esta discussão é descrita com mais detalhes.

Aplicações de métodos de alocação de perdas em submercados podem ser encontradas em [Lima, 2006] e [Leite da Silva, 2003a]. Métodos baseados em fatores incrementais de perdas podem ser encontrados em [Galiana, 2002] e [Leite da Silva, 2003b], entre outros. No Brasil, o método utilizado para a alocação das perdas baseia-se no método de Pro-Rata. Entretanto, houve uma tentativa de aplicar um método baseado na definição de fatores de perda tanto para a carga quanto para a geração. Esses fatores são calculados por meio de fluxo de carga CC, que considera algumas aproximações nas equações do fluxo de potência convencional. Acredita-se que este método possa fornecer uma alocação de perdas injusta aos participantes do mercado. Em [Menezes, 2006] é proposta uma metodologia para o cálculo dos fatores de perda, também baseada em métodos incrementais, mas considerando a não-linearidade das equações do fluxo de carga, utilizando para isso um modelo de fluxo de carga CA. Uma comparação entre o cálculo dos fatores incrementais de perdas usando o modelo CA e CC também é apresentada.

Em [Shih-Chieh, 2006], [Peng, 2007], o conceito de teoria dos jogos cooperativos (valor de Shapley) é usado para determinar uma alocação de perdas, onde as potências geradas são modeladas como fontes de corrente e as cargas são modeladas por seu equivalente de impedância constante. Assim, cada fonte de corrente é tratada como um jogador individual do *jogo de alocação*

de perdas. Este procedimento de alocação, embora tenha várias características atraentes, apresenta duas limitações importantes: a) o processo de alocação é afetado pela agregação de agentes; b) o esforço computacional, devido ao aspecto combinatório, cresce muito rapidamente com o número de agentes.

Para superar estas limitações da teoria de Shapley, surge a teoria de Aumann-Shapley, que é mais completa, conforme descrito na Seção 2.8. Em [Vieira Filho, 1999] [Tan, 2001], [Molina, 2007], é aplicada a teoria de Aumann-Shapley para o problema de alocação de perdas; Em [Vieira Filho, 1999] o custo de perdas de transmissão é definido como a diferença entre a quantidade paga aos geradores na operação do sistema com e sem perdas, isto é, primeiro é determinada o custo da operação do sistema com as resistências das linhas originais, seguidamente calcula-se o custo da operação do sistema considerando as resistências das linhas nulas, entretanto o custo unitário de Aumann-Shapley é feito através de métodos numéricos; em [Tan, 2001], a equação para as perdas de sistema é função das potências ativas dos geradores e o cálculo do custo unitário de Aumann-Shapley também é feito através de métodos numéricos de integração; enquanto em [Molina, 2007], a equação de perdas é uma função das injeções de corrente equivalentes dos geradores e o cálculo do custo unitário é feito de forma analítica.

Em [Abdelkader, 2007], apresenta-se um método que aloca as perdas complexas de cada linha de maneira proporcional aos fluxos de potência complexa. Isto significa que, um fluxo de potência ativa (reativa) não somente causa perda ativa (reativa), mas também perda reativa (ativa). Portanto, a influência mútua entre as perdas e os fluxos de potência ativa e reativa é levada em consideração.

Outro método baseado em fluxo de potência é apresentado em [Macqueen, 1996]. Utiliza-se um método visual da rede com a finalidade de determinar as perdas em cada barra. Desse modo, uma fórmula de alocação de perdas específica é aplicada. Porém, esta fórmula se mostrou inadequada, já que aloca a totalidade das perdas somente aos consumidores.

### 1.3.2

#### Contribuição dos Geradores às Cargas

Na literatura são propostos diversos métodos de partição de responsabilidades dos geradores para o atendimento das demandas de potência. Muitas abordagens se baseiam no seguimento de fluxos, apresentando soluções práticas para o problema, utilizando adicionalmente os princípios da superposição e divisão proporcional. Existe também um método que usa basicamente a teoria de circuitos, considerando hipóteses e suposições para determinar tais responsabilidades. A seguir, uma breve descrição destes métodos.

Em [Bialek, 1996] apresenta-se um método baseado no seguimento de fluxos 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 princípio da divisão proporcional, o 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 de fluxo por linha que chega a uma barra e segue por outra linha que deixa esta barra.

Em [Kirschen, 1997], descreve-se um método baseado em seguimento de potência ativa, no qual se determina quais geradores alimentam uma carga particular, isto é, quanto da potência produzida pelo gerador é usada pela carga. Esta proposta, embora seja aplicada somente para determinar a contribuição de potência ativa dos geradores para as cargas, pode também ser generalizada para potência reativa. O método inicia-se de uma solução de fluxo de carga, onde são identificadas as barras que são atingidas pela potência produzida por cada gerador, isto é, faz um seguimento da potência fornecida pelos geradores até as cargas. Logo, agrupam-se as barras que são alimentadas pelo mesmo gerador, sendo possível calcular a contribuição de cada gerador para as cargas, supondo-se uma divisão proporcional.

Em [Wu, 2000], apresenta-se um método que calcula a contribuição de potência dos geradores para as cargas, usando a teoria de grafos e seguimento de fluxos de potência. Este método, da mesma maneira que em [Bialek, 1996] e [Kirschen, 1997], supõe uma divisão proporcional dos fluxos; considerando esta

suposição, conseguiu-se obter as potências das cargas como uma função das potências fornecidas pelos geradores.

Em [When, 2004], propõe-se a alocação do fornecimento de potência reativa levando em conta uma consideração básica da teoria de circuitos: a tensão em 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 ( $E_G$ ), de maneira a serem decompostas as tensões de todas as barras de carga em parcelas  $\Delta E_L$ , resultantes da atuação de apenas um gerador por vez. Então, estas contribuições de tensão são utilizadas juntamente com as injeções de corrente 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 são alocados para as cargas segundo a lógica proposta para a partição da potência reativa.

## 1.4

### Estrutura da Tese

Este trabalho está estruturado em 7 capítulos. A seguir será apresentada uma breve descrição de cada um deles.

No Capítulo 2 são apresentados vários métodos utilizados para repartição de custos em ambientes competitivos. Será verificado que o problema de alocação de perdas e demanda pode ser fortemente relacionado com a teoria dos jogos.

No Capítulo 3 são apresentados alguns trabalhos que tratam da alocação de perdas e demandas de potência. Alguns destes métodos serviram como embasamento teórico para o desenvolvimento do método proposto e serão mais enfatizados.

No Capítulo 4 é apresentada a teoria básica de circuitos, estabelecendo as bases para a análise de circuitos em sistemas de potência. Desenvolvem-se

algumas ferramentas básicas que compreendem conceitos fundamentais, definições e procedimentos necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

No Capítulo 5 descreve-se o método proposto para determinar a transferência de potência dos geradores para as cargas e para alocar as perdas de potência ativa e reativa simultaneamente entre geradores e cargas, apresentando-se inicialmente os conceitos necessários para o entendimento do método e posterior desenvolvimento da proposta.

No Capítulo 6 são reportados os resultados numéricos obtidos para 3 sistemas-teste, de 4 barras, de 5 barras e o IEEE de 30 barras. Utiliza-se um programa computacional, no qual é desenvolvido e implementado o método proposto, para determinar a transferência de potência dos geradores para as cargas e a alocação de perdas para geradores e cargas.

Finalmente, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões e considerações finais do trabalho, acompanhadas de sugestões para trabalhos futuros.