GUILHERME BORIN DA SILVA

**Análise da competitividade no Mercado de Energia Brasileiro
por meio de redes complexas**

São Paulo

2016

GUILHERME BORIN DA SILVA

**Análise da competitividade no Mercado de Energia Brasileiro
por meio de redes complexas**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-graduação em Modelagem de Sistemas Complexos.

Área de Concentração: Sistemas Complexos

Versão corrigida contendo as alterações solicitadas pela comissão julgadora em 15 de setembro de 2016. A versão original encontra-se em acervo reservado na Biblioteca da EACH-USP e na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP (BDTD), de acordo com a Resolução CoPGr 6018, de 13 de outubro de 2011.

Orientador: Prof. Dr. Camilo Rodrigues Neto

São Paulo
2016

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

CATALOGAÇÃO-NA-PUBLICAÇÃO

(Universidade de São Paulo. Escola de Artes, Ciências e Humanidades. Biblioteca)

Silva, Guilherme Borin

Análise da competitividade no mercado de energia brasileiro por meio de redes complexas / Guilherme Borin da Silva ; orientador, Camilo Rodrigues Neto. – São Paulo, 2016.

84 p. : il

Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Modelagem de Sistemas Complexos, Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo. Versão corrigida.

1. Energia elétrica - Competitividade - Modelos computacionais - Brasil. 2. Energia elétrica - Regulação - Brasil. 3. Grafos aleatórios. 3. Redes complexas. 4. Sistemas dinâmicos. I. Rodrigues Neto, Camilo, orient. II. Título

CDD 22.ed.— 621.31011

Dissertação de autoria de Guilherme Borin da Silva, sob o título "**Análise da competitividade no Mercado de Energia Brasileiro por meio de redes complexas**", apresentado à Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-graduação em Modelagem de Sistemas Complexos, na área de concentração Sistemas Complexos, aprovado em 15 de setembro de 2016 pela comissão examinadora constituída pelos doutores:

Prof. Dr. Camilo Rodrigues Neto

Presidente

Instituição: EACH-USP

Prof. Dr. Esteban Fernandez Tuesta

Instituição: EACH - USP

Prof. Dr. Marcelo de Souza Lauretto

Instituição: EACH – USP (Sistemas de Informação)

Prof. Dr. Luiz Henrique Alves Pazzini

Instituição: Universidade Presbiteriana Mackenzie

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Camilo Neto pelas ideias, discussões e paciência em todo esse período. Também agradeço aos demais professores e colegas do programa de mestrado, que acabaram contribuindo, cada um de sua maneira, com o resultado desse trabalho.

Aos amigos da gerência de Monitoramento de Mercado da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, agradeço pelas sugestões e por terem suportado minhas ausências quando precisei.

Agradeço à minha família, que me deu as condições para aprender e sempre me incentivou a continuar estudando e seguindo o caminho das ciências.

Agradeço a Náshara Silveira pelos incentivos, apoio, compreensão e por ser o motivo pelo qual eu tento ser alguém melhor a cada dia.

E por fim, agradeço ao acaso, que proporcionou as condições iniciais para que isso tudo fosse possível.

“It really boils down to this: that all life is interrelated. We are all caught in an inescapable network of mutuality, tied into a single garment of destiny. Whatever affects one destiny, affects all indirectly.”
— Martin Luther King Jr.

Resumo

SILVA, Guilherme Borin. **Análise da competitividade no Mercado de Energia Brasileiro por meio de redes complexas**. 2016. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

O presente trabalho tem como principal meta auxiliar na resposta a um dos principais problemas no estudo da economia: o quanto intervenções regulatórias afetam a dinâmica dos mercados. Para isso será feita uma análise dos dados contratuais de comercialização de energia elétrica no ambiente livre de comercialização de energia brasileiro por meio de uma metodologia que utiliza métricas de análise de redes complexas para avaliação da competitividade. Os dados abordam o período de 2006 a 2015, dos agentes comercializadores de energia nesse mercado. É estabelecido então um ranking mensal desses agentes e criada a rede por meio da verificação das trocas de posições nesses rankings. Os resultados da análise indicam em quais anos houve maior variação na competitividade no mercado e pela análise das redes resultantes verifica-se a formação de estruturas de mercado. Posteriormente os resultados são comparados com métricas tradicionais de avaliação de competitividade e concentração de mercado e, por fim, é feita uma avaliação qualitativa dos índices sob a luz das principais alterações regulatórias ocorridas no período.

Palavras-chave: Energia, Mercado de energia, Análise de Ranking, Competitividade, Poder de Mercado, Análise de redes complexas, Grafos, Mercado de energia

Abstract

SILVA, Guilherme Borin. **Competitiveness analysis of the Brazilian Energy Market through complex networks**. 2016. 84 p. Dissertation (Master of Science) – School of Arts, Sciences and Humanities, University of São Paulo, São Paulo, 2016.

The main goal of this project is to assist in the answer to one of the main issues in the study of Economics: how regulatory interventions affect the dynamics of the markets, in this case specifically, electricity markets. This will be achieved through an analysis of the contractual data of electric energy in the free Brazilian energy market environment through a methodology that uses complex network analysis for the evaluation of competitiveness. The data cover the contracts of all energy traders of this market in the period from 2006 to 2015. A monthly ranking of these agents is established and a network is created through the verification of position changes in these rankings. The results of the analysis indicate which years there was greater variation in competitiveness and the analysis of the resulting networks indicates market structures formation. The results are then compared with traditional metrics for competitiveness and market concentration and, finally, a qualitative assessment of the results is made considering the major regulatory changes that have occurred in the study period.

Keywords: Energy, Energy Markets, Ranking Analysis, Competitiveness, Market power, Complex Network Analysis, Graphs.

Lista de figuras

Figura 2.1- Ambientes de contratação	19
Figura 2.2 - Evolução do número de agentes no mercado livre de energia no Brasil	21
Figura 2.3- Sistema Interligado Nacional.....	22
Figura 2.4 - Capacidade instalada no SIN	23
Figura 2.5 - Energia Natural Armazenada - Médias históricas	24
Figura 2.6 - Histórico do PLD médio mensal em R\$/MWh.....	27
Figura 4.1 - Bando de estorninhos em comportamento coletivo.....	41
Figura 4.2 - Sete pontes de Königsberg.....	44
Figura 4.3 - Matriz de adjacência de um grafo não dirigido e sua representação.	46
Figura 4.4 - Matriz de adjacência de um grafo dirigido e sua representação.	46
Figura 4.5 - Exemplo de rede aleatória com 100 nós e probabilidade de 8% de conexão. A coloração dos nós representa o grau de cada nó, quanto mais escuro maior o grau.	50
Figura 4.6 – Representação de um modelo small world com 50 nós conectados a 3 vizinhos imediatos e probabilidade de reconexão de 5%. A coloração dos nós representa o grau de cada nó, quanto mais escuro maior o grau.....	51
Figura 4.7 - Representação de um modelo livre de escala com 100 nós. A coloração dos nós representa o grau de cada nó, quanto mais escuro maior o grau.	52
Figura 5.1 - Grafo de competitividade da família de rankings $\mathcal{R}$	56
Figura 6.1 - Evolução do número de comercializadores e quantidade de energia comercializada mensalmente (valores em MWh).	59
Figura 6.2 - Evolução da concentração de mercado.....	60
Figura 6.3 - Grafos de competitividade de 2006 a 2008. A cor representa o grau de cada nó, quanto mais escuro, maior o grau.....	65
Figura 6.4 - Grafos de competitividade de 2006 a 2008. A cor representa o grau de cada nó, quanto mais escuro, maior o grau.....	66
Figura 6.5- Grafos de competitividade de 2012 a 2015 separados em camadas de concentração de mercado.....	67

Lista de tabelas

Tabela 6.1 - Resultados da análise pelo método de grafos competitivos. Os resultados em verde são os que indicam maior competitividade enquanto os em vermelho indicam o oposto.....	61
Tabela 6.2 - Métricas obtidas para uma série de grafos aleatórios usando o Modelo de Erdős Renyi. Fonte: produção do próprio autor.....	62
Tabela 6.3 – Métricas obtidas por meio da metodologia de grafos de competitividade, embaralhando as posições dos rankings em cada mês. Fonte: produção do próprio autor	62
Tabela 6.4 - Resultado da metodologia de grafos de competitividade, após feita a remoção de agentes inativos. Fonte: produção do próprio autor	63
Tabela 6.5- Comparação do grau médio normalizado com outros modelos de redes. <i>GNE</i> , para o modelo de grafos aleatórios, <i>GNSW</i> , para o modelo de grafos de pequeno mundo e <i>GNLE</i> para o modelo de grafos livre de escala.	64
Tabela 6.6 - Aplicação de métricas tradicionais de competitividade e concentração de mercado na base de dados na comercialização de energia. Fonte: produção do próprio autor	68
Tabela 7.1 - Diferentes resultados da operação para dois períodos.....	84

Lista de abreviaturas e siglas

Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
Cepel	Centro de Pesquisas em Energia Elétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
HHI	Índice de Herfindahl Hirschman
MAE	Mercado Atacadista de Energia
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PDDE	Programação Dinâmica Dual Estocástica
PLD	Preço de Liquidação das Diferenças
PIE	Produtor Independente de Energia
RSI	Índice de Suprimento Residual
SEB	Setor Elétrico Brasileiro
SIN	Sistema Interligado Nacional

Sumário

1	Introdução	13
2	Descrição do mercado de energia Brasileiro	15
2.1	O caso Brasileiro	16
2.1.1	A Reestruturação	17
2.2	Panorama atual.....	19
2.3	Estruturas do SIN	22
2.3.1	Geração de Energia Elétrica.....	23
2.3.2	Comercialização de energia	24
2.4	Modelos Computacionais	25
2.5	Preço de Liquidação das Diferenças - PLD	26
2.6	Alterações Regulatórias a partir de 2006.....	28
3	Conceitos econômicos	32
3.1	Livres mercados e Regulação.....	32
3.2	Estruturas de mercado	33
3.2.1	Mercados competitivos	34
3.2.2	Monopólios.....	34
3.2.3	Oligopólios	35
3.3	Concentração de Mercado	35
3.3.1	Market share e grau de concentração	36
3.3.2	Índice de Herfindahl–Hirschman (HHI)	37
3.3.3	Residual Supply Index(Índice de suprimento residual) – RSI.....	37
4	Redes Complexas	39
4.1	Breve introdução sobre sistemas Complexos	39
4.1.1	Principais propriedades de sistemas complexos	40
4.1.2	A economia como um sistema complexo	42
4.1.3	Sistemas complexos e políticas públicas	42
4.2	Estudo de redes	43
4.2.1	Conceitos básicos de Teoria dos grafos	44
4.2.2	Representação matricial	45
4.2.3	Métricas de rede (Medidas de centralidade e Coeficiente de Clustering)	47
4.3	Tipos de redes.....	49
4.3.1	Modelo de redes aleatórias.....	49
4.3.2	Modelo Small World.....	50
4.3.3	Modelo de rede livre de escala.....	51

5	Estatísticas de Ranking	53
5.1	Rankings.....	53
5.1.1	O coeficiente de Kendall.....	53
5.1.2	Índice de Churn Ajustado.....	54
5.2	Grafos de competitividade	55
5.2.1	Construção dos grafos	55
5.2.2	Métricas de um grafo de competitividade.....	56
6	Aplicação do método de grafos de competitividade à comercialização de energia	59
6.1	Descrição dos dados.....	59
6.2	Resultados	60
6.2.1	Paralelo com redes aleatórias	61
6.2.2	Gráficos obtidos	65
6.2.3	Comparação com métricas tradicionais	68
6.2.4	Influência externa na competitividade	68
7	Conclusões	70
	Referências	71
	Apêndice A – Código em R	75
	Apêndice B - Planejamento da Operação do Sistema.....	80

1 Introdução

Um dos grandes motivadores do estudo da economia é a avaliação do papel dos governos nos mercados. (MANKIW, 2009). Uma das possíveis falhas de mercado que podem ocorrer é o aumento do poder de mercado por parte de um ou um grupo de agentes. A intervenção estatal em um mercado pode ser benéfica, a ponto de se reduzir o poder de mercado, ou então causar uma concentração ainda maior nesse poder. Uma maneira de se analisar a concentração de mercado é por meio de índices gerais ou específicos a cada mercado e como os agentes desse mercado se classificam em rankings perante a esses índices. (BANOVA, 2005)

O estudo de rankings não é algo recente nos conceitos estatísticos, tendo como trabalho seminal o estudo que propôs uma medida para comparação de rankings, (KENDALL, 1938) que foi aplicado em diferentes áreas do conhecimento, como, por exemplo, esportes, mercados financeiros, impactos de periódicos científicos, índice de prestígio de universidades, dentre outros. Entretanto, devido ao crescimento e avanço de implementações de aprendizagem de máquina como sistemas de busca, recomendação e classificadores, os rankings têm voltado a entrar em evidência, dessa vez em análises de grandes volumes de dados.

Outro campo de estudo que na última década tem avançado de forma acelerada é o estudo de redes por meio da teoria dos grafos¹. Inicialmente considerados como objetos matemáticos apenas teóricos, os grafos passaram a ter aplicações relacionadas com o mundo real a partir do surgimento dos estudos de redes aleatórias (ERDÖS e RÉNYI, 1959). Mais recentemente, estudos propuseram alterações no modelo de grafos aleatórios, criando o modelo de redes *small world* (WATTS e STROGATZ, 1998) e posteriormente o modelo de redes livres de escala (BARABASI e ALBERT, 2002). A partir daí diversos campos do conhecimento passaram a utilizar os conceitos de redes, como por exemplo logística, economia e biologia.

Esse trabalho propõe unir os três temas citados acima com uma aplicação do método de análise de rankings por meio do uso de grafos de competitividade (CRIADO, GARCIA, *et al.*, 2013), ao longo do tempo, a fim de se verificar impactos de intervenções estatais e alterações regulatórias na competitividade de um mercado específico. Neste estudo, o método será aplicado no ranking de agentes comercializadores de energia no mercado de energia brasileiro, no período de 2006 a 2015.

¹ A teoria dos grafos é o campo da matemática que estuda as relações entre os objetos de um determinado conjunto. Um grafo, resumidamente, é a representação matemática de uma rede.

No capítulo 2, é apresentada uma descrição do setor elétrico brasileiro a fim de se contextualizar o trabalho, abordando desde o início desse setor em diversas partes do mundo, uma descrição do histórico no Brasil, a reestruturação do mercado brasileiro após as privatizações e o racionamento de energia em 2001. Por fim, é apresentado um panorama contemporâneo com uma descrição sobre as alterações regulatórias mais recentes no mercado livre de energia.

Posteriormente, no capítulo 3 são apresentados os conceitos econômicos de competição em mercados e mercados regulados, passando por concentração de mercado, monopólios e oligopólios. Também são apresentados os índices de Herfindhal-Hirshmann (HHI) e o Residual Supply Index (RSI) tradicionais índices utilizados para medição de poder de mercado em mercados liberalizados de energia.

No capítulo 4 é apresentado um breve resumo de Sistemas Complexos, apresentando as principais definições, características e aplicações com alguns exemplos. É também realizada revisão dos conceitos de redes complexas com a apresentação dos tipos de formação de rede e definição de algumas medidas de centralidade utilizadas para análise.

O capítulo 5 introduz o conceito de ranking e as principais medidas estatísticas relativas a esse assunto. Aqui é apresentado o método de análise de rankings por meio do uso de grafos de competitividade. É feita uma descrição do método e alguns tipos de análise em que ele pode ser aplicado.

Já o capítulo 6 apresenta os resultados da aplicação do método nos dados de negociação dos comercializadores de energia no mercado brasileiro nos anos de 2006 a 2015 e é feita uma análise desses resultados sob a luz das principais externalidades (intervenções regulatórias, cenários econômicos e climáticos), a fim de se verificar os impactos nas medidas de competitividade.

Por fim, no capítulo 7 serão apresentadas as conclusões a respeito do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 Descrição do mercado de energia Brasileiro

A fim de se inserir o trabalho no contexto atual do mercado, será apresentado um breve histórico dos mercados de energia e do Setor Elétrico Brasileiro (SEB) com foco maior nas mudanças ocorridas a partir da década de 1990.

O surgimento de um setor de energia consolidado, na maioria dos países, ocorreu por meio do crescimento de companhias privadas, descendentes das primeiras instalações geradoras que supriam os centros urbanos e industriais no século XIX. Portanto até as primeiras décadas do século XX o desenvolvimento do setor provinha de investimentos privados. O estado, que já regulava de forma leve os setores de mineração e hidráulico, apenas atuava como observador, a atividade de geração de energia era considerada como qualquer outra atividade econômica.

A maior intervenção estatal veio no primeiro terço do século XX, como um resultado de mudanças tecnológicas e econômicas: a criação de redes de transmissão com uso de corrente alternada permitiu que a energia fosse levada para longas distâncias, tornando possível a construção de usinas muito maiores, longe dos centros de demanda. Tal fato exigia empresas de energia mais robustas financeiramente e maior apoio financeiro dos bancos. Concomitantemente, a crise financeira de 1929 na América e o pós guerra na Europa enfraqueceram as empresas de energia, impedindo-as de tomar frente nos projetos de geração necessários para atender ao crescimento que surgiu após esses dois fatos.

Então houve uma reestruturação dos setores energéticos em quase todos os países, levando a uma estatização completa dos serviços relacionados à energia. Em especial na América Latina houve projetos de expansão ambiciosos com a construção de grandes usinas hidrelétricas de alto custo. (BATLLE, BARROSO e PEREZ-ARRIAGA, 2010)

Tal situação permaneceu estável até a década de 1980. Com a dificuldade em manter os investimentos expressivos que o setor requer, em diversos países, o estado transferiu essa responsabilidade para empresas por meio do mecanismo de concessão dos serviços de eletricidade (HUNT, 2002). Posteriormente houve a desverticalização das empresas e consequente quebra de monopólios, sendo que apenas nos casos de transporte de energia (distribuição e transmissão) ²foi mantido o conceito de monopólio natural.

