



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

USO DE REDES COMPLEXAS PARA A AVALIAÇÃO DE RISCOS DE EXPOSIÇÃO NA COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

BRUNO APOLINÁRIO(1)
USP(1)

MARCELO LAURETTO(2)
USP(2)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma extensão aos métodos atuais de avaliação do risco de exposição financeira na comercialização de energia elétrica no ACL, através do uso de técnicas de visualização e análise de redes complexas. O modelo propõe dois tipos de indicadores de avaliação de risco. O primeiro, denominado indicador de risco local, decomposto em duas dimensões: risco de exposição intrínseca e risco de exposição propagada, apresentados em termos das métricas estatísticas VaR e CVaR. O segundo, denominado indicador de risco global, utiliza o conceito de comunidades em redes para avaliar o nível de exposição de um agrupamento de agentes comercializadores.

PALAVRAS-CHAVE

Comercialização de Energia Elétrica, Avaliação de Riscos de Mercado, Risco Sistêmico, Análise de Redes Complexas, Indicadores de Risco.

1.0 - INTRODUÇÃO

O Setor Elétrico Brasileiro vivencia uma nova reestruturação, embasada nas contribuições da Consulta Pública nº 33/2017 elaborada pelo Ministério de Minas e Energia (MME), em busca de melhores soluções que permitam a modernização do Setor, fundamentando-se na governança, estabilidade jurídico-regulatória, na previsibilidade e segurança do mercado. Em meio ao processo de mudanças, o mercado de energia elétrica presenciou, no início de 2019, a quebra de empresas comercializadoras, por firmarem contratos de venda a descoberto. Isto resultou em uma exposição financeira de mais de R\$ 200 milhões, transmitida de forma sistêmica a outros agentes, causando prejuízos e sérias preocupações ao mercado. Esse efeito dominó ocorre porque, quando uma empresa não honra suas obrigações contratuais, seja pelo não registro de contratos ou por insuficiência de lastro (na forma de garantias financeiras), isso implica na denominada não efetivação de contratos. Em ambos os casos, a contraparte compradora poderá ficar exposta à necessidade de comprar energia no Mercado de Curto Prazo (MCP), onde os preços podem ocasionalmente estar elevados, com impacto financeiro direto ao agente exposto.

A fim de aumentar a segurança no mercado de energia elétrica, diversas medidas de aprimoramento nas operações comerciais estão sendo estudadas. Por exemplo, pode-se citar o conjunto de Notas Técnicas¹ encaminhadas pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE à Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, propondo o aperfeiçoamento de mecanismos para a segurança do mercado de energia elétrica. Um dos pontos abordados nessas notas técnicas, foca especificamente na evolução dos indicadores de mercado.

Apesar dos recentes avanços nos instrumentos de avaliação de riscos, os indicadores atualmente utilizados não consideram os riscos decorrentes da propagação sistêmica, implicando em uma subestimação do risco financeiro total ao qual cada agente está exposto.

Para mitigar esta lacuna, este trabalho apresenta uma extensão aos métodos atuais de avaliação do risco de exposição financeira na comercialização de energia elétrica no Ambiente de Contratação Livre (ACL), através do uso de técnicas de visualização e análise de redes complexas. O principal objetivo é proporcionar um aumento na percepção do risco de exposição no MCP, para fins de monitoramento, através da utilização de novos indicadores.

O modelo propõe dois tipos de indicadores de avaliação de risco. O primeiro, denominado indicador de risco local, decompõe o risco de exposição financeira de cada agente em duas dimensões: (1) o risco de exposição intrínseca, que leva em consideração a exposição financeira baseada meramente na posição contratual do agente, em relação

¹ Nota Técnica nº42/2019 - Proposta de Aperfeiçoamento de Mecanismos para Segurança do Mercado de Energia, substituída em outubro de 2020 pela NT nº 86/2020 – Segurança de Mercado. Em agosto de 2021, a CCEE encaminhou à ANEEL a NT nº 4925/2021, sobre a Evolução do Monitoramento, em substituição à NT nº 86/2020.

ao seu respectivo recurso e requisito; e (2) o risco de exposição propagada, que avalia a exposição financeira potencial do agente decorrente da não efetivação de contratos por suas contrapartes vendedoras. A partir da composição dos riscos nessas duas dimensões, o modelo fornece a estimativa do risco de exposição total por agente. Esses riscos são estimados sob diferentes cenários simulados de preços de comercialização e apresentados em termos das métricas estatísticas VaR (Value at Risk) e CVaR (Conditional Value at Risk).

O segundo indicador, denominado indicador de risco global, utiliza o conceito de comunidades em redes complexas para avaliar o nível de exposição entre conjuntos de agentes comercializadores, com intuito de ranquear as redes de comercialização em função de seus respectivos níveis de exposição financeira.

Para ilustrar os ganhos de sensibilidade que o modelo proposto fornece em relação à percepção de riscos de exposição dos agentes, especialmente aqueles decorrentes de exposição sistêmica entre agentes comercializadores, apresentamos um estudo de caso baseado em uma rede sintética de comercialização de energia.

2.0 - DESENVOLVIMENTO CONCEITUAL

2.1 - Conceitos fundamentais:

As análises utilizadas neste trabalho, se fundamentam em quatro conceitos: (a) modelagem de redes complexas, (b) detecção de comunidades em redes (também denominado de modularidade), (c) métricas estatísticas VaR e CVaR e (d) exposição financeira no Mercado de Curto Prazo (MCP).

