



**XXIV SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GCR/26

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO 6 - GCR**

**GRUPO DE ESTUDO DE COMERCIALIZAÇÃO, ECONOMIA E REGULAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA- GCR**

**ANÁLISE DA COMPETITIVIDADE NO MERCADO DE ENERGIA BRASILEIRO POR MEIO DE  
REDES COMPLEXAS**

**Guilherme Borin da Silva(\*)  
CCEE**

**Camilo Rodrigues Neto  
EACH-USP**

**RESUMO**

O presente informe técnico tem o objetivo de apresentar uma análise da competitividade no mercado brasileiro de energia por meio de um método baseado em redes, também chamadas de grafos, construídas pelas trocas de posições no ranking de comercialização, e posterior avaliação das métricas dessas redes. Foram utilizados os dados de volume de energia registrados no Ambiente de Comercialização Livre, na CCEE, pelos agentes da classe dos comercializadores de energia, no período entre 2006 e 2016.

Foram realizadas comparações entre os índices obtidos pela metodologia proposta e outros índices tradicionais de competitividade, como o Índice de Herfindahl-Hirschmann (HHI) e índices de concentração (CRx). Por fim foi feito um paralelo da evolução da competitividade sob a luz das alterações regulatórias mais relevantes ocorridas no período estudado.

**PALAVRAS-CHAVE**

Energia, Mercado de Energia, Competitividade, Redes Complexas, Grafos

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O mercado de energia brasileiro, em seu modelo atual, funciona em dois ambientes distintos de comercialização de energia, um Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e um Ambiente de Contratação Livre (ACL). No ACL os agentes negociam bilateralmente a compra e venda de energia conforme as regras de comercialização vigentes, portanto há nesse ambiente uma maior liberdade de competição. Nesse ambiente, há a atuação de comercializadores de energia que fazem a intermediação das negociações entre consumidores e produtores, oferecendo mais flexibilidade e liquidez ao mercado.

Um dos motivadores do estudo da economia é a avaliação da atuação governamental e regulatória nos mercados e uma das possíveis falhas de mercado na busca da competição perfeita 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.

O estudo de rankings não é algo recente nos conceitos estatísticos, tendo como trabalho seminal o estudo de Kendall (1) de 1938 que propôs uma medida para comparação de rankings, sendo 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 com o objetivo de 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

(\*) Avenida Paulista, n° 2064 – 13º Andar – CEP 01310 - 200 São Paulo, SP, – Brasil

Tel: (+55 11) 3175-6422 – Cel: (+55 11) 98141-8855 – Email: [guilherme.borin@ccee.org.br](mailto:guilherme.borin@ccee.org.br)

Disclaimer: O conteúdo deste trabalho é de responsabilidade dos autores e não representa posicionamento oficial da CCEE.

teoria dos grafos. 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 pelos matemáticos Paul Erdős e Alfred Renyi (2). Mais recentemente, estudos propuseram alterações no modelo de grafos aleatórios, criando o modelo de redes *Small World* (3) e posteriormente o modelo de redes livres de escala (4). 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 temas citados acima com uma aplicação do método de análise de rankings por meio do uso de grafos de competitividade, proposto por Regino Criado (5) 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 2016.

## 2.0 - METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia utilizada para análise neste informe técnico é a proposta por Regino Criado no artigo *A new method for comparing rankings through complex networks: Model and analysis of competitiveness of major European soccer leagues* (5) que utiliza os conceitos de modelagem de redes para avaliar a competitividade em um ranking específico, no caso, a metodologia foi utilizada para a avaliação da competitividade em ligas de futebol europeias. Esse método consiste, resumidamente, em se criar uma rede por meio de trocas de posições no ranking, onde cada ponto da rede (nó) é um membro do ranking e cada troca de posição é representada por meio de uma conexão (aresta) entre esses pontos.

### 2.1 Grafos de Competitividade

A teoria dos grafos é o nome formal que se dá ao campo da matemática que estuda as redes. Basicamente, um grafo é formado por um conjunto de nós que se conectam por meio de arestas. Ao se analisar a estrutura resultante desses relacionamentos pode-se obter conclusões acerca do objeto de estudo que gerou a rede. No caso, será estudada a competitividade, utilizando-se a rede gerada por meio da regras a seguir.