²Nos termos de mercado de energia brasileiro, a transmissão é o transporte da energia proveniente dos geradores de energia por meio da rede de alta tensão (maior ou igual a 230 kV) até as subestações, já a distribuição é o transporte dessa energia até o consumidor final. Em uma analogia livre com o transporte de pessoas, a rede de transmissão seriam as rodovias interestaduais enquanto a rede de distribuição seriam as ruas e avenidas dentro das cidades.

Em alguns países houve ainda a abertura do mercado para a livre comercialização de energia, nos quais os consumidores de energia devem pagar as tarifas reguladas pelo transporte, mas podem escolher seus fornecedores de energia e realizar seus contratos livremente. Tal abertura poderia ser parcial ou total, sendo que atualmente o Brasil encontra-se nesse estágio de mercado com uma abertura parcial. (ARFUX, 2011). A ideia aqui seria a de que com a introdução da competição num setor anteriormente monopolizado haveria um crescimento nos investimentos em produção de energia capazes de atender ao crescimento da demanda.

Atualmente, em alguns mercados, observa-se uma tendência a um maior fechamento e uma maior força à regulação estatal, já que a abertura de mercados, após algumas décadas, deixou de surtir o efeito desejado. (BATLLE, BARROSO e PEREZ-ARRIAGA, 2010)

2.1 O caso Brasileiro

O caso brasileiro foi bem semelhante ao de outros países. Até o final da década de 1980 o setor era composto por empresas estatais verticalizadas, ou seja, que mantinham controle único sobre os segmentos de geração, transmissão e distribuição de energia. Entretanto, nessa década, o país passou por uma forte crise econômica com elevados índices de inflação. Nesse período, as tarifas de energia pagas pela população eram mantidas num patamar baixo de forma artificial, não garantindo aos distribuidores a remuneração mínima de 10% prevista em lei (SILVA, 2008), causando assim, uma reduzida possibilidade de investimento do governo e expansão do parque gerador.

Com as mudanças políticas e econômicas ocorridas no Brasil a partir do início da década de 1990, foi sinalizado um aumento na demanda por energia e então fez-se necessária uma reestruturação do setor. A lei nº 9074 de 1995 criou as figuras do Produtor Independente de Energia (PIE), empresas privadas que produzem energia e a vendem por meio de contratos e Consumidor Livre, agente do mercado que pode escolher seu fornecedor de energia.

Foi então criado o Projeto RE-SEB, que teve como premissas: (MAYO, 2009)

- Assegurar os investimentos necessários para a expansão de oferta de energia, uma vez que havia uma percepção de esgotamento da capacidade do estado de investir em infraestrutura para suprir o aumento da demanda.
- Assegurar que o setor fosse economicamente eficiente, utilizando os recursos disponíveis para garantir um suprimento confiável de energia elétrica ao menor custo possível.

As principais conclusões do projeto foram a necessidade de desverticalização e privatização das empresas de energia elétrica; incentivo da competição na produção e comercialização de energia e manutenção sob regulação dos setores de distribuição e transmissão de energia elétrica como monopólios naturais.

A fim de se operacionalizar o funcionamento desse novo mercado fez-se necessária a criação das instituições independentes:

- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, agência reguladora, responsável pela regulação e fiscalização setorial.
- ONS – Operador³ Nacional do Sistema, responsável pelo sistema de transmissão e pelo despacho das usinas de forma a garantir otimização energética.
- MAE – Mercado Atacadista de Energia, instituição operadora⁴ do mercado, responsável por viabilizar a contabilização e liquidação da energia transacionada pelos agentes.

Esse processo de reestruturação do setor elétrico ocorreu de forma semelhante em diversos países do mundo nessa mesma época e sempre tiveram como característica principal “a mudança de um ambiente de monopólio baseado no custo para um ambiente de competição baseado no preço e o desmembramento (desverticalização) das empresas de energia elétrica em três segmentos separados de geração, transmissão e distribuição”. (MAYO, 2009)

Entretanto, tal projeto não obteve sucesso por completo e grande parte dos agentes geradores existentes não chegou a ser privatizada. Ocorreu então a crise de abastecimento de 2001 culminando no racionamento de energia, o que levou à criação de comissões para analisar o sistema elétrico e fazer a gestão da crise.

2.1.1 A Reestruturação

Após diversos estudos, as comissões chegaram à conclusão de que o déficit de energia de 2001 poderia ter sido previsto caso fosse observado o índice de risco de não atendimento das cargas, que chegou a 14%, contra os 5% que se consideram normais. Soma-se a isso o fato de que houve atrasos na execução de obras de geração e transmissão, causando uma redução nos

³ Nos mercados de infraestrutura e utilidades públicas, um operador é a empresa responsável por garantir a continuidade e disponibilidade do serviço. No setor elétrico, por exemplo, o operador do sistema é a organização responsável por realizar o balanço entre suprimento e a demanda de energia.

⁴ Nesse caso o operador de mercado é responsável pelo balanço comercial dos recursos (geração e contratos de compra) e requisitos (consumo e venda)

níveis dos reservatórios e consequente não atendimento às cargas. Portanto, o fator hidrológico não foi determinante para o racionamento, como se chegou a veicular na mídia inicialmente, mas sim a falha estrutural do modelo, que não estimulava de forma correta os agentes a promoverem aumento de geração e investimentos em melhorias de transmissão. (SILVA, 2008)

Em 2003 foi então proposto um novo modelo institucional para o Setor Elétrico Brasileiro, com os seguintes objetivos (SILVA, 2008):

- Promover a modicidade tarifária;
- Garantir a segurança do suprimento de energia elétrica;
- Assegurar a estabilidade do marco regulatório;
- Promover a inserção social no Setor Elétrico Brasileiro, principalmente pelos programas de universalização do atendimento.

Nesse novo modelo, a comercialização de energia é viabilizada pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), que sucedeu o MAE, em dois ambientes de mercado distintos (MAYO, 2009):

- Ambiente de Contratação Regulada (ACR): ambiente no qual é feita a contratação de energia dos consumidores cativos. Nele a energia é contratada por meio de leilões regulados pelo governo, nos quais a negociação ocorre pelo menor preço da energia ofertada.
- Ambiente de Contratação Livre (ACL): Ambiente no qual a energia é negociada livremente por meio de contratos bilaterais entre consumidores livres, agentes de geração e comercializadores.

A figura 2.1 ilustra essa configuração para os dois ambientes de comercialização:

Figura 2.1- Ambientes de contratação
Fonte: produção do próprio autor

Atualmente o ACL é responsável por cerca de 24% do consumo de energia, segundos dados de fevereiro de 2015, sendo que a proporção é maior nos estados do Norte (41%) e Sudeste (27%). (CCEE, 2015)

2.2 Panorama atual

Atualmente existem 7 classes de agentes que atuam no mercado de energia brasileiro:

- **Geradores:** São agentes produtores de energia que têm concessão do governo para tal. Geralmente são representantes de grandes usinas hidrelétricas.
- **Produtores independentes (PIE):** São agentes produtores de energia cujas usinas são provenientes de investimentos da iniciativa privada. Ambos PIEs e Geradores tem tratamento similar perante as regras de mercado.
- **Autoprodutores:** São consumidores de energia altamente eletro intensivos que veem vantagem comercial em construir ou adquirir uma usina para abater seu consumo. Atualmente tem tratamento semelhante ao PIE, porém possui um valor de consumo.
- **Comercializadores:** São agentes sem geração que apenas fazem negociação da energia. Compram e vendem contratos de energia, procurando obter lucro nas negociações.

- Consumidores Livres: São consumidores de energia cuja demanda é maior que 3MW e estão ligados na tensão de 69kV caso tenha sido ligada antes de 7/7/1995, caso contrário não há tensão limitante. Esses consumidores devem fazer a opção de comprar sua energia de terceiros e não mais da Distribuidora local. Apenas podem adquirir energia, não realizam contratos de venda.
- Consumidores especiais: Semelhantes aos consumidores livres, com a diferença que o limite para a demanda é 0,5 MW e que deve adquirir energia apenas de agentes geradores cujas fontes são incentivadas (PCHs, Eólica, Biomassa, Solar, Cogeração Qualificada)
- Distribuidores: São os agentes que suprem o consumo residencial e público. Também suprem o consumo de consumidores cativos (aqueles que não podem ou não optaram por ser livres). Os distribuidores são detentores de concessão governamental e sua atividade é monopólio natural. Apenas podem comprar energia no ambiente regulado, por meio dos leilões.

Observa-se aqui que apesar da denominação de “mercado livre de energia”, esse mercado não é totalmente livre, pois para se tornar um agente, tanto do lado do consumo quando do lado fornecedor, uma empresa deve atender a certas restrições ou obter concessões estatais de exploração. Ou seja, existem barreiras à entrada e o mercado não atingiu o nível de liberação total.

A evolução da quantidade de agentes por classe é demonstrada na Figura 2.2, nota-se uma forte migração de agentes consumidores livres entre 2004 e 2005 e de consumidores especiais em 2011 (CCEE, 2015). Os aumentos nas quantidades de consumidores livres e especiais devem-se, respectivamente à Resolução de 2004 que tornou obrigatória a adesão à CCEE dos consumidores que desejavam participar do ACL e à Resolução Normativa 247/2006 que regulamentou a comercialização dos consumidores especiais:

Figura 2.2 - Evolução do número de agentes no mercado livre de energia no Brasil⁵
Fonte: produção do próprio autor

Também é válido apresentar o conceito de mais dois tipos de agente existentes do mercado

- Transmissores: São detentores das concessões das linhas de transmissão que ligam os geradores de energia à rede básica⁶ sua atividade também é um monopólio natural como a dos distribuidores, entretanto não possuem cargas, sendo que a energia apenas passa pelos seus fios.
- Exportadores/importadores: são agentes que atuam como os comercializadores de energia, entretanto realizam exportação ou importação de energia para outros países, por meio de acordos internacionais.

Durante cada mês, toda a energia gerada, consumida (excetuando as perdas) e contratada no Mercado de energia é registrada na CCEE e é então realizada a contabilização mensal das diferenças positivas e negativas de energia e posteriormente é realizada a liquidação do Mercado de Curto Prazo (MCP).

Isso permite que os agentes liquidem suas posições por meio de compra ou venda de energia elétrica em base mensal pelo valor do Preço de Liquidação das Diferenças (PLD)

⁵ Os dados referem-se ao período de janeiro de 2000 a agosto de 2016.

⁶ A rede básica do sistema interligado é constituída por todas as subestações e linhas de transmissão em tensões iguais ou superiores a 230kV, integrantes de concessões de serviços públicos de energia elétrica, devidamente outorgadas pelo Poder Concedente. (ANACE, 2014)

(TOLMASQUIM, 2011). Entretanto essa liquidação não envolve assinatura contratual, os valores monetários são calculados pela CCEE e transferidos aos agentes. Isso mostra a importância do PLD na comercialização de energia, já que assim ele acaba sendo um balizador de todas as contratações bilaterais do mercado (conforme será discutido na seção 2.7).

2.3 Estruturas do SIN

A predominância na geração de energia no sistema brasileiro é hidráulica, com usinas dispostas em cascata em diferentes bacias hidrográficas em todas as regiões do país. Essas usinas atendem ao mercado por meio de uma extensa malha de transmissão que permite inclusive o intercâmbio de energia entre diferentes regiões do país. A rede está ilustrada na Figura 2.3.

Figura 2.3- Sistema Interligado Nacional.
Fonte: (ONS, 2016)

Como há uma capacidade limitada de transmissão entre certas regiões, há a subdivisão do Sistema Interligado Nacional em 4 submercados, cada um com seu centro de gravidade⁷. Cada submercado tem seu PLD calculado separadamente. Por consequência qualquer agente

⁷ Ponto virtual onde é efetuada a entrega simbólica da energia e onde a geração total é igual ao consumo total do submercado.

que negocie energia entre os submercados está sujeito ao risco das diferenças de preço. (MAYO, 2009). Há ainda, na região Norte do país, o sistema isolado, que não se interliga com os outros sistemas. A partir da interligação dos estados do Amazonas e Amapá ao SIN, esses sistemas passaram a responder por 1% da carga do país. A geração nesses sistemas é predominantemente térmica a base de óleo (ELETROBRÁS, 2015).

2.3.1 Geração de Energia Elétrica

Como já comentado anteriormente, a geração no SIN é predominantemente hidrelétrica, entretanto há uma participação importante de outras fontes na matriz de geração, sendo que essa participação vem crescendo ao longo do tempo. A Figura 2.4 mostra a participação dos tipos de fonte em termos de capacidade instalada (CCEE, 2015).

Figura 2.4 - Capacidade instalada no SIN
Fonte: produção do próprio autor

A forte presença de geração hidrelétrica deve-se ao fato do Brasil possuir diversas bacias hidrográficas com centenas de rios perenes e caudalosos, que se espalham pelas diversas regiões geográficas do País, topografia favorável à construção de grandes reservatórios de regularização plurianual e regimes de chuvas diferentes entre si ao longo de um mesmo ano. (DEUS, 2008) A Figura 2.5 ilustra essa complementaridade mostrando o histórico da Energia Natural Afluente, ENA, nos quatro subsistemas, com as médias mensais de 1931 até 2015 (ONS, 2016)

Figura 2.5 - Energia Natural Armazenada - Médias históricas

Fonte: produção do próprio autor

Entretanto, a capacidade de regularização dos reservatórios vem caindo ao longo dos anos. Isso se deve às restrições ambientais para grandes reservatórios, o que faz com que a maioria das novas usinas licitadas sejam a fio d'água⁸ ou tenham reservatórios pequenos. Adicionalmente, a grande parte das novas usinas está localizada na região amazônica, região de planície e com regime hidrológico com grande variação sazonal. Essas características, impedem que os reservatórios tenham regularização com volume significativo e afetam a contribuição energética dos aproveitamentos para o sistema, tornando-a efetiva em certos períodos mas praticamente nula em outros. (ARFUX, 2011)

2.3.2 Comercialização de energia

Comercializadores de energia elétrica são empresas que na sua essência não possuem ativos de carga ou geração e atuam exclusivamente no mercado de compra e venda de energia elétrica para quaisquer outros agentes autorizados a operar no mercado.

Geradores e consumidores de energia não têm como atividade principal a negociação de energia e muitas vezes têm objetivos distintos nesse mercado. Geradores desejam maximizar

⁸ Usinas a fio d'água são usinas que não possuem um reservatório de água ou o tem em dimensões menores do que poderiam ter.

preço de venda, bem como o volume vendido e vender conforme sua produção. Também procuram contratos de longo prazo para lastrear financiamentos. Já para os consumidores a energia entra como um insumo em sua cadeia de produção, então buscam reduzir preço de compra, comprar conforme suas curvas de carga, segurança no suprimento e prazos menores de contratação.

Os comercializadores então atuam fazendo essa ponte entre geradores e consumidores, oferecendo produtos baseados em contratos de energia que sejam satisfatórios a ambos os lados reduzindo os chamados custos de transação.

Com sua atividade, dão racionalidade econômica ao “rateio” de sobras e déficits, permitem o ajuste dos portfólios de compra e venda, assumem o risco de crédito do consumidor e o risco de performance do produtor e oferecem liquidez ao mercado, viabilizando a competição.

De forma análoga a outros mercados de commodities, o mercado de comercialização de energia tem passado por um processo de modernização e sofisticação, importando e adaptando ferramentas já usadas em outros mercados, tais como opções, futuros, swaps, contratos a termo e outros. (ABRACEEL, 2016)

2.4 Modelos Computacionais

O planejamento da operação do Sistema elétrico baseia-se em dados e análises de forma a se gerar um conjunto de decisões e ações tomadas de acordo com uma certa diretriz. Uma operação ótima é aquela em que o conjunto de decisões é tomada de forma que o custo total da operação seja o menor possível no horizonte de planejamento. Mais detalhes sobre a otimização dos recursos do SIN são encontrados no Anexo A deste trabalho.

Inicialmente, o planejamento e coordenação dos recursos de geração do SIN era realizado por meio de uma curva-guia baseada na pior seca já ocorrida no histórico de vazões. A partir de 1979 passou-se a utilizar um modelo desenvolvido pela Eletrobrás e pelo Cepel, baseado em Programação Dinâmica Estocástica. Entretanto, esse modelo não levava em conta o intercâmbio de energia entre os subsistemas pois à época, ainda eram isolados.

Com a integração dos subsistemas, essa metodologia passou a ser insuficiente para realizar o planejamento da operação do SIN.

Em 1985 foi proposto um modelo de Programação Dinâmica Dual Estocástica, PDDE, que gera a árvore de afluições por meio de um modelo auto regressivo periódico de ordem p , também conhecido como $par(p)$, em que as afluições anteriores de cada reservatório são

variáveis de estado e utiliza a técnica matemática de Decomposição de Benders de forma a contornar a “maldição da dimensionalidade”, já que a quantidade de cenários gerada para o médio prazo (5 anos) torna o cálculo computacional inviável.

Essa modelagem está em vigência atualmente e é utilizada pelos softwares NEWAVE e DECOMP, desenvolvidos pelo Cepel.

O NEWAVE realiza os cálculos para ao horizonte de médio prazo, de até 5 anos, com discretização mensal. Os cenários de afluições são gerados por meio de um modelo chamado GEVAZP que utiliza a técnica par(p) e as usinas são representadas de forma agregada dentro dos subsistemas agregados por trocos de transmissão.

Já o DECOMP, também utiliza a PDDE e os cenários gerados pelo GEVAZP, no entanto ele tem um horizonte de curto prazo, de no máximo 12 meses, sendo que para o primeiro mês, a discretização é semanal. Por ter um horizonte mais reduzido, a representação das usinas e do sistema elétrico são mais detalhadas (SOARES, 2008).

Esses dois modelos funcionam de forma acoplada, a função de custo futuro é calculada pelo NEWAVE e consultada pelo DECOMP para obtenção de informações do horizonte de médio prazo para o curto prazo sob a forma de derivadas do custo futuro em relação aos armazenamentos do estágio atual e afluições anteriores.

2.5 Preço de Liquidação das Diferenças - PLD

O resultado obtido a partir dos modelos citados na seção 2.4 é uma lista de despachos das usinas hidráulicas e térmicas em cada subsistema, e, por consequência, o Custo Marginal de Operação (CMO), que é o custo da energia para o próximo incremento de carga, também para cada subsistema.