2.2 - Breve Introdução sobre Redes Complexas

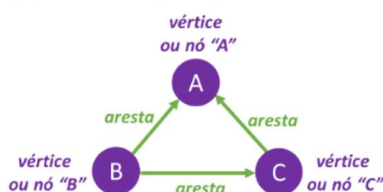
O estudo de sistemas complexos é um campo interdisciplinar que procura explicar como pequenas partes de um sistema se organiza, sem a existência de um controle central, gerando padrões, informações, se adaptando e até mesmo evoluindo. Diversos tipos de sistemas, dos mais variados campos da ciência, podem ser classificados como complexos, como por exemplo, cidades, redes sociais, ecossistemas, colônia de insetos, o cérebro (redes neurais), o sistema imunológico, a economia, o mercado financeiro, a internet, entre outros.

Esses sistemas possuem algumas características em comum, tais como: (1) possuem grande quantidade de agentes participantes; (2) comportamento coletivo, onde cada componente do sistema segue regras simples de comportamento individualmente, entretanto, quando analisado coletivamente, outros comportamentos emergem do sistema; (3) sinalização e processamento de informações, ou seja, esses sistemas geram informações para o exterior (sistemas abertos) e processam informações do exterior, podendo ser realimentados com as próprias informações geradas (*feedbacks*); (4) os sistemas são adaptativos, sendo capazes de mudar comportamentos através do aprendizado ou evolução.

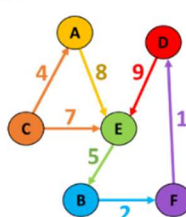
Uma das formas de se estudar sistemas complexos é por meio das redes complexas, apoiando-se nas definições e algoritmos da Teoria dos Grafos. Redes podem ser definidas como abstrações que nos permitem representar a interação entre objetos, possibilitando a coleta de informações locais e globais da rede. Esse conjunto de objetos são denominados de vértices ou nós da rede. Quando existe alguma interação entre esses objetos, pode-se representar tal interação por meio da conexão entre os vértices, denominada aresta, podendo-se ainda atribuir um peso à conexão. As arestas, podem ser do tipo não dirigidas, quando não apontam um sentido da interação entre vértices, ou dirigidas, quando apontam o sentido da interação. A Figura 1- (a) ilustra os elementos de um grafo dirigido (vértices e arestas). A Figura 1- (b) mostra um exemplo de grafo dirigido com arestas ponderadas. Na Figura 1- (c) tem-se a representação matricial do grafo dirigido da Figura 1- (b). No presente trabalho, as representações comerciais de compra e venda de energia, bem como a transferência de montantes relacionados aos riscos de exposições financeiras entre contrapartes, serão apresentadas de forma semelhante.

Por fim, existe o conceito de detecção de comunidades, Figura 1- (d), referindo-se à divisão dos vértices de uma rede em grupos (comunidades), de acordo com o padrão de arestas da rede. Existem diversos algoritmos para a detecção de comunidades², os quais procuram dividir os vértices de modo que os grupos formados fiquem firmemente entrelaçados com muitas arestas dentro dos grupos e poucas arestas nas extremidades entre grupos.

(a) Elementos principais de um Grafo



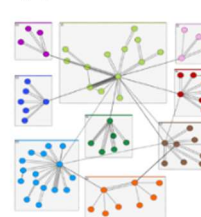
(b) Grafo Valorado



(c) Matriz de Adjacência

	A	B	C	D	E	F
A	0	0	0	0	8	0
B	0	0	0	0	0	2
C	4	0	0	0	7	0
D	0	0	0	0	9	0
E	0	5	0	0	0	0
F	0	0	0	1	0	0

(d) Comunidades



² Neste trabalho utilizou-se o software Gephi (<https://gephi.org>) para a detecção de comunidades. Esse software faz uso de um algoritmo de detecção de comunidades denominado de *Fast Greedy*.

FIGURA 1 – Elementos principais para a modelagem e análise de redes. Elaborado pelos autores, 2021.

Um último conceito sobre redes que se pode mencionar refere-se ao grau de entrada e saída de um vértice. Para um grafo não direcionado, seja $A(i, j)$, os elementos de adjacência de um grafo G , o grau, k_i , é definido como a cardinalidade do conjunto de todos os vértices adjacentes a i , conforme Equação 1.

$$k_i = \sum_{j=1}^N A(i, j) = \sum_{j=1}^N A(j, i) \quad (1)$$

Para o caso de um grafo direcionado, denota-se grau de entrada, k_i^{in} , o número de arestas que incidem sobre um determinado vértice do grafo G , conforme Equação 2. O grau de entrada, neste trabalho, representa a soma das exposições financeiras propagadas sistemicamente de um conjunto de agentes j para cada agente i .

$$k_i^{in} = \sum_{j=1}^N A_{(j,i)} \quad (2)$$

Ainda no caso de um grafo direcionado, denota-se grau de saída, k_i^{out} , o número de arestas que incidem sobre um determinado vértice do grafo G , conforme Equação 3. O grau de saída, neste trabalho, representa a soma das exposições financeiras propagadas sistemicamente de cada agente i para suas respectivas contrapartes j .