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  $c_{t+1}$ . (5)

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 criada uma aresta 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, ou seja, não há diferença entre uma aresta  $(i, j)$  e  $(j, i)$

No exemplo abaixo consideremos um conjunto com 5 nós, nomeados de A, B, C, D e E com a seguinte família de rankings:  $c_1: (A, B, C, D, E)$ ,  $c_2: (B, A, C, D, E)$ ,  $c_3: (B, A, D, C, E)$  e  $c_4: (D, E, A, B, C)$ , 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 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.

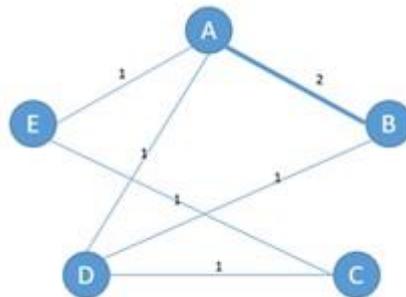


Figura 1 - Grafo de competitividade da família de rankings  $\mathcal{R}$

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.

## 2.2 Métricas de um grafo de competitividade

Podem ser obtidas medidas estruturais de um grafo, ou métricas, por meio da maneira com que seus elementos se relacionam através de suas conexões. A seguir são apresentadas as métricas utilizadas nesse estudo.

### 2.2.1 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:

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

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 médio de vezes que os componentes de um grafo trocaram de posição. Quanto maior o grau médio normalizado, mais competitivo é o grafo.

### 2.2.2 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.

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

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

### 2.2.3 Coeficiente 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  $i$ .

$$C_i = \frac{e_i}{\binom{K_i}{2}},$$

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:

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

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

### 2.2.4 Coeficiente de correlação de Kendall aplicado a redes

Diferentemente das métricas anteriores, que são oriundos dos estudos dos parâmetros de centralidade de grafos, o coeficiente de correlação  $\tau$  é proveniente do estudo de rankings de Kendall (1). 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  $\binom{n}{2}$  (1).

Define-se o Coeficiente de Kendall Generalizado  $\tau(\mathcal{R})$  para uma família de  $r > 2$  rankings da seguinte forma (8):

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

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.

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

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. (5)

### 3.0 - MÉTRICAS TRADICIONAIS

#### 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:

$$p_{it} = \frac{q_{it}}{q_t}.$$

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:

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

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. Conforme  $k = 4$  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)

#### 3.2 Índice de Herfindahl Hirschmann

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 ( $S_i$ ).

$$H = \sum_{i=1}^N S_i^2.$$

Portanto, em um mercado monopolista, a firma tem 100% de participação, logo o HHI máximo é de  $100^2 = 10000$ . Já se houver duas firmas com 50% de participação, o índice cai para  $50^2 + 50^2 = 5000$  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. (7)

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 elasticidade<sup>1</sup> no curto prazo, e um alto índice HHI combinado com baixa elasticidade de demanda geraria uma proporção improvável de receita/lucro.

<sup>1</sup> 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.

## 4.0 - APLICAÇÃO

### 4.1 Base de dados

Para realização da análise foram obtidos os dados públicos de contratos de compra e venda de todos os comercializadores de energia contabilizados no ambiente de comercialização livre (ACL) do mercado de energia brasileiro pela CCEE de janeiro de 2006 a dezembro 2016 disponíveis no site da CCEE (11).

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.

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

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 contém um ranking mensal dos agentes comercializadores de 2006 a 2016.

A partir desse conjunto de dados pôde-se obter a figura 2 que mostra a evolução da quantidade de agentes comercializadores para cada mês, bem como o volume de energia comercializada por esses agentes.

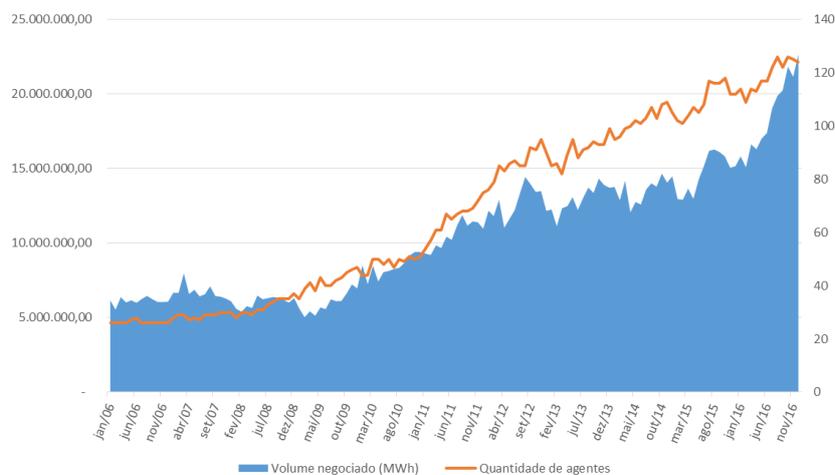


Figura 2 - Evolução do número de comercializadores e quantidade de energia comercializada mensalmente (valores em MWh).

