

## ROBUSTEZ E FRAGILIDADES DA REDE DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL

Gabriela da C. Martins<sup>1\*</sup>, Amanda C. A. Vilas Boas<sup>2</sup>, Fabricio L. Forgerini<sup>3</sup>.

1. Estudante de PIBIPCI UFSB, BI Ciências da Universidade Federal do Sul da Bahia
2. Estudante do IHAC – CPF da Universidade Federal do Sul da Bahia
3. Professor do IHAC – CPF da Universidade Federal do Sul da Bahia

### Resumo:

O estudo de redes complexas de diversos tipos tem atraído o interesse de um grande número de investigadores. Algumas redes tem sido foco de estudos específicos dados a sua importância estratégica e interesse econômico. As redes de transmissão e distribuição de energia elétrica são um exemplo, sendo neste trabalho estudadas algumas de suas características, como o grau médio, a distribuição de graus e o coeficiente de agrupamento. Obteve-se a estrutura espacial da rede elétrica Brasileira por meio do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), constituído por linhas de transmissão de alta tensão, usinas geradoras e subestações. As subestações locais de baixa tensão e a rede de distribuição foram negligenciadas. Surpreendentemente, a rede mostrou-se resiliente contra falhas aleatórias, uma vez que a remoção aleatória de ligações não afeta significativamente o tamanho do maior *cluster*.

**Autorização legal:** Por se tratar de um trabalho teórico, não foi necessária autorização legal para a execução do mesmo.

**Palavras-chave:** Redes complexas; Transmissão de energia; Modelagem e simulação computacional.

**Apoio financeiro:** Universidade Federal do Sul da Bahia e CNPq, por meio do Edital Universal 2016.

### Introdução:

Muitos fenômenos naturais podem ser descritos como um conjunto de elementos conectados entre si. A esse conjunto atribui-se o nome de rede complexa, a qual tem atraído interesse de estudo por pesquisadores das mais variadas áreas. Estudar essas redes complexas vem se tornando promissor, já que estas possuem aplicações em diversos campos de pesquisa.

As redes de energia são categorizadas como parte das redes complexas, nas chamadas redes tecnológicas, que nada mais são que um tipo de rede de suporte para o transporte de energia e informação [1]. Outros exemplos são as redes telefônicas e a internet. Devido à possibilidade de ocorrer falhas em larga escala quando surgem problemas de conectividade, dos quais podem resultar em apagões [2, 3, 4, 5], as redes de distribuição de energia tem sido alvo de inúmeras pesquisas nos últimos anos. Mesmo essas redes de distribuição sendo controladas por sistemas informatizados e por operadores humanos [6], as suas características estáticas podem ser estudadas e assim gerar informações importantes para direcionar investimentos privados ou públicos, bem como a prevenção contra falhas [7].

As redes de transmissão de energia elétrica são responsáveis pelo transporte de energia das usinas geradoras até os consumidores (comércio, indústrias, casas, etc.). Diversos fatores podem influenciar no funcionamento e desempenho dessas redes, sendo então, a análise desses fatores, junto à possibilidade de prevenção de falhas nesses sistemas complexos, interesse de estudos com aplicações comerciais além da pesquisa científica.

Estudou-se neste trabalho a topologia da rede complexa de distribuição de energia elétrica brasileira, por meio de sua caracterização e análise. Obteve-se a estrutura espacial da rede através do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), constituído pelas linhas de transmissão, usinas geradoras e as subestações. Negligenciou-se as subestações locais de baixa tensão. Também foram negligenciadas as características dinâmicas da rede elétrica como os processos eletromagnéticos e a interferência humana. As estações e subestações fora representadas por nós e as linhas de transmissão por ligações entre os nós. Ao serem indetificadas as principais informações topológicas pode-se usá-las para descobrir as fragilidades da rede,

bem como indicar melhorias para a mesma a fim de evitar os chamados *blackouts*.

Objetivou-se nesse trabalho, caracterizar e analisar a rede complexa de distribuição de energia elétrica brasileira.

### Metodologia:

A metodologia consistiu na caracterização da rede de energia elétrica. Os dados da rede brasileira de distribuição de energia foram obtidos por meio do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e da Eletrobrás. Construíram-se as redes complexas, considerando apenas as características estáticas da rede, excluindo as intervenções nos fluxos de energia.

A construção e caracterização foram feitas através dos conceitos da Teoria de Redes, onde cada fonte geradora fora identificada com um nó (um ponto) e cada linha de transmissão fora identificada como uma ligação entre os nós (uma linha). De forma que, a rede é uma coleção de pontos ligados entre si, caracterizando a rede de distribuição de energia.

