

1

Introdução

1.1

A reforma do setor elétrico

Durante os últimos 20 anos a indústria de energia elétrica viveu um intenso processo de reestruturação, o que tem levado a uma nova visão acerca do suprimento de eletricidade. Tradicionalmente, uma empresa de energia assumia a obrigação de atender a uma demanda de energia elétrica de certa região, e ela cobria todas as fases da cadeia de suprimento, incluindo geração de energia, transmissão através de altas tensões e distribuição para consumidores finais através de redes de médias e baixas tensões. Além de serem responsáveis pela operação, manutenção e expansão da capacidade de geração e da rede de transmissão, as empresas também realizavam toda a parte comercial de medição e cobrança. Geralmente, o Estado garantia às empresas o completo ressarcimento dos custos envolvidos nestas atividades.

Na segunda metade do século 20, a expansão gradual dos sistemas elétricos levou a um aumento gradual do intercâmbio de energia entre países vizinhos. Em alguns casos, empresas decidiram coordenar a operação de suas interconexões de forma a aumentar a eficiência e confiabilidade de seus sistemas. A criação de mercados atacadistas, com a participação de empresas tanto geradoras, quanto de distribuição e de transmissão, acabou por não considerar as diferenças conceituais existentes entre cada uma destas atividades. Por outro lado, a operação, manutenção e expansão de um sistema são mais eficientes quando realizadas por uma entidade única. As atividades de transmissão e distribuição podem ser consideradas como monopólios naturais, já a geração e comercialização podem ser inseridas em um ambiente competitivo, com as empresas fazendo uso dos sistemas de transmissão e distribuição mencionados.

Com o objetivo de aumentar a eficiência no suprimento de energia, alguns países pioneiros introduziram competição em seus mercados de energia, o que levou à criação dos mercados atacadistas. As empresas geradoras que quisessem

gerar e vender energia deveriam fornecer informações não somente sobre seus custos de produção, como também sobre suas características técnicas e restrições na operação de suas unidades. Com base nas informações obtidas, as usinas eram despachadas através de modelos computacionais de otimização que visavam minimizar o custo operativo total. Em geral, o lado da demanda não fazia parte destes mercados, e o preço spot de energia, para cada período, era determinado pelo custo variável da última unidade despachada usada para atender a demanda de energia do período.

Através da experiência obtida pelos agentes reguladores, uma segunda geração de mercados atacadistas aumentou ainda mais a liberdade dos participantes, permitindo-lhes tomar suas próprias decisões. Esses mercados foram concebidos sob a forma de leilão, em que os participantes deviam submeter suas ofertas para realizar transações de venda e compra de energia, e qualquer aspecto operativo já deveria estar considerado nos preços ofertados.

Neste tipo de mercado o preço *spot* da energia, em cada período, é obtido através dos resultados desses leilões. Os geradores podem livremente fazer suas ofertas (uma certa quantidade de MWh a um certo preço mínimo, expresso em \$/MWh) para a produção de energia em cada período, que era tipicamente pré-determinado em base horária para o próximo dia ou próxima semana. As unidades são então despachadas por ordem crescente da oferta de preço até que a demanda seja totalmente atendida. Em alguns casos os consumidores também devem fazer suas ofertas, definindo a quantidade de MWh e o preço máximo que estão dispostos a pagar. Todos os geradores despachados recebem pelo preço da unidade despachada mais cara, que corresponde ao custo marginal de curto prazo do sistema, ou preço *spot*. Uma vez calculada a geração de cada usina, esta recebe do mercado atacadista um valor (\$) dado pelo custo marginal de curto prazo, ou preço *spot* (\$/MWh), multiplicado pela energia gerada (MWh). Por sua vez, cada comprador (empresas distribuidoras ou grandes consumidores industriais) paga um valor (\$) relativo aos MWh consumidos nesta hora, multiplicados pelo mesmo preço *spot*.

Da mesma forma que a operação destes sistemas se tornou mais descentralizada, a expansão da oferta de energia, ou construção de novas usinas, também vivenciou um processo semelhante. Ao invés de seguir um plano produzido por uma agência de planejamento central, os agentes, privados ou

públicos, tornaram-se livres para decidir pela construção de novas usinas e competir pelos contratos de venda de energia para empresas de distribuição e consumidores livres.

Em resumo, a indústria de eletricidade de muitos países passou por um processo de reestruturação [1] com ênfase na introdução de competição em seus segmentos, buscando, com isso, uma maior eficiência no uso de seus recursos. Embora os detalhes do processo de reformas e o desenho institucional sejam diferentes entre os diversos países [2], a organização geral, na maioria dos casos, passa pela substituição do planejamento centralizado da operação e expansão do sistema, por procedimentos de mercado. Nestes mercados os agentes geradores são livres para tomar suas decisões de investimento (longo-prazo) e produção (curto-prazo), sendo também responsáveis pelos riscos decorrentes dessas decisões.