Posteriormente foi realizada uma análise da evolução de concentração de mercado. 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 obtido o gráfico ilustrado na figura 3, 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 a concentração e o mercado se encaminha para uma estrutura de oligopólio moderada.

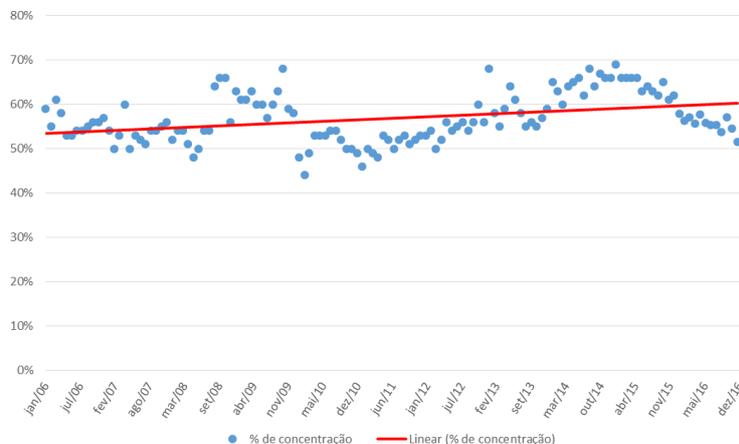


Figura 3 - Evolução da concentração de mercado.

Ao aprofundar a análise dos dados foi verificado que alguns agentes comercializadores permaneciam inativos, por muitos meses seguidos, impactando a análise de competitividade. Por esse motivo, foram excluídos os agentes que permaneceram mais de 6 meses consecutivos sem comercializar em um ano.

#### 4.2 Resultados obtidos

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 calculadas as métricas apresentadas na seção 2.2.

Tabela 1- Métricas de rede obtidas por meio do método de grafos de competitividade (Números em verde indicam os maiores valores do histórico e em vermelho, os menores.)

Ano	$GN(\mathcal{R})$	$C(\mathcal{R})$	$FN(\mathcal{R})$	$\tau(\mathcal{R})$	$\tau(\mathcal{R})_e$
2006	0,1667	0,8149	0,0226	- 0,0302	0,9548
2007	0,1994	0,6756	0,0300	- 0,0361	0,9399
2008	0,1749	0,7758	0,0198	- 0,0317	0,9604
2009	0,2248	0,7256	0,0313	- 0,0408	0,9374
2010	0,2378	0,7669	0,0309	- 0,0432	0,9381
2011	0,1593	0,7893	0,0202	- 0,0289	0,9597
2012	0,2611	0,7791	0,0300	- 0,0474	0,9401
2013	0,1421	0,7453	0,0193	- 0,0258	0,9615
2014	0,2010	0,7770	0,0220	- 0,0365	0,9561
2015	0,2183	0,7466	0,0241	- 0,0397	0,9518
2016	0,1788	0,7148	0,0234	- 0,0325	0,9531

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. Apenas o coeficiente de clustering médio não entra em consenso com as outras métricas para quais anos ocorreu maior ou menor competitividade.

#### 4.3 Análises gráficas

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 Frucherman-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 (9). A figura 4 ilustra essas representações.