Os CMOs obtidos estão em sua essência relacionados com o estado de escassez de recursos do sistema e são utilizados como sinalizadores econômicos da sua atual condição de suprimento. O PLD é equivalente ao CMO, limitado a um piso e um teto estabelecidos por regulamentação. (ARFUX, 2011)

O PLD, portanto, tem grande importância para o mercado de energia, visto que, além de ser o preço no qual as diferenças são liquidadas no mercado livre de energia, ele também é um sinal da alocação ótima dos recursos no curto prazo e da expansão do parque gerador no longo prazo.

A Figura 2.6 a seguir mostra um histórico da média do PLD para cada mês, de maio de 2003 até abril de 2016 (CCEE, 2016)

Figura 2.6 - Histórico do PLD médio mensal em R\$/MWh
Fonte: produção do próprio autor

Nota-se uma alta volatilidade nos preços e em alguns meses uma grande diferença de preços entre os submercados⁹. Segundo (ARFUX, 2011), essa volatilidade é causada pelos seguintes fatores:

- Imprevisibilidade do regime hidrológico
- Redução da capacidade de regularização dos reservatórios
- Aumento da Participação termelétrica na matriz energética
- Alteração da matriz energética nacional
- Arbitrariedade no despacho complementar aos modelos de otimização

Portanto, o PLD, de certa forma, deixa de ser uma sinalização eficiente da escassez e das condições econômicas do mercado de energia.

No entanto, o PLD é o balizador de inúmeros instrumentos do setor, sendo utilizado para: (ARFUX, 2011)

- Decisões de contratação e gerência de risco de consumidores livres;
- Composição de tarifas de consumidores regulados;

⁹ A partir de janeiro de 2015 foi estabelecido um teto máximo para o PLD, reduzindo seu valor de 822,83 R\$/MWh para 388,48 R\$/MWh, tal medida foi tomada para evitar a inadimplência de empresas de energia expostas no mercado livre.

- Critério de seleção de projetos em leilões de energia nova para termelétricas;
- Incentivar práticas prudentes por parte de geradores e consumidores;
- Incentivar a otimização da manutenção de unidades geradoras;
- Incentivar economia de energia em situações de escassez.

Portanto, no curto prazo, o PLD influencia diretamente a contratação de energia no mercado livre, sendo que a precificação dos contratos deve levar em conta o risco resultante de sua volatilidade.

Já no longo prazo, o PLD influencia o Ambiente de contratação regulada, pois se tornando menos atrativo, Consumidores Livres podem optar pelo retorno ao mercado cativo das distribuidoras, impactando seus resultados e previsões de contratação futura, que também será impactada pelo PLD, já que os preços de venda de leilões também são influenciados por ele, e por fim elevando a tarifa para todo o mercado cativo.

Assim, verifica-se a importância do cálculo de um PLD que sinalize corretamente as condições do mercado.

2.6 Alterações Regulatórias a partir de 2006

O mercado de energia brasileiro é, de forma resumida, um mercado aberto com barreiras de entrada, em que empresas privadas e públicas fazem as negociações de contratos de energia de acordo com uma regulamentação específica de forma a suprir seu consumo e remunerar sua geração. É natural que cada segmento específico de agentes desse mercado tenha interesses distintos e muitas vezes conflitantes.

O regulador tem o papel de criar e revisar, quando necessário, as regras a fim de se melhorar a eficiência do mercado de forma isonômica a todos os agentes. Adicionalmente o governo também pode realizar alterações na legislação do setor conforme os interesses relativos à visão de futuro do país.

A seguir algumas alterações na regulamentação e legislação mais recentes e os impactos diretos que elas causaram no mercado:

Resolução Normativa nº 247, de 21 de dezembro de 2006 (BRASIL, 2006) – Estabeleceu as condições para a comercialização de energia elétrica oriunda de empreendimentos de geração que utilizem fontes primárias incentivadas, com unidade ou conjunto de unidades consumidoras cuja carga seja maior ou igual a 500 kW. Essa resolução

representou uma abertura maior do mercado de energia, no ambiente de comercialização livre, criando a figura dos Consumidores Especiais e Geradores Incentivados. A partir dessa resolução esses consumidores puderam negociar energia no mercado desde que ela fosse proveniente das fontes incentivadas (Pequenas centrais hidrelétricas, biomassa, eólica e posteriormente solar). O incentivo dessa energia é o desconto nas tarifas de uso do sistema, estabelecido para cada usina, pela Aneel, variando de 50 a 100%. Essa energia, também pode ser negociada através de comercializadores e consumidores não especiais, portanto, além da abertura do mercado foi possibilitada a criação de novos produtos para a comercialização.

Resolução Homologatória nº531 de 31 de dezembro de 2012 (BRASIL, 2012) – A resolução 531 alterou a metodologia de cálculo das garantias financeiras associadas ao mercado de curto prazo e estabeleceu critérios e condições para efetivação de registro de contratos de compra e venda de energia elétrica no ACL.

Todos os agentes do mercado de energia obrigatoriamente devem realizar um aporte mensal de garantias financeiras antes de cada liquidação. Caso esse agente incorra em inadimplência no mercado, sua garantia é executada e rateada aos agentes credores. Esse processo tem como objetivo trazer mais segurança ao mercado.

O dilema é qual o montante que cada agente deve aportar como garantia a cada liquidação, de forma que o mercado seja protegido mas ao mesmo tempo não seja inviabilizada a operação do agente.

Até a Resolução 531/2012 era feito um cálculo que levava em conta projeções futuras declaradas pelo próprio agente e as comparava com declarações de meses anteriores e do mês corrente, o que levava a grandes distorções e não protegia o mercado de forma adequada.

A Resolução 531 definiu então que o valor a ser aportado por cada agente era apenas o valor devido pelo agente na liquidação do mês corrente. Entretanto, caso o aporte não fosse realizado o agente teria o registro de seus requisitos (contratos de venda) não efetivados naquele mês, “cancelando” os efeitos desses contratos na liquidação financeira.

Essa resolução impactou consideravelmente o mercado de energia, já que seu mecanismo fez com que os agentes compradores tivessem um maior cuidado na hora de escolher suas contrapartes e os vendedores tiveram que demonstrar maior solidez para que pudessem realizar suas negociações.

Medida Provisória 579/2012 de 11 de setembro de 2012 (BRASIL, 2012) -, convertida na lei 12.783, de 11 de janeiro de 2013 – A MP579/2012 teve como principal

objetivo a redução das tarifas nacionais de energia, de forma a assegurar a sustentabilidade do mercado.

Para isso, a medida propôs a antecipação do vencimento das concessões de geração (usinas hidrelétricas cujo prazo da concessão se encerraria em até 60 meses) e a renovação posterior das mesmas, com redução nos custos da energia, de forma a refletir apenas o custo operacional das usinas, já que todo o custo de implantação seria considerado amortizado. Também foi aplicada a antecipação nos vencimentos das concessões dos serviços de transmissão, reduzindo a Receita Anual Permitida das empresas como condicionante para a renovação.

Toda a energia das concessões de geração renovadas foi 100% contratada compulsoriamente pelas distribuidoras de energia, por meio de um regime de cotas, gerando assim a redução tarifária desejada pelo governo. A medida também reduziu ou encerrou uma série de encargos setoriais com esse fim.

As concessionárias que não optaram pela renovação das concessões mantiveram seu contrato de concessão até o encerramento do prazo original de seus contratos e essas concessões serão licitadas por até 30 anos na modalidade leilão ou concorrência.

A medida, que foi festejada por alguns setores da indústria à época, foi vista com desconfiança pelo setor elétrico, sendo a data de sua publicação chamada de o “11 de setembro do setor elétrico”. (GODOI, 2013)

Essa medida impactou de forma generalizada todos segmentos do setor elétrico, já que reduziu a receita das empresas, levando à queda das ações das concessionárias nos mercados de capitais. Muitas dessas concessionárias também tinham negociações no ACL por meio de empresas do mesmo grupo econômico e tiveram que reduzir suas operações.

Adicionalmente, como toda a energia da renovação das concessões foi destinada ao ACR, houve uma falta de isonomia entre os ambientes, o que deixou o ambiente de comercialização livre economicamente menos atrativo para os agentes do setor durante um período.

Portaria nº 455, de 2 de agosto de 2012 (BRASIL, 2012)– Essa portaria alterou a forma de registro dos contratos no ACL. Até então os contratos poderiam ser registrados de forma *ex-post*, ou seja, após o efetivo consumo da energia (até a data limite do mês seguinte acrescido de 8 dias úteis), entretanto, a portaria estabeleceu que esses contratos deveriam ser registrados de forma *ex-ante*, antes do consumo da energia. Essa alteração, tinha como objetivo aumentar a segurança do mercado reduzindo a inadimplência e estimulando a contratação de longo prazo.

Entretanto, essa mudança, aparentemente apenas técnica, impactou toda a dinâmica de negociações entre os agentes, já que todos deveriam passar a fazer previsões de seus consumos e gerações e uma gestão mais forte de suas compras e vendas. Além disso, exigiria uma alteração em todos os contratos já firmados e em vigência.

Outro ponto polêmico da portaria foi que o Ministério de Minas e Energia não tinha como atribuição decidir sobre a forma de comercialização no ACL, sendo esse papel o da agência reguladora.

As diversas associações dos segmentos do mercado acionaram a justiça contra a portaria e agentes obtiveram liminares para continuar registrando os contratos da forma *ex-post*.

Atualmente, a portaria encontra-se suspensa por força de liminar obtida pela Associação Brasileira de Comercializadores de Energia (Abraceel), sendo que não foi sequer regulamentada pela Aneel, entretanto houve um impacto considerável no mercado, já que os agentes precisaram se preparar para essa nova forma de contratação, que não se concretizou.

Resolução 633/2014 (BRASIL, 2014) – Essa resolução alterou o artigo 3º da Resolução 682, de 23 de dezembro de 2003 que trata do valor teto para o PLD.

No auge da crise hídrica de 2014, as termelétricas mais caras, de combustível óleo Diesel, tiveram que ser acionadas para cobrir a carga de energia do país, elevando o PLD ao patamar de 822 R\$/MWh, que é o custo operativo da usina mais cara ligada no sistema. A Resolução 633/2014 alterou o artigo da resolução 682/2003 que determinava esse teto para o PLD. A partir daí o teto do PLD passou a ser o custo da termelétrica a gás natural mais cara acionada no sistema, que no caso foi de 388,48R\$/MWh.

Isso alterou a dinâmica do mercado pois o PLD é o balizador de praticamente toda a contratação do mercado livre. Um PLD alto demais dificultava as negociações e deixava o mercado parado. Essa medida trouxe uma maior dinamização do mercado nesse período. O preço se manteve no patamar de 388 R\$/MWh até junho de 2015.

3 Conceitos econômicos

Como já visto no Capítulo 1, pelo histórico dos mercados de energia, ora há um maior controle estatal, ora há uma maior desregulamentação, como num pêndulo. (BATLLE, BARROSO e PEREZ-ARRIAGA, 2010). Nas duas últimas décadas é possível encontrar, no setor, tanto exemplos em que o excesso de regulamentação foi prejudicial, quanto em que a falta de regulamentação causou problemas na economia.

Um exemplo do excesso de intervenção estatal ocorreu no caso do Brasil em 2014 e 2015, quando houve um aumento generalizado dos preços da energia para o consumidor cativo final, devido a uma série de decisões tomada para controle de preços dois anos antes (D'ARAÚJO, 2015).

Por outro lado, um exemplo de desregulamentação excessiva é o caso do estado da Califórnia no início dos anos 2000, no qual a liberdade dos operadores de energia, no caso principalmente da empresa ENRON, que criaram uma escassez artificial de forma a aumentar os preços, causou diversos *blackouts* naquele estado, culminando com a quebra de uma das distribuidoras locais e prejuízos financeiros às outras. A ENRON acabou também indo à falência devido às operações realizadas com derivativos de energia e fraudes financeiras (HODAK, 2007).

3.1 Livres mercados e Regulação

Em uma economia de mercado os recursos são alocados por meio de decisões descentralizadas de produtores e consumidores quando esses interagem nos mercados de bens e serviços (MANKIW, 2009). Um dos conceitos clássicos mais conhecidos da economia é o da “mão invisível” do mercado, observado por Adam Smith em seu livro “A riqueza das nações”, no qual as empresas e famílias, ao interagirem nos mercados, agem como se fossem guiadas por meio dessa mão invisível, que as leva a resultados de mercado desejáveis.

Na realidade, o principal instrumento que a “mão invisível” utiliza para conduzir a atividade econômica são os preços dos bens, que definem não só o custo de sua produção, mas também seu valor para a sociedade. Na visão de Adam Smith, os preços se ajustam de forma a equilibrar oferta e demanda, alcançando resultados que maximizam o bem-estar da sociedade como um todo. (MANKIW, 2009)

Conforme as afirmações acima, pode-se pensar então que não há a necessidade de regulamentação em mercados livres, já que o mercado se regula sozinho. Entretanto, isso não é verdade, já que os governos por meio da regulação têm o poder de garantir os cumprimentos das regras de mercado e manter as principais instituições da economia. Garantindo assim, o direito à propriedade dos recursos e meios de produção.

Além da segurança e solidez das instituições, outros dois motivos genéricos para intervenção de um governo na economia são a promoção da eficiência de mercado, ao mitigar falhas de mercado, e a promoção da igualdade.

Falhas de mercado podem ocorrer, ou seja, situações em que não se é capaz de alocar os recursos de forma eficiente. Essas falhas ocorrem devido a dois motivos: externalidades e poder de mercado.

Externalidade é o impacto da ação de um indivíduo sobre o bem-estar de todos que estão ao redor. Já o **poder de mercado** é a capacidade de um indivíduo, ou pequeno grupo de indivíduos, capaz de influenciar significativamente os preços de um mercado. (MANKIW, 2009)

Portanto quando há externalidades ou poder de mercado, políticas públicas bem executadas são desejáveis para aumentar a eficiência econômica.

Outro ponto em que pode ocorrer a intervenção governamental na economia é na promoção da igualdade, já que a ‘mão invisível do mercado’ não garante a distribuição igualitária dos bens econômicos. Portanto, dependendo das orientações políticas de um estado, pode haver intervenções, a fim de se mitigarem essas desigualdades. (MANKIW, 2009)

Como decisões governamentais também podem sofrer pressões e influências de determinados grupos, faz-se necessário o estudo das ciências econômicas, a fim de verificar se essas políticas públicas causam realmente os efeitos desejados ou incrementam ainda mais a eficiência e a desigualdade.

3.2 Estruturas de mercado

Um mercado é formado por agentes compradores e vendedores que, por meio de interações, determinam o preço dos bens negociados. A estrutura de mercado é o conjunto de características de um mercado que influenciam o comportamento e resultados dos agentes presentes nesse mercado.

Algumas das principais características que definem uma estrutura de mercado são: a quantidade de agentes, a força de negociação entre eles, a capacidade de influência de cada agente, a concentração de poder e as barreiras de entrada e saída desse mercado.

3.2.1 Mercados competitivos

Um mercado competitivo é um mercado onde há uma grande quantidade de compradores e vendedores interagindo, de forma que sua influência sobre os preços seja insignificante. Nesse mercado os bens oferecidos pelos vendedores são, em grande escala, os mesmos ou totalmente equivalentes. E não há barreiras de entrada tanto para compradores quanto para vendedores. (MANKIW, 2009).

Um mercado competitivo pode ter a chamada concorrência perfeita quando possui também as características de total simetria de informações sobre os preços e perfeita mobilidade de recursos produtivos.

A concorrência perfeita é uma estrutura de mercado teórica, estudada pelos economistas como um paradigma para análises de outros mercados, para se verificar no que diferem de um modelo ideal. (VICECONTI e DAS NEVES, 2012)

Num mercado perfeitamente competitivo, as variações na demanda têm efeitos diferentes em diferentes horizontes de tempo. No curto prazo, um aumento da demanda eleva os preços e gera lucros, e uma queda reduz os preços e gera prejuízos. Como não há barreiras de saída, no longo prazo, a quantidade de empresas tende a se ajustar conduzindo o mercado de volta para o equilíbrio de lucro zero. (MANKIW, 2009)

Em mercados de infraestrutura ou utilidades públicas a competição não é algo imediatamente intuitivo, já que nesses casos aparentemente há um controle centralizado governamental, entretanto mesmo nesses mercados a competição é algo desejável. (BODY OF KNOWLEDGE ON INFRASTRUCTURE REGULATIONS, 2015)

3.2.2 Monopólios

Um **monopólio** consiste no tipo de concorrência em que apenas uma firma é vendedora e, portanto, formadora de preço. (VICECONTI e DAS NEVES, 2012)

Como citado no Capítulo 2, existem monopólios técnicos naturais no mercado de energia brasileiro. Os agentes distribuidores e transmissores são detentores de concessão de governo para explorar essas atividades.

No caso de monopólio em um mercado de serviços públicos, há a competição; entretanto, a competição não ocorre no mercado, mas pelo mercado, por meio de leilões ou editais de concorrência.

3.2.3 Oligopólios

Já o **oligopólio** ocorre quando há um grande número de concorrentes no mercado, mas não tantos a ponto de considerarmos nula a influência de cada um deles sobre o preço dos produtos.

Em oligopólios, as variáveis de preços e quantidades produzidas pelas empresas são definidos de acordo com o próprio comportamento das concorrentes.

Há vários modelos relevantes de oligopólios, pois há vários padrões de comportamento diferentes no mundo real.

Quando existe conhecimento das variáveis de uma firma pela sua concorrente, há a formação de um jogo sequencial, onde uma atua após o comportamento da outra. Já quando não há conhecimento da estratégia concorrente, há a formação de um jogo simultâneo. Por fim, pode haver acordo entre firmas concorrentes, caracterizando um jogo cooperativo. (VARIAN, 2012)

O modelo de oligopólio que mais se assemelha a mercados de energia é o modelo de Cournot. (NEWBERY, 2009), no qual a firma procura maximizar seu lucro segundo suas expectativas sobre o comportamento da concorrente.