O processo de reforma do setor elétrico gerou intensos esforços por parte de empresas e pesquisadores para analisar, modelar e estimar estratégias de atuação dos participantes neste tipo de mercado. O fato de a energia elétrica ser um dos propulsores das economias tanto dos países desenvolvidos, quanto dos países em desenvolvimento, torna o estudo do assunto ainda mais relevante.

Apesar dos recentes avanços nas pesquisas sobre o assunto, a adoção de um mercado atacadista competitivo foi feita de forma muito rápida, afetando as empresas, que passaram a ter que se adaptar de forma rápida e desenvolver novas estratégias para tomada de decisões. Os lucros e o bom gerenciamento de seus portfólios passaram a estar condicionados ao sucesso dessas estratégias.

1.2

O Mercado Elétrico Nórdico: Nord Pool ¹

O mercado elétrico nórdico possui uma capacidade instalada de 93 GW (com 50% de usinas hidrelétricas e 50% de usinas termelétricas) e uma geração total, em 2009, de 400 TWh, tamanho semelhante ao do sistema elétrico brasileiro.

¹ Fonte: Nordpool webpage: <http://www.nordpool.com>

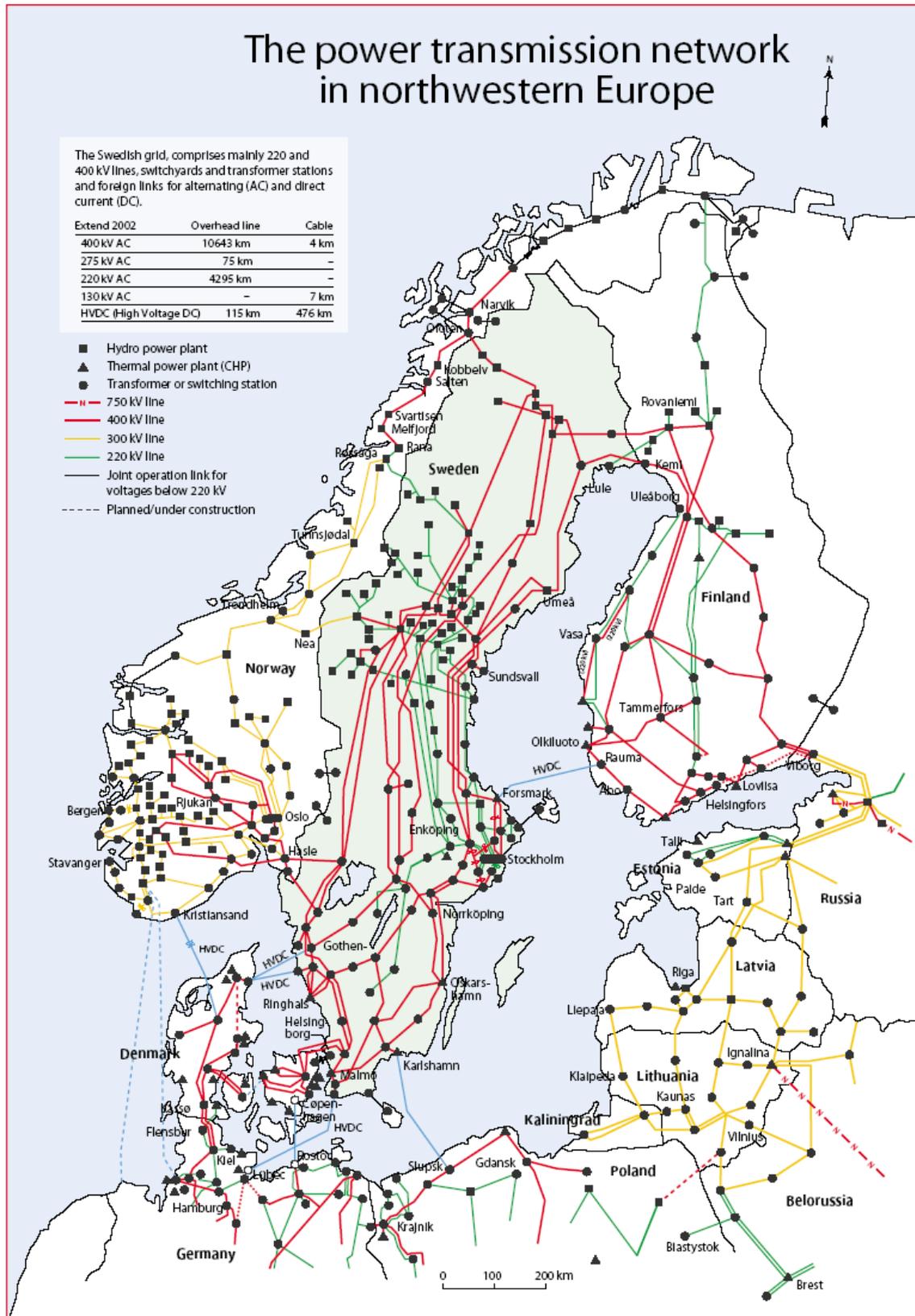


Figura 1.1 – Sistema elétrico do Nord Pool

A Noruega, que é um país predominantemente hidrelétrico (98% da capacidade instalada), pioneiramente descentralizou seu mercado de energia elétrica em 1991, e os principais objetivos da reforma foram:

- Obter um melhor balanço entre oferta e demanda de energia;
- Aumentar a eficiência e a confiabilidade do sistema;
- Reduzir diferenças regionais nos preços de energia dos consumidores finais.