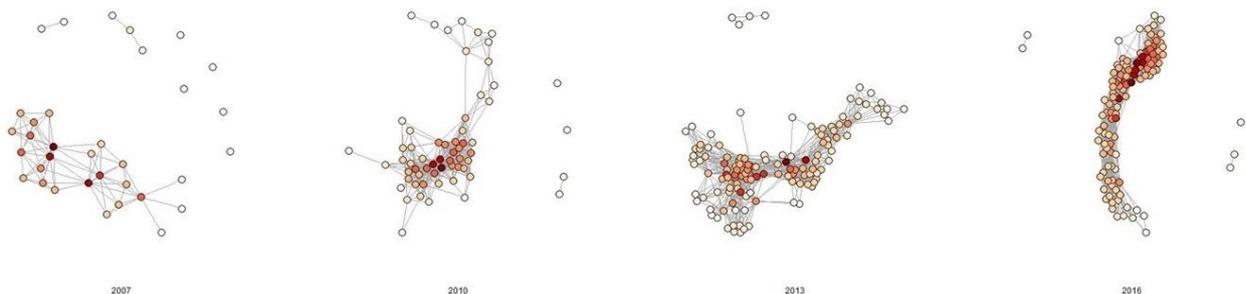


Figura 4 - Grafos de competitividade de 2007, 2010, 2013 e 2016. A cor representa o grau de cada nó, quanto mais escuro, maior o grau.

Percebe-se que, mesmo 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 5, no software de visualização de redes Gephi, separando-se os agentes em camadas de acordo com o seu Market Share onde a camada superior contém os 10% agentes com maior concentração de mercado e as demais 30% cada.

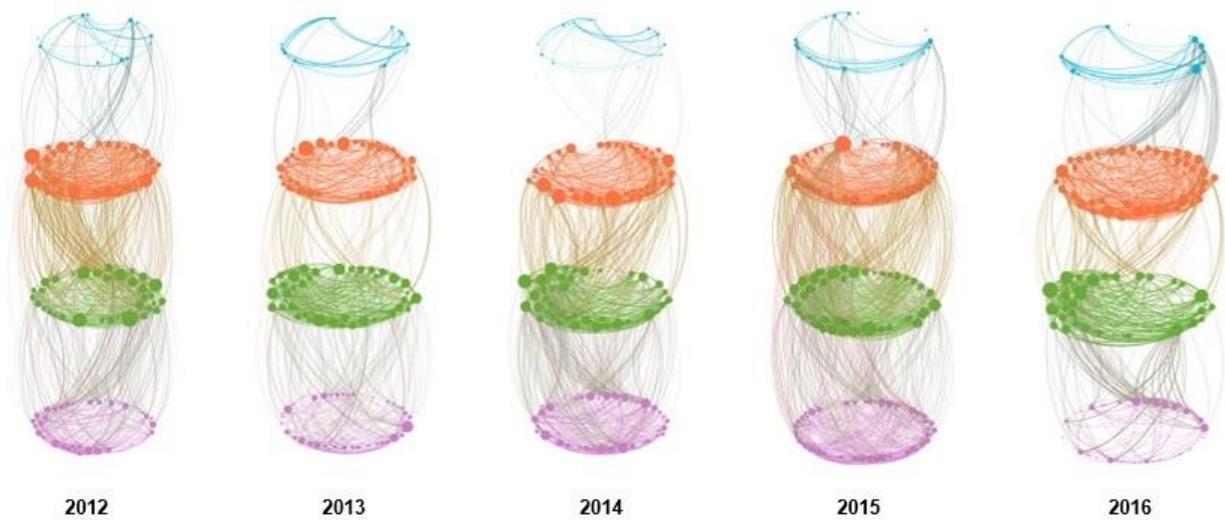


Figura 4- Grafos de competitividade de 2012 a 2016 separados em camadas de concentração de mercado. (cores ilustrativas para auxiliar na visualização das camadas)

Percebe-se que na faixa superior, há menos ligações entre os nós, 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 entre 2013 e 2015 os maiores agentes passam a se separar cada vez mais da rede e em 2016 há um maior aumento nas trocas com as camadas superiores.

## 5.0 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 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 e o Índice de Herfindahl Hirschmann (HHI).

Tabela 2 - Aplicação de métricas tradicionais de competitividade e concentração de mercado na base de dados na comercialização de energia.

Ano	HHI	CR(4)	CR(8)	CR10%
2006	1.355,73	63,2%	83,7%	54,0%
2007	1.176,63	61,5%	80,0%	52,6%
2008	1.113,35	60,3%	79,8%	60,3%
2009	901,23	52,4%	71,7%	58,1%
2010	682,90	42,6%	64,5%	54,9%
2011	491,61	34,5%	53,3%	53,3%
2012	409,65	31,5%	47,0%	58,0%
2013	482,46	35,7%	53,2%	68,5%
2014	515,62	37,4%	54,8%	68,3%
2015	549,58	40,0%	54,9%	67,0%
2016	383,84	31,2%	46,9%	62,0%

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.

