

ALTERAÇÕES TOPOLÓGICAS PARA REDUZIR A PROPAGAÇÃO DE FALHAS NA REDE ELÉTRICA DE ALTA TENSÃO

William Roberto de Paiva

Limeira/SP
Dezembro de 2013

ALTERAÇÕES TOPOLÓGICAS PARA REDUZIR A PROPAGAÇÃO DE FALHAS NA REDE ELÉTRICA DE ALTA TENSÃO

William Roberto de Paiva

Monografia apresentada para a Defesa de Mestrado em Tecnologia e Inovação pela Faculdade de Tecnologia da Unicamp sob orientação do Prof. Dr. André Franceschi de Angelis.

Limeira/SP

Dezembro de 2013

Dedico este trabalho a Deus, por todas as oportunidades que colocou diante de mim e a meus pais, Matilde e Vicente, pelo amor tão verdadeiro, por todo o incentivo e pela educação que me deram.

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar ao André, meu orientador, que com paciência leu e rabiscou este trabalho incontáveis vezes e deu conselhos profissionais e pessoais. Esteve sempre pronto pra ajudar. Quando eu crescer, quero ser como ele! Deixo também um agradecimento sincero a todos que direta ou indiretamente me ajudaram a concluir este trabalho, me apoiando e incentivando.

Já dediquei o trabalho a Deus, e O agradeço também. Sem Ele, ficaria sem rumo e sem forças.

Sumário

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica	4
2.1	Estudos em Redes Complexas	4
2.2	Robustez de Redes Complexas	5
2.3	Redes Complexas e Redes de Alta Tensão	8
2.4	A Atual Rede Brasileira	11
3	Metodologia	13
3.1	Coleta de Dados	13
3.2	Adição de Novas Linhas	14
3.3	Teste de Robustez	19
3.4	Ferramentas	20
4	Resultados	22
4.1	Grafos resultantes para cada estratégia	22
4.2	Aumento de eficiência na rede de alta tensão	25
4.3	Aumento de eficiência em redes <i>Scale-Free</i> e redes aleatórias	27
4.4	Resiliência a falhas planejadas e falhas aleatórias	28
5	Discussão	31
6	Conclusões	34
7	Trabalhos Futuros	36

Referências Bibliográficas	37
---	-----------

Lista de Figuras

Figura 3.1:	Mapa da rede brasileira de alta tensão	14
Figura 3.2:	Representação da estratégia MGr	15
Figura 3.3:	Representação da estratégia VVz	16
Figura 3.4:	Representação da estratégia CMd	17
Figura 3.5:	Representação da estratégia VMC	18
Figura 3.6:	Estratégias aliadas ao procedimento <i>min-cut</i>	18
Figura 4.1:	Grafos resultantes após a inserção de 50 arestas, utilizando as 4 estratégias	23
Figura 4.2:	Grafos resultantes após a inserção de 50 arestas, utilizando as 4 estratégias, com o auxílio do procedimento <i>min-cut</i>	24
Figura 4.3:	Grafo resultante pela inserção de 50 arestas através da AAI.	25
Figura 4.4:	Aumento de eficiência para adição de 50 arestas utilizando todas as estratégias	26
Figura 4.5:	Comparação entre a estratégia CMd sem e com <i>min-cut</i> diante do aumento trazido pela AAI	26
Figura 4.6:	Aumento de eficiência em 1000 grafos <i>Scale-Free</i> e 1000 Aleatórios	27
Figura 4.7:	Comparação entre aumento de eficiência na rede original e nas redes artificiais.	28
Figura 4.8:	Dano na rede para todas as estratégias diante de falhas aleatórias	29
Figura 4.9:	Dano na rede para todas as estratégias diante de falhas planejadas	29

Resumo

Neste trabalho, propõe-se a avaliação de quatro métodos que possam melhorar a resiliência de redes de alta tensão através da adição de linhas de transmissão, utilizando-se a Teoria das Redes Complexas. Criou-se um modelo da rede brasileira de geração e transmissão de energia elétrica em forma de grafo para testar os métodos. O primeiro deles consiste em ligar pares de vértices que possuam menor grau em toda a rede. O segundo liga os vértices de menor *betweenness*. O terceiro efetua ligações entre pares de vértices de menor grau que estejam ligados aos vértices de maior carga em toda a rede. O último, faz ligações entre os dois vértices de *betweenness* mediano. Todos os métodos foram testados com e sem o auxílio do procedimento "*min-cut*", capaz de identificar as arestas que, ao serem removidas, dividem a rede em duas sub-redes, permitindo assim efetuar ligações que reduzam o risco dessa divisão. Além dos testes no modelo da rede brasileira, utilizaram-se também 1000 redes *Scale-Free* e 1000 aleatórias para verificar o aumento de eficiência trazidos. Todos os métodos foram capazes de aumentar a eficiência, tanto no modelo da rede real quanto nos modelos artificiais. A estratégia de ligar os vértices de *betweenness* mediano com auxílio do *min-cut* trouxe o maior aumento. A resiliência da rede, diante de falhas planejadas e falhas aleatórias, foi aumentada em poucos casos, porém, em nenhum houve redução da mesma. Conclui-se que as estratégias propostas podem ser utilizadas para melhorar a eficiência de redes de alta tensão, mantendo ou aumentando sua resiliência, bem como podem ser usadas para trazer os mesmos atributos para redes complexas em geral.

Palavras-Chave: rede complexa, rede de alta-tensão, resiliência de rede, vulnerabilidade de rede, avaliação topológica.

Abstract

In this work we purpose to assess four methods to improve high-voltage networks resilience against failures and attacks, using the Complex Network Theory to do it. To test these methods, we created a network model in graph format, based on the Brazilian generation and transmission electrical network. The first of these methods consist in to link pairs of nodes which have the lowest degree in the network. The second creates a link betweenenn the lowest betweenness nodes. The third method is to link the two lowest degree nodes which are linked to the highest load nodes. The last one creates a link betweenenn the two nodes which has the median betweenness. All methods were tested with and without the use of the "min-cut" procedure. This procedure finds the lowest number of necessary links that, when removed, divide the network in two sub-networks. It allows us to identify these links and reduce the risk of this partitioning the network by adding new links. We also test the strategies in 1000 artificial Scale-Free networks and 1000 artificial Random networks to validate those methods. All strategies were able to increase efficiency, in the real and artificial networks models. The strategy which links the median betweenness nodes using the "min-cut" procedure brought the best results. The network resilience against planned and random failures was increased in in few cases, but no decreases was registered. We conclude that our strategies can be used to improve high-voltage network efficiency, keeping or improving its resilience, as they can be used to bring the same attribute to any type of complex networks.

Keywords: complex network, high-voltage network, power grid, network resilience, network vulnerability, topological assessment.

Glossário

Agrupamento: densidade de arestas ligadas a um vértice. Quanto mais interligados os vizinhos de um nó estejam entre si, maior será o agrupamento.

Aresta: é um relacionamento, uma ligação entre dois vértices em um grafo. Arestas podem ser simples, onde não se diferenciam umas das outras, ou ponderadas, indicando a intensidade da ligação.

***Betweenness*:** medida que representa a fração de menores caminhos que utilizam determinado vértice como intermediário. A medida também pode ser calculada para arestas, sendo assim a quantidade de menores caminhos que passam por estas.

Caminho Mínimo: é o caminho, entre dois vértices quaisquer, cuja soma dos pesos das arestas necessárias para se atingir um dos nós, partindo do outro, seja a menor possível. Quando não existe um caminho entre um par de vértices, considera-se então que este caminho tem valor infinito.

Capacidade: carga máxima que um vértice pode suportar antes de ser desativado na rede. Esta é uma medida utilizada em testes de robustez da rede.

Carga: vide *Betweenness*.