3.3 Concentração de Mercado

Conforme discutido na subseção 2.1, há conceitualmente, no desenho do mercado livre de energia brasileiro, uma barreira ao surgimento de estruturas monopolistas. Entretanto isso não impede que alguns agentes detenham maior poder de mercado que outros. A fim de realizar esse tipo de análise, iremos indicar três índices de concentração de mercado, o *Market Share*, o índice de Herfindahl–Hirschman e o *Residual Supply Index* (RSI).

3.3.1 *Market share* e grau de concentração

O *Market Share* é uma das medidas mais comuns utilizadas para se medir posição de um agente em um mercado. Ele indica a proporção do mercado que um agente é capaz de capturar e é dado pela divisão da quantidade negociada (compras ou vendas, por exemplo) por um agente de mercado i pelo total negociado no mercado em um determinado período t . É calculado por:

$$p_{it} = \frac{q_{it}}{q_t}. \quad (3.1)$$

onde p_{it} é o *market share* do agente i no período t , q_{it} é a quantidade da variável que se deseja avaliar desse mesmo agente e q_t é a quantidade total dessa variável para todo o mercado. A partir desses resultados, pode-se obter a medida de grau de concentração do mercado. Para isso, os valores de p_{it} devem ser ordenados e a medida é a soma dos k maiores percentuais conforme a equação:

$$GC(k) = \sum_{i=1}^k p_{it}. \quad (3.2)$$

Na literatura que estuda os assuntos relacionados à concentração de mercado, não há um consenso sobre qual o melhor valor de k . Entretanto os valores mais utilizados são 4, 8 e 16. De acordo com BANOVA (2005) para $k = 4$ temos:

- $GC(4) > 80\%$ - O mercado caminha para se tornar um monopólio
- $50\% < GC(4) < 80\%$ - O mercado é um oligopólio com tendências a se tornar um monopólio.
- $25\% < GC(4) < 50\%$ - O mercado é um oligopólio fraco
- $GC(4) < 25\%$ - Indica que não há a presença de oligopólios e há uma competitividade efetiva no mercado.

Apesar do GC indicar a presença de concentração de mercado, ele não indica de fato qual a estrutura de mercado predominante, já que os k maiores agentes podem deter igualmente uma mesma parcela do mercado, indicando um oligopólio ou apenas um agente deter maior parcela do mercado, indicando uma estrutura monopolista. Para uma avaliação mais precisa deve-se utilizar em conjunto o Índice de Herfindahl- Hirschmann (HHI)

3.3.2 Índice de Herfindahl–Hirschman (HHI)

O HHI é uma medida estatística amplamente aceita para concentração de mercado. Ele é calculado pelo somatório dos quadrados do percentual de participação de cada firma em um mercado (S_i).

$$H = \sum_{i=1}^N S_i^2. \quad (3.3)$$

Portanto, em um mercado monopolista, a firma tem 100% de participação, logo o HHI é de $100^2 = 10000$. Já se houver duas firmas com 50% de participação, o índice cai para $50^2 + 50^2 = 2500$ e assim por diante.

O índice apenas leva em conta o tamanho relativo das firmas em um mercado. Quanto mais firmas e mais igualdade entre elas, menor é o índice.

As agências regulatórias geralmente consideram um mercado com HHI entre 1500 e 2500 como moderadamente concentrado e acima de 2500 como altamente concentrado. (UNITED STATES DEPARTMENT OF JUSTICE, 2014)

Entretanto, esse índice apresenta alguns problemas quando aplicado a mercados de energia e deve ser analisado com cautela. Em mercados de energia, a demanda tem baixíssima elasticidade¹⁰ no curto prazo, causando uma inconsistência no modelo de oligopólios tradicional de Cournot. Um alto índice HHI combinado com baixa elasticidade de demanda geraria uma proporção improvável de receita/lucro. (NEWBERY, 2009)

3.3.3 Residual Supply Index(Índice de suprimento residual) – RSI

É um índice bastante relevante para análises de estruturas de mercados de energia (Swinand, 2008). O RSI foi inicialmente criado em 2007 pelo Operador Independente do Sistema Elétrico da Califórnia.

O cálculo do RSI é dado por:

$$RSI_i = \frac{\text{Capacidade total do mercado} - \text{Capacidade da firma } i}{\text{Demanda Total}}. \quad (3.4)$$

¹⁰ É um conceito econômico que representa a variação na quantidade demandada de um bem ou serviço, dada uma variação no preço destes, com a premissa de que todas as demais variáveis da demanda permaneçam constantes.

Esse índice mostra a concentração por firma participante do mercado de energia, calculando o quanto da demanda poderia ser atendida ao retirarmos do mercado a capacidade instalada da firma avaliada.

Valores menores do RSI implicam maior poder de mercado. Em outras palavras, o RSI mede o grau ao qual uma firma é pivotal, ou seja, quanto sua capacidade não comprometida é essencial se a demanda for atingida. (NEWBERY, 2009)

Normalmente, valores de RSI inferiores a 110% são utilizados pelos analistas de mercado para indicar uma alta concentração.

4 Redes Complexas

4.1 Breve introdução sobre sistemas Complexos

Um sistema pode ser simples, complicado, caótico ou complexo. Sistemas simples são sistemas formados por poucas partes, cujo comportamento é previsível e seu comportamento pode ser descrito por meio de equações, sendo um comportamento determinístico. Exemplos de sistemas simples são os da mecânica clássica, como pêndulo inelástico.

Já um sistema complicado é um sistema com um elevado número de partes, mas que pode ser reduzido em pequenas partes simples, portanto também tem seu comportamento determinado e previsível.

Um sistema caótico, ao contrário do senso comum, não é um sistema de comportamento desordenado, aleatório. Um sistema caótico é também um sistema determinístico que, entretanto, apresenta super-sensibilidade às condições iniciais. Por isso, sistemas caóticos não são previsíveis, já que, uma diferença mínima na determinação da precisão das condições iniciais pode levar o sistema a um estado totalmente inesperado.

Não há definição sobre uma “Teoria de Sistemas Complexos” na literatura a respeito do assunto, nem mesmo há um consenso sobre a própria definição de o que é um sistema complexo, sendo que os autores e pesquisadores desse campo preferem definir um Sistema Complexo pelas suas características e comportamentos.

Por exemplo, segundo Mitchell (2009), o campo de estudos de sistemas complexos é um campo interdisciplinar que procura explicar como pequenas partes de um sistema se organiza, sem um controle centralizado, em uma coletividade, gerando padrões, informação e possivelmente, aprendendo e evoluindo. As partes desse tipo de sistemas são interconectadas, entretanto não são totalmente dependentes umas das outras. Sistemas dos mais diferentes campos da ciência podem ser qualificados como sistemas complexos, como por exemplo, colônias de insetos, o cérebro, o sistema imunológico, a economia e a internet.

Segundo a autora, todos esses sistemas possuem algumas características em comum:

- Comportamento coletivo: cada componente do sistema segue simples regras de comportamento individualmente; entretanto, coletivamente há um comportamento imprevisível, que emerge do sistema.

- Produção e processamento de informação: Os sistemas geram informação para o exterior e processam informações do exterior, inclusive sendo realimentados com as próprias informações geradas.
- Adaptação: Os sistemas se adaptam, mudam seus comportamentos melhorando suas chances de sucesso por meio de aprendizagem ou evolução.

E a partir daí é definida uma proposta para o termo Sistema Complexo: **“um sistema em que grandes redes de componentes, sem um controle central e regras simples de operação, geram um comportamento coletivo, processamento de informação sofisticado e adaptação.”**

Em um sistema complexo, não é possível fazer previsões de comportamento reduzindo-o em componentes menores, como em um sistema complicado, já que a interação das partes e o processamento de informação (adaptação) deve ser levado em conta. Nesse caso o total é diferente da soma das partes. Adicionalmente, um sistema complexo pode exibir um comportamento caótico, mas um sistema caótico não é complexo.

Uma outra definição mais concisa para um sistema complexo é: **um sistema multiagente, que exibe comportamento emergente e auto organizado (podendo ser adaptativo).**

4.1.1 Principais propriedades de sistemas complexos

- Emergência e auto-organização: Emergência define-se como o surgimento de propriedades em um sistema que, apesar de não serem características de seus elementos individuais, são características do todo. Fenômenos emergentes surgem das interações desses elementos individuais e por meio de mecanismos de retroalimentação, contribuem para a complexidade do sistema. Essas interações, por sua vez, levam a uma ordenação global do sistema, sem a presença de um controle central. Um exemplo desse comportamento é o comportamento coletivo de pássaros (Figura 4.1), que se localizam e se organizam em meio ao bando sem que exista uma liderança que controle o movimento.

Figura 4.1 - Bando de estorninhos em comportamento coletivo.

Fonte: (MILLER, 2007)

- **Retroalimentação:** Essa propriedade refere-se à capacidade de um sistema responder aos resultados de suas próprias ações. Ou seja, o sistema utiliza a própria informação gerada como entrada para uma nova iteração. Um exemplo nesse caso seria o mercado de ações, em que o preço de uma ação ao se alterar, impacta as negociações dessa ação, que leva a uma nova alteração no preço da mesma ação.
- **Invariância à escala (Leis de potência):** Os elementos em sistemas complexos se relacionam de forma que não são nem totalmente dependentes uns dos outros e nem totalmente independentes, assim podem ser considerados interdependentes. Essas relações levam o sistema a apresentar padrões que podem ser repetidos utilizando-se as mesmas regras, mas em escalas diferentes. Diferentes sistemas naturais apresentam esse comportamento, como os galhos de árvores, padrões em folhas ou estrutura pulmonar. Esses padrões são descritos por meio de Leis de potência.
- **Universalidade:** Por exibirem comportamento de invariância à escala, pode ser observado o mesmo tipo de comportamento macroscópico em diferentes sistemas, mesmo que seus componentes sejam totalmente diferentes. Um exemplo disso pode ser observado no estudo de urbanismo, em que diversas cidades ao redor do mundo, em diferentes países, com diferentes culturas, apresentam comportamentos complexos semelhantes.
- **Interações em redes complexas:** as interações dos elementos em sistemas complexos apresentam uma organização que não é nem totalmente regular, como numa estrutura de um cristal, e nem totalmente aleatória. A esse tipo de estrutura é dado o nome de rede complexa e será mais detalhado na seção 4.2.

4.1.2 A economia como um sistema complexo

Conforme visto na seção 2, sistemas complexos são formados por múltiplos elementos que interagem e se adaptam de acordo com padrões e informações externas e internas. Esses elementos podem ser, por exemplo, elétrons em um material ferromagnético que reagem ao momento magnético de seus vizinhos, ou então células de um sistema imunológico que reagem à concentração de anticorpos. Todos esses sistemas geram padrões e adaptações de acordo com o contexto. (ARTHUR, 1999)

Esse tipo de sistema também surge naturalmente na economia. Agentes econômicos, bancos, firmas, consumidores, investidores, etc. interagem entre si e continuamente ajustam seu comportamento adaptando-se, gerando padrões macroscópicos que, por sua vez, influenciam novamente o comportamento desses componentes. Entretanto, ao contrário de elétrons em um material magnético, esses componentes reagem de forma estratégica, fazendo previsões e buscando resultados como consequência de seu comportamento.

A teoria econômica tradicional não leva em conta esses padrões e comportamentos criados pelos agentes, mas tenta simplificar essas questões de forma agregada, a fim de se buscar soluções analíticas para os problemas em casos de equilíbrio. Ela considera que a soma das ações individuais é sim igual ao todo, o que, com exceção de casos específicos, não é verdade sob a ótica de sistemas complexos.

Portanto a complexidade nos estudos econômicos vem para alterar os conceitos da teoria econômica clássica, auxiliando na compreensão de fenômenos como instabilidade de mercados, surgimento de monopólios e persistência da desigualdade. A abordagem por meio de sistemas complexos retrata a economia não como um sistema mecânico, determinístico e previsível, mas sim como algo orgânico, dependente de processos e evolutivo. (ARTHUR, 1999)

4.1.3 Sistemas complexos e políticas públicas

Existem decisões políticas com foco em um objetivo único que acabam tendo impactos de longo alcance não esperados. Isso se deve à interconexão dos setores de uma sociedade. Dependências em rede e padrões de comportamento são objetos de estudo da ciência de sistemas complexos.

Como sistemas complexos apresentam comportamento com invariância à escala, os métodos de estudo de análise multiescalar, ou seja, analisando um sistema a partir de uma função de escala, podem auxiliar a elaboração de políticas públicas.

Segundo Bar-Yam (2015), o foco em comportamentos em escala maior, em relação ao componente de comportamento de escala menor, permite entender como as forças externas e a auto-organização interna compreendem, juntas, o comportamento do sistema. O impacto de intervenções políticas, as passadas e as intencionadas, pode ser retratado. Políticas que alteram um determinado comportamento devem ter uma escala adequada de intervenção, enquanto que políticas que mudam comportamentos complexos devem ter a habilidade necessária para responder a diferentes condições – uma intervenção eficaz deve ser ao menos tão complexa quanto o sistema-alvo.

Alguns exemplos de como decisões políticas podem ter efeitos diversos do esperado são: o papel do aumento de preços de alimentos na instabilidade política em países da África, pânico em mercados de ações e seus efeitos, a relação entre interdependência bancária e crises financeiras ou como o aumento no transporte mundial altera os tipos de doenças existentes.

Portanto, uma maior compreensão dos métodos e conceitos de sistemas complexos permite uma análise que pode prover melhores informações para tomadas de decisão efetivas do mundo real, sendo que essas análises ajudam a explicar e entender as causas de fenômenos globais. Formuladores de políticas e reguladores devem se beneficiar dos conceitos de sistemas complexos a fim de tomar as melhores decisões para alcançar benefícios específicos e melhorar de forma generalizada os sistemas socioeconômicos.

4.2 Estudo de redes

Apesar de, devido ao surgimento das redes sociais e a internet, na última década o interesse pelo estudo de redes ter aumentado, os primeiros usos de redes como solução de problemas práticos remontam ao século XVIII, com a solução do problema das pontes de Königsberg pelo matemático Leonhard Euler utilizando a teoria dos grafos. A cidade de Königsberg, que à época fazia parte do Império alemão e hoje é uma cidade russa chamada Kaliningrado, era construída parte em uma ilha e parte no continente, separada pela bifurcação de um rio, portanto dividida em quatro partes conforme demonstrado na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Sete pontes de Königsberg.
Fonte: (KRAITCHIK, 1942)

Entre as partes havia pontes para que os cidadãos pudessem fazer a travessia. O problema então consistia em saber se era possível passar por todas as partes da cidade cruzando cada ponte apenas uma vez. Euler (EULER, 1741) usou a teoria dos grafos para provar que tal travessia não era possível. Esse problema tornou-se importante, pois foi o que estabeleceu a teoria dos grafos e ao mesmo tempo demonstrou que ela era capaz de resolver problemas do mundo real, saindo do campo das abstrações matemáticas. (LEWIS, 2009)

Posteriormente, a teoria dos grafos se desenvolveu mais no campo abstrato da matemática, sendo as redes consideradas objetos estáticos, (BARABÁSI, 2002) até o surgimento do modelo de redes de Erdos-Renyi, que propôs uma maneira de construção da rede ligando os seus elementos de forma aleatória até que o número de ligações tivesse sido atingido.

A partir daí, tanto dentro da matemática quanto em diversos outros campos da ciência surgiram diferentes estudos que aplicaram os modelos de redes, como por exemplo, sociologia, biologia, tecnologia e teoria da informação. (KOLACZYK, 2009)

4.2.1 Conceitos básicos de Teoria dos grafos

O campo da matemática que estuda as redes, conforme citado na seção 4.1, é conhecido formalmente, por teoria dos grafos, sendo que um grafo é a representação matemática de uma rede.

Um grafo pode ser definido então pela expressão:

$$G = (V, E). \quad (4.1)$$

Onde V é um conjunto de elementos chamados vértices ou nós¹¹ e E é um conjunto de arestas, onde essas arestas são definidas por pares não ordenados $\{u, v\}$ de nós sendo que $u, v \in V$. A quantidade de nós e de arestas de um grafo também são conhecidos como ordem e tamanho de um grafo respectivamente.

Um grafo G para o qual cada aresta possui uma ordem entre os nós que a forma, no caso $\{u, v\}$ é diferente de $\{v, u\}$ é chamado de grafo dirigido, ou seja, as arestas possuem uma direção definida por seu par, no caso de $\{u, v\}$ a origem é o nó u e o destino o nó v . Um grafo em que não há diferença na ordem dos nós de cada aresta é conhecido por não-dirigido¹².

Uma propriedade importante dos nós de um grafo é o conceito de grau de um nó. Grau de um nó é definido pela quantidade de arestas incidentes nesse nó. Ou seja, para um grafo não dirigido, o grau é a quantidade de conexões que um nó possui.

Outros termos importantes de um grafo referem-se à movimentação dentro dele. Por exemplo, um *passeio* é a sequência de nós que se deve passar para chegar de um nó a outro, já uma *trilha* é um passeio em que arestas não se repetem. Um *caminho* é uma trilha em que os nós não se repetem.

Um grafo é considerado conectado quando é possível se alcançar um nó a partir de qualquer outro do grafo. A *distância* entre dois nós é definida pelo tamanho do menor caminho entre dois nós. Também é conhecida como distância geodésica.

Por fim, as arestas de um grafo podem ter mais ou menos importância dependendo da natureza do grafo. Para isso é definido um conjunto de pesos $\{W_e\}$ para essas arestas. Quando há peso nas arestas a distância entre dois nós passa a ser a menor soma desses pesos dentre os caminhos possíveis.

4.2.2 Representação matricial

Na análise e modelagem de grafos, frequentemente são utilizadas matrizes e cálculo matricial para representá-los. A conectividade fundamental de um grafo G pode ser capturada por uma matriz simétrica $N_v \times N_v$ da seguinte forma (KOLACZYK, 2009):

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{caso } \{i, j\} \in E \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.2).$$

¹¹ Este trabalho utilizará a terminologia “nós” para se referir a esses elementos

¹² Todas as definições a partir deste ponto referem-se a grafos não dirigidos, já que este é o objeto de estudo do trabalho, salvo quando houver ressalva explícita no texto.