$$k_i^{out} = \sum_{j=1}^N A_{(i,j)} \quad (3)$$

2.3 - Exposição Financeira no MCP

O Mercado de Curto Prazo (MCP), segundo a REN 622/2014³ é a denominação do processo em que se procede à contabilização e liquidação das diferenças apuradas entre os montantes de energia elétrica: (i) contratados, registrados e validados pelos agentes da CCEE, cujo registro tenha sido efetivado pela Câmara e (ii) de geração ou de consumo efetivamente verificados e atribuídos aos respectivos agentes da CCEE. Compete, portanto, à CCEE contabilizar as diferenças entre o que foi produzido ou consumido e o que foi contratado, mediante consideração dos contratos e dos dados de medição registrados, promovendo a liquidação financeira dos valores decorrentes das operações de compra e venda de energia elétrica no MCP. O balanço energético de um agente é definido pela Equação 4.

$$NET_{a,s,j} = (TGG_{a,s,j} + MRE_{a,s,j} + TGGC_{a,s,j}) - (TRC_{a,s,j}) - (PCL_{a,s,j}) \quad (4)$$

Onde,

$NET_{a,s,j}$ é o balanço energético do perfil de agente “a” no submercado “s” para o período de comercialização “j”.

$TGG_{a,s,j}$ é a geração total do perfil de agente “a” no submercado “s” para o período de comercialização “j”.

$MRE_{a,s,j}$ representa a consolidação do resultado do Mecanismo de Realocação de Energia do perfil de agente “a” no submercado “s” para o período de comercialização “j”.

$TGGC_{a,s,j}$ é o consumo de geração total do perfil de agente “a” no submercado “s” para o período de comercialização “j”.

$TGGC_{a,s,j}$ é o consumo total do perfil de agente “a” no submercado “s” para o período de comercialização “j”.

$PCL_{a,s,j}$ é a posição contratual líquida por perfil de agente “a”, por submercado “s”, por período de comercialização “j”.

O resultado do balanço, que pode ser positivo ou negativo, implica em uma posição credora ou devedora de cada agente, denominada exposição do Mercado de Curto Prazo. Essa exposição pode oferecer riscos financeiros tanto para os próprios agentes diretamente relacionados, como também para o mercado (risco sistêmico). Esse tipo de risco normalmente é caracterizado pela contratação excessiva ou insuficiente de energia elétrica por um agente, atrelado à volatilidade do PLD (Preço de Liquidação das Diferenças).

É importante ressaltar que tanto a exposição negativa quanto a exposição positiva oferecem risco de prejuízo financeiro. Neste trabalho vamos focar apenas na exposição negativa, especificamente no cenário em que ocorre a venda excessiva de energia (requisito), sem a existência do recurso equivalente para equilibrar a operação.

³ Resolução Normativa ANEEL nº 622, de 19 de agosto de 2014 - Dispõe sobre as garantias financeiras e a efetivação de registros de contratos de compra e venda de energia elétrica, associados à comercialização no âmbito da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica e dá outras providências.

Um dos mecanismos para assegurar a viabilidade e a segurança do processo de comercialização de energia é a exigência de aporte de garantias financeiras⁴. Mensalmente, a CCEE informa os montantes de garantias financeiras que cada agente deve constituir, com base em suas operações de compra e venda de energia no período contabilizado e aplicando-se todas as apurações algébricas e regras de comercialização relativas ao processo da contabilização do MCP. Caso um agente não aporte a referida Garantia Financeira para a efetivação de seus contratos registrados, a CCEE fica autorizada a cancelar o registro do(s) contrato(s) até o limite dos valores não aportados, evitando que ocorra a inadimplência no âmbito do mercado. Um ponto relevante em relação ao não aporte das garantias financeiras é justamente o cancelamento do registro dos contratos de venda, implicando na exposição sistêmica mencionada anteriormente.

2.4 - Ferramenta convencional para a avaliação do Risco

Uma ferramenta convencional para a avaliação do risco de exposição financeira é a utilização das métricas estatísticas VaR e CVaR. O *Value at Risk* (valor em risco), ou simplesmente VaR é uma medida associada a um determinado nível de confiança, normalmente utilizada em mercados financeiros para representar perdas ou ganhos esperados. Por exemplo, para avaliar o risco de perda financeira a partir de uma distribuição estatística com cenários de preços $f(\omega)$, o VaR corresponde ao p -quantil (α_β) associado a um nível de confiança $\beta \in (0,1)$, onde β é o parâmetro de risco pré definido e α_β é o preço, tal que a probabilidade de existir um preço maior na mesma distribuição é $1 - \beta$. O risco de exposição financeira é obtido pelo produto entre α_β e o montante do balanço energético previsto. Deve-se atentar que o exemplo acima enfatiza um caso de avaliação de risco para um cenário em que o balanço energético é negativo, de modo que a utilização da abordagem da cauda direita da distribuição, com os maiores preços, faça sentido, ver Figura 2- (a).

Uma das maiores críticas ao VaR é inerente à metodologia, especialmente para distribuições assimétricas de cauda alongada. Nesses casos, com eventos extremos, o modelo não captura os piores cenários, ou seja, falha em capturar o que é conhecido como “risco final”. Para solucionar essa questão, utiliza-se o *Conditional Value at Risk* – CVaR, que fornece, para esse exemplo, a média dos piores cenários da distribuição de preços $f(\omega)$, resultando em uma noção mais apurada sobre o risco. Na Figura 2 - (b), $\varphi_\beta(x)$ é a esperança condicional da variável aleatória ω restrita a $\omega \geq \alpha_\beta(x)$ e $\alpha_\beta(x)$ é o preço, tal que a probabilidade de existir um preço maior na mesma distribuição é $1 - \beta$. O montante de exposição financeira correspondente ao CVaR é obtido a partir do produto entre o $\varphi_\beta(x)$ e o montante do balanço energético previsto.