Centralidade de um Vértice: é o quanto um vértice está posicionado no centro de um grafo, em relação aos caminhos que o utilizam como intermediário. Algumas medidas de centralidade são o *Page Rank*, *Betweenness* e Proximidade.

Cluster: vide Agrupamento.

Componente: porção de um grafo onde existe ao menos um caminho para cada par de vértices. Se esta porção representa o grafo todo, diz-se que o grafo é conexo.

Componente Conexo: vide Componente.

Distância Geodésica (distância): vide Caminho Mínimo.

Diâmetro: calculando-se todos os menores caminhos entre todos os pares de vértices de um grafo, o maior desses caminhos é considerado como sendo o diâmetro.

Eficiência: a eficiência entre dois vértices é definida como o inverso da distância entre eles e mede o quão eficientemente os dois se comunicam.

Eficiência da Rede: é a média da eficiência entre todos os nós da rede.

Falhas Aleatórias: são falhas ocasionais em uma rede de alta tensão. No Brasil, é o único tipo de falha que se encontrou registros durante a pesquisa. Pode ocorrer devido a problemas em equipamentos de proteção, causas naturais (raios, ventanias, temperatura elevada, etc) ou falha humana.

Falhas Planejadas: são falhas causadas de forma intencional em uma rede de alta tensão. Exemplos de falhas desse tipo podem ser atos de vandalismo ou um ataque terrorista em um ponto estratégico da rede, visando causar o maior dano possível.

Grafo: um conjunto de vértices que podem ser ligados entre si através de arestas. Um grafo pode ser simples ou ponderado, quando possui valores (pesos) nas suas arestas, que representam a intensidade da ligação.

Grau de um Vértice: É a quantidade de vizinhos que determinado vértice possui.

Matriz de Adjacência: dado um grafo G com N vértices, não ponderado, pode-se representá-lo em uma matriz quadrada $N \times N$ $A(G) = [a_{ij}]$, onde o valor de a_{ij} indica se há (1) ou não (0) uma aresta entre i e j .

Matriz de Pesos: dado um grafo G com N vértices, pode-se representá-lo em uma matriz quadrada $N \times N$ $W(G) = [w_{ij}]$, onde o valor de w_{ij} representa o peso da aresta entre i e j . A matriz de pesos de um grafo não ponderado é equivalente à matriz de adjacência.

Nó: vide Vértice.

Page-Rank: vide Rank de Página.

Proximidade: indica o quão próximo um vértice está de todos os outros nós da rede, baseando-se na distância geodésica.

Rank de Página: algoritmo criado por Brin e Page (1998), que classifica a importância de um vértice em função da importância dos vértices que apontam para ele. É uma medida utilizada em grafos direcionados.

Rede Complexa: redes cujos vértices podem apresentar diferentes graus entre si.

Rede Aleatória (Ex: modelo Erdős-Rényi): rede complexa cuja probabilidade de existência de uma aresta entre qualquer par de vértices é a mesma para todos.

Rede Scale-Free (Ex: modelo Barabási-Albert): é uma rede complexa cuja distribuição de grau dos vértices exibe uma lei de potência.

Rede Small-World (Ex: modelo Watts-Strogatz): rede cujo diâmetro tem um valor relativamente baixo, ou seja, partindo-se de um determinado vértice pode-se chegar a outro por um número pequeno de passos.

Transitividade: probabilidade média de dois vértices que possuem um vizinho em comum possuam também uma aresta entre eles.

Vértice: representa um elemento da rede. Normalmente, é ilustrado como sendo um ponto.

1 Introdução

A maioria dos apagões inicia-se por falha em apenas um ponto da rede, que gera uma reação em cadeia. Quando, por exemplo, uma linha de transmissão deixa de funcionar, a demanda de carga naquela linha será exigida das linhas adjacentes a ela. Se alguma destas linhas não suportar sua nova carga, poderá também parar de funcionar [1]. Distúrbios não contidos por dispositivos de segurança também podem se espalhar pela rede [2]. Desta forma, falhas em cascata ocorrem e causam o colapso da rede toda.

Há diversos registros de apagões causados por falhas em cascata. Em Agosto de 2003 ocorreu o maior apagão da história dos EUA, devido a um distúrbio iniciado no Estado de Ohio. Em 2006, a queda de uma linha de transmissão no Sul do Estado de Oregon causou outro apagão nos EUA [1–3]. Em 2003, uma falha na cidade de Lucomagno, na Suíça, causou um apagão que atingiu a maior parte da Itália e sul da Suíça [3].

No Brasil, houve também diversos casos. Em 2005 e em 2007, problemas em duas linhas de transmissão causaram apagão nos Estados do Espírito Santo e Rio de Janeiro. Em 2009, vinte e seis Estados ficaram sem energia elétrica e acredita-se que este colapso foi causado por uma perturbação nas linhas de Itaipu. Outro apagão, em 2011, deixou sem fornecimento parte da rede do Nordeste, devido a uma perturbação causada ao religar uma linha do sistema [4]. Em 2012, na mesma região, uma falha de manutenção deixou uma linha desprotegida, causando outro apagão [5] e, em 2013, uma queimada na cidade de Canto do Buriti, no Piauí, causou o desligamento de duas linhas de transmissão paralelas, causando um apagão que atingiu todo o Nordeste brasileiro [6].

Com base na Teoria das Redes Complexas, diversas redes de alta tensão foram avaliadas: nos trabalhos [1, 7–9], os autores analisaram e caracterizaram a rede dos EUA; em [3, 10] avaliou-se a rede Italiana; em [11] três redes europeias; e em [4] a rede brasileira. Nestas análises, calcularam-se propriedades que identificassem pontos vulneráveis e fizeram-se testes de resistência da rede à remoção de subestações e linhas de transmissão, simulando falhas planejadas (estratégicas) e falhas aleatórias. Uma conclusão comum nos trabalhos analisados é de

que as redes de alta tensão são resistentes a falhas aleatórias, como a queda de uma linha ou parada de uma subestação qualquer. Contudo, as redes se mostraram frágeis diante de falhas planejadas e distúrbios [3, 4, 7, 8, 11–13].

Estratégias para melhorar a resistência de redes complexas a ataques e distúrbios são discutidas em [2, 13–17]. Modelos com maior robustez a ataques e distúrbios foram feitos e, no caso de redes já existentes, modificações de arestas ou vértices foram sugeridas. Apesar disso, no caso de redes de alta tensão, é inviável recriar a rede ou sugerir muitas modificações, devido ao alto custo de instalação de seus componentes e a questões ambientais [18].

Partindo-se da hipótese que é possível melhorar a confiabilidade e estabilidade da rede de alta tensão brasileira com alterações em sua topologia, propôs-se nesta pesquisa verificar estratégias de adição de novas linhas de transmissão ao sistema, utilizando um modelo em forma de grafo. Assim sendo, para avaliar a rede antes e após a adição destas linhas, fez-se o uso da Teoria das Redes Complexas, que permitiu fazer testes de aumento de eficiência, testes de resistência a falhas planejadas e aleatórias.

Apesar de existirem diversos estudos de redes de alta tensão pelo enfoque da Teoria das Redes Complexas, há poucos estudos relacionados à rede de alta tensão brasileira, inclusive estudos relacionados à sua resistência a falhas. A rede brasileira possui propriedades diferentes das propriedades das redes analisadas pelos trabalhos encontrados, visto que o país tem grande extensão territorial e a maior parte das usinas são hidrelétricas, distantes dos centros de distribuição. Isso leva à existência de linhas de transmissão longas e com poucas ramificações [18], fazendo com que o modelo aqui utilizado tenha vértices com poucas arestas. A grande concentração populacional nas regiões Sudeste e Centro-Oeste faz também com que a maior parte das usinas e subestações estejam aglomeradas nesta região, de forma que a densidade da rede seja maior nestas áreas [19].