Onde os números inteiros $1 \dots N_v$ são utilizados para representar os elementos de V , ou seja, os nós e as arestas são representadas por um par não ordenado $\{i, j\} \in E$, ou seja, os elementos da matriz têm valor 1 para os nós que possuem uma conexão e valor zero para os elementos que não tenham uma conexão. Essa matriz é definida como a *matriz de adjacência* de um grafo.

Para o caso de um grafo não dirigido essa matriz é simétrica, caso contrário a matriz é assimétrica; as figuras 4.3 e 4.4 são exemplos de representações de grafos não-dirigidos e dirigidos, respectivamente.

Figura 4.3 - Matriz de adjacência de um grafo não dirigido e sua representação.
Fonte: produção do próprio autor

Figura 4.4 - Matriz de adjacência de um grafo dirigido e sua representação.
Fonte: produção do próprio autor

A matriz de adjacência não só é utilizada como forma de se armazenar as informações de um grafo, mas também podem ser realizadas operações com seus elementos para obtenção das propriedades de um grafo. Por exemplo, em um grafo não dirigido, o somatório de uma linha da matriz de adjacência é o valor do grau do nó representado por aquela linha. No caso de grafos dirigidos, essa soma corresponde ao grau de saída do nó.

Uma outra representação matricial possível de um grafo é por meio da matriz de pesos, na qual é atribuído um valor para cada elemento da matriz, ou seja, ela também representa a intensidade das ligações entre os elementos do grafo, construída da seguinte forma:

$$A_{ij} = \begin{cases} a_{ij} & \text{caso } \{i, j\} \in E \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases} \quad (4.3)$$

onde a_{ij} representa o peso da aresta $\{i, j\}$

4.2.3 Métricas de rede (Medidas de centralidade e Coeficiente de Clustering)

Uma maneira de se analisar os elementos que formam as redes é por meio de métricas e medidas de centralidade. Essas medidas indicam a importância de cada nó de uma rede de acordo com um certo parâmetro que se deseja analisar. Têm diversas aplicações práticas como por exemplo em análises de redes sociais, onde se quer determinar qual dos indivíduos possui mais contatos, ou em redes de difusão onde há um interesse maior em saber qual indivíduo é mais influente. Aqui serão detalhadas duas métricas importantes para esse trabalho, a centralidade de informação e o coeficiente de clustering.

A medida de centralidade de informação refere-se ao grau de um nó. Conforme já citado na subseção 4.2.1, o grau de um nó é a quantidade de ligações que ele possui. Quando o grafo é direcionado, essa medida pode se dividir em grau de entrada e grau de saída. Na matriz de adjacência do grafo, o grau de um nó é dado pela soma dos valores da linha ou coluna correspondente a ele, conforme equação abaixo:

$$C_D(v_i) = k_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}. \quad (4.4)$$

Onde v_i é o nó, ou vértice do grafo e a_{ij} o elemento da matriz de adjacência relativa ao grafo com n elementos.

A centralidade de informação também pode ser definida para o grafo todo, conforme a equação:

$$C_D(\mathcal{R}) = \frac{\sum_{i=1}^V [k^* - k_i]}{(n-1)(n-2)}. \quad (4.5)$$

Onde G é o grafo e k^* o grau do nó com mais ligações de todo o grafo. A centralidade máxima de informação possível é igual a 1, quando um grafo é no formato estrela, em que todos

os nós são conectados a um único nó central. Já um grafo regular, em que todos os seus nós possuem o mesmo grau, tem centralidade igual a 0, como ilustrado pela figura 4.5:

Figura 4.5 - Exemplo de um grafo estrela e um grafo regular

Uma propriedade importante a se observar a respeito do grau é a distribuição dos graus em uma rede, indicando maior ou menor complexidade dessa rede e maior proximidade entre um modelo teórico e uma rede real.

O coeficiente de clustering é uma medida que indica qual a relação entre os vizinhos de um nó, ou seja, o quanto esses vizinhos estão conectados entre si. Para um nó i com grau k_i , o coeficiente de clustering é dado pela fórmula (BARABÁSI, 2016):

$$C_i = \frac{2L_i}{k_i(k_i - 1)}. \quad (4.6)$$

onde L_i é o número de arestas entre os k_i vizinhos do nó i , sendo que sempre o valor de C_i estará entre 0 e 1. O coeficiente de clustering mede então a densidade local dos links em um grafo. Quanto mais interconectada é a vizinhança de um nó, maior será o coeficiente de clustering.

Também é possível calcular o coeficiente de clustering de uma rede inteira, que é capturado como a média dos coeficientes de todos os nós:

$$C_G = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i. \quad (4.7)$$

De um ponto de vista probabilístico, C_G é a probabilidade de dois vizinhos de um nó estarem ligados entre si.

Outras centralidades de rede importantes são a centralidade de proximidade, que indica o quanto um nó é distante dos demais segundo sua distância geodésica a todos os nós da rede,

a centralidade de intermediação, que indica o quanto um nó está no caminho geodésico entre dois outros nós, e a centralidade de autovetor, que classifica o nó na medida em que seus vizinhos também estejam em uma posição central.

4.3 Tipos de redes

O principal objetivo e o grande desafio de se estudar as propriedades das redes é o de encontrar modelos de redes que possam reproduzir com fidelidade as propriedades das redes encontradas no mundo real.

Esta subseção apresenta os modelos de redes aleatórias, proposto por Erdos e Renyi (1959), o modelo de redes *Small World*, de Watts e Strogatz (1998), o modelo de redes livres de escala (BARABASI e ALBERT, 1999) e por fim o modelo de grafos de competitividade que será utilizado na análise dos dados proposto por (CRIADO, GARCIA, *et al.*, 2013)

4.3.1 Modelo de redes aleatórias

Uma rede é um objeto relativamente simples, consistente apenas de nós e arestas. Entretanto deve-se tentar descobrir quais desses nós devem ser ligados de forma a tentar reproduzir a complexidade do mundo real. (BARABÁSI, 2016). Um primeiro modelo intuitivo é o de que os nós se conectam de forma aleatória. Essa foi a premissa adotada por Paul Erdős e Alfred Rényi em seus primeiros estudos sobre grafos (ERDÖS e RÉNYI, 1959) e por isso esse modelo de redes também é conhecido como rede de Erdős-Rényi.

Basicamente, a rede aleatória consiste em um conjunto de N nós, onde cada par de nós é conectada com uma probabilidade p . Ou seja, partindo de um conjunto isolado de N nós, se escolhe um par de nós e gera-se um número aleatório entre 0 e 1. Caso esse número seja maior do que p , os nós devem ser conectados, caso contrário, não. Esse procedimento deve ser repetido para cada um dos $\frac{N(N-1)}{2}$ pares de nós da rede. Uma representação de um grafo aleatório é ilustrado pela figura 4.6.

Apesar do modelo de redes aleatórias atualmente não ser considerado como uma boa representação das redes encontradas no mundo real, serve como parâmetro para os estudos dessas redes reais.

Ao se observar o comportamento de uma rede real, deve-se verificar se o mesmo comportamento é observado em um modelo de rede aleatório. Caso positivo, a aleatoriedade

pode ser responsável por esse comportamento. Caso negativo, pode ser sinal de uma ordem emergente, exigindo maiores investigações. (BARABÁSI, 2016)

Figura 4.6 - Exemplo de rede aleatória com 100 nós e probabilidade de 8% de conexão. A coloração dos nós representa o grau de cada nó, quanto mais escuro maior o grau.

Fonte: produção do próprio autor

4.3.2 Modelo Small World

O modelo *small world*, ou pequeno mundo, foi proposto por Duncan Watts e Steven Strogatz como uma extensão ao modelo de redes aleatórias. (WATTS e STROGATZ, 1998). O modelo também é conhecido pelo nome de modelo Watts-Strogatz.

Esse modelo foi motivado pela observação de que em redes reais, a distância média entre dois nós depende logaritmicamente da quantidade de nós do grafo e que o coeficiente de *clustering* médio em uma rede real é mais alto que em um grafo aleatório.

O modelo é construído tomando-se um grafo regular em que cada nó está conectado a seus k vizinhos imediatos e com uma probabilidade p cada aresta pode ser reconectada a um outro nó aleatório. Quando $p = 0$ o grafo é perfeitamente regular, já em $p = 1$ o grafo é aleatório. Entre esses extremos o grafo apresenta como características coexistentes, valores de coeficiente de clustering altos e baixos valores de distância entre dois nós. (BARABÁSI, 2016)

Esse modelo geralmente é representado com os nós dispostos em forma de anel conforme Figura 4.7.

Figura 4.7 – Representação de um modelo small world com 50 nós conectados a 3 vizinhos imediatos e probabilidade de reconexão de 5%. A coloração dos nós representa o grau de cada nó, quanto mais escuro maior o grau.

Fonte: produção do próprio autor

4.3.3 Modelo de rede livre de escala

Uma característica encontrada empiricamente em redes reais é a presença de muitos nós com um grau baixo e de alguns poucos nós com um grau elevado aos quais os outros nós se conectam. Nessas redes, a distribuição de grau segue o formato de uma lei de potência, ou seja, há sempre o mesmo comportamento da distribuição de grau independentemente da escala que se examine o grafo e sempre uma probabilidade de haver um nó com um grau ainda maior do que o examinado, mesmo que baixa. A essas redes dá-se o nome de redes livres de escala ou *scale-free*, sendo o primeiro modelo desse tipo de rede foi proposto por Albert Barabási e Reka Albert (1999) e por esse motivo também é conhecido como modelo Barabási-Albert.

Esse modelo de rede parte de duas premissas básicas que divergem do modelo de redes aleatórias, a maneira com que a rede se forma é aberta e a probabilidade de conexão de dois nós não é uniforme.

As redes reais não partem de um número já determinado de nós e apenas suas conexões são formadas, elas crescem em um ambiente aberto, partindo de um número inicial de nós e adicionando-se nós a cada iteração. Por exemplo em uma rede de pesquisas acadêmicas, sempre estão entrando novos pesquisadores e se conectando a outros mais antigos.

Já as conexões ocorrem de forma preferencial, onde um nó com mais conexões, tem maior probabilidade de obter uma nova conexão. No mesmo exemplo da rede de pesquisa

acadêmica, os pesquisadores mais antigos têm uma probabilidade maior de coautoria com pesquisadores mais novos.

Essas duas premissas (crescimento e ligação preferencial) devem estar presentes simultaneamente no sistema, caso contrário a rede não apresentará o comportamento livre de escala (BARABASI e ALBERT, 1999)

Por esse modelo surgem então alguns poucos nós extremamente conectados, também chamados de hubs. A Figura 4.8 ilustra esse modelo.

Figura 4.8 - Representação de um modelo livre de escala com 100 nós. A coloração dos nós representa o grau de cada nó, quanto mais escuro maior o grau.

Fonte: produção do próprio autor

5 Estatísticas de Ranking

Ao se realizar o estudo de rankings, geralmente são utilizadas medidas estatísticas descritivas, como média e desvio padrão. Entretanto, tais medidas não conseguem captar a informação da dinâmica desses rankings. Para tal deve-se realizar a comparação entre dois ou mais rankings.

Na literatura o primeiro trabalho de comparação de rankings foi o artigo de Kendall de 1955, o qual propôs uma medida de correlação entre 2 rankings, conhecido como o τ de Kendall. A partir daí surgiram outras métricas de avaliação de rankings, como por exemplo o coeficiente de correlação de Spearman, a distância D de Spearman ou o coeficiente de concordância de Kendall. (CRIADO, GARCIA, *et al.*, 2013)

Outros estudos, principalmente em esportes, usam grafos de forma a descrever resultados em competições, ligando dois competidores a cada partida e usando medidas de centralidade para obter um ranking final. (RADICCHI, 2011)

Há hoje uma grande quantidade de artigos e estudos sobre ranking e uso de grafos para obtenção de rankings. Entretanto poucos que utilizam grafos de forma a avaliar a relação entre rankings. O presente trabalho utiliza essa última abordagem, proposta em Criado et al. (2013), que cria o chamado grafo de competitividade e gera informações sobre a competitividade em um conjunto de rankings pelo uso das medidas de centralidade.

5.1 Rankings

Tomando um conjunto de elementos P:

$$P = \{a, b, \dots, x, y\}. \quad (5.1)$$

Quando a ordem dos elementos de P é levada em conta, temos um ranking de P, podemos representar esse ranking pelo conjunto dos índices de ordem dos elementos de P. Por exemplo, em um ranking de 4 elementos (a, b, c, d) ordenado da forma (a, b, d, c) temos um conjunto de índices $\{1, 2, 4, 3\}$.

5.1.1 O coeficiente de Kendall

O coeficiente de correlação de Kendall é uma medida para avaliação de rankings que leva em conta a distância entre dois rankings com a mesma quantidade de elementos. Para isso

cada ranking é decomposto em pares ordenados e depois é observada a quantidade de pares diferentes entre esses rankings. O Coeficiente de Kendall é obtido pela normalização dessa diferença de forma que ela tenha valores entre -1 e 1, sendo que -1 é o resultado que ocorre quando a diferença é total entre os rankings e +1 ocorre quando os rankings são idênticos. O coeficiente é dado pela equação (5.2)

$$\tau = \frac{\frac{1}{2}n(n-1) - d_{\Delta}(P_1, P_2)}{\frac{1}{2}n(n-1)}. \quad (5.2)$$

Onde n é a quantidade de elementos do ranking e $d_{\Delta}(P_1, P_2)$ é a quantidade de elementos com posição diferente entre os rankings P_1 e P_2 .

O coeficiente de Kendall pode ser interpretado de uma forma probabilística, ou seja, para quaisquer pares retirados aleatoriamente, o τ pode ser interpretado como a diferença entre a probabilidade desses pares estarem na mesma ordem e a probabilidade de eles estarem em ordens diferentes. (ABDI, 2007)

5.1.2 Índice de Churn Ajustado

Outra medida de indicação de competitividade baseada nos rankings é o índice de Churn. Esse índice é bastante utilizado em competições esportivas e estima o equilíbrio competitivo medindo a diferença nas posições dos rankings em períodos diferentes. (MIZAK, NERAL e STAIR, 2007) O índice é dado por:

$$Churn_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |c_{i,t} - c_{i,t-1}|. \quad (5.3)$$

onde $c_{i,t}$ é a posição do elemento i no período t , e o índice de Churn ajustado é definido por:

$$Churn_{aj} = \frac{C_t}{C_{t,max}}. \quad (5.4)$$

Onde $C_{t,max}$ é o valor máximo de $Churn_t$ dado um conjunto de n elementos. Se dois rankings são idênticos, então $Churn_t = 0$. Quanto mais forte for o equilíbrio competitivo, mais alto é o valor de $Churn_t$. Quanto mais equilibrada for a competição, em termos da dinâmica de

ranking, mais os rankings serão aleatórios, ou seja, quaisquer posições em um ranking são igualmente prováveis.

5.2 Grafos de competitividade

Conforme citado na seção 5.1 há diversos estudos de competição que utilizam a teoria dos grafos para obtenção de métricas e posterior criação de rankings, sendo que um dos métodos mais célebres utilizados é o *PageRank*, algoritmo de ordenação criado por Larry Page, que foi o motor inicial do buscador Google. O presente trabalho, diferentemente, vai utilizar o método de Grafos de Competitividade (CRIADO, GARCIA, *et al.*, 2013) que propõe a construção de um grafo a partir de um conjunto de rankings e utiliza as métricas da teoria dos grafos para avaliar a dinâmica entre esses rankings.

5.2.1 Construção dos grafos

Dado um conjunto de elementos $\mathcal{N} = \{1, \dots, n\}$ que serão considerados nós, é definido um ranking c em $\mathcal{N}$ em que $c: \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{N}$. Definimos que $i <_c j$ quando o nó i precede o nó j dentro do ranking c , sendo que i é diferente de j . Dada uma família de rankings $\mathcal{R} = \{c_1, c_2, \dots, c_r\}$ dizemos que o par de elementos (i, j) compete quando i e j trocam de posição relativa entre dois rankings c_t e c_{t+1} . (CRIADO, GARCIA, *et al.*, 2013)

O grafo de competitividade da família de rankings $\mathcal{R}$ é definido por $G_c(\mathcal{R}) = (\mathcal{N}, E_R)$ onde E_R é o conjunto de arestas. Para a construção desse grafo devem ser seguidas as seguintes regras:

- é sempre criado um link entre dois nós i e j quando i e j competem.
- a aresta entre i e j recebe um peso k se o conjunto de nós (i, j) compete k vezes. Nesse caso o grafo passa a se chamar grafo evolutivo de competitividade.
- o grafo é não-dirigido

No exemplo abaixo consideremos um conjunto com 5 nós, nomeados de A, B, C, D e E com a seguinte família de rankings:

$$\begin{aligned} c_1: & (A, B, C, D, E), \\ c_2: & (B, A, C, D, E), \\ c_3: & (B, A, D, C, E), \\ c_4: & (D, E, A, B, C), \end{aligned}$$

em que a posição do ranking se dá da esquerda para a direita. Por exemplo, no ranking c_3 o elemento B ocupa a posição mais alta, enquanto o elemento D ocupa a 3ª colocação e assim por diante.

A Figura 5.1 mostra o desenho do grafo da família de rankings $\mathcal{R} = \{c_1, c_2, c_3, c_4\}$. Nota-se que, como os elementos A e B trocam de posição mais de uma vez (entre c_1 e c_2 e entre c_3 e c_4) o link entre eles possui um peso 2.

Figura 5.1 - Grafo de competitividade da família de rankings $\mathcal{R}$
Fonte: produção do próprio autor

Dessa forma pode-se gerar os grafos de competitividade para diferentes famílias de rankings e utilizar os parâmetros descritos a seguir para se obter comparações entre esses grafos.

5.2.2 Métricas de um grafo de competitividade

Como visto na seção 4.2.3 os elementos de um grafo possuem propriedades que permitem tirar conclusões sobre suas estruturas e formação. Aqui, essas métricas são agregadas de forma a tirar informações para os grafos de competitividade.