Com a liberalização do mercado de energia elétrica da Noruega, o setor passou de um modelo controlado e regulado pelo governo para um modelo competitivo e regido pelo mercado. Posteriormente, este processo se deu em todos os países nórdicos, que formaram um mercado único chamado Nord Pool [3]. Além da presença dos quatro países nórdicos: Noruega, Suécia, Finlândia e Dinamarca, o Nord Pool ainda conta com a participação de uma pequena área do norte da Alemanha, chamada Kontec.

O Nord Pool hoje é formado por duas empresas: o Nord Pool Spot [4] e o Nord Pool ASA [5]. O Nord Pool Spot (ou Elspot) é o mercado atacadista, onde são firmados contratos físicos de energia resultantes dos leilões diários de compra e venda de energia, conforme será explicado mais adiante. O Nord Pool ASA compreende o mercado de contratos financeiros (Financial Market), que permite que os participantes do Nord Pool estabeleçam estratégias para mitigar os riscos da flutuação dos preços futuros da energia através da transação de contratos bilaterais, *forwards*, futuros e de opções. O mercado de contratos é também responsável por administrar os pagamentos e compensações financeiras dos participantes, além de ter uma área que presta consultoria no desenvolvimento de mercados de energia mundo afora.

Os leilões diários do Elspot, ou somente mercado *spot*, são realizados sempre no dia anterior ao dia em que a energia deve ser fisicamente gerada e entregue. Durante este intervalo de tempo eventos inesperados podem acontecer, de forma que é necessário haver mecanismos para ajustar possíveis desequilíbrios entre geração e carga, e para isso existem o mercado de balanços, também

chamado de mercado de ajustes (*balancing* ou *regulating market*), e o mercado Elbas.

Cada um destes mercados será introduzido nas próximas subseções.

1.2.1

O mercado *spot* (Elspot)

No que tange à livre tomada de decisão na produção, um dos componentes básicos dos sistemas reestruturados é o mercado atacadista de energia de curto prazo, ou mercado *spot*, onde ocorrem todas as transações diárias de compra e venda de energia elétrica no atacado.

Conforme já introduzido anteriormente, no mercado elétrico nórdico (Nord Pool) o mercado *spot* é baseado em leilões, realizados diariamente, e que resultam em obrigações de compra e venda de energia para cada uma das horas do dia seguinte.

Os leilões realizados no mercado *spot* representam um sistema eficiente que permite que oferta e demanda definam o preço *spot* de cada hora, além de dar aos participantes a possibilidade de balancearem seus *portfólios* de contratos relativamente perto (um dia) da hora em que a energia é fisicamente gerada. O mercado *spot* funciona da seguinte maneira:

- a) Às 12:00 horas de cada dia os geradores submetem ofertas (ou curvas de ofertas) de quantidade (MWh) e preço (\$/MWh) para cada uma das horas do dia seguinte, refletindo sua disposição em *vender* energia. A demanda (consumidores), por sua vez, também participa, enviando suas ofertas (ou curvas de ofertas) de quantidade e preço que refletem sua disposição em *comprar* energia;
- b) Dadas as ofertas dos geradores e consumidores, o operador de mercado determina o despacho econômico dos agentes em cada hora, isto é, define a quantidade a ser gerada/consumida por cada um. Para isso, o operador coloca as ofertas dos geradores em ordem crescente de preço e as ofertas dos consumidores em ordem decrescente, e encontra o preço de equilíbrio no mercado para o qual a oferta total se iguala à demanda em cada uma

das horas. O preço de equilíbrio é conhecido por preço *spot* (\$/MWh). Desta forma, aplicam-se ao setor elétrico os fundamentos básicos da teoria microeconômica [8], onde o preço de qualquer mercadoria num ambiente de mercado resulta do equilíbrio entre as curvas de oferta – cuja disposição em produzir aumenta com o preço – e de demanda – cuja disposição para consumir diminui com o preço. O processo é ilustrado na Figura 1.2 a seguir, que mostra curvas reais de oferta e demanda dos mercados da Noruega (Área NO1) e Suécia:

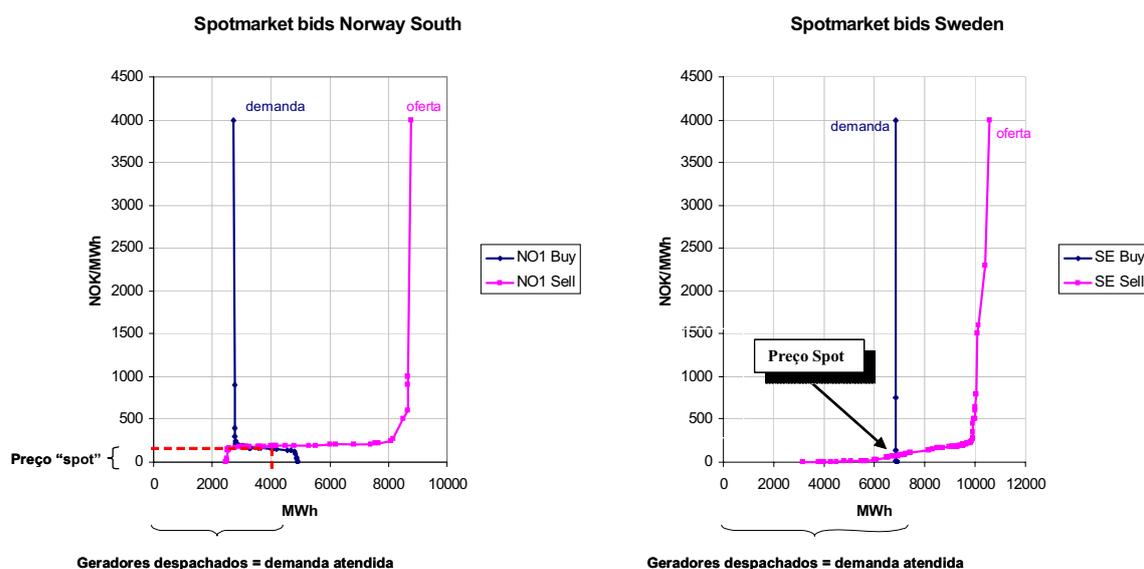


Figura 1.2 - Formação de preços e despacho por ofertas

Vale observar que, depois de definido o preço *spot*, normalmente, devido aos limites de transmissão do sistema, não é possível que todos os participantes gerem e consumam a energia de seus lances aceitos. Nesses casos se faz necessário dividir a região do Nord Pool em áreas, cada uma com um preço spot resultante diferente.

Aumentando o preço *spot* da área com déficit de energia faz os participantes desta área produzirem mais e consumirem menos, enquanto na área com sobra um preço menor faz os participantes gerarem menos e consumirem mais. Os preços das diferentes áreas são calculados de maneira que se encontre o equilíbrio, e de forma a garantir que as linhas de transmissão que dividem as áreas com preços diferentes estejam sendo usadas com o máximo de suas capacidades. A Figura 1.3 mostra um exemplo da divisão do Nord Pool em diversas áreas (com

a Noruega dividida em quatro áreas, NO1, NO2, NO3 e NO4, e a Dinamarca dividida em duas, DK1 e DK2) e os fluxos de energia resultantes entre elas. Mais detalhes sobre este procedimento podem ser encontrados em [4].



Figura 1.3 – Exemplo de divisão das áreas no Nord Pool e fluxos de energia

- c) Finalmente, é realizada a contabilização/liquidação das vendas e compras de energia: os geradores (demandas) recebem (pagam) um valor igual ao produto entre a quantidade produzida (consumida) e preço de equilíbrio.

No máximo às 14:00 horas os preços spot para cada hora do dia seguinte são divulgados, e os geradores são, então, notificados sobre as quantidades de energia que deverão gerar em cada uma delas. Os lances para esses leilões são feitos sob incerteza, uma vez que o preço *spot* não é conhecido de antemão, o que torna a tarefa dos agentes difícil.

Esse esquema de despacho e formação de preços por ofertas baseado na teoria marginalista de remuneração dos agentes (pagamento *spot*), foi adotado na maioria dos países que reestruturaram seus setores elétricos, como por exemplo, Argentina, Colômbia, maioria dos países da América Central, diversos mercados elétricos dos Estados Unidos (PJM, NY, New England, Califórnia, Texas), toda a Europa Ocidental, países nórdicos, Austrália e Nova Zelândia. Um detalhamento maior do funcionamento de outros mercados atacadistas de energia pode ser encontrado em [2][6][7].

A quantidade total de energia negociada no mercado *spot* no Nord Pool em 2009 foi de 287 TWh, representando um valor total de EUR 10.8 bilhões. Esta quantidade representa mais de 72% do total consumido pelos países do Nord Pool no ano. Portanto, as vendas no mercado *spot* representam uma parte substancial das receitas dos geradores no Nord Pool, e logo, participar destes leilões, diariamente, é uma importante tarefa encarada por eles.

1.2.2

O mercado de contratos

O mercado de contratos (ou *financial market*) é um mercado para mitigação de riscos associados às flutuações nos preços da energia do mercado *spot*. Nesse mercado se transacionam contratos bilaterais e derivativos, como futuros, *forwards* e opções.