Em linhas gerais, foram adicionadas novas arestas ao modelo da rede brasileira, utilizando as estratégias propostas, detalhadas no capítulo de Metodologia. Testou-se então se houve aumento de eficiência e resiliência dos modelos alterados. Para validar melhor as estratégias, criaram-se também modelos artificiais para verificar apenas o aumento de eficiência, visto que o teste de resiliência para todos os modelos seria demorado demais, levando cerca de 160 anos de processamento no mesmo *hardware* e *software* utilizados no trabalho.

Nesta pesquisa, diferente dos trabalhos encontrados, cuidou-se de simular a perda de linhas de transmissão, não de subestações ou usinas. Isso se deve ao fato de que, historicamente, no Brasil, os registros de apagão encontrados fazem menção apenas a falhas nas linhas de transmissão como razão dos apagões ocorridos.

Comprovou-se parcialmente a hipótese inicial, visto que algumas estratégias não conseguiram aumentar a resiliência da rede. Apesar disso, uma estratégia manteve a resiliência próxima da original e em certos casos, a aumentou, trazendo também um acréscimo significativo na eficiência de transmissão da rede.

Além desta Introdução, este texto está dividido em mais seis capítulos: A Revisão Bibliográfica, Metodologia, Resultados, Discussão, Conclusões e Referências Bibliográficas.

A Revisão Bibliográfica está organizada de forma gradativa, apresentando inicialmente trabalhos em diversas áreas, mas que usam a Teoria das Redes Complexas como base. Discute-se então trabalhos que avaliam a robustez de redes complexas, seguido de uma seção relacionada a trabalhos que estudam redes de alta tensão utilizando redes complexas e, por fim, trabalhos que caracterizam e analisam a rede de alta tensão brasileira, maior foco desta pesquisa.

Na Metodologia expõe-se inicialmente como se fez a coleta dos dados, discutindo-se na sequência os métodos utilizados para adicionar novas arestas na rede de alta tensão brasileira, visando o aumento de eficiência. Apresentam-se, então, os testes de resiliência de todas as redes obtidas pela adição de novas arestas na rede brasileira, diante de falhas planejadas e falhas aleatórias. Reservou-se última seção do capítulo para comentar sobre as ferramentas utilizadas para o desenvolvimento.

O capítulo Resultados foi dividido em 3 seções, sendo que a primeira apresenta os resultados referentes à aplicação das estratégias na rede de alta tensão. A segunda, o que foi obtido aplicando-se as estratégias em mil grafos *Scale-Free* e mil aleatórios. A última seção apresenta os testes de resiliência sobre a rede.

No capítulo de Discussão, mostra-se como o modelo desenvolvido pode ser aplicado no planejamento de novas linhas em redes de alta tensão, aumentando a eficiência, mantendo ou aumentando a resiliência. Faz-se uma comparação entre as estratégias, evidenciando qual delas mais se adéqua ao objetivo da pesquisa.

No capítulo seguinte, são apresentadas as conclusões desta pesquisa. A contribuição deste trabalho é evidenciada, assim como a sua originalidade em termos de proposta e desenvolvimento. Ao final, analisa-se a consecução dos objetivos deste trabalho.

Na sequência, são listadas as referências bibliográficas, indexadas pelo sistema numérico.

2 *Revisão Bibliográfica*

Neste capítulo apresenta-se a revisão dos trabalhos relacionados a esta pesquisa. Na primeira seção, mostra-se como a Teoria das Redes Complexas é capaz de deduzir propriedades de alguns tipos de redes através de sua topologia. Em seguida, discute-se sobre a robustez de redes complexas contra ataques coordenados, falhas aleatórias e distúrbios. Na terceira seção, expõem-se trabalhos que avaliaram redes de alta tensão utilizando a Teoria das Redes Complexas. A seção A Atual Rede Brasileira trata de estudos sobre a rede brasileira, seu funcionamento, suas propriedades, sua estabilidade pelo ponto de vista elétrico e um estudo da rede brasileira utilizando redes complexas.

2.1 Estudos em Redes Complexas

Ao abstrair-se determinada rede em forma de grafo, ou seja, representando seus elementos por vértices e as ligações entre estes elementos por arestas, é possível estudá-la com a Teoria das Redes Complexas [20]. Bem fundamentada na matemática, esta teoria pode ser aplicada em diversas áreas [21], como exemplificado a seguir.

Rocha [20] utiliza redes complexas para avaliar a propagação de notícias através de e-mails. Adotou-se na pesquisa uma rede real de contatos de e-mail e uma rede aleatória artificial baseada no modelo de Erdős-Rényi. Como forma de espalhar a mensagem, utilizou três métodos: envio aleatório, onde em um momento t_i um contato qualquer envia uma mensagem para qualquer um de seus contatos; envio preferencial, onde um contato envia a mensagem para seu contato que possui mais ligações (maior grau); e envio por *broadcast*, também conhecido como *spam*, onde cada contato escolhido envia a mensagem para todos os seus contatos. Concluiu-se que na rede aleatória o tempo de resposta (tempo necessário para a notícia atingir metade dos contatos) é menor que na rede real de e-mails. Como esperado, o envio por *broadcast* é o mais rápido. Entre o envio aleatório e o preferencial, o primeiro método deu melhores resultados, pois a variação de destinatários da notícia era maior, fazendo com que mais pessoas a recebessem.

Para verificar as cidades com maior poder de disseminar informações, Mello et al. [22] construíram três modelos de redes de municípios brasileiros: a rede rodoviária intermunicipal, rede telefônica e uma rede radiofônica. Para classificar cada cidade, foram utilizadas algumas medidas comuns em redes complexas, como eficiência de um nó e *rank* de página, e também foi criada uma medida própria para o estudo, chamada "Poder de Difusão". Os autores correlacionaram as medidas obtidas dos três modelos e, com isto, conseguiram encontrar as cidades com maior poder de disseminar informações e verificaram que a ordem das cidades está relacionada com a densidade populacional e com o PIB de determinadas regiões.

Chen et al. [23] utilizaram redes complexas para avaliar a estabilidade de uma cadeia de suprimentos artificial, criada com base em um modelo feito pelos autores. Testou-se qual a maior quantidade de nós que a rede suporta perder diante de falhas aleatórias e de ataques estratégicos. Foi encontrado que a rede se desmantela rapidamente diante de ataques. Propuseram que os núcleos empresariais devem fazer planos emergenciais, escolhendo múltiplos fornecedores, pois a falta de matéria-prima influencia não somente o núcleo empresarial, mas todos os nós na cadeia de fornecimento, o que pode até levar a rede ao colapso. Sugeriu-se também que as grandes empresas da cadeia evitem mudanças na política empresarial e mudanças de pessoal, visando manter a estabilidade da cadeia de suprimentos.

Pode-se notar pelos estudos apresentados nesta seção que a análise da topologia de redes é capaz de identificar propriedades interessantes em redes distintas. De particular interesse, nota-se no trabalho de Chen et al. um esforço para testar a resistência da rede diante de falhas. Este é um problema estudado por diversos autores e, na seção seguinte, alguns destes estudos são discutidos.

2.2 Robustez de Redes Complexas

Uma vantagem oferecida pela Teoria das Redes Complexas é a de permitir a simulação de situações que na prática não são viáveis. Com auxílio de um computador, as operações sobre grafos (adição e remoção de vértices e arestas) tornam-se rápidas e simples, sendo possível verificar o comportamento da rede diante destas operações. Neste trabalho, foi necessário avaliar a robustez da rede de alta tensão brasileira e verificar se alterações na topologia eram capazes de melhorar sua resistência e isto foi feito sobre um modelo da rede em forma de grafo. Cuidou-se, pois, de conferir as técnicas de avaliação de robustez e métodos de modificações topológicas, decidindo-se quais foram os mais adequados para a pesquisa.