Grau médio normalizado

O grau de um nó é definido pela quantidade de arestas que o conecta a outros nós do grafo. O grau médio normalizado de um grafo é a soma dos graus de todos os nós desse grafo, dividido pela quantidade de arestas possíveis entre todos os nós. Esse parâmetro é dado pela fórmula abaixo:

$$GN(\mathcal{R}) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \in \mathcal{N}} k_i. \quad (5.5)$$

Onde k é a quantidade de vizinhos do nó i , e n é a quantidade total de nós do grafo. Esta medida representa o número de vezes que os componentes de um grafo trocaram de posição. Quanto maior o grau médio normalizado, mais competitivo é o grafo.

Força média normalizada

Definimos a força de um nó como a soma dos pesos das arestas conectadas a esse nó. A força média normalizada de um grafo é o somatório do peso das arestas dividido pelo máximo de peso total possível do grafo, ou seja, uma combinação de todas as arestas possíveis dentre os rankings analisados.

$$FN(\mathcal{R}) = \frac{w(E_R)}{\binom{n}{2}(r-1)}, \quad (5.6)$$

onde $w(E_R)$ é a soma de todos os pesos das arestas do grafo, n é a quantidade de nós do grafo e r é a quantidade de rankings sendo analisados. Quanto maior a força média normalizada mais competitivo é o grafo

Coefficiente de clustering

Esse coeficiente mede o quanto os nós estão mutualmente conectados entre si, ou seja, o quanto os nós vizinhos de um nó i também estão conectados. A fórmula abaixo define o coeficiente de clustering de um nó i .

$$C_i = \frac{e_i}{\binom{K_i}{2}}, \quad (5.7)$$

onde K_i é a quantidade de vizinhos do nó i e e_i é a quantidade de conexões entre pares de vizinhos de i . Quanto mais conectados estão os vizinhos de um nó, maior é o coeficiente de clustering desse nó (valor que sempre varia de 0 a 1).

O coeficiente de clustering do grafo G de competitividade de uma família de rankings $\mathcal{R}$ é a média dos coeficientes de clustering dos nós do grafo e é dado pela fórmula:

$$C(\mathcal{R}) = \frac{1}{n} \sum_{i \in G} C_i. \quad (5.8)$$

Também nesse caso, quanto maior o coeficiente de clustering mais competitivo é o grafo.

Coeficiente de correlação de Kendall aplicado a redes

Diferentemente dos parâmetros anteriores, que são oriundos dos estudos dos parâmetros de centralidade de grafos, o coeficiente de correlação de Kendall é proveniente do estudo de rankings de Kendall. A definição original desse parâmetro se dá pela diferença da quantidade de pares que não compete e a quantidade de pares que compete dividida pelo número total de pares possíveis $\binom{n}{2}$ (KENDALL, 1938)

Define-se o Coeficiente de Kendall Generalizado $\tau(\mathcal{R})$ para uma família de $r > 2$ rankings da seguinte forma (CRIADO, GARCIA, *et al.*, 2015):

$$\tau(\mathcal{R}) = \frac{\tilde{K}(\mathcal{R}) - K(\mathcal{R})}{\binom{n}{2}} = 1 - \frac{2|E_R|}{\binom{n}{2}} = 1 - \frac{4|E_R|}{n(n-1)}. \quad (5.9)$$

Onde $|E_R|$ é a quantidade de arestas do grafo $G(\mathcal{R})$. Também pode-se obter o coeficiente de correlação de Kendall evolutivo, no qual são levados em conta os pesos das arestas.

$$\tau(\mathcal{R})_e = 1 - \frac{2w(E_R^e)}{\binom{n}{2}(r-1)}. \quad (5.10)$$

Onde $w(E_R^e)$ é a soma dos pesos de todas as arestas do grafo. O denominador representa a quantidade de todas as possíveis arestas com os maiores pesos possíveis. Nesse caso quanto menor o parâmetro, mais competitivo é o grafo. (CRIADO, GARCIA, *et al.*, 2013)

6 Aplicação do método de grafos de competitividade à comercialização de energia

6.1 Descrição dos dados

Para se realizar essa análise foram obtidos os dados de contratos de compra e venda de todos os comercializadores de energia que foram contabilizados no mercado de energia pela CCEE a partir de janeiro de 2006 a dezembro 2015 disponíveis no site da CCEE (CCEE, 2015).

Para obtenção da quantidade negociada foi feita a verificação para cada comercializador, em cada mês, qual era o maior valor entre o total de compra e o total de venda.

$$QT_{i,m} = \max \left(\sum compra_{i,m}, \sum venda_{i,m} \right). \quad (6.1)$$

Onde i é o agente e m é o mês analisado. Após isso, dentro de cada mês foi criado um ranking de comercializadores ordenando-se pelo valor de volume negociado. Então a tabela final a ser analisada é um ranking mensal dos agentes comercializadores de 2006 a 2015.

A partir desse conjunto de dados pôde se obter a figura 6.1 que mostra a evolução da quantidade de agentes comercializadores para cada mês.

Figura 6.1 - Evolução do número de comercializadores e quantidade de energia comercializada mensalmente (valores em MWh).

Fonte: produção do próprio autor

Posteriormente foi realizada uma análise da evolução de concentração de mercado, conforme já citado na seção 3.3. Entretanto, como a quantidade de agentes varia ao longo do tempo, em vez de se fixar uma quantidade de empresas a se analisar a concentração, foi verificada a representatividade dos 10% primeiros agentes com relação ao total do mercado.

Dessa forma foi obtida o gráfico ilustrado na figura 6.2, que mostra a variação na concentração de mercado dos 10% maiores agentes ao longo do tempo. Pode-se perceber que a concentração no mercado, apesar de variar, vem seguindo uma tendência de aumento. Logo, o aumento de agentes no mercado parece não influenciar negativamente a concentração de mercado e o mercado, apresenta uma estrutura de oligopólio moderada.

Figura 6.2 - Evolução da concentração de mercado.

Fonte: produção do próprio autor

6.2 Resultados

Tomando como base o conjunto de dados de rankings mensais de comercializadores obtido anteriormente, foi feita a aplicação do método de grafos de competitividade e obtidas as métricas apresentadas na seção 5.2. As análises foram feitas utilizando a linguagem de programação R (R CORE TEAM, 2015) e a biblioteca de manipulação e análise de redes *igraph* (CSARDI e NEPUSZ, 2006). A tabela 6.1 a seguir apresenta os resultados obtidos com o método:

Tabela 6.1 - Resultados da análise pelo método de grafos competitivos. Os resultados em verde são os que indicam maior competitividade enquanto os em vermelho indicam o oposto.

Fonte: produção do próprio autor

Ano	$GN(\mathcal{R})$	$C_D(\mathcal{R})$	$C(\mathcal{R})$	$C_G(\mathcal{R})$	$FN(\mathcal{R})$	$\tau(\mathcal{R})$	$\tau(\mathcal{R})_e$
2006	0,14815	0,31909	0,78742	0,52174	0,01732	- 0,02682	0,96537
2007	0,14082	0,30114	0,66698	0,55307	0,01920	- 0,02552	0,96159
2008	0,15315	0,21984	0,69900	0,59713	0,01467	- 0,02778	0,97065
2009	0,18854	0,39529	0,63536	0,51979	0,02012	- 0,03425	0,95976
2010	0,19016	0,42373	0,68062	0,59862	0,01813	- 0,03455	0,96374
2011	0,13838	0,35815	0,70179	0,49279	0,01273	- 0,02515	0,97454
2012	0,19954	0,41290	0,63146	0,51844	0,01679	- 0,03627	0,96642
2013	0,11979	0,28456	0,70406	0,53931	0,01099	- 0,02177	0,97803
2014	0,16207	0,35098	0,69602	0,55756	0,01394	- 0,02946	0,97211
2015	0,19248	0,61514	0,68143	0,56604	0,01738	- 0,03499	0,96523

Pela análise dos resultados obtidos percebe-se que não há um consenso de qual ano a competitividade foi maior, com apenas duas das métricas apontando para o ano de 2012 como o ano em que a competitividade foi mais elevada.

Já as métricas de grau médio normalizado ($GN(\mathcal{R})$), força média normalizada ($FN(\mathcal{R})$) e os coeficientes de Kendall ($\tau(\mathcal{R})$, $\tau(\mathcal{R})_e$) indicam que o ano de 2013 apresentou menor competitividade em todo o histórico. Adicionalmente, a centralidade de informação ($C_D(\mathcal{R})$) indica uma queda brusca em seu valor do ano de 2012 para 2013, sendo o valor desse ano o 2º menor do histórico no cálculo dessa métrica.

Os coeficientes de clustering médio e global não indicam um consenso em quais anos ocorreu maior ou menor competitividade.

6.2.1 Paralelo com redes aleatórias

A fim de se verificar se as características da rede gerada pelo método de grafos de competitividade advêm de sua própria estrutura e não de mera causalidade, será feita a comparação com redes similares, geradas pelos modelos apresentados na seção 4.3, dada atenção especial ao modelo de redes aleatórias de Erdos-Renyi.

Para cada ano foi gerado um grafo aleatório com a mesma quantidade de nós que os grafos de competitividade obtidos pelo método descrito na seção 5.2. A probabilidade de conexão entre os nós foi definida pela razão n/E_R . Como o modelo de grafos aleatórios não

gera arestas com peso e dado que muitas das métricas avaliadas utilizam essa variável, foi aplicado um peso nas arestas utilizando uma distribuição de Poisson, de forma que a soma total dos pesos seja a mesma dos grafos de competitividade obtidos. A tabela 6.2 apresenta os resultados das métricas para uma série de grafos aleatórios.

Tabela 6.2 - Métricas obtidas para uma série de grafos aleatórios usando o Modelo de Erdős Renyi. Fonte: produção do próprio autor.

Ano	$GN(\mathcal{R})$	$C_D(\mathcal{R})$	$C(\mathcal{R})$	$C_G(\mathcal{R})$	$FN(\mathcal{R})$	$\tau(\mathcal{R})$	$\tau(\mathcal{R})_e$
2006	0,45238	0,19088	0,42865	0,42986	0,00081	- 0,00214	0,99838
2007	0,41176	0,17424	0,39185	0,39014	0,00067	- 0,00158	0,99867
2008	0,33183	0,20714	0,37489	0,36264	0,00062	- 0,00165	0,99875
2009	0,20739	0,19216	0,21037	0,20428	0,00074	- 0,00133	0,99852
2010	0,17650	0,12768	0,18092	0,17289	0,00062	- 0,00113	0,99877
2011	0,16527	0,09897	0,14934	0,15164	0,00029	- 0,00062	0,99943
2012	0,08635	0,06389	0,08304	0,08044	0,00048	- 0,00064	0,99905
2013	0,12554	0,07561	0,13671	0,13469	0,00017	- 0,00034	0,99966
2014	0,09172	0,06309	0,09726	0,09270	0,00030	- 0,00047	0,99940
2015	0,07485	0,06795	0,07023	0,07327	0,00048	- 0,00054	0,99905

Por meio da tabela 6.2, pode-se perceber que os resultados obtidos pela análise dos grafos aleatórios não demonstram o mesmo padrão dos resultados obtidos com os grafos de competitividade, um indício de que as características desses últimos não são provenientes do acaso.

Outra verificação que envolve uma rede aleatória é utilizar-se do mesmo método para gerar os grafos de competitividade, entretanto embaralhando os rankings de forma aleatória a cada mês, dentro de cada ano. A tabela 6.3 mostra os resultados obtidos com essa avaliação.

Tabela 6.3 – Métricas obtidas por meio da metodologia de grafos de competitividade, embaralhando as posições dos rankings em cada mês. Fonte: produção do próprio autor

Ano	$GN(\mathcal{R})$	$C_D(\mathcal{R})$	$C(\mathcal{R})$	$C_G(\mathcal{R})$	$FN(\mathcal{R})$	$\tau(\mathcal{R})$	$\tau(\mathcal{R})_e$
2006	0,989418	0,011396	0,989928	0,989816	0,223545	-0,19775	0,55291
2007	0,951872	0,051136	0,955519	0,95519	0,156239	-0,19029	0,687522
2008	0,98048	0,020634	0,98277	0,98248	0,187237	-0,19602	0,625526
2009	0,927602	0,075294	0,934839	0,93445	0,135596	-0,18548	0,728808
2010	0,933333	0,068926	0,936922	0,936549	0,136694	-0,18664	0,726612
2011	0,927171	0,074584	0,932251	0,932217	0,132171	-0,18542	0,735658
2012	0,915942	0,085545	0,919687	0,919568	0,128635	-0,18318	0,742731
2013	0,87293	0,082170	0,877666	0,877522	0,111556	-0,17458	0,776888
2014	0,918967	0,066666	0,925073	0,925009	0,132108	-0,18379	0,735784
2015	0,942952	0,057905	0,948076	0,948267	0,151222	-0,18858	0,697557

Dessa maneira é possível verificar como seria um ranking mais próximo do máximo de competitividade, já que praticamente todos os agentes trocam de posição com todos os agentes, limitados apenas pela quantidade de rankings sendo comparados a cada ano.

Entretanto, observa-se que mesmo assim o ano de 2013 apresentou valores menores dos indicadores de competitividade. Examinando a base de dados, foi verificado que nesse ano alguns comercializadores passaram diversos meses consecutivos sem comercializar energia alguma. Isso afetou tanto a geração dos grafos de competitividade reais quanto as do aleatório, já que caso um agente não participe da comercialização em um mês ele vai para o final do ranking.

Foi feita então uma nova análise excluindo os agentes que permaneceram mais de 6 meses sem comercializar em um ano, e foram novamente gerados os grafos de competitividade e calculadas as métricas para os dados reais. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Resultado da metodologia de grafos de competitividade, após a remoção de agentes inativos. Fonte: produção do próprio autor

Ano	$GN(\mathcal{R})$	$C_D(\mathcal{R})$	$C(\mathcal{R})$	$C_G(\mathcal{R})$	$FN(\mathcal{R})$	$\tau(\mathcal{R})$	$\tau(\mathcal{R})_e$
2006	0,166667	0,317029	0,814929	0,568282	0,022576	-0,03015	0,954848
2007	0,19943	0,366154	0,675628	0,56129	0,030044	-0,03613	0,939912
2008	0,174877	0,272487	0,775838	0,610825	0,019816	-0,03168	0,960367
2009	0,224751	0,39039	0,725602	0,568651	0,031294	-0,0408	0,937411
2010	0,237805	0,459615	0,766919	0,664495	0,030931	-0,04318	0,938137
2011	0,159329	0,520319	0,789304	0,522529	0,02017	-0,02894	0,959659
2012	0,261072	0,555769	0,779096	0,642438	0,030049	-0,04745	0,939903
2013	0,142105	0,196396	0,745344	0,661884	0,019282	-0,02582	0,961435
2014	0,201283	0,472367	0,776743	0,595554	0,022077	-0,03658	0,955846
2015	0,215511	0,428004	0,747958	0,645762	0,023897	-0,03917	0,952206

De onde conclui-se que, apesar de muitos agentes permanecerem inativos no ano de 2013, expurgando-se esses agentes da análise, esse ano continua sendo o ano em que a competitividade foi a menor do histórico.

Também é válido verificar qual a semelhança dos grafos de competitividade com os outros modelos de rede mais utilizados, o modelo de pequeno mundo e o modelo de ligações preferenciais. Para essa análise foi realizada apenas a comparação do valor de $GN(\mathcal{R})$ de cada grafo e foram obtidos os resultados:

Tabela 6.5- Comparação do grau médio normalizado com outros modelos de redes. $GN(E)$, para o modelo de grafos aleatórios, $GN(SW)$, para o modelo de grafos de pequeno mundo e $GN(LE)$ para o modelo de grafos livre de escala.

Ano	$GN(\mathcal{R})$	$GN(E)$	$GN(SW)$	$GN(LE)$
2006	0,14815	0,45238	0,22222	0,07143
2007	0,14082	0,41176	0,18182	0,05882
2008	0,15315	0,33183	0,16667	0,05405
2009	0,18854	0,20739	0,11765	0,03846
2010	0,19016	0,17650	0,10000	0,03279
2011	0,13838	0,16527	0,07143	0,02353
2012	0,19954	0,08635	0,05263	0,01739
2013	0,11979	0,12554	0,04615	0,01527
2014	0,16207	0,09172	0,04615	0,01527
2015	0,19248	0,07485	0,04478	0,01481

Aqui também pode-se observar que o comportamento dos grafos de competitividade difere dos demais modelos de grafos. Situando-se entre os diferentes modelos dependendo da quantidade de nós.

6.2.2 Gráficos obtidos

A fim de se observar melhor a estrutura e evolução dos grafos obtidos foram geradas representações gráficas da rede de cada ano. Essas representações também foram criadas utilizando-se o pacote `igraph`. O algoritmo utilizado para gerar os layouts é o Fruchterman-Reingold, que cria forças de atração e repulsão entre os nós conectados para obter as distâncias e posicionamento de nós a fim de se desenhar os grafos (FRUTCHERMAN e REINGOLD, 1991). As figuras 6.3 e 6.4 ilustram essas representações.

Figura 6.3 - Grafos de competitividade de 2006 a 2011. A cor representa o grau de cada nó, quanto mais escuro, maior o grau.
Fonte: produção do próprio autor

Figura 6.4 - Grafos de competitividade de 2012 a 2015. A cor representa o grau de cada nó, quanto mais escuro, maior o grau.

Fonte: produção do próprio autor

Percebe-se que com o aumento do número de agentes há o surgimento de uma estrutura separada do grupo maior, mais aglutinado, sendo que em alguns anos há o aparecimento de nós que sequer estão conectados ao grupo maior, ou seja, não competem no mercado, ou apenas competem dentro de um conjunto menor.

A fim de se observar melhor essas estruturas, foi gerada a figura 6.5, no software de visualização de redes Gephi, separando-se os agentes em camadas de acordo com o seu Market Share. Cada camada contém 25% dos agentes que participaram do mercado e estão ordenadas em cada ano e o tamanho de cada nó é proporcional ao seu Market Share. Foram gerados esses gráficos para os anos de 2012 a 2015.

Figura 6.5- Grafos de competitividade de 2012 a 2015 separados em camadas de concentração de mercado.