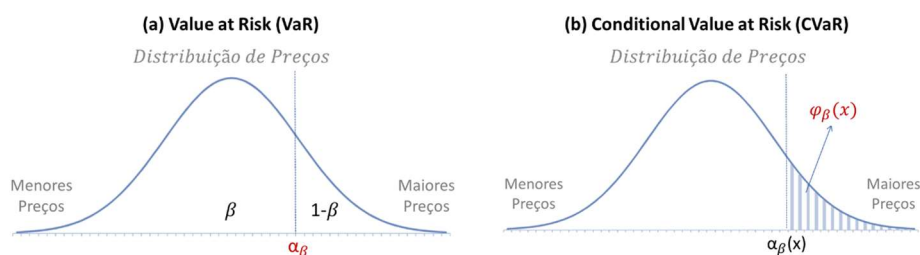


FIGURA 2 – Exemplo para a obtenção do VaR e CvaR de uma distribuição de preços $f(\omega)$ para a avaliação do risco de uma exposição financeira a partir de um balanço energético negativo. Elaborado pelos autores, 2021.

A CCEE disponibiliza para os agentes de mercado uma ferramenta para a avaliação do risco de exposição financeira pela métrica CVaR. Os detalhes sobre o procedimento de cálculo podem ser obtidos pelo manual⁵ da ferramenta, disponibilizado no site da empresa. Cabe mencionar que a ferramenta mencionada (Calculadora CVaR) utiliza apenas os cenários de preço disponibilizados pela CCEE, especificamente à “marcação ao modelo Spot”, sendo importante para um melhor gerenciamento de riscos a utilização de mais de uma única curva de preços, provenientes de outras metodologias (*forward*, por exemplo). Cabe mencionar também, que uma limitação dessa ferramenta é o fato dela apresentar apenas os montantes de exposição financeira relativas à posição contratual de um agente específico, ou seja, não contempla o risco no caso da não efetivação de contratos das contrapartes.

É exatamente nesse ponto que o trabalho se concentra, em apresentar uma metodologia para a avaliação do pior cenário de exposição financeira, decorrente do risco de contraparte vinculado à não efetivação de contratos e também uma posição média, em relação ao risco global da rede de comercialização ao qual o agente faz parte.

3.0 - DESCRIÇÃO DO MODELO PROPOSTO

3.1 – Avaliação do Risco Local

⁴ A obrigação de aporte de garantias financeiras visa evitar ou, no mínimo mitigar, o risco de inadimplência e está disciplinada no artigo 1º, parágrafo 6º, inciso II, da Lei nº 10.484/2004, no artigo 17, III, da Convenção de Comercialização de Energia Elétrica (Resolução ANEEL 109/04) e na Resolução Normativa ANEEL nº 622/2014.

⁵ Manual de utilização da Calculadora de Risco CVaR, disponível em (http://www.ccee.org.br/ccee/documentos/CCEE_578032).

A ideia central do modelo é considerar um cenário onde a contraparte vendedora possa não honrar seus compromissos, impactando, de forma sistêmica, seus vizinhos na rede de negociações.

Utilizou-se as métricas VaR e CVaR em duas dimensões: (a) **intrínseca** e (b) **propagada**. Denominou-se **risco de exposição intrínseca** aquele exclusivamente resultante da posição contratual de um agente, relacionado ao resultado do balanço entre seu recurso e requisito, semelhante à Calculadora CVaR disponibilizada pela CCEE. Denominou-se de **risco de exposição propagada** o efeito da propagação sistêmica de exposições provenientes de suas contrapartes vendedoras, pelos motivos já mencionados. A análise conjunta dessas duas dimensões denominou-se de **avaliação local**, pois atinge o risco financeiro particular de cada agente. Os gráficos resultantes dessa avaliação foram denominados de **indicadores locais**.

Para permitir a criação de indicadores que exemplificassem o aumento da percepção dos riscos de exposição nas dimensões mencionadas, desenvolveu-se um simulador para a construção de uma base de dados sintética, com as seguintes informações: (a) lista de agentes divididos em classes⁶, (b) geração (MWh), (c) consumo (MWh), (d) negociações comerciais (rede de comercialização com volume de energia em MWh, origem e destino) e (e) Preços (PLD e Contratos).

Utilizou-se como premissa para a criação da rede de comercialização a adoção de apenas três classes, com regras simplificadas, a fim de facilitar a implementação e por considerar que as premissas adotadas representariam bem a ideia do trabalho, sem prejuízos. A Tabela 1 elenca as premissas adotadas para cada classe.

TABELA 1 – Premissas adotadas para cada classe de agentes.

Classe	Sigla da Classe	Qtde.	Premissas
Consumidor	CS	600	consome e compra energia, porém não vende, nem gera energia.
Gerador	GE	350	gera, compra e vende energia, porém não consome.
Comercializador	CM	50	compra e vende energia, porém não gera nem consome energia.

Para a elaboração das análises, desenvolveu-se um simulador, em dois blocos de processamento, utilizando duas linguagens de programação: R e VBA. A linguagem R fez uso dos pacotes *igraph*, *tidyverse*, *bootstrap*, e *knitr*, representando a maior parte do esforço operacional, na manipulação de dados e geração de números aleatórios para a simulação de preços de compra, venda e PLD. A linguagem VBA foi utilizada para a parte do simulador que deu origem às negociações e para automatizar a consolidação dos resultados e tratamento de dados para relatórios. Para a elaboração dos gráficos, utilizou-se como ferramenta os softwares *R Studio*, *Tableau*, *Gephi* e *Excel*.