Crucitti et al. [1] e Motter et al. [24] verificaram a resistência de 4 redes com diferentes

organizações topológicas: uma *Scale-free* artificial e uma aleatória também artificial, a Internet e a rede elétrica dos EUA. Definiram a carga máxima que cada nó pode suportar calculando sua capacidade. Simularam então o disparo de falhas em cascata de vértices escolhidos ao acaso, de vértices com maior grau e de vértices com maior carga. A diferença entre os trabalhos é que em [1], os vértices não são removidos da rede ao atingirem o limite de carga, mas ficam com a comunicação reduzida. Ambas as pesquisas conseguiram mostrar que a remoção de vértices de maior carga, que simula um ataque coordenado, causa maiores danos na rede, podendo levá-la rapidamente ao colapso. Como nas redes reais existem poucos nós com carga alta, estes poucos são os com maior chance de causar problemas sérios na rede.

Dando sequência ao trabalho anterior, Crucitti et al. propuseram um novo modelo em [25], onde simulam a degradação da rede com a passagem do tempo. Para isso, cada vértice que excede sua capacidade máxima, tem sua comunicação reduzida, através da variação dos pesos nas arestas ligadas a ele. Redistribuindo a carga excedente aos vértices vizinhos, puderam simular o efeito cascata com o passar do tempo. Com isto, demonstraram como problemas em um único componente do sistema podem levar a rede ao colapso.

Wang et al. [13] testaram a robustez de redes complexas considerando que, quando um vértice é removido, sua carga deve ser redistribuída para seus vizinhos, ao contrário dos trabalhos anteriores em que a carga da rede toda é recalculada. Se algum dos vizinhos não suporta a carga, o mesmo cai e tem sua carga redistribuída. Isso ocorre sucessivamente até que a rede fique estável. Um parâmetro α foi definido para variar a carga inicial dos vértices baseada no grau dos mesmos. Com simulações, encontraram o valor ideal de α para que a rede tivesse maior resistência. Em seguida, usando este valor ideal de α , modelaram redes do tipo *Scale-Free* variando o grau médio ao criar a rede. Concluíram que redes *Scale-Free* com quantidades diferentes de vértices tem resistência semelhante se o grau médio for o mesmo. Porém, ao aumentar o grau médio da rede, a resistência também aumenta. No presente trabalho, este será um dos métodos utilizados para avaliar a robustez da rede diante de falhas.

Sabendo que redes do tipo *Scale-Free* são resistentes a falhas aleatórias, com boa conectividade, e redes aleatórias são resistentes a ataques, Shargel et al. [17] tentaram construir uma rede que houvesse qualidades de ambos os tipos. Para tal, variaram dois parâmetros, p (conexão preferencial) e g (evolução). Quando $p = 0$, as arestas são ligadas a vértices aleatórios e com $p = 1$ a probabilidade de se ligarem aos nós de maior grau é máxima. Para $g = 0$, tem-se que todos os nós são criados ao mesmo tempo, efetuando-se as ligações em seguida e $g = 1$ significa que os vértices serão adicionados um a um e, desta forma, uma aresta é criada entre o nó adicionado e outro nó qualquer já existente. Como resultado, obtiveram que quando a rede é

criada com $p = 1$ e $g = 0$, sua conectividade e robustez são as mais satisfatórias.

Apesar de que, em [17] ter sido criado um modelo de rede com maior resistência, alguns autores verificaram que é impraticável remodelar radicalmente a topologia de uma rede real já estabelecida. Assim sendo, buscaram estratégias que pudessem melhorar a robustez de redes existentes.

Guo et al. [14] observaram o comportamento da rede ao proteger os vértices com maior grau, testando assim a resistência da rede. Os resultados sugeriram que este método é pouco efetivo, pois, ao se proteger 3% dos vértices, sendo estes os de maior grau, a robustez aumentou na proporção de apenas 0,1%.

Zhao e Xu [15] inseriram novas arestas na rede de três formas: ligando aleatoriamente dois vértices; ligando um par de vértices com maior grau e; ligando um par de vértices com menor grau. Encontraram que ligar os nós de grau mais baixo é a estratégia mais eficiente e optou-se na presente pesquisa por utilizar esta técnica como outra forma de melhorar a robustez da rede brasileira de alta tensão.

Zhuo et al. [16] alocaram arestas redundantes baseando-se no grau dos vértices. Utilizaram três esquemas de seleção de nós: aleatório (R); preferencial (P), valorizando maior grau e; preferencial inverso (I), valorizando o menor grau. Com estes três esquemas, criaram 5 formas de anexar pares de vértices com arestas redundantes: R-R, P-P, P-I, I-P e I-I. Simularam estes esquemas em uma rede *Scale-Free* e testaram uma técnica chamada *Hiding Redundancy Links (HRL)*, que consiste em esconder as informações de roteamento dos links redundantes. Como resultado, obtiveram que a estratégia I-I mostrou-se mais eficiente contra ataques coordenados à rede, principalmente ao usar a *HRL*.

Pereira et al. [21] examinaram falhas em cascata diante de 4 situações distintas: sem nenhuma estratégia de contenção de falhas; aumentando a capacidade dos vértices; criando arestas entre os vértices de menor grau da rede; e associando o aumento de capacidade com adição de arestas entre os vértices de menor grau. Constataram em seu trabalho que a melhor estratégia foi o aumento de capacidade dos vértices e que a adição de links diminui a habilidade da rede em conter as falhas. Vale lembrar que sua análise baseou-se no quesito de velocidade de espalhamento da cascata, não testando a resiliência da rede à perda de arestas ou vértices.

Neste trabalho, sugeriram-se duas abordagens inéditas para adicionar arestas na rede com a intenção de melhorar sua robustez e aumentar a eficiência. Um método consiste em adicionar arestas ligando os vértices de menor grau que estejam ligados aos vértices de maior carga da rede. Com isto, esperava-se criar caminhos alternativos onde a carga da rede é mais concentrada.

O segundo método busca os vértices de carga mediana e faz uma ligação entre eles. Ambos os métodos são explicados em detalhes na Metodologia.

Verificou-se nos trabalhos revisados nesta seção que há várias formas de analisar e aumentar robustez de uma rede complexa. Devido à importância que as redes de alta tensão têm para a sociedade atual, vários autores se interessaram em utilizar estes métodos para analisá-las. Estes estudos são apresentados a seguir.

2.3 Redes Complexas e Redes de Alta Tensão

Utilizar redes complexas para avaliar redes de alta tensão é algo sugestivo, visto que, para modelar estas últimas em forma de grafo, basta relacionar os vértices como usinas e subestações e as arestas como as linhas de transmissão. Portanto, estudos neste sentido foram feitos com várias redes de alta tensão no mundo todo.

Para assegurar a originalidade do presente trabalho, uma extensa bibliografia relacionada a redes complexas e redes de alta tensão foi consultada. Não se encontrou nenhum trabalho que avaliasse a rede brasileira pela perspectiva aqui apresentada, nem que utilizasse o método descrito no penúltimo parágrafo da seção 2.2.

Albert et al. [8] fizeram um estudo sobre a rede de alta tensão norte americana. Simularam a perda vértices de 4 formas diferentes: perda aleatória, por maior grau, maior carga e maior carga recalculada a cada perda. Demonstraram que esta última causa maior dano na rede, onde a remoção de apenas 2% dos vértices gera uma baixa de aproximadamente 60% da conectividade. Apontaram como possíveis soluções o aumento de redundância, aumento da capacidade de carga ou instalação de pequenas usinas distribuídas por toda a rede como fonte secundária para regiões específicas.

Em [3], Crucitti et al. avaliaram a rede italiana pelo modelo proposto em [1]. Verificaram que essa rede possui poucos vértices com carga alta e que estes são os que representam maior perigo no caso de um ataque coordenado. Demonstraram com isso a importância da avaliação topológica de redes de alta tensão e que a rede da Itália é vulnerável a ataques, porém, resistente a falhas aleatórias.