Fonte: produção do próprio autor

Percebe-se que na faixa superior, há menos links entre os agentes, ou seja, há um menor grau de competição entre os agentes, entretanto nas outras faixas observa-se uma competitividade maior, principalmente dentre os agentes das duas faixas intermediárias. Também se observa um isolamento dos maiores agentes ao longo do tempo, em 2012 o grafo era totalmente conectado, enquanto que a partir de 2013 os maiores agentes passam a se separar cada vez mais da rede e em 2015 os 3 maiores agentes se isolam completamente dos outros.

6.2.3 Comparação com métricas tradicionais

A fim de se verificar a consistência do método de grafos de competitividade, foram obtidos os valores das métricas tradicionais de concentração de mercado e competitividade e apresentadas nas subseções 3.3 e 2.2.1. A tabela a seguir mostra as variáveis de Concentração de mercado para 4, 8 e as 10% primeiras empresas do ranking (GC(4), GC(8) e GC(10%)), respectivamente, o coeficiente de Churn e o Índice de Herfindahl Hirschmann (HHI).

Tabela 6.6 - Aplicação de métricas tradicionais de competitividade e concentração de mercado na base de dados na comercialização de energia. Fonte: produção do próprio autor

Ano	CR(4)	CR(8)	CR(10%)	Churn	HHI
2006	63,20%	83,70%	54,00%	-	1.355,732
2007	61,50%	80,00%	52,60%	0,1926	1.176,626
2008	60,30%	79,80%	60,30%	0,1802	1.113,349
2009	52,40%	71,70%	58,10%	0,2404	901,233
2010	42,60%	64,50%	54,90%	0,1669	682,897
2011	34,50%	53,30%	53,30%	0,1888	491,607
2012	31,50%	47,00%	58,00%	0,1533	409,665
2013	35,70%	53,20%	68,50%	0,1085	482,269
2014	37,30%	54,70%	68,30%	0,1697	515,359
2015	39,90%	54,80%	66,90%	0,1598	548,258

Os valores resultantes de CR mostram uma redução da concentração de mercado no topo ao longo dos anos sendo que há uma interrupção nessa redução a partir de 2013. Já o HHI não mostra o ano de 2013 como um ano de maior concentração, mas indica que a partir desse ano, a concentração de mercado que vinha diminuindo, passou a crescer novamente.

O coeficiente de Churn, que avalia a competitividade, também indica um ponto de menor valor em 2013. Esses valores se mostram coerentes com os resultados obtidos por meio da análise dos grafos de competitividade.

6.2.4 Influência externa na competitividade

Cabe aqui encontrar justificativas dos resultados obtidos, do comportamento dos níveis de competitividade, principalmente do fato de a maioria dos indicadores calculados terem apontado o ano de 2013 como o ano de menor competitividade no histórico analisado. Essa análise pode ser feita por dois aspectos, a influência regulatória e a volatilidade do Preço de liquidação das diferenças.

Na subseção 2.6 foram apresentados alguns atos regulatórios expedidos no período que alteraram a dinâmica das relações entre os agentes do mercado de energia elétrica. A Resolução 247/2006 representou uma maior abertura no mercado de energia, derrubando algumas barreiras de entrada para agentes consumidores menores, representando um aumento de clientes, e estimulando a entrada de mais agentes comercializadores no mercado. Com algumas Oscilações, o valor de competitividade manteve-se crescente até o ano de 2012, sendo esse ano o mais competitivo pelas métricas de grau normalizado médio e coeficiente τ de Kendall.

Na segunda metade de 2012, foram introduzidas três alterações na regulação, a Medida Provisória 579/2012, a Portaria MME 455 e a Resolução 471/2012. Essas medidas causaram fortes impactos na dinâmica de contratação entre os agentes, a Portaria MME 455 e a resolução 471/2012 exigiram um maior controle dos agentes sobre sua contratação, fechando espaço para agentes que assumissem mais risco, já a MP 579 levou a um desequilíbrio financeiro em grandes grupos do setor, o que também levou a um engessamento nas contratações de energia e exigiu um período de adaptação dos agentes. O reflexo disso pode ser observado nos resultados de competitividade do ano subsequente, que foram os menores de todo o histórico.

Já com relação à volatilidade do PLD, observa-se uma alta volatilidade durante todo o ano de 2013 e valores excessivamente elevados em 2014. A alta volatilidade leva a incertezas dos agentes no curto prazo, exigindo que as contratações sejam feitas com mais cautela, já valores elevados também desestimulam a contratação pois exigem montantes financeiros elevados para consolidação das operações.

7 Conclusões

O presente trabalho propôs a aplicação da metodologia de grafos competitivos em um cenário de um mercado específico, no caso o mercado de comercializadores de energia. Os resultados do método de Criado *et al* (2013) demonstraram um comportamento comparável com as métricas tradicionais de avaliação da competitividade e concentração de mercado.

Adicionalmente foi possível observar a presença de uma estrutura de mercado próxima da oligopolista, com poucos agentes detendo uma grande parcela do mercado. Também pôde-se observar por meio da visualização das redes de competitividade que esses agentes com maiores concentrações de mercado são menos sujeitos a competição do que agentes menores.

Foi feita a comparação dos resultados do método de geração desses grafos com grafos aleatórios, gerados de duas maneiras diferentes, uma pelo método de Erdos-Renyi, e outra embaralhando os rankings em cada mês e gerando as redes pela metodologia de grafos de competitividade. Chegou-se à conclusão de que os grafos obtidos com os dados reais, gerados pela metodologia de grafos de competitividade apresentam características divergentes de ambos os grafos aleatórios, indicando a presença de complexidade em sua estrutura.

Por fim, foi realizado um paralelo com as alterações regulatórias no setor elétrico e variação do preço de liquidação das diferenças e foi verificado que em períodos de mais intervenções e maior volatilidade no preço, em especial nos anos de 2013 e 2014, houve uma redução na competitividade geral na comercialização de energia.

Para trabalhos futuros sugere-se a aplicação de modificação na metodologia de geração de grafos que preveja ocorrência de empates e possibilite a análise de ranking localmente, como por exemplo analisar apenas os n primeiros agentes. Uma técnica (CRIADO, GARCIA, *et al.*, 2015) foi proposta pelos mesmos autores da metodologia utilizada nesse trabalho, que faz uso de multigrafos para resolver essa questão. Outra ideia seria avançar na análise de mais métricas de redes complexas implementando algoritmos de detecção de comunidades e modularidade a fim de se verificar padrões e existência de estruturas de mercado.

Referências¹³

ABDI, H. The Kendall Rank Correlation. In: ABDI, H. **Encyclopedia of Measurement and Statistics**. [S.l.]: Neil Salkind, 2007.

ABRACEEL. O papel das comercializadoras. **ABRACEEL**, 2016. Disponível em: <http://www.abraceel.com.br/zpublisher/secoes/mercado_livre.asp?m_id=19151>. Acesso em: 26 maio 2016.

ANACE. Perguntas Frequentes. **Anace - Associação Nacional dos Consumidores de Energia**, 21 jun. 2014. Disponível em: <<http://www.anacebrasil.org.br/portal/index.php/faqs/1-energia-eletrica/21-o-que-e-rede-basica>>.

ARFUX, G. A. B. Definição de estratégia de comercialização de energia elétrica via métodos de otimização estocástica e análise integrada de risco, Florianópolis, 2011.

ARTHUR, W. B. Complexity and the Economy. **Science**, p. 107-109, 2 abril 1999.

BANOVAC, E. Measuring concentration in the energy markets. **NAFTA**, Janeiro 2005. 249-256.

BARABÁSI, A.-L. **Linked: The New Science Of Networks**. [S.l.]: Basic Books, 2002.

BARABÁSI, A.-L. Network Science Book, maio 2016. Disponível em: <<http://barabasi.com/networksciencebook/>>.

BARABASI, A.-L.; ALBERT, R. Emergence of Scaling in Complex Networks. **SCIENCE**, 15 outubro 1999. 509-512.

BARABASI, A.-L.; ALBERT, R. Statistical mechanics of complex networks. **Reviews of Modern Physics**, Janeiro 2002. 47-95.

BAR-YAM, Y. Aplicações de Sistemas Complexos em Políticas Públicas no Mundo. In: FURTADO, B.; SAKOWSKI, P.; TÓVOLI, M. **Modelagem de Sistemas Complexos Para Políticas Públicas**. Brasília: IPEA, 2015. p. 267-288.

BATLLE, C.; BARROSO, L.; PEREZ-ARRIAGA, I. J. The changing role of the State in the expansion of electricity. **Energy Policy**, 01 agosto 2010. 7152-7260.

BODY OF KNOWLEDGE ON INFRASTRUCTURE REGULATIONS. Market Structure and Competition. **Body of Knowledge on Infrastructure Regulations**, 2015. Disponível em: <<http://regulationbodyofknowledge.org/market-structure-and-competition/concluding-observations/>>. Acesso em: 25 maio 2016.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Estabelece as condições para a comercialização de energia elétrica, oriunda de empreendimentos de geração que utilizem fontes primárias incentivadas, com unidade ou conjunto de unidades consumidoras cuja carga

¹³ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023

seja maior ou igual a 500 kW e dá outras providências., Resolução Normativa nº 247 - de 21 de dezembro de 2006.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Altera a metodologia de cálculo das garantias financeiras associadas ao mercado de curto prazo, estabelece critérios e condições para efetivação de registro de contratos de compra e venda de energia elétrica no âmbito da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE, e dá outras providências. Resolução Homologatória 531 de 31 de dezembro de 2012.

BRASIL. Medida Provisória nº579/2012 de 11 de setembro de 2012, Dispõe sobre as concessões de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, sobre a redução dos encargos setoriais, sobre a modicidade tarifária, e dá outras providências.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Portaria nº 455, de 2 de agosto de 2012.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Altera o art. 3º da Resolução 682, de 23 de dezembro de 2003 e o art. 3º da Resolução Normativa nº 392, de 15 de dezembro de 2009. Resolução Normativa nº633 de 25 de novembro de 2014.

CCEE. Informações ao Mercado. **Site da CCEE**, 01 maio 2015. Disponível em: <http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/infomercado>.

CCEE. CCEE - Preços médios - PLD - Preço de Liquidação das Diferenças. **CCEE**, 20 jun. 2016. Disponível em: <http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/precos_medios>. Acesso em: 16 junho 2016.

CRIADO, R. et al. A new method for comparing rankings through complex networks: Model and analysis of competitiveness of major European soccer leagues. **Chaos**, Outubro 2013.

CRIADO, R. et al. Competitivity graphs analysis and structural comparison of rankings. **International Journal os Complex Systems in Science**, Dezembro 2013. 113-119.

CRIADO, R. et al. On graphs associated to sets of rankings. **Journal of Computational and applied Mathematics**, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cam.2015.03.009>>.

CSARDI, ; NEPUSZ,. The igraph software package for complex network research. **InterJournal**, v. Complex Systems, p. 1695, 2006. Disponível em: <<http://igraph.org>>.

D'ARAUJO, R. Instituto Ilumina. **Instituto Ilumina**, 2015. Disponível em: <<http://ilumina.org.br/voce-quer-saber-a-verdadeira-razao-da-sua-conta-de-luz-ter-se-tornado-cara/>>.

DEUS, M. L. D. D. Séries temporais aplicadas ao planejamento da operação do Sistema Interligado Nacional, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do rio de Janeiro, Rio de Janeiro, abril 2008.

ELETROBRÁS. Sistemas Isolados. **Site corporativo da Eletrobrás**, 01 maio 2015. Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/elb/main.asp?Team=%7BF6839649-9BFF-4C62-A77C-21863DBA3F48%7D>>.

ERDÖS, P.; RÉNYI, A. On random graphs. **Publicationes Mathematicae**, 1959. 290-297.

EULER, L. Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis. **Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae**, 1741. 128-140.

FRUTCHERMAN, T.; REINGOLD, E. M. Graph Drawing by Force-directed Placement. **Software - Practice and Experiment**, v. 21, p. 1129-1164, março 1991.

GODOI, M. MP 579: um ano do 11/09 do setor elétrico. **Canal Energia**, 2013. Disponível em: <<http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/Materias/Retrospectiva.asp?id=97289&a=2013>>. Acesso em: 25 maio 2016.

HODAK, M. The Enron Scandal (Slides). **Social Science Research Network**, 2007. Disponível em: <<http://ssrn.com/abstract=991044> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.991044>>.

HUNT, S. **Making Competition Work in Electricity**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2002.

KENDALL, M. G. A New Measure of Rank Correlation. **Biometrika**, Junho 1938. 81-93.

KOLACZYK, E. D. **Statistical Analysis of Network Data**. Boston MA: Springer, 2009.

KRAITCHIK, M. **Mathematical Recreations**. New York: W. W. Norton, 1942. 209-211, p.

LEWIS, T. G. **Network Science - Theory and Applications**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2009.

MANKIW, N. G. **Introdução à Economia**. São Paulo: Cengage Learning, 2009.

MAYO, R. **Derivativos de Eletricidade & Gerenciamento de Risco**. Rio de Janeiro: Synergia, 2009.

MILLER, P. Inteligência coletiva. **Viaje Aqui**, julho 2007. Disponível em: <<http://viajeaquibril.com.br/materias/teoria-dos-exames>>.

MITCHELL, M. **Complexity, a Guided Tour**. Nova Iorque: Oxford University Press, 2009.

MIZAK, D.; NERAL, J.; STAIR, A. The adjusted churn: an index of competitive balance for sports leagues based on changes in team standings over time. **Economics Bulletin**, v. 26, p. 1-7, 14 Novembro 2007. ISSN 3. Disponível em: <<http://economicsbulletin.vanderbilt.edu/2007/volume26/EB-07Z00005A.pdf>>.

NEWBERRY, D. Predicting Market Power in Wholesale Electricity Markets, Florença, 2009.

ONS. ONS-Conheça o Sistema - Mapas do SIN. **ONS**, 21 jun. 2016. Disponível em: <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx#>.

PENNA, D. D. J. Definição da árvore de cenários de afluências para o planejamento da operação energética de médio prazo, Rio de Janeiro, 01 agosto 2010.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria, 2015.

RADICCHI, F. Who Is the Best Player Ever? A Complex Network Analysis of the History of Professional Tennis. **PLoS One** 6(2), 2011.

SILVA, E. F. D. Principais condicionantes das alterações no modelo de comercialização de energia elétrica: retrospectiva e análise crítica. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SOARES, M. P. Otimização multicritério da operação de sistemas hidrotérmicos utilizando algoritmos genéticos, Rio de Janeiro, 08 setembro 2008.

TOLMASQUIM, M. **Novo Modelo do Setor Elétrico Brasileiro**. Rio de Janeiro: Synergia, 2011.

UNITED STATES DEPARTMENT OF JUSTICE. USDOJ: Antitrust Division : Herfindahl-Hirschman Index. **United States Department of Justice**, 20 jun. 2014. Disponível em: <<http://www.justice.gov/atr/public/guidelines/hhi.html>>.

VARIAN, H. R. **Microeconomia - Uma abordagem Moderna (8ª Edição)**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

VICECONTI, P.; DAS NEVES, S. **Introdução à economia (11ª Edição)**. São Paulo: Saraiva, 2012.

WATTS, D. J.; STROGATZ,. Collective dynamics of ‘small-world’ networks. **Nature**, 4 Junho 1998. 440-442.

Apêndice A – Código em R

Algoritmo 1 – Geração dos grafos de competitividade e obtenção das métricas

```

1  library(reshape2)
2  library(zoo)
3  library(igraph)
4  library(statnet.common)
5  library(sqldf)
6  library(lubridate)
7  library(scales)
8
9  df <- read.table("~/negociado_0615.csv", header=TRUE, sep=";", dec=".",
10                  stringsAsFactors = T)
11
12  metricas <- NULL
13  metricas_a <- NULL
14  metricas_t <- NULL
15  comp_graus <- NULL
16
17  #tratamento de datas
18  df$Mes <- as.Date(as.yearmon(df$Mes, "%b/%y"))
19
20  #Ordena a tabela
21  df <- df[order(df$Mes,df$Volume),]
22
23  #Cria a coluna de ranking
24  df$rank <- unlist(with(df, tapply(-Volume, Mes, rank)))
25  anos <- 2006:2015
26
27  for(i in anos) {
28    tab <- assign(paste("t",i,sep="_"), subset(df, format.Date(Mes, "%Y")==i))
29
30    #cria a tabela de referencia cruzada
31    tabela <- dcast(tab, Agente~Mes, value.var = "rank")
32    #tratamento de vazios
33    tabela[is.na(tabela)] <- 1000
34
35    #cria a matriz de adjacência do grafo
36    agentes <- tabela[,1]
37    G <- matrix(0,nrow=length(agentes),ncol=length(agentes),byrow = TRUE)
38
39    a=0
40    rel1 <- 0
41    rel2 <- 0
42
43    rownames(G) <- agentes
44    colnames(G) <- agentes
45
46    #início da rotina que popula a matriz diagonal G
47    for (mes in 2:(ncol(tabela)-1)){
48      for (ls in 1:(nrow(tabela)-1)){
49        for(li in (ls+1):(nrow(tabela))){
50          #calcula o sinal da posição relativa entre dois agentes em um mes
51          rel1 <- sign(tabela[ls,mes]-tabela[li,mes])
52          #calcula o sinal da posição relativa entre dois agentes no mes
53          seguinte
54          rel2 <- sign(tabela[ls,mes+1]-tabela[li,mes+1])
55