O modelo considerou 6 etapas: (1) organização da base de agentes, com sorteio do consumo e geração; (2) elaboração da rede de comercialização, por meio de simulação que definiu de forma aleatória as conexões entre contrapartes; (3) sorteio de preços (PLD e contratos), (4) cálculo do risco de exposição intrínseca, (5) cálculo do risco de exposição propagada e (6) consolidação de resultados.

Após organização da base de dados, o PLD e o preço dos contratos foram estimados através do método de *Bootstrap*, a partir de uma amostra da série histórica do PLD⁷, em que foram sorteadas 5 mil reamostras *bootstrap*. O preço sorteado para os contratos de compra e venda foram limitados em relação ao PLD sorteado, para garantir o efeito da exposição financeira.

O Algoritmo 1 apresenta os passos para a simulação do risco de exposição intrínseca. O resultado desse procedimento foi o valor da exposição financeira intrínseca de cada agente (*ExpoFint*), em valor percentual⁸, obtido como resultado da proporção entre a exposição financeira (Custo Esperado – Custo Efetivo) e o Custo Esperado. O objetivo foi mostrar o quão exposto financeiramente um agente ficou em relação ao seu resultado esperado.

⁶ Adotou-se por premissa a utilização de três classes (gerador, consumidor e comercializador), com regras simplificadas, a fim de facilitar a implementação e por considerar que as premissas adotadas representariam bem a ideia do trabalho, sem prejuízos.

⁷ Utilizou-se como base para a simulação a série histórica do PLD do ano de 2017, resultante da média entre os patamares de carga para o submercado sudeste. A escolha do ano e da quantidade de semanas (52) foi aleatória.

⁸ Os valores percentuais permitem a comparação entre agentes, para auxiliar na elaboração dos indicadores.

Algoritmo SIMULAÇÃO DO RISCO DE EXPOSIÇÃO INTRÍNSECA**Entrada:****VRec, VReq:** Vetores contendo o recurso e o requisito de cada agente**PLD, PrC:** PLD e preços de compra sorteados**Saída:****ExpVInt:** Vetor de tamanho N ; **ExpVInt**(a) é o volume de exposição (MWh) intrínseca do agente a **ExpFInt:** Matriz $N \times B$; **ExpFInt**(a, b) é o percentual de exposição financeira intrínseca do agente a no b -ésimo cenário da simulação

```

1 início
2   /* Iteração sobre os agentes
3   para  $a \in \{1, \dots, N\}$  faça
4     /* Exposição em volume: recurso - requisito
5     ExpVInt( $a$ )  $\leftarrow$  VRec( $a$ ) - VReq( $a$ )
6     /* Interesse: agentes expostos negativamente
7     se ExpVInt( $a$ ) < 0 então
8       /* Iteração sobre os cenários
9       para  $b \in \{1, \dots, B\}$  faça
10        /* Custo esperado sobre o requisito total de energia
11        CstEsp( $a, b$ )  $\leftarrow$  VReq( $a$ ) PrC( $a, b$ )
12        /* Custo efetivo sobre o recurso total de energia
13        CstEfet( $a, b$ )  $\leftarrow$  VRec( $a$ ) PrC( $a, b$ ) - ExpVInt( $a$ ) PLD( $b$ )
14        /* Exposição financeira: diferença percentual entre o custo
15        efetivo e o custo esperado
16        ExpFInt( $a, b$ )  $\leftarrow$  [CstEsp( $a$ ) - CstEfet( $a$ )] / CstEsp( $a$ )  $\times$  100
17      fim
18    fim
19  fim
20  retorna ExpVInt, ExpFInt

```

FIGURA 3 – Algoritmo 1, com a simulação do risco de exposição intrínseca. Elaborado pelos autores, 2021.

Onde,

 a : agentes analisados, onde $a \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$. b : número de iteração para a simulação e sorteio de preços, onde $b \in \{1, \dots, B\}$. $CstEsp_{a,b}$: custo esperado em cada interação b . $CstEfet_{a,b}$: custo efetivo em cada interação b .A avaliação do risco de exposição propagada de cada agente (*ExpoFint*) é obtida a partir do Algoritmo 2.

No Algoritmo 2, para cada agente da rede, se verificou primeiramente os que estavam expostos negativamente, pois representaram o conjunto de potenciais propagadores de exposição. Em seguida, analisou-se o limite que cada agente vendedor a_v pode propagar para suas contrapartes compradoras a_c . O resultado desse passo forneceu um valor percentual com a proporção de energia que pode ser propagada, *PropExpVProp*. A variável $ExpVRec_{(a_v, a_c)}$ é responsável por reorganizar o portfólio de recursos do agente comprador, considerando cada uma das exposições recebidas.