Rosato et al. [11] estudaram as redes italiana de 380kV, francesa de 400kV e espanhola de 400kV, em busca de vulnerabilidades. Os autores utilizaram análise espectral, através de um procedimento denominado "*min-cut*". Com esta análise, é possível identificar qual a menor quantidade de arestas que, ao serem removidas, são capazes de dividir a rede em duas com-

ponentes conexas. Mostraram que, ligando apenas dois vértices específicos na rede italiana, o número mínimo de arestas que divide a rede em duas componentes conexas aumenta de 3 para 12, melhorando sua robustez. Com isto, considerou-se o uso do procedimento "*min-cut*" na atual pesquisa, pois, é um método que pode ajudar a melhorar a robustez da rede brasileira.

Com a decisão de utilizar o *min-cut*, buscou-se por trabalhos que o empregassem para melhor entendê-lo. Para isso, consultou-se o trabalho de Namboodiri & Kripadas [26], que faz o uso do particionamento espectral, especificamente o *min-cut*, para particionar grafos que representam estrutura de proteínas, o trabalho de Ferreira [27], que usa análise espectral para particionar grafos com a finalidade de segmentar imagens e o trabalho de Pothén et al. [28], que faz um estudo de algoritmos para particionamento de matrizes esparsas com autovetores de grafos.

Kinney et al. [7] demonstraram que a rede de alta tensão dos EUA pode perder 25% da sua eficiência com a remoção de apenas um vértice. Para tal, criaram um grafo ponderado, onde os valores dos pesos é a eficiência da aresta e dividiram as subestações do sistema em 3 tipos: geração, transmissão e distribuição. A eficiência média da rede, propriedade utilizada para medir a resistência da mesma, foi calculada utilizando somente as subestações de geração e distribuição. Assim como em [1], utilizaram os conceitos de capacidade e degradação da rede para testá-la contra falhas. Efetuaram simulações com diferentes valores de tolerância para a rede e testaram a remoção de subestações de geração e de transmissão separadamente. Concluíram que a rede é resistente a falhas aleatórias, mas ataques aos nós de maior carga podem causar danos sérios. Como soluções, sugerem a construção de mais subestações, para distribuir melhor a carga, ou a produção de energia alternativa, de forma a reduzir o consumo pela rede principal.

Arianos et al. [10] fizeram uma abordagem diferente, tentando aproximar mais o estudo de conceitos elétricos. Com a impedância e fluxo de carga, calcularam um parâmetro que chamaram de distância elétrica entre os nós. Por conta desta distância, para qualificar a rede, definiram o conceito de *net-ability*, que se assemelha à eficiência média em uma rede complexa, mas leva em consideração a energia que é distribuída pelas linhas. Também definiram a taxa de sobrecarga, calculada utilizando o fluxo de carga nas linhas. Com isto, fizeram simulações em uma rede e compararam a eficiência, *net-ability* e a taxa de sobrecarga. A medida *net-ability* identificou as linhas mais críticas do sistema, já que seus resultados se aproximaram mais da taxa de sobrecarga.

Wang e Rong [13] testaram a rede dos EUA contra ataques por ordem crescente e decrescente de carga. Para definir a carga, utilizaram uma forma diferente da apresentada por outros

autores, multiplicando o grau do vértice em questão pelo somatório do grau dos vértices adjacentes a ele. Um parâmetro α controla o valor inicial da carga. Ao ser atacado, a carga de um nó é redistribuída para seus vizinhos. Nas simulações feitas, quando o parâmetro α foi definido abaixo de 0.7, o ataque aos nós de menor carga foi mais efetivo.

Para estudar o efeito em cascata, Pahwa et al. [2] analisaram as redes de alta tensão IEEE 300, IEEE 118 e WSCC 179, que são redes disponibilizadas para testes. Analisaram também mais 3 redes aleatórias criadas artificialmente, com quantidade de vértices, grau máximo e grau médio semelhantes às 3 redes de teste. Definiram a impedância das linhas de tensão como peso das arestas. Com isto, simularam o efeito cascata em todas as redes, comparando-os. Pela natureza aleatória das redes artificiais, sua resistência a ataques revelou-se maior que nas redes originais. Discutiram ainda 3 estratégias para aliviar o efeito cascata. A primeira é de reduzir homogeneamente a carga em todos os nós. A segunda, reduzir a carga em vértices específicos e última de isolar agrupamentos e usar fontes renováveis de alimentação elétrica no isolamento. A redução específica de carga é a mais indicada, porém de difícil implementação, pois requer a instalação de equipamentos que permitam reduzir a carga nas regiões desejadas. A redução homogênea apesar de mais custosa, apresentou bons resultados e tem fácil implementação. Para a última estratégia não houve simulação, mas os autores afirmaram estar investigando técnicas para desconectar o isolamento da rede principal.

Han e Ding [12] fizeram um estudo sobre redes de alta tensão que apresentam comparações entre uma rede complexa do tipo *Small-World*, do Leste da China e uma não *Small-World*, de Anhui, também na China. Criaram grafos com arestas ponderadas, utilizando a reatância na linhas como parâmetro. Para testar a resistência da rede, utilizaram dois modos de falha: o primeiro para testar ataques aos vértices de maior grau e carga e o segundo para testar a reação da rede a fatores internos e externos, definindo grupos de nós baseados em sua carga. No testes, os autores relataram que ataques aos vértices de grau mais alto não causavam grande impacto em ambas as redes, mas se atacados os de maior carga, diminuía consideravelmente a capacidade na rede *Small-World*. Quanto ao segundo modo de falha, sugeriram que, para redes não *Small-World*, aumentar a capacidade da rede pode melhorar sua robustez, mas para redes *Small-World* o mesmo não ocorre. Os autores sugerem alterações na estrutura da rede para reduzir a concentração de carga em alguns vértices específicos.

Uma revisão de diversos métodos de avaliação de falhas em cascatas é feita por Huang et al. em [29]. Um de particular interesse é a análise da topologia de redes utilizando redes complexas. Verificam também algumas tecnologias emergentes, como tecnologia de fasores, visualização avançada, computação de alta-performance e *data mining*. Deixaram, por fim,

algumas perguntas em aberto: como medir o risco de ocorrer uma falha em cascata? Qual será o próximo possível evento de grande impacto que irá ocorrer na rede? Qual a vulnerabilidade da rede diante de um ataque específico? O que aconteceu em um apagão em particular e o que se aprendeu com o mesmo? Como balancear risco de falhas e custos de proteção? Estas perguntas são estudos que podem ser feitos em trabalhos futuros com os métodos que foram propostos nesta pesquisa.

2.4 A Atual Rede Brasileira

Nota-se, nos trabalhos revisados na seção anterior, que redes complexas auxiliaram a encontrar e sugerir soluções para problemas em diversas redes de alta tensão ao redor do mundo, principalmente relacionados a testar a resistência para evitar falhas em cascata. No entanto, não encontraram-se trabalhos que avaliassem a rede de alta tensão brasileira pela perspectiva de redes complexas. Optou-se por utilizar a rede nacional para efetuar as simulações deste trabalho, tanto pela escassez de estudos sobre a mesma pela perspectiva de redes complexas, quanto pelo fato de ser uma rede real, o que permite tirar conclusões de uso prático.

Leão [18] faz um histórico da rede de alta tensão brasileira e define características do sistema atual. No Brasil, a fonte primária de produção elétrica sempre foi hidrelétrica. Devido a isso e à grande extensão territorial do país, a rede de transmissão possui linhas longas e as usinas ficam distantes dos centros de consumo. Espera-se que isso caracterize uma topologia diferente de um país como, por exemplo, os EUA, onde prevalece a produção de energia térmica e nuclear [30].