Um comprador ou vendedor de energia pode, nesse mercado, controlar sua exposição e reduzir seus riscos através da assinatura de contratos futuros nos quais preços e quantidades de energia são acordados previamente entre as partes.

Suponha que um comprador e um vendedor estabelecem um contrato correspondendo a certa quantidade de energia e um dado preço, e que o preço *spot* médio para o período do contrato é maior que o preço acordado. Nessa situação, o vendedor irá compensar o comprador através do pagamento da diferença entre o preço *spot* médio e o preço do contrato, multiplicado pelo volume contratado. Caso ocorra o contrário, ou seja, o preço *spot* médio esteja menor que o preço do contrato, o vendedor recebe uma compensação financeira do comprador igual à diferença entre preço do contrato e o preço *spot* médio, multiplicado pelo volume contratado. Portanto, quando se assina um contrato, tanto o vendedor quanto o comprador passam a não mais se preocupar com o preço *spot* resultante.

Os contratos aplicam-se a um dia, semana, mês ou ano específico, e uma vez que o contrato assinado é puramente financeiro, a energia fisicamente gerada tem que ser transacionada no mercado *spot*.

Caso o vendedor e comprador estejam localizados na mesma área, basta informar que irão produzir e consumir a energia do contrato independentemente do preço *spot* resultante, para, depois, serem compensados de forma a pagar e receber ao preço acordado no contrato². Caso eles estejam em áreas diferentes, eles devem traçar estratégias que levem em conta a possibilidade de haver congestionamento da rede, implicando em um risco de diferença de preços.

Um contrato firmado entre vendedor e comprador é não somente um *hedge* contra flutuações dos preços *spot*, como também uma obrigação financeira mútua, controlada e administrada pelo Nord Pool. A transação de derivativos (futuros, *forwards*, opções) no mercado de contratos se dá através também de uma plataforma eletrônica, onde as condições do mercado podem ser acompanhadas em tempo real. O uso integrado destes derivativos, juntamente com contratos bilaterais, oferece aos participantes uma importante ferramenta para o controle e mitigação dos riscos de longo prazo do mercado *spot*.

Uma vez que o objetivo central desta tese é analisar isoladamente o efeito do mercado de ajustes Elbas na estratégia de oferta dos agentes, optou-se por não considerar o mercado de contratos no modelo final desenvolvido.

² Esta quantidade de energia não é considerada nas estatísticas do total de energia transacionada no mercado *spot*.

1.2.3

O mercado de balanços (ou ajustes)

Conforme a discussão introduzida no início da seção 1.2, os leilões de compra e venda de energia são realizados no mercado *spot* no dia anterior ao dia em que a energia deve ser fisicamente gerada e entregue. Até cada hora do dia seguinte eventos improváveis podem acontecer, como quebra de máquinas, quedas de linhas de transmissão, aumento inesperado da demanda, entre outros, o que faz com que exista a necessidade de haver mecanismos para ajustar possíveis desequilíbrios entre geração e carga.

Desvios entre as gerações reais e as gerações definidas pelos lances aceitos no mercado *spot* são transacionados no mercado de balanços (ou *balancing market*), também através de leilões, de forma análoga ao mercado *spot*.

Os principais objetivos deste mercado são:

- Servir de ferramenta para os agentes do sistema balancearem a geração e carga a qualquer momento durante a operação, sem a intervenção do operador;
- Estabelecer um preço para a energia dos ajustes dos participantes.

Os lances no mercado de balanços são submetidos ao operador do sistema depois que o mercado *spot* é fechado, e podem ser alterados até pouco tempo³ antes da real hora de operação. Dois tipos possíveis de lances podem ser feitos: lances para regulação positiva e lances para regulação negativa.

Os lances para regulação positiva servem para casos em que é necessário aumentar a geração, ou diminuir o consumo. Neste caso, o participante que puder e desejar participar do mercado de balanços deve informar o quanto deseja receber para aumentar sua geração (ou diminuir seu consumo) de um montante específico. O menor preço de lance permitido é o preço *spot* daquela hora específica. Já os lances para regulação negativa são para casos em que se precisa diminuir a geração, ou aumentar o consumo. Neste caso, os participantes devem dizer quanto

³ Podendo ser até de 15 minutos. Este tempo varia de país para país no Nord Pool.

estão dispostos a pagar para aumentar o consumo (ou diminuir a geração) de um determinado montante.

Uma vez realizados os lances, eles são ordenados, e, se existe a necessidade de se aumentar a geração, o lance para regulação positiva de menor valor é atendido. Caso haja a necessidade de se diminuir a geração, o lance para regulação negativa de maior valor é atendido.

As usinas participantes no mercado de balanços, quando requisitadas, devem ser capazes de alterar seus níveis de geração em curtos espaços de tempo (minutos), o que é uma característica da flexibilidade operativa das hidrelétricas, por exemplo.