Algoritmo SIMULAÇÃO DO RISCO DE EXPOSIÇÃO PROPAGADA**Entrada:****VCom, VVen:** Vetores contendo os volumes comprado e vendido por cada agente**VGer, VCons:** Vetores contendo os volumes gerado e consumido por cada agente**VRec, VReq:** Vetores de recursos e requisitos de cada agente**ExpVInt:** Vetor de exposição intrínseca em volume por agente**MNeg:** Matriz de negociações, em que **MNeg**(a_i, a_j) é o volume vendido pelo agente a_i para o agente a_j , $a_i, a_j = 1, \dots, N$ **PLD, PrC:** PLD e preços de compra sorteados**Saída:****ExpVProp:** Matriz em que **ExpVProp**(a_i, a_j) é o volume de exposição que o agente a_i propaga para o agente a_j , onde $a_i = a_j = 1, \dots, N$ **ExpFProp:** Matriz em que **ExpFProp**(a, b) é o percentual de exposição financeira total que o agente a recebe dos demais agentes no b -ésimo cenário da simulação, $a = 1, \dots, N, b = 1, \dots, B$

```

1 início
2   /* Cálculo dos volumes de exposição negativa propagados
3   para  $a_v \in \{1, \dots, N\}$  faça
4     se ExpVInt( $a_v$ ) < 0 então
5       /* Volume total propagado é limitado pelo volume vendido
6       LimExpVProp( $a_v$ )  $\leftarrow$  (-1) min(-ExpVInt( $a_v$ ), VVen( $a_v$ ))
7       para  $a_c \in \{1, \dots, N\}$  faça
8         PropExpVProp( $a_v, a_c$ )  $\leftarrow$  LimExpVProp( $a_v$ ) / MNeg( $a_v, a_c$ )
9         ExpVProp( $a_v, a_c$ ) = ExpVInt( $a_v$ ) PropExpVProp( $a_v, a_c$ )
10      fim
11    fim
12  fim
13  /* para  $a_c \in \{1, \dots, N\}$  faça
14    ExpVRec( $a_c$ )  $\leftarrow$   $\sum_{a_v=1}^N$  ExpVProp( $a_v, a_c$ )
15    se ExpVRec( $a_c$ ) < 0 então
16      para  $b \in \{1, \dots, B\}$  faça
17        /* Custo esperado da energia comprada
18        CstEsp( $a_c, b$ )  $\leftarrow$  VCom( $a_c$ ) PrC( $a_c, b$ )
19        /* Custo efetivo da energia comprada
20        CstEfet( $a_c, b$ )  $\leftarrow$  (VCom( $a_c$ )) PrC( $a_c, b$ ) + ExpVProp( $a_c$ ) PLD( $b$ )
21        /* Exposição financeira: diferença percentual entre o custo
22        efetivo e o custo esperado
23        ExpFProp( $a_c, b$ )  $\leftarrow$  [CstEsp( $a_c, b$ ) - CstEfet( $a_c, b$ )] / CstEsp( $a_c, b$ )  $\times$ 
24        100
25      fim
26    fim
27  fim
28  retorna ExpVProp, ExpFProp

```

FIGURA 4 – Algoritmo 2, com a simulação do risco de exposição propagada. Elaborado pelos autores, 2021.

Onde,

 a : agentes analisados, onde $a \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$. b : número de iteração para a simulação e sorteio de preços, onde $b \in \{1, \dots, B\}$. j : agentes contrapartes, onde $j \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$. a_v : agente vendedor, onde $a_v \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$. a_c : agente comprador, onde $a_c \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$. $LimExpVProp_{(a_v)}$: limite de exposição que um agente vendedor pode propagar para suas contrapartes. $PropExpVProp_{(a_v, a_c)}$: valor percentual que representa uma fração ou valor integral do montante de exposição propagada em relação ao montante total negociado entre o agente vendedor a_v e o comprador a_c . $MNeg_{(a, j)}$: matriz de negociações, com o volume de energia vendido pelo agente a para o agente j . $ExpVProp_{(a_v, a_c)}$: volume total de energia propagada pelo agente vendedor a_v e o comprador a_c .

$ExpVRec_{(a_v, a_c)}$: volume de energia do Recurso do agente comprador a_c , considerando o impacto das exposições propagadas $ExpVProp_{(a_v, a_c)}$.

$CstEsp_{(a_c, b)}$: custo esperado do agente comprador a_c em cada interação b .

$CstEfet_{(a_c, b)}$: custo efetivo do agente comprador a_c em cada interação b .

$ExpFProp_{(a_c, b)}$: exposição financeira propagada para cada agente comprador a_c nas b interações da simulação.

Após obtidas as matrizes de exposição intrínseca ($ExpoFint$) e propagada ($ExpoFProp$) foi calculado o VaR intrínseco de cada agente da rede, correspondente ao P95% dos dados ordenados de $ExpoFint$ e o VaR propagado, de igual forma, correspondente ao P95% dos dados ordenados de $ExpoFProp$. O CVaR intrínseco foi obtido pela Equação 5 e o CVaR propagado foi obtido pela Equação 6.

$$CVaRIntr_a = \frac{\sum_{i=N \times 0,95}^N ExpFInt_a}{N \times 0,05} \quad (5)$$

$$CVaRProp_a = \frac{\sum_{i=N \times 0,95}^N ExpFProp_a}{N \times 0,05} \quad (6)$$

3.2 – Avaliação do Risco Global

O propósito desta etapa foi quantificar e classificar as comunidades existentes, para em seguida (i) calcular o risco de exposição média da rede global, (ii) calcular o risco de exposição média para cada comunidade e (iii) ranquear as redes da maior exposição para a menor exposição. Utilizou-se o software Gephi para o mapeamento das comunidades e, posteriormente, o software Excel para os demais cálculos.