Affonso et al. [19] avaliaram a estabilidade da rede de alta tensão nacional, utilizando dados reais da operação e planejamento. Os autores calcularam a margem de estabilidade de 4 regiões do país, concluindo com isto que a estabilidade do sistema é limitada pela região Sudeste/Centro-Oeste. Tendo isto, fizeram uma análise no Estado de São Paulo, pois, dados de outras regiões não foram disponibilizados. Em primeiro lugar, verificaram que a margem de estabilidade de tensão no Estado ficou abaixo das recomendações em alguns horários do dia. Avaliaram então a perda das linhas entre Aparecida e Taubaté (230kV) e entre Araraquara e Santa Bárbara (440kV), nos horários em que a margem ficou abaixo dos limites. Concluíram que perder a linha de 230kV causaria mais problemas, reduzindo mais a margem de estabilidade de tensão que a perda da linha 440kV. Ressaltam, porém, que a linha de 230kV exige reforços localizados para sua correção, o que torna sua perda menos severa que a linha de 440kV, que exigiria ações distribuídas em diversos pontos do sistema para recuperar a sua estabilidade. A

perda de qualquer uma das linhas não causaria um apagão, mas deixaria o sistema vulnerável.

Em um trabalho anterior [4], que deu origem à atual pesquisa, fez-se a análise da topologia da rede brasileira utilizando redes complexas. Calculou-se diversas propriedades estáticas da rede, tanto globais quando individuais para cada vértice. O modelo obtido apresentou características de uma rede complexa do tipo *Scale-Free*, porém, não se pôde comprovar que este é o tipo da rede. Foram identificados os vértices de maior importância na rede, de acordo com o maior grau e carga. Em uma comparação com o trabalho de Affonso et al. [19], verificou-se que a subestação de Araraquara é uma das mais importantes na visão topológica, confirmando que a perda desta subestação realmente seria preocupante. Pela sua topologia, sugere-se que a rede seja resistente a falhas aleatórias, mas frágil contra ataques coordenados e distúrbios.

Pode-se perceber nesta seção que a estabilidade da rede nacional é baixa e limitada por uma região específica, sugerindo que a topologia está relacionada a este atributo. Pelos trabalhos avaliados em todo o capítulo 2, nota-se que a rede brasileira de alta tensão carece de pesquisas que avaliem sua resistência e que possam fazer sugestões de melhorias, como se propôs neste trabalho. No capítulo a seguir, são discutidos os métodos que foram utilizados para fazer estes testes.

3 *Metodologia*

Neste capítulo são discutidos os métodos e ferramentas utilizados para efetuar a pesquisa. A primeira seção expõe como os dados foram obtidos e como foram tratados para uso neste trabalho. Em seguida, discute-se as estratégias utilizadas para simular a inserção de novas linhas de transmissão na rede de alta tensão brasileira, visando o aumento da eficiência global. Na seção Teste de Robustez discutem-se os métodos utilizados para testar a resistência da rede contra falhas planejadas e falhas aleatórias. Finalmente, na seção Ferramentas, apresenta-se como se deu o desenvolvimento dos *scripts* criados para efetuar as simulações na rede e recuperação e transformação dos dados.

3.1 Coleta de Dados

Os dados da rede de alta tensão para criar o modelo foram obtidos no aplicativo Sistema de Informações Geográficas Cadastrais do Sistema Interligado Nacional (SINDAT), disponível no site do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). O sistema disponibiliza em formato texto o cadastro de linhas de transmissão, usinas e subestações (rede de geração e transmissão). A Figura 3.1 representa o mapa da rede brasileira de alta tensão, disponibilizado pelo ONS, e permite visualizar a rede de geração e transmissão de energia elétrica.

mento *min-cut*, mais detalhado adiante nesta seção.

Para verificar se o aumento de eficiência causado pelos métodos propostos é relevante, fez-se o seguinte procedimento:

1. Adicionou-se uma aresta à rede e calculou-se a eficiência global, armazenando este valor;
2. Removeu-se a aresta adicionada;
3. Repetiram-se os passos 1 e 2 para todas as possíveis arestas a serem adicionadas;
4. Encontrou-se qual das arestas causou o maior aumento de eficiência, adicionando-a à rede;
5. Utilizando esta nova rede formada, inicia-se novamente o procedimento. Repetiu-se este processo até que a rede ficasse com 50 novas arestas.

Este cálculo serve de base teórica de referência para o maior ganho possível em eficiência e será referenciado como Adição de Arestas Ideais (AAI).

Seria interessante efetuar a combinatória de 50 arestas para todos os vértices, porém, o tempo necessário para efetuar os cálculos computacionalmente, nas mesmas condições em que foram executados os algoritmos dessa pesquisa, seria impraticável (estimou-se em torno de $3,016 \times 10^{133}$ anos).

A primeira estratégia é a forma proposta por Zhao e Xu [15], onde ligam-se os vértices de menor grau na rede. Fez-se nesta estratégia uma modificação para que o algoritmo ignorasse os vértices cujo grau é igual a 1, devido à quantidade de nós com esta característica ser muito grande. Nomeou-se esta estratégia como ligação de vértices de menor grau (MGr). Um exemplo do método pode ser visualizado na Figura 3.2.

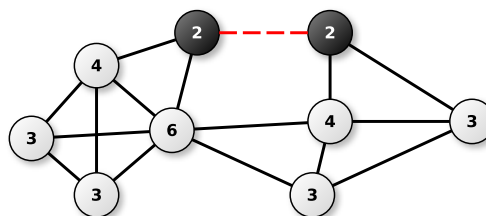


Figura 3.2: Representação da estratégia MGr. Os valores dentro dos vértices representam seu grau e os vértices escuros são aqueles que possuem o menor grau. A aresta pontilhada é aquela que será adicionada à rede.

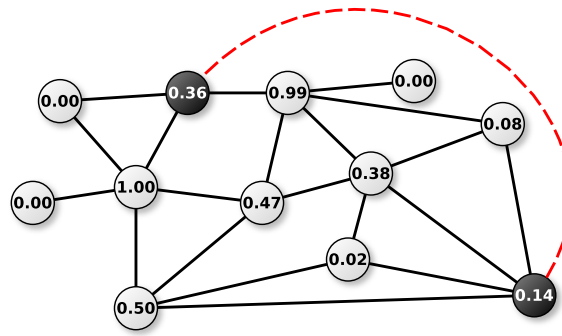


Figura 3.4: *Representação da estratégia CMd. Os números dentro dos vértices representam a carga de cada um e os vértices em preto são os de carga mediana. A aresta pontilhada é aquela que será adicionada à rede utilizando a estratégia.*

Todas as estratégias descritas foram testadas com e sem o auxílio do procedimento *min-cut*, proposto por [11]. Este algoritmo efetua a divisão de um grafo em dois subgrafos com quantidade semelhante de vértices em cada um, removendo o mínimo de arestas possíveis. Para tal, calcula-se primeiramente a matriz laplaciana L , através da equação 3.1:

$$(3.1) \quad L = D - W,$$

onde D é a matriz diagonal com o grau dos vértices e W é a matriz de pesos [26, 31]. Considerou-se peso 1 para todas as arestas, fazendo assim com que a matriz de pesos seja equivalente à matriz de adjacência [32]. Calculam-se então os autovalores da matriz L e seus autovetores associados. Baseando-se no sinal (valor positivo ou negativo) dos componentes do autovetor associado ao segundo autovalor, separa-se os vértices em dois grupos, que formarão os subgrafos da divisão pelo procedimento *min-cut*, ligados um ao outro pelo menor número de arestas [11, 26, 31].

Na Figura 3.5 mostra-se quais seriam as arestas identificadas pelo procedimento *min-cut*.