### 5.2 Análise sob a luz de alterações regulatórias

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.

No início do período estudado, 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 de Kendall.

Na segunda metade de 2012, foram introduzidas três alterações na regulação, a Medida Provisória 579/2102, a Portaria MME 455 e a Resolução 531/2012. Essas medidas causaram fortes impactos na dinâmica de contratação entre os agentes. A Portaria MME 455 e a resolução 531/2012 exigiram um maior controle dos agentes sobre sua contratação, fechando espaço para que agentes 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.

No ano de 2016 houve divergência entre as métricas de rede e as métricas tradicionais. Ou seja, a competitividade caiu e o mercado ficou menos concentrado. Uma possível explicação é o aumento da quantidade de agentes consumidores pequenos no mercado nesse ano, o que levou ao surgimento de comercializadores especializados em varejo, reduzindo a concentração. Entretanto, esse aumento não foi suficiente para aumentar a mobilidade no ranking de comercialização.

## 6.0 - CONCLUSÕES

O presente trabalho propôs a aplicação da metodologia de grafos competitivos em um cenário de um mercado específico, no caso o mercado de comercialização de energia. Os resultados do método de Criado *et al* (5) 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.

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. Outra ideia seria avançar na análise de mais métricas de redes complexas.

## 7.0 - AGRADECIMENTOS

Agradeço aos colegas da Gerência de Monitoramento de Mercado, André Valverde, Bruno Apolinário, Regiane Yamanaka e Nilton Lima pelo auxílio e ao Gerente Executivo de Monitoramento, Gestão de Penalidades e Informações, Carlos Dornellas, pela revisão do texto e sugestões.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Kendall, M. G. A new measure of rank correlation. *Biometrika*. Junho de 1938, pp. 81-93.
2. Erdős, Paul e Rényi, Alfred. On random graphs. *Publicationes Mathematicae*. 1959, pp. 290-297.
3. Watts, Duncan J. e Strogatz, Steven H. . Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*. 4 de Junho de 1998, pp. 440-442.
4. Barabasi, Albert-Laszlo e Albert, Réka. Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*. Janeiro de 2002, pp. 47-95.
5. Criado, Regino, et al. A new method for comparing rankings through complex networks: Model and analysis of competitiveness of major European soccer leagues. *Chaos*. Outubro de 2013.
7. United States Department of Justice. USDOJ: Antitrust Division : Herfindahl-Hirschman Index. *United States Department of Justice*. [Online] 20 de 06 de 2014. <http://www.justice.gov/atr/public/guidelines/hhi.html>.
8. CCEE. Informações ao Mercado. *Site da CCEE*. [Online] 01 de 02 de 2016. [http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/o-que-fazemos/infomercado](http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/infomercado).
9. *Graph Drawing by Force-directed Placement*. Frutcherman, Thomas e Reingold, Edward M. março de 1991, Software - Practice and Experiment, Vol. 21, pp. 1129-1164.

## 9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Guilherme Borin da Silva** - Possui graduação em Engenharia Mecatrônica pela Universidade de São Paulo (2006) e mestrado em Modelagem de Sistemas Complexos pela Universidade de São Paulo (2016). Atualmente é analista de Monitoramento de Mercado na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Tem experiência na área de Mercados de Energia. Possui interesse em análises de sistemas complexos, especificamente os socioeconômicos, análises estatísticas de grandes volumes de dados, aprendizagem de máquina e cálculos de risco.

**Camilo Rodrigues Neto** - Formado em Física (graduação-1986, mestrado-1992 e doutorado-1997), é desde 2005 professor na EACH/USP. Trabalhou com Física de Plasmas, no desenvolvimento e caracterização de equipamentos para aplicações industriais (microeletrônica) e acadêmicas (fusão nuclear). Estudou a Formação de Padrões em sistemas convectivos-difusivos (mestrado/Unicamp) e em meios reativos-difusivos excitáveis (guest scientist/Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems/Alemanha em 2003). Interessado na Emergência da inteligência a partir de neurônios simples, estudou analítica e numericamente as propriedades de recuperação e categorização de redes neurais atratoras (doutorado/USP). Seu interesse atual é a análise e modelagem de sistemas socioeconômicos, políticos e biológicos, utilizando conceitos e técnicas das áreas genericamente denominadas de Sistemas Complexos, tais como Redes Complexas, Multiagentes e Multifractais.