4.0 - RESULTADOS

A Figura 5 mostra a parcela dos agentes da rede de comercialização que receberam exposição. O gráfico tem por objetivo mostrar uma relação entre a posição dos agentes sem considerar o risco sistêmico e o percentual de exposição financeira ao qual estão sujeitos. A cor verde representa exposição positiva, a amarela, igual ou próximo de zero e a vermelha, exposição negativa. Essas cores estão atreladas à posição inicial dos agentes. O eixo horizontal do gráfico representa a exposição financeira sistêmica. O valor em percentual refere-se à razão entre requisito e exposição.

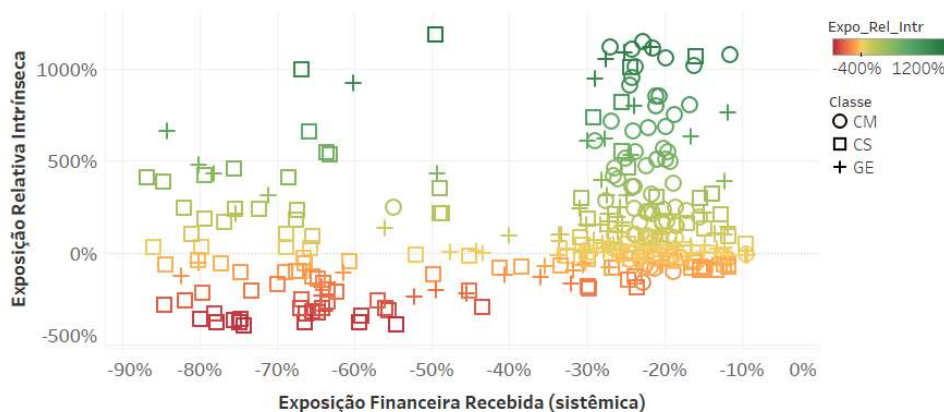


FIGURA 5 – Relação entre a exposição intrínseca e propagada na simulação. Elaborado pelos autores, 2021.

A Figura 6 ilustra a rede de comercialização de energia contendo o conjunto de agentes propagadores de exposição negativa e agentes afetados por exposições. A rede foi elaborada a partir dos resultados do simulador inseridos no software Gephi, onde se obteve a classificação das comunidades de comercialização existentes na rede. Na imagem, os nós mais expressivos (maiores) representam os agentes propagadores de exposições, e as cores representam comunidades, dezoito no total, ranqueadas em função do CVaR Propagado médio de cada rede.

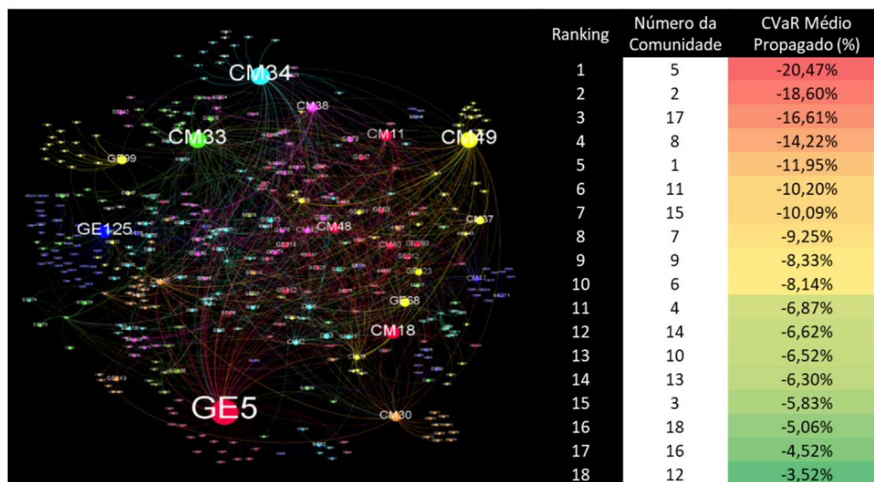


FIGURA 6 – Ilustração da rede de comercialização de energia contendo o conjunto de agentes propagadores de exposição negativa e agentes afetados por exposições. Elaborado pelos autores, 2021.

A Figura 7 ilustra um painel contendo a visualização dos indicadores abordados no trabalho para a avaliação local e global. Os valores das métricas VaR e CVaR intrínseco, propagado e total foram posicionados nessa ordem para proporcionar um aumento da sensibilidade ao risco de exposição. A “visão global”, indicador que apresenta a visão da rede de comercialização, permite uma visão mais ampliada do risco sistêmico.

Agente	Visão Local						Visão Global		
	VaR Intrínseco	CVaR Intrínseco	VaR Propagado	CVaR Propagado	VaR TOTAL	CVaR TOTAL	Risco Sistêmico (MWh)	CVaR Médio Rede	Posição na Rede
CM47	-6%	-8%	-20%	-23%	-25%	-31%	-997094	-6,87%	11 de 18

FIGURA 7 – Painel com os indicadores propostos pelo trabalho: visão local (dimensões intrínseca e propagada) e global. Elaborado pelos autores, 2021.

Vale ressaltar que os valores percentuais apresentados pelo painel foram obtidos a partir de simulação de preços de compra, venda e PLD e posteriormente comparada a exposição financeira proveniente das métricas VaR e CvaR com o Requisito (custo esperado) de cada agente.

5.0 - CONCLUSÕES

Neste trabalho, explorou-se o problema de avaliação do risco de exposição financeira dos agentes de uma rede de comercialização de energia elétrica, no Ambiente de Contratação Livre (ACL). O risco de exposição abordado no trabalho refere-se aos casos em que um agente vendedor possa não honrar suas obrigações contratuais, seja pelo não registro de um contrato ou pelo não aporte de garantias financeiras, implicando no ajuste contratual que impacta diretamente as contrapartes compradoras desse agente, pois tais contrapartes poderão ficar sujeitas à necessidade de comprar energia no Mercado de Curto Prazo (MCP), à preços mais elevados.