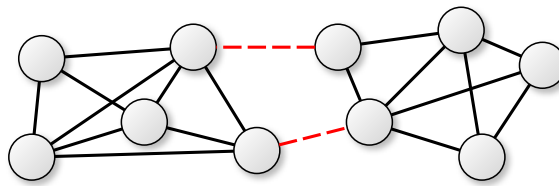


Figura 3.5: *Representação do procedimento min-cut. As arestas tracejadas são as identificadas pelo método como sendo o corte mínimo, que divide o grafo da figura em dois subgrafos com quantidade de vértices semelhante.*

Como todas as estratégias identificam dois vértices para efetuar a ligação, quando aliadas ao *min-cut* cada vértice é encontrado em um subgrafo diferente. A lógica das estratégias não é alterada, mas apenas aplicada separadamente para cada conjunto de vértices. Na figura 3.6 mostram-se exemplos de todas as estratégias utilizadas em conjunto com o *min-cut*. Os subgrafos ficam destacados pelos vértices de coloração distinta.

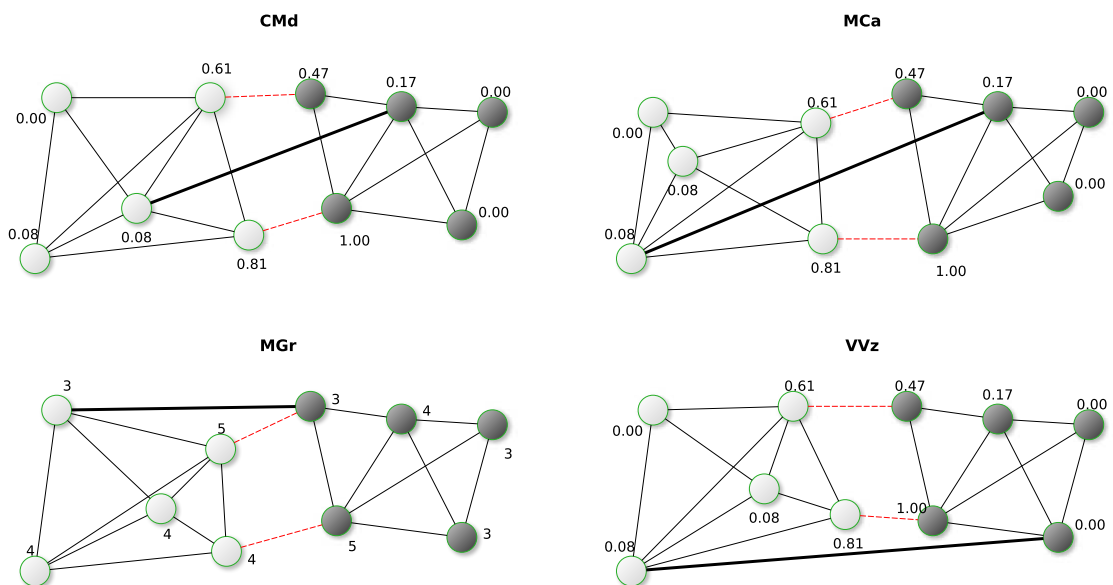


Figura 3.6: *Representação de todas as estratégias aliadas ao procedimento min-cut. As arestas pontilhadas são as encontradas pelo procedimento min-cut e as arestas mais espessas são as sugeridas por cada método. Para a estratégia MGr, o valor nos vértices representa o grau. Para as restantes, o valor representa a carga (betweenness).*

3.3 Teste de Robustez

Os testes de robustez serão feitos através de simulações sobre o modelo original da rede e os modelos gerados pela aplicação das estratégias. Procurou-se por propriedades oferecidas na Teoria das Redes Complexas que pudessem definir a tolerância da rede contra distúrbios e que pudessem qualificá-la antes e após a ocorrência de falhas.

Para simular a carga nas linhas de transmissão, utilizou-se uma propriedade típica de Redes Complexas conhecida como *betweenness*, que avalia a carga de uma aresta baseando-se na quantidade de menores caminhos que passam através da mesma. Inicialmente, considerou-se que todas as arestas tem peso 1. Assim sendo, a equação 3.2, definida em [33], foi utilizada para calcular a carga inicial das arestas.

$$(3.2) \quad L_i = \sum_{s \neq v \in G} \frac{\sigma(s, v|e)}{\sigma(s, v)},$$

onde $\sigma(s, d)$ é o conjunto de menores caminhos entre os vértices s e v e $\sigma(s, d|e)$ são os menores caminhos entre s e v que passam pela aresta e . Por convenção, $\frac{0}{0} = 0$. Tendo isso, deve-se calcular a carga máxima que as arestas são capazes de suportar (capacidade). A capacidade é proporcional à carga inicial de cada aresta e é dada pela equação 3.3, previamente enunciada em [1, 7, 25].

$$(3.3) \quad C_i = \alpha L_i(0), 1 \leq i \leq N,$$

onde $L_i(0)$ é a carga inicial da aresta i e α é o parâmetro que varia a tolerância de sobrecarga.

Estas equações definem os parâmetros iniciais necessários no modelo para que seja possível simular o efeito cascata. Este efeito inicia-se quando uma aresta é removida do grafo. A partir de então, a carga de todas as arestas é recalculada, efetuando-se a redução do peso nas arestas que excedam sua capacidade através da equação 3.4, encontrada em [1, 7, 25]:

$$(3.4) \quad w_e(t+1) = \begin{cases} w_e(0) \frac{C_i}{L_j(t)} & \text{se } L_i > C_i \\ w_e(0) & \text{se } L_i \leq C_i \end{cases},$$

onde w_e é o peso da aresta e . Assim, quando uma aresta atinge seu limite, ela não é removida

da rede, mas tem sua comunicação reduzida, alterando desta forma os menores caminhos da rede e, conseqüentemente, a carga das arestas.

A equação 3.5 define a eficiência global, mostrada em [1, 7, 10, 15, 25]. Esta medida é recalculada a cada iteração da redistribuição de carga da equação 3.4, mostrando gradativamente a mudança da eficiência da rede diante das falhas.

$$(3.5) \quad E(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}},$$

sendo G o grafo que representa a rede e d_{ij} o caminho mínimo entre os vértices i e j .

Para medir a queda da eficiência no início da falha e após a estabilização do efeito cascata, utilizou-se a medida de dano na rede, que é a medida normalizada da diferença entre a eficiência final e inicial [7]. A equação 3.6 define esta medida.

$$(3.6) \quad D(G) = \frac{E(G_0) - E(G_f)}{E(G_0)},$$

onde $E(G_0)$ é a eficiência da rede antes da ocorrência de falhas e $E(G_f)$ é a eficiência da rede no momento em que se estabiliza após a ocorrência da falha.

A resistência da rede foi avaliada calculando-se a variação do dano diante de dois tipos de falhas: planejadas e aleatórias. Para falhas aleatórias, a chance de cada aresta ser atingida é equiprovável, portanto, é necessário calcular o dano médio em vários testes. Assim sendo, o teste foi repetido 50 vezes em cada modelo gerado pelas estratégias, calculando-se o dano médio em cada instante, até a estabilização. Para falhas planejadas o procedimento é mais simples, visto que apenas é necessário remover a aresta de maior carga e então registrar a queda de eficiência [1, 3, 16, 25].

3.4 Ferramentas

Optou-se neste trabalho por criar *scripts* específicos para efetuar todos os cálculos e simulações necessárias, pois, foi necessário utilizar o *cluster* Beowulf da Faculdade de Tecnologia da Unicamp. Tais *scripts* foram criados para obter o máximo de performance do *cluster*, utilizando-se de multiprocessamento para agilizar os testes.

Tudo foi desenvolvido no sistema operacional Ubuntu Linux, utilizando a linguagem de programação *Python*². Estas ferramentas são de licença gratuita e livre, o que reduz os custos de execução da pesquisa.

A escolha da linguagem Python se deu principalmente por esta possuir diversas bibliotecas prontas, bem testadas e documentadas, específicas para uso com grafos e redes complexas, ajudando assim a redução do tempo de desenvolvimento dos *scripts*. As principais bibliotecas utilizadas foram a NetworkX³ e a Graph-tool⁴.