A caracterização da rede se deu pelas suas principais medidas, como o grau médio (Eq. 1) onde  $q_i$  é o número de ligações do nó  $i$ , pela distribuição de graus  $P(q)$ , que é a probabilidade de um nó, escolhido de forma totalmente aleatória na rede possua um grau  $q$  (Eq. 2), onde  $N$  é o número total de nós da rede e  $\langle N\langle q \rangle \rangle$  é o número médio de nós da rede com o grau  $q$ , e o coeficiente de agrupamento médio que é a média de todos os coeficientes de agrupamentos locais, onde esse coeficiente é dado pela Eq. 3. Também se observou na caracterização o chamado *Betweenness Centrality*,  $b(m)$ , o número de menores caminhos entre os outros nós da rede que passam pelo nó  $m$  (Eq. 4), onde  $B(i, j) > 0$  é o número de caminhos mais curtos entre os nós  $i$  e  $j$ ,  $B(i, m, j)$  é o número de menores caminhos entre os nós passando pelo nó  $m$ .  $FN = 2/[N(N-1)(N-2)]$  é o fator de normalização proposto por Freeman [8].

$$\text{Eq. 1} \quad \langle q_i \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_i$$

$$\text{Eq. 2} \quad P(q) = \frac{\langle N\langle q \rangle \rangle}{N}$$

$$\text{Eq. 3} \quad \bar{c} = \left\langle \frac{2t_i}{q_i(q_i - 1)} \right\rangle = \sum_q P(q) \bar{c}(q)$$

$$\text{Eq. 4} \quad b(m) = FN \sum_{i \neq m \neq j} \frac{B(i, m, j)}{B(i, j)}$$

Para a análise da rede foram utilizados o Pajek e o Gephi, softwares próprios para o estudo de redes, onde por meio destes as grandezas descritas acima foram obtidas. Utilizou-se, também, o Microsoft Office Excel para a organização de planilhas e dados.

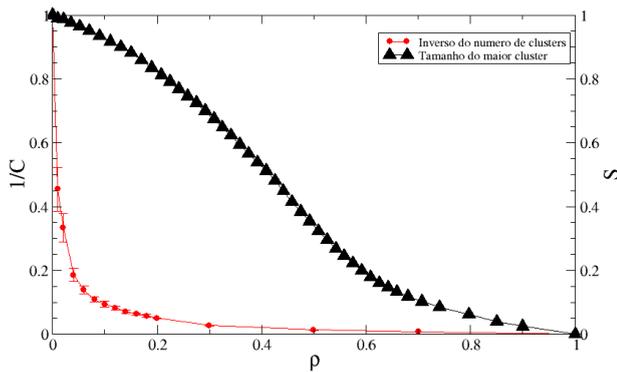
### Resultados e Discussão:

Os principais resultados da caracterização da Rede de elétrica Brasileira são mostrados na tabela 1. Podem-se observar as medidas topológicas mais básicas da rede.

**Tabela 1:** Principais resultados da análise topológica da Rede de energia Elétrica Brasileira.

| Características               | Valores Numéricos |
|-------------------------------|-------------------|
| Grau médio                    | 6,487             |
| Número de nós                 | 230               |
| Número de ligações            | 1492              |
| Coefficiente de agrupamento   | 0,174             |
| <i>Betweenness Centrality</i> | 0,438             |

Muita informação sobre a rede pode ser obtida através da sua distribuição de graus. Uma rede com distribuição de graus do tipo lei de potência com a forma  $P(q) \sim q^{-\gamma}$  com  $2 \leq \gamma \leq 3$ , é esperada que seja resiliente contra falhas aleatórias das suas ligações. Neste caso em específico foi obtida uma distribuição de graus não como lei de potência, mas como uma distribuição de graus exponencial. No entanto, observa-se que o tamanho do maior *cluster*  $S$ , decresce muito lentamente quando a fração de ligações retiradas aleatoriamente aumenta ( $p$ ), como mostrado no eixo direito da figura 1.



**Figura 1:** Medidas de conectividade da rede em função da fração de ligações removidas aleatoriamente,  $\rho$ . Mediu-se o inverso do número de componentes conectados na rede  $1/C$  (eixo ordenado esquerdo) e o tamanho do maior cluster  $S$  (eixo ordenado direito).

Esse resultado sugere que mesmo a rede tendo uma distribuição de graus exponencial, ela mantém grande parte de suas ligações e, portanto, funcional para falhas aleatórias em suas ligações.

A chamada componente conectada gigante da rede,  $C$ , decai muito rapidamente em função de  $\rho$ , dividindo a rede em vários conjuntos de nós isolados.

### Conclusões:

Neste trabalho estudou-se e analisou-se a Rede Brasileira de Transmissão de Energia Elétrica. Observa-se que a rede é fracamente conectada e bastante dependente de alguns nós para manter sua componente conectada gigante. A distribuição de graus da rede tem a forma exponencial e, com uma pequena fração de ligações removidas, se torna um conjunto de nós desconectados. Entretanto, esses conjuntos de nós desconectados não se caracterizam como uma grande parcela da rede, como pode ser observado pelo lento decaimento de  $S$  em função de  $\rho$ , fazendo com que a rede mantenha minimamente suas funções.

### Referências bibliográficas

[1] M. E. J. Newman, Networks, an Introduction, Oxford University Press, Oxford (2010).

[2] S. N Dorogovtsev, Lectures on Complex Networks, Oxford University Press, Oxford (2010).

[3] F. L. Forgerini, Interacting Agents and Stochastic Process on Complex Networks, LAP Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, Germany (2015).

[4] A. E. Motter, Phys. Rev. Lett. 93, 098701 (2004).

[5] I. Dobson, B. A. Carreras, V. E. Lynch, and D. E. Newman, CHAOS 7, 026103 (2007).

[6] D. J. Watts and S. H. Strogatz, Nature 393, 440 (1998).

[7] S. Arianos, E. Bompard, A. Carbone, and F. Xue, Chaos 19, 013119 (2009).

[8] L. C. Freeman, Sociometry 40, 35 (1977).