Objetivando aprofundar o método de avaliação convencional de riscos de exposição, disponibilizado aos agentes pela Calculadora CvaR, foi proposta uma abordagem que faz uso de técnicas de modelagem de redes complexas, a fim de sugerir a adoção de novos indicadores para uma avaliação sistêmica do risco.

Apesar das simplificações impostas ao trabalho, os resultados obtidos sugerem que a utilização dos indicadores denominados como “locais”, agrupados na ordem VaR e CvaR intrínseco, propagado e total proporcionam boa percepção ao aumento da sensibilidade ao risco de exposição. Esses indicadores, se associados ao indicador que avalia o risco global da rede, pelo uso do conceito de comunidades, pode ser uma boa ferramenta para influenciar de forma positiva o comportamento entre as partes envolvidas nas negociações, trazendo mais segurança para as partes sujeitas ao tipo de risco específico analisado.

A abordagem de comunidades traz consigo alguns desafios, como por exemplo, a abordagem temporal da rede, a fim de se conseguir demonstrar a maturação ou transformações na rede, durante um período (quando for desejável o histórico evolutivo), objetivando elucidar comportamentos que fazem com que uma comunidade ora seja formada por um grupo de agentes e ora formada por outro grupo.

Visto que todas as informações foram simuladas, fica difícil fazer analogias sobre o padrão de comportamento nas negociações. Para trabalhos futuros é necessário tornar a modelagem da propagação do risco de exposição em um processo probabilístico, em que cada agente tenha uma probabilidade “P” de propagar sua exposição. Por exemplo, o indicador apresentado demonstra o pior cenário possível, em casos onde as contrapartes vendedoras não honram seus compromissos contratuais. Entretanto os níveis de exposição tendem a diminuir até o período de registro e validação dos contratos, de modo que faz-se necessário modelar a captura das frequências e amplitudes de comportamentos indesejados, para avaliar probabilidades desses eventos acontecerem, assim como correlações temporais e espaciais.

Espera-se que o presente trabalho sirva de contribuição para outros trabalhos que tenham a pretensão de estudar redes complexas atreladas à economia e avaliação de riscos provenientes das interações entre os agentes dessas redes, especialmente na comercialização de energia elétrica, que possui boas oportunidades para esse tipo de abordagem.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) APOLINÁRIO, B. F. R. Uso de redes complexas para a avaliação de riscos de exposição na comercialização de energia elétrica. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2020.
- (2) BOCCARA, N. Modeling Complex Systems. Springer Science & Business Media, 2010.
- (3) BORBA, E. M. Medidas de centralidade em grafos e aplicações em redes de dados. 2013.
- (4) CCEE. Nota Técnica 04925/2021 – Evolução do Monitoramento – Substitutivo da NT nº 86/2020.
- (5) CCEE. Procedimentos de Comercialização – Módulo 5 – Mercado de Curto Prazo – Submódulo 5.1 – Contabilização e Recontabilização. 2013. V. 1.1.
- (6) CCEE. Calculadora de Risco CvaR – Manual de utilização. 2018. Disponível em < http://www.ccee.org.br/ccee/documentos/CCEE_578032>. Acesso em: 10.01.2020.
- (7) CLAUSET, A. NEWMAN, M. E. J. MORE, C. Finding community structure in very large networks. Physical Review E, 2004.
- (8) CROUHY, M. GALAI, D. MARK, R. The essentials of risk management. McGraw-Hill. New York, 2006. V. 1.
- (9) EFRON, B. TIBSHIRA, R. J. An introduction to the bootstrap. CRC press, 1994.

- (10) NEWMAN, M. Networks: An Introduction. Oxford University Press, 2010.
- (11) ROUTERS. Briga de comercializadoras de energia vai à Justiça e deve impactar liquidação na CCEE. 2019. Disponível em <<https://br.reuters.com/article/businessNews/idBRKCN1R92HS-OBRS>>. Acesso em 28/03/2019.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



BRUNO FILIPE RAMOS APOLINÁRIO

Engenheiro Eletricista. Mestre em Modelagem de Sistemas Complexos - USP (2020). Graduado em Engenharia Elétrica - Universidade do Sul de Santa Catarina - Unisul (2013). Técnico em Eletrotécnica - Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC (2008). Atua a mais de 8 anos no Setor Elétrico Brasileiro. Estagiou na Eletrosul (2009), ONS (2013-2014) e desde 2014 atua na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE, exercido atividades nas áreas de Gerenciamento de Contratos (2014-2015), Monitoramento de Mercado (2015-2018) e Comercialização de Energia (desde 2018). Áreas de pesquisa e interesse de trabalho englobam inteligência de mercado, gerenciamento de riscos, planejamento energético, e modelagem de sistemas complexos.



MARCELO DE SOUZA LAURETTO

Graduado em Ciências da Computação pela UFMS (1992), mestre em Matemática Aplicada (1996) e doutor em Bioinformática (2007) pela USP. Professor Doutor (MS-3 Nível 2) da Universidade de São Paulo, na Escola de Artes, Ciências e Humanidades (área de Sistemas de Informação). Atuais áreas de pesquisa e atuação: Aprendizado de máquina; Avaliação quantitativa de risco microbiológico; Bioestatística; Estatística computacional; Métodos de amostragem; Redes complexas.