Os *scripts* desenvolvidos foram capazes de efetuar as seguintes operações:

- Recuperar dados do ONS e transformá-los em um grafo no formato *GML*;
- Verificar o aumento de eficiência da rede pela adição de arestas através das estratégias propostas para 50 arestas;
- Verificar o aumento de eficiência ao adicionar 50 arestas, testando todos os pares de vértices possíveis antes de adicionar cada uma, em busca da arestas que mais aumentam a eficiência;
- Gerar grafos *Scale-Free* e aleatórios para comparar com a rede de alta tensão brasileira;
- Efetuar a simulação de falhas planejadas e falhas aleatórias na rede de alta tensão;
- Gerar os gráficos envolvendo as propriedades e resultados das simulações;
- Gerar as imagens para visualização da rede de alta tensão em forma de grafo, se necessário destacando propriedades de interesse;

Seria inconveniente exibir impressos neste documento os programas desenvolvidos e os resultados obtidos na pesquisa. Por isso, decidiu-se disponibilizá-los online, através do repositório Git no endereço <http://github.com/willunicamp/hvnscripts.git> e em CD, que pode ser solicitado junto ao Sistema de Bibliotecas da Unicamp.

Finaliza-se assim a definição da metodologia utilizada neste trabalho. No capítulo a seguir, apresentam-se os resultados obtidos através dos métodos aqui descritos.

²Documentação, downloads e outras informações sobre a linguagem *Python* podem ser encontrados em <http://www.python.org/>.

³A documentação completa da biblioteca NetworkX pode ser consultada em <http://networkx.lanl.gov>.

⁴Detalhes sobre a biblioteca Graph-tool podem ser encontrados em <http://projects.skewed.de/graph-tool/>.

4 *Resultados*

Neste capítulo, apresentam-se os resultados, divididos em 3 seções, correspondentes à mesma sequência em que os testes foram feitos. Na primeira parte, apresentam-se as medidas de aumento da eficiência para todas as estratégias propostas no capítulo anterior, utilizando o modelo da rede de alta tensão brasileira. Na segunda seção, apresenta-se o teste feito com as mesmas estratégias em 1000 redes *Scale-Free* e 1000 redes aleatórias, todas artificiais. Na última seção, mostram-se os dados do teste de resiliência da rede à falhas planejadas e falhas aleatórias.

4.1 **Grafos resultantes para cada estratégia**

A primeira etapa consistiu em gerar todas as novas redes adicionando 50 arestas com cada estratégia proposta, a partir do modelo original. Para isso, geraram-se 8 novas redes provenientes das 4 estratégias com e sem o auxílio do procedimento *min-cut*. Os grafos resultantes são mostrados nas Figuras 4.1 e 4.2.

Pode-se notar que a topologia das redes resultantes diferem em relação à estratégia utilizada, por exemplo, comparando-se a VVz, onde as novas arestas ficaram mais próximas umas das outras, com a estratégia CMd, em que as arestas ficaram bastante espalhadas. A aparência se mantém semelhante quando compara-se a mesma estratégia com e sem o auxílio do *min-cut*.

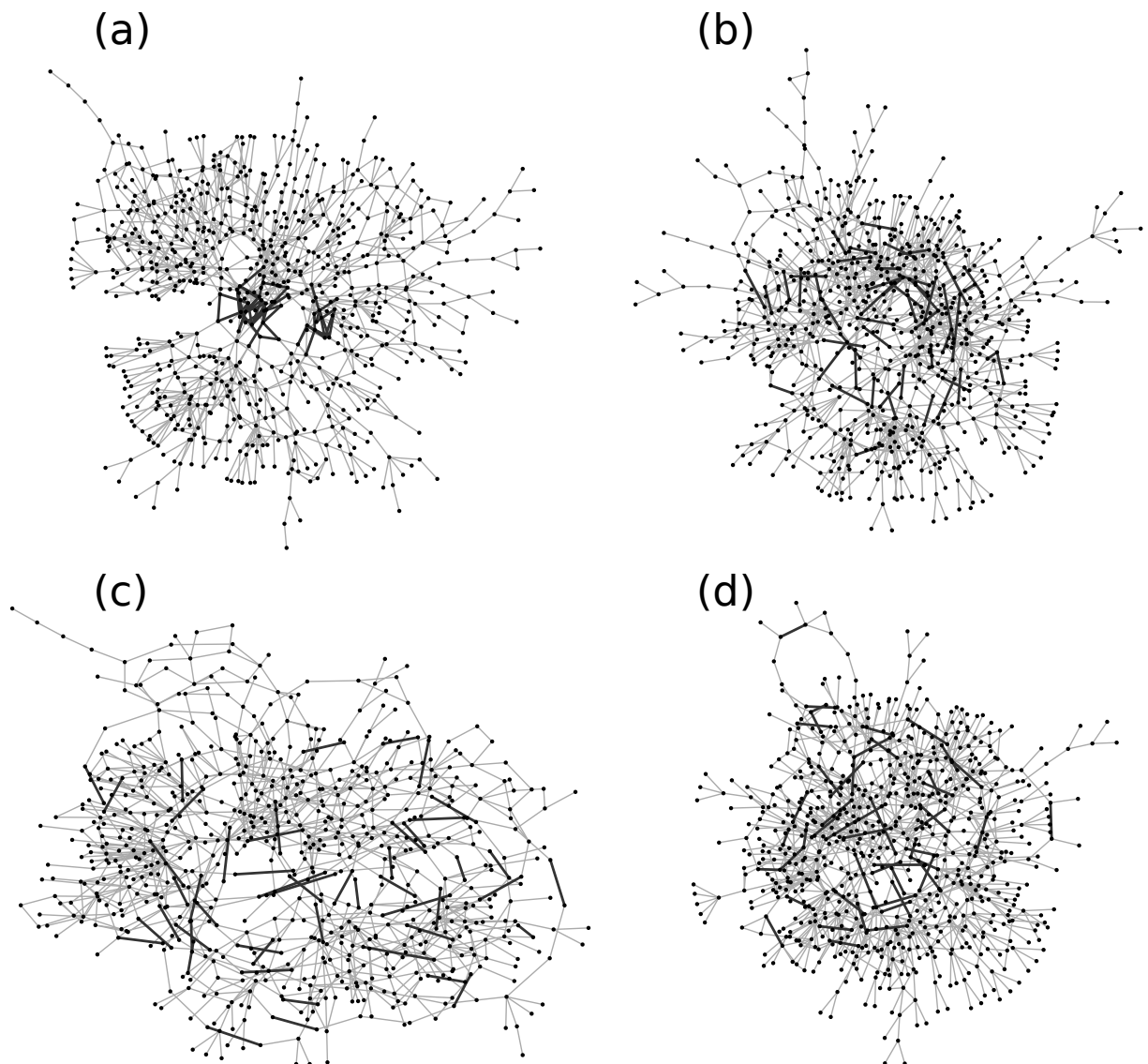


Figura 4.1: *Grafos resultantes após a inserção de 50 arestas, utilizando as 4 estratégias. (a) VVz. (b) MCa. (c) MGr. (d) CMd. As novas arestas adicionadas a cada rede estão destacadas em negrito.*

Em seguida, gerou-se, a partir da seleção das arestas que mais aumentam a eficiência, a rede da Figura 4.3, também para 50 novas arestas. Todas as arestas inseridas tiveram em comum um mesmo vértice, referente a Usina de Luiz Gonzaga localizada no estado de Pernambuco. Observando as propriedades do vértice que representa esta usina, não se encontrou informações que justificassem a escolha desse vértice pelo algoritmo para ser ligado a todas as novas arestas adicionadas por esse método. O grafo começou a propender para uma topologia estrela, caracterizada por um vértice central que possui uma ligação direta com todos os vértices do grafo.