```

```

56     #tratamento de valores nulos
57     rel1 <- NVL(rel1,1)
58     rel2 <- NVL(rel2,1)
59
60     #tratamento de agentes que não comercializam todos os meses
61     if(abs(tabela[ls,mes]-tabela[li,mes])>200 | abs(tabela[ls,mes+1]-
62         tabela[li,mes+1])>200){
63         rel1=1
64         rel2=1
65     }
66
67     if(ls==li){
68         G[ls,li] <- G[ls,li]+0
69     }
70
71     if(ls!=li){
72         if(rel1!=rel2){
73             G[ls,li] <- G[ls,li]+1
74         } else if(rel1==rel2){
75             G[ls,li] <- G[ls,li]+0
76         }
77     }
78 }
79 }
80 }
81
82 #cria o grafo
83 grafo <- graph.adjacency(G, mode = "undirected", weighted = TRUE)
84
85 #plota o grafo com o layout Fruchterman Reingold
86 V(grafo)$color <- scales::dscale(degree(grafo) %>% cut(9),
87     sequential_pal)
88 jpeg(filename = paste("myplot_", i, ".jpeg", sep=""))
89 plot(grafo, layout=layout_with_fr, vertex.size=7,
90     vertex.label = NA, sub= i)
91
92 #####
93 #Calculo do Market Share e HHI
94
95 ms<-aggregate(Volume ~ Agente, tab, sum)
96 ms$Volume<-ms$Volume/sum(tab$Volume)
97 HHI<-sum(ms$Volume^2)*100^2
98
99 ms <- ms[order(-ms$Volume),]
100 z<-findInterval(ms$Volume, quantile(ms$Volume, c(.25, .50, .75)))
101 ms<-cbind(ms,z)
102 cr4<-sum(ms$Volume[1:4])
103 cr8<-sum(ms$Volume[1:8])
104 cr16<-sum(ms$Volume[1:16])
105 cr10<-sum(ms$Volume[1:round(length(ms$Volume)/10)])
106 metricas_t <- rbind(metricas_t,c(i,HHI, percent(cr4), percent(cr8),
107     percent(cr16), percent(cr10)))
108 colnames(metricas_t) <- c("ano","HHI", "CR(4)", "CR(8)", "CR(16)"
109     ,"cr10%")
110 write.csv2(metricas_t, file = "metricas_t.csv")
111
112 #gera os arquivos de nós e arestas no formato do gephi
113 #arestas com peso e tipo não dirigido
114 gephi_a <- assign(paste("arestas",i,sep="_"),subset(melt(G), value>0))
115 gephi_a <- cbind(gephi_a, type="undirected")
116 colnames(gephi_a) <- c("Source", "Target", "Weight", "Type")

```

```

117 write.csv2(gephi_a, file <- paste("arestas2_",i,".csv", sep=""),
118           row.names = FALSE)
119 #nós com label e mercado do agente
120 #gephi_n<-sqldf('select Agente as Id, SUM(Volume) as Vol from tab group
121           by Agente')
122 gephi_n<-ms
123 colnames(gephi_n) <- c("Id","ms", "faixa")
124 write.csv2(gephi_n, file <- paste("nos2_",i,".csv", sep=""), row.names =
125           FALSE)
126
127 #calcula as métricas do grafo
128 c <- transitivity(grafo, type="local")
129 cluster <- sum(c[!is.na(c)])/length(c[!is.na(c)]) # Maior é mais
130           competitivo
131 cluster2 <- transitivity(grafo, type='global') #clustering global
132 grau <- sum(degree(grafo))/((length(agentes))*(length(agentes)-1)) #
133           Maior é mais competitivo
134 info <- sum(max(degree(grafo))-degree(grafo))/((length(V(grafo))-
135           1)*(length(V(grafo))-2)) #maior é mais competitivo
136 forca <- sum(E(grafo)$weight)/(length(combn(length(agentes),2))*(mes-1))
137           # Maior é mais competitivo
138 tau <- (1-4*length(E(grafo)))/(length(combn(length(agentes),2))*(mes-1))
139           # Menor é mais competitivo
140 taue <- (1-2*forca) # Menor é mais competitivo
141 nos <- length(V(grafo))
142 arestas <- length(E(grafo))
143 peso_total <- sum(E(grafo)$weight)
144
145
146 #####
147 #tabela de resultados para o grafo
148 metricas <- rbind(metricas,c(i,grau, info, cluster,
149           cluster2,cluster3,cluster_b, forca, tau, taue, nos, arestas,
150           HHI))
151 colnames(metricas) <- c("ano","grau", "info", "cluster", "cluster2",
152           "cluster3", "cluster_b", "força", "tau", "taue", "nos",
153           "arestas", "HHI")
154 write.csv2(metricas, file = "metricas.csv")
155
156 #####
157 #Comparação com grafos aleatórios
158 #Gera um grafo aleatório com a mesma quantidade de nós e arestas que os
159           grafos anuais
160 #com os pesos seguindo uma distribuição de Poisson
161
162 #função para gerar uma distribuição de poisson com N elementos e soma M
163 rand_pois <- function(N, M, positivos = TRUE) {
164   vec <- rpois(N, M/N)
165   if (abs(sum(vec)) < 0.01) vec <- vec + 1
166   vec <- round(vec / sum(vec) * M)
167   deviation <- M - sum(vec)
168   for (. in seq_len(abs(deviation))) {
169     vec[i] <- vec[i <- sample(N, 1)] + sign(deviation)
170   }
171   if (positivos) while (any(vec < 0)) {
172     negs <- vec < 0
173     pos <- vec > 0
174     vec[negs][i] <- vec[negs][i <- sample(sum(negs), 1)] + 1
175     vec[pos][i] <- vec[pos][i <- sample(sum(pos), 1)] - 1
176   }
177   vec

```

```

178 }
179 #####
180 #construção dos grafos aleatorios
181
182 set.seed(42)
183 nos <- length(V(grafo))
184 arestas <- length(E(grafo))
185 peso_total <- sum(E(grafo)$weight)
186 Erdos <- sample_gnp(nos, nos/peso_total)
187 dif <- peso_total-length(E(Erdos))
188 E(Erdos)$weight <- 1
189 E(Erdos)$weight <- E(Erdos)$weight + rand_pois(length(E(Erdos)),dif)
190
191 #gera as métricas
192 c <- transitivity(Erdos, type="local")
193 cluster <- sum(c[!is.na(c)])/length(c[!is.na(c)]) # Maior é mais
194 competitivo
195 cluster_g <- transitivity(Erdos, type="global") #clustering global
196 grau <- sum(degree(Erdos))/((length(V(Erdos)))*(length(V(Erdos))-1)) #
197 Maior é mais competitivo
198 info <- sum(max(degree(Erdos))-degree(Erdos))/((length(V(Erdos))-
199 1)*(length(V(Erdos))-2)) # Maior é mais competitivo
200 forca <- sum(E(Erdos)$weight)/(length(combn(length(E(Erdos)),2))*(mes-1))
201 # Maior é mais competitivo
202 tau <- (1-4*length(E(Erdos)))/(length(combn(length(E(Erdos)),2))*(mes-1))
203 # Menor é mais competitivo
204 taue <- (1-2*forca) # Menor é mais competitivo
205 peso_total_e <- sum(E(Erdos)$weight)
206 metricas_a <- rbind(metricas_a,c(i,grau, info, cluster, cluster_g, forca,
207 tau, taue, nos, arestas, peso_total_e))
208 colnames(metricas_a) <- c("ano", "grau", "info", "cluster", "Cluster_g",
209 "força", "tau", "taue", "nos", "arestas", "peso")
210 write.csv2(metricas_a, file = "metricas_a.csv")
211
212
213 #comparação dos graus de diferentes modelos
214 sw<- sample_smallworld(1,nos, 3, nos/peso_total)
215 ba<- sample_pa(nos, power= 1, m=peso_total/nos, directed = FALSE)
216 grau_comp <- sum(degree(grafo))/((length(V(grafo)))*(length(V(grafo))-1))
217 grau_a <- sum(degree(Erdos))/((length(V(Erdos)))*(length(V(Erdos))-1))
218 grau_sw <- sum(degree(sw))/((length(V(sw)))*(length(V(sw))-1))
219 grau_ba <- sum(degree(ba))/((length(V(ba)))*(length(V(ba))-1))
220
221 comp_graus<- rbind(comp_graus,c(i,grau_comp, grau_a, grau_sw, grau_ba))
222 colnames(comp_graus) <- c("ano", "grau", "grau_E", "grau_sw", "grau_ba")
223
224 }

```

Fonte: Guilherme Borin da Silva, 2016

Algoritmo 2 – Códigos para a plotagem dos grafos

```

1  library(igraph)
2
3  #matriz de adjacência não dirigida
4  d<-matrix(c(0,1,1,1,0,
5             1,0,0,0,1,
6             1,0,0,1,1,
7             1,0,1,0,1,
8             0,1,1,1,0), 5, 5)
9  g1 <- graph_from_adjacency_matrix( d , mode = "undirected")
10
11 plot(g1, layout=layout_with_fr, vertex.size=28)
12
13 #matriz de adjacência dirigida
14 d<-matrix(c(0,1,1,1,0,
15            0,0,0,0,0,
16            0,0,0,0,0,
17            0,1,0,0,1,
18            0,1,0,0,0), 5, 5)
19 g1 <- graph_from_adjacency_matrix( d , mode = "directed")
20
21 plot(g1, layout=layout_with_kk, vertex.size=28)
22
23
24 #modelos de rede
25 Erdos_renyi <- sample_gnp(100, 0.08)
26 small_world <- sample_smallworld(1, 50, 3, 0.05)
27 Scale_free <- sample_pa(100, directed = FALSE)
28
29 #cor dos nós de acordo com o grau
30 V(Erdos_renyi)$color <- scales::dscale(degree(Erdos_renyi) %>% cut(9),
31                                       sequential_pal)
32 V(small_world)$color <- scales::dscale(degree(small_world) %>% cut(9),
33                                       sequential_pal)
34 V(Scale_free)$color <- scales::dscale(degree(Scale_free) %>% cut(9),
35                                       sequential_pal)
36 #V(Erdos_renyi)$color=degree(Erdos_renyi)
37 #V(small_world)$color=degree(small_world)
38 #V(Scale_free)$color=degree(Scale_free)
39
40
41 plot(Erdos_renyi, layout=layout_with_fr, vertex.size=7,
42      vertex.label = NA)
43
44 plot(small_world, layout=layout_in_circle, vertex.size=7,
45      vertex.label = NA, edge.curved = TRUE)
46
47 plot(Scale_free, layout=layout_kamada_kawai, vertex.size=7,
48      vertex.label = NA)
49

```

Fonte: Guilherme Borin da Silva, 2016

Apêndice B - Planejamento da Operação do Sistema

O planejamento da operação do Sistema elétrico consiste em se basear em dados e análises de forma a se gerar um conjunto de decisões e ações tomadas de acordo com uma certa diretriz. Uma operação ótima é aquela em que o conjunto de decisões é tomada de forma que o custo total da operação seja o menor possível no horizonte de planejamento.

B.1 Sistemas Térmicos

Usinas térmicas, de um modo geral, geram energia por meio do calor resultante de um processo de queima de combustíveis. Esse calor é utilizado para a geração de vapor, que passa pelas turbinas de um gerador. Nesse sentido, usinas nucleares também são consideradas térmicas, com a diferença que geram o calor por meio da fissão nuclear.

Um sistema elétrico puramente térmico tem as seguintes características principais:(Soares, 2008)

- Desacoplado no tempo: uma decisão tomada em um período não tem impactos sobre o custo de operação de períodos posteriores, já que depende apenas da disponibilidade de combustível. •
- Custo direto de operação: o custo de operação de cada usina térmica independe do nível de geração ou da disponibilidade de outras usinas
- Confiabilidade de fornecimento: não apresentam restrições de armazenamento, dependendo apenas da capacidade total de atendimento das usinas.

Portanto, o custo de operação de uma usina térmica é diretamente ligado apenas pelo custo de seu combustível. Assim, o problema da operação de um sistema térmico é resolvido classificando-se as usinas pelo seu custo e despachando-as em ordem crescente até o atendimento da carga. O Custo Marginal de Operação é então o custo da usina mais cara do sistema.

B.1.1 Exemplo Numérico

A Figura 7.1 a seguir exemplifica um sistema térmico com três usinas e demanda única:

Figura 7.2 Exemplo de sistema térmico

No exemplo acima, o custo total da operação se dá pela expressão:

$$C_{total} = \min(g_1 * c_1 + g_2 * c_2 + g_3 * c_3)$$

Sujeito às restrições:

$$g_1 + g_2 + g_3 = Demanda$$

$$g_1 \leq g_{1max}$$

$$g_2 \leq g_{2max}$$

$$g_3 \leq g_{3max}$$

Que para o exemplo é:

$$C_{total} = 10 * 8 + 5 * 12 + 5 * 15 = R\$215$$

Portanto, no caso, o custo marginal de operação é de 15 R\$/MWh, que é o custo para o incremento de uma unidade na demanda.

B.2 Sistemas Hidrotérmicos

Em um sistema hidrotérmico, além da presença das usinas térmicas citadas acima, há a presença de usinas hidrelétricas, que utilizam a água armazenada em reservatórios como forma de gerar a energia. Para cálculo dos custos de operação, o custo de uma usina hidrelétrica é nulo, portanto, a geração por meio de usinas térmicas é evitada sempre que possível (PENNA, 2010).

Entretanto, como a quantidade de água armazenada nos reservatórios disponível no futuro é incerta, decisões que reduzem totalmente o custo em um momento atual, podem elevar o custo no futuro, caso as afluições sejam baixas e usinas térmicas precisem ser despachadas, havendo ainda um risco de não atendimento da carga em casos extremos (racionamento). Por outro lado, caso a água seja economizada no momento atual e as afluições sejam altas, pode haver o vertimento da água, ou seja, energia que poderia ser armazenada em forma de água estaria sendo desperdiçada.

A figura 7 a seguir ilustra esse processo de decisão:

Figura 7.3 - Resumo das decisões do operador

Dessa forma, assim como os sistemas puramente térmicos, os sistemas hidrotérmicos têm as seguintes características:(Soares, 2008)

- **Acoplamento Temporal:** Decisões no presente afetam os custos de operação no futuro
- **Acoplamento Espacial:** A localização das usinas, ao contrário das usinas térmicas, importa para sua operação, já que grande parte dessas usinas estão dispostas em cascata numa mesma bacia hidrográfica. Então a operação de uma usina a montante em um rio afeta a operação das usinas a jusante.
- **Estocasticidade:** Existe incerteza quanto às afluições futuras, que se agrava conforme a extensão do planejamento.

B.2.1 Exemplo Numérico

Já num sistema onde há a presença de energia hidrelétrica (Figura 8), o custo operativo da usina hidráulica é nulo, logo a formulação do problema é:

$$C_{total} = \min(g_1 * c_1 + g_2 * c_2 + g_3 * c_3)$$

Sujeito às restrições:

$$g_h + g_1 + g_2 + g_3 = Demanda$$

$$g_1 \leq g_{1max}$$

$$g_2 \leq g_{2max}$$

$$g_3 \leq g_{3max}$$

$$g_h \leq g_{hmax}$$

Figura 7.4 - Exemplo de Sistema Hidrotérmico

Que para o exemplo numérico acima resultaria em um custo total de R\$80, já que a usina hidrelétrica geraria em sua totalidade e apenas a térmica t1 seria despachada. Já o Custo marginal de operação seria de 12 R\$/MWh, pois para o incremento de uma unidade na demanda, a usina t2 teria que ser despachada.

Entretanto, se considerarmos o caso acima em dois períodos consecutivos em que não há afluência para a usina hidráulica no segundo período, ela não poderia ser despachada, pois toda a água já havia sido utilizada, elevando o custo total da operação.

Num 1º período, o custo seria de:

$$G_h = 10MWh \text{ e } G_{t1} = 10MWh$$

$$C_1 = 10 * p_1 = R\$80$$

Já num 2º período, em que não há afluência para a usina hidráulica o custo seria de:

$$C_2 = 10 * p_1 + 5 * p_2 + 5 * p_3 = R\$215$$

Portanto o custo total da operação ficaria em:

$$C_T = C_1 + C_2 = R\$295$$

Conforme veremos adiante, esse não é o menor custo da operação quando considerados os dois períodos. Realizando-se os mesmos cálculos acima para diferentes quantidades de geração hidrelétrica no primeiro período chega-se à seguinte tabela com os resultados:

Tabela 7.1 - Diferentes resultados da operação para dois períodos

Decisões na Etapa 1 (MWh)				Custo no Período 1 (R\$)	Custo no Período 2 (R\$)	Custo total (R\$)
H	T1	T2	T3	C1	C2	C1+C2
10	10	0	0	80	215	295
8	10	2	0	104	185	289
6	10	4	0	126	155	281
4	10	5	1	155	126	281
2	10	5	3	185	104	289
0	10	5	5	215	80	295

Percebe-se que para o exemplo em tela, existem duas decisões para as quais o custo total é otimizado.

O Custo Imediato corresponde às despesas decorrentes das decisões presentes, tais como o pagamento do combustível a ser utilizado para a geração em usinas termoeletricas. Logo, é fácil determiná-lo.

Para saber qual é o Custo Futuro, por sua vez, teria que se saber o que ocorrerá nos próximos anos. No sistema brasileiro, entretanto, o Custo Futuro depende das afluições (vazões) que vão ocorrer nos rios em que estão instaladas as usinas hidroelétricas. E as vazões, da mesma forma que o clima, tem alto grau de incerteza.

Resta então, como a única forma de se ter uma indicação do custo futuro, estudar o comportamento estatístico das afluições.

B.3 Critérios de otimização

O objetivo principal no modelo atual de otimização é minimização da função de custo total da operação, que simplesmente é a soma da função de custo presente com a função de custo futuro. A função de custo futuro engloba o custo dos combustíveis fósseis mais o custo

de déficit, que representa as perdas financeiras para o país, decorrentes da falta de energia. A figura 10 abaixo ilustra as curvas dessas funções:

Figura 7.5 - Curvas de custo de operação(ONS-Conheça o Sistema - Mapas do SIN, 2014)

Na figura acima, o eixo das abcissas representa o armazenamento ao final de um estágio e o custo no eixo das ordenadas. Percebe-se que o custo ótimo da operação é onde a derivada da função de custo total é nula.

Portanto:

$$FCT = FCF + FCI$$

Como a operação ótima é onde a derivada da função de custo futuro é nula, temos:

$$\frac{\partial (FCF + FCI)}{\partial V} = \frac{\partial FCF}{\partial V} + \frac{\partial FCI}{\partial V} = 0; \quad \frac{\partial FCF}{\partial V} = -\frac{\partial FCI}{\partial V}$$

Ou seja, a operação ótima ocorre quando as derivadas das Funções de custo imediato e de custo futuro são simétricas.