O mercado de balanços de cada país é controlado por seu próprio operador, que também é responsável por fiscalizar possíveis especulações feitas neste mercado. Caso o sistema precise de um ajuste na geração, o operador é o responsável por estabelecer os lances aceitos e informar aos participantes as mudanças de geração e consumo que devem ser atendidos por eles, de acordo com os lances realizados.

Com o funcionamento do mercado Elbas, que será introduzido na próxima seção, as transações no mercado de balanços (ou ajustes) tornam-se quase irrelevantes, e, muitas vezes, os próprios países que participam do Elbas o chamam de mercado de balanços. Por esta razão, o mercado de balanços é suprimido da modelagem adotada nesta tese.

1.2.4

O mercado Elbas

Além do mercado de balanços, ajustes na geração definida pelos lances aceitos no mercado *spot* podem ser feitos através do mercado Elbas, que permite aos agentes a transação (*intraday*) contínua de energia até uma hora antes da hora da real operação.

Diferentemente do que ocorre no mercado de balanços, no mercado Elbas os participantes não realizam lances de preço e quantidade para vender ou comprar energia. Ele funciona como um mercado de ações, ou seja, através de uma plataforma eletrônica na internet podem ser acompanhadas as ofertas de compra e de venda de energia para cada uma das 24 horas. Nestas ofertas sempre

há um intervalo (*gap*) entre o maior preço de compra e o menor preço de venda, da mesma maneira que ocorre numa plataforma de compra e venda de ações. Se o participante deseja comprar imediatamente um dos produtos (1 MWh para uma dada hora específica) ele deverá pagar o menor preço dentre os que estão atualmente sendo ofertados, e vice-versa para o caso da venda. O mercado Elbas funciona como um *aftermarket* do mercado *spot*, onde os participantes são empresas geradoras, distribuidoras e comercializadoras de energia que têm liberdade de comprar ou vender energia conforme necessitem.

Os produtos negociados no mercado Elbas são bem simples: contratos de geração de 1 MWh durante cada hora do dia, totalizando, portanto, 24 diferentes produtos. As 14:00 horas, depois que os preços *spot* são definidos, o mercado Elbas abre para transações de energia de cada hora do dia seguinte. A transação do produto de uma hora específica pode ser feita no máximo até uma hora antes da hora em que a energia é fisicamente gerada.

O sistema automaticamente controla possíveis restrições de capacidade nas linhas de transmissão, impedindo a venda energia que não pode ser transmitida da área do vendedor para a do comprador. Por exemplo, se não há mais capacidade de transferência de energia da Finlândia para a Suécia, os geradores da Finlândia não irão ver em seus sistemas as ordens de compra colocadas por participantes da Suécia.

Fora a Noruega, que tem 98% da capacidade instalada de hidrelétricas, os outros países do Nord Pool têm a maior parte de suas matrizes compostas por termelétricas, o que torna os custos variáveis de produção altos. Com isso, uma importante tarefa para os geradores de energia destes países é a estimação da produção de energia com grande antecedência. Porém, uma vez que o consumo e produção planejados nem sempre correspondem à situação durante a hora da operação, a transação contínua de energia até uma hora antes da entrega da energia se torna importante e eficaz. Esta foi a razão de representantes do Nord Pool, principalmente da Finlândia e Suécia, terem começado a estudar uma solução para um ajuste de mercado eficiente, onde geradores e consumidores pudessem ajustar seus balanços energéticos a qualquer hora até o mais próximo possível da hora em que a energia é gerada.

O mercado Elbas foi aberto em março de 1999, inicialmente funcionando durante apenas uma parte do dia. Graças a um sistema novo, implementado em

2001, o mercado passou a funcionar 24 horas por dia. O volume total de energia transacionado no mercado Elbas em 2009 foi de 2370 GWh, o que representa quase 1% do volume no mercado *spot*, que foi de 287 TWh. Hoje, o mercado Elbas está aberto em todos os países que compõem o Nord Pool, com a Noruega sendo a última a ingressá-lo, em março de 2009.

1.3

Escopo, objetivo e contribuições

A transição de uma estrutura onde as empresas tinham a garantia de que seus custos fixos e variáveis seriam ressarcidos para uma estrutura onde as receitas são incertas e dependem de suas estratégias criou a necessidade do desenvolvimento de novas ferramentas para ajudar na tomada de decisão. As novas metodologias se diferem dependendo do horizonte de tempo das decisões operativas, e, tradicionalmente, estruturam a operação dos sistemas de energia elétrica, através da separação das decisões de longo, médio e curto prazos.

Esta tese se concentra na atuação de empresas geradoras no horizonte de curto prazo, adotando a perspectiva de um agente hidrelétrico atuando no Nord Pool. Atuar num mercado *spot* envolve a importante tarefa de definir diariamente os lances de preço e quantidade para o leilão de compra e venda de energia, tarefa esta que tem influência direta nas receitas obtidas pela empresa no mercado *spot*.

De forma geral, as principais decisões envolvidas no planejamento de curto prazo de um agente gerador são:

- Fazer ofertas para os leilões diários de energia do mercado *spot*;
- Criar um detalhado programa de operação de suas unidades a fim de atender a suas obrigações de geração obtidas dos resultados dos leilões do mercado *spot* (lances aceitos);
- Realizar ajustes nas ofertas e programas de operação através dos mercados Elbas, a fim de adequar suas estratégias a novas informações obtidas até a hora em que a energia é fisicamente gerada e entregue.

Essas três atividades são mostradas na linha do tempo da Figura 1.4 abaixo:

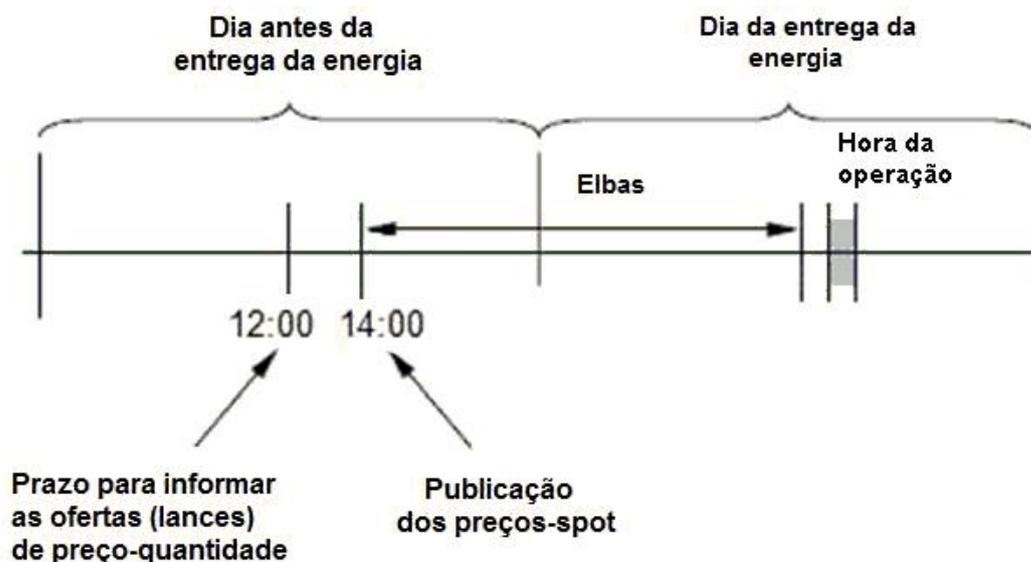


Figura 1.4 – Cronologia das principais decisões no planejamento de curto prazo

Os preços *spot* definidos pelos leilões diários são afetados por condições do mercado difíceis de prever. Para um agente pequeno no mercado o processo de formação do preço *spot* é governado pela atuação dos outros agentes, e geralmente informações sobre outros agentes não estão disponíveis. Portanto, para um agente *price-taker*, que não possui poder de mercado (capacidade de afetar os preços deste mercado com suas ofertas), o preço *spot* pode ser considerado uma variável exógena e não disponível no momento em que se faz a oferta no leilão. Em outras palavras, a estratégia de oferta em leilões de energia de um agente *price-taker* é feita sob incerteza quanto aos preços *spot*. Esta é uma hipótese realista para o mercado nórdico, onde o nível de competição é elevado.

A representação das incertezas acerca das vazões afluentes é relevante em modelos de longo prazo, mas não tanto em modelos de curto prazo, já que suas previsões de curto prazo apresentam grande precisão. Isso faz com que muitos autores, como no caso deste trabalho, usem previsões de vazões determinísticas em modelos de curto prazo, preocupando-se mais com o detalhamento de outras partes do modelo, como a representação dos mercados de ajustes.

O primeiro objetivo desta tese é desenvolver um modelo computacional que otimize a estratégia de oferta de um agente hidrelétrico atuando no mercado *spot* diário do Nord Pool, levando-se em conta as incertezas nos preços deste

mercado e a possibilidade de atuação no mercado Elbas. O modelo de otimização desenvolvido tem como função objetivo a maximização de uma combinação convexa entre o valor esperado e o CVaR da renda obtida na venda de energia, dependendo do perfil de risco do agente. Para um agente totalmente avesso a risco seu objetivo será maximizar exclusivamente o CVaR da distribuição da renda, enquanto para um totalmente neutro a risco será maximizar o valor esperado da renda.

Apesar de o volume de energia transacionado no mercado Elbas ser pequeno se comparado ao volume do mercado *spot*, uma estratégia adequada de atuação neste mercado pode ter grande importância e impacto sobre as receitas de uma empresa atuando no Nord Pool. Como será visto, dependendo das condições do sistema, os preços observados no mercado Elbas podem sofrer grandes flutuações no decorrer do dia, fazendo com que considerá-los nos modelos passe a ter relevância. Ainda não há referências bibliográficas nas quais as transações de energia no mercado Elbas sejam modeladas.

O modelo desenvolvido neste trabalho representa de forma detalhada as características operativas das usinas do agente hidrelétrico, incluindo uma modelagem individualizada de cada uma das unidades geradoras. Ferramentas para geração de cenários de preços foram estudadas e usadas para gerar *inputs* para o modelo.

O problema de programação estocástica resultante é de grande porte, e sua solução através de algoritmos clássicos para instâncias grandes torna-se inviável computacionalmente. Como a proposta da tese é desenvolver um modelo o mais realista e com o maior nível de detalhes possível na modelagem das usinas, o segundo objetivo desta tese é aplicar a decomposição de Benders para permitir que instâncias com maior número de cenários, e que representam melhor a realidade, possam ser testadas.

Com o modelo desenvolvido seguem-se o terceiro e quarto objetivos da tese, que dizem respeito a estudar a atuação dos agentes no mercado Elbas sob dois pontos de vista distintos: sob a ótica dos agentes geradores e sob a ótica do regulador:

- Sob a ótica dos geradores é feita uma análise da importância para suas estratégias de se poder transacionar energia no mercado Elbas.

- Sob a ótica do regulador o objetivo é investigar até que ponto atuar neste mercado traz incentivos aos agentes em deixar de ofertar energia no mercado *spot* para tentar obter rendas maiores com transações no mercado Elbas.

A função do mercado Elbas é permitir que os agentes realizem ajustes em suas gerações e consumos que venham a ser necessários para tornarem seus planos de operação adequados às suas estratégias, e não servir como mais uma ferramenta de especulação e obtenção de lucros.

Todos estes efeitos serão estudados e analisados para diferentes perfis de risco dos agentes e diferentes condições de mercado, ou seja, para diferentes níveis de volatilidades dos preços praticados no mercado Elbas e diferentes valores (ou custos de oportunidade) da água armazenada nos reservatórios. Quando os reservatórios estão cheios, os agentes hidrelétricos são mais dispostos a usar a água, já que a chance de se verter é maior, e o valor da água, neste caso, é baixo. O oposto ocorre quando os reservatórios estão vazios.

Em resumo, esta tese possui quatro contribuições principais: (i) formulação do problema de ofertas sob incerteza em mercados *spot* diários considerando todas as características técnicas, operativas e financeiras das usinas, possibilidade de transacionar energia no mercado Elbas, e modelagem da aversão a risco; (ii) modelagem da decomposição de Benders do modelo resultante, de forma a permitir que instâncias maiores e mais realistas sejam testadas; (iii) estudar a atuação e a influência do mercado Elbas sob a ótica dos geradores; (iv) estudar a atuação e a influência do mercado Elbas sob a ótica do regulador.

1.4

Organização da tese

Esta parte do capítulo descreve a organização da tese, com o objetivo de facilitar a leitura e o entendimento das análises e conclusões do trabalho realizado.

O capítulo 2 introduz as diferenças fundamentais entre modelos baseados em custos e modelos baseados em oferta de preços. Mostram-se as diferentes etapas do planejamento da operação de um sistema elétrico, passando pelos

modelos de longo e médio prazo, até chegar aos modelos de curto prazo, onde os níveis de detalhes modelados são maiores. O capítulo também introduz as diferentes técnicas de modelagem das estratégias de agentes *price-makers* e *price-takers* atuando em um mercado de oferta de preços, além de situar o escopo desta tese.

O capítulo 3 contém o modelo de otimização estocástica de dois estágios usados para definir a estratégia de oferta e de operação de um agente hidrelétrico *price-taker* atuando no Nord Pool. O capítulo começa mostrando o caso determinístico, mais simples, até chegar ao modelo estocástico mais detalhado, incluindo a modelagem da aversão a risco através do CVaR, representação individualizada de cada unidade geradora e as incertezas envolvidas no problema.

O capítulo 4 introduz diferentes técnicas de geração de cenários para representação de incertezas em problemas de programação estocástica, incluindo a utilizada nesta tese para gerar cenários de preços *spot* e preços do Elbas, que foi baseada em modelos de séries temporais ARMA (*autoregressive moving average*) e GARCH (*generalized autoregressive conditional heteroskedasticity*).

No capítulo 5 é feita uma introdução sobre problemas de programação estocástica de dois estágios e o algoritmo de decomposição de Benders aplicado a eles. O capítulo inclui o algoritmo de decomposição de Benders desenvolvido especificamente para o problema modelado nesta tese, incluindo sua versão relativa à decomposição de Benders *Multicut*.

O capítulo 6 apresenta a metodologia empregada na análise dos resultados obtidos do modelo, e o capítulo 7 mostra os resultados dos estudos de casos realizados. Esse capítulo é dividido em duas seções, uma que estuda a atuação dos agentes no mercado Elbas sob o ponto de vista dos agentes geradores, e outra sob a ótica do regulador.

O capítulo 8 apresenta as principais conclusões da tese e trabalhos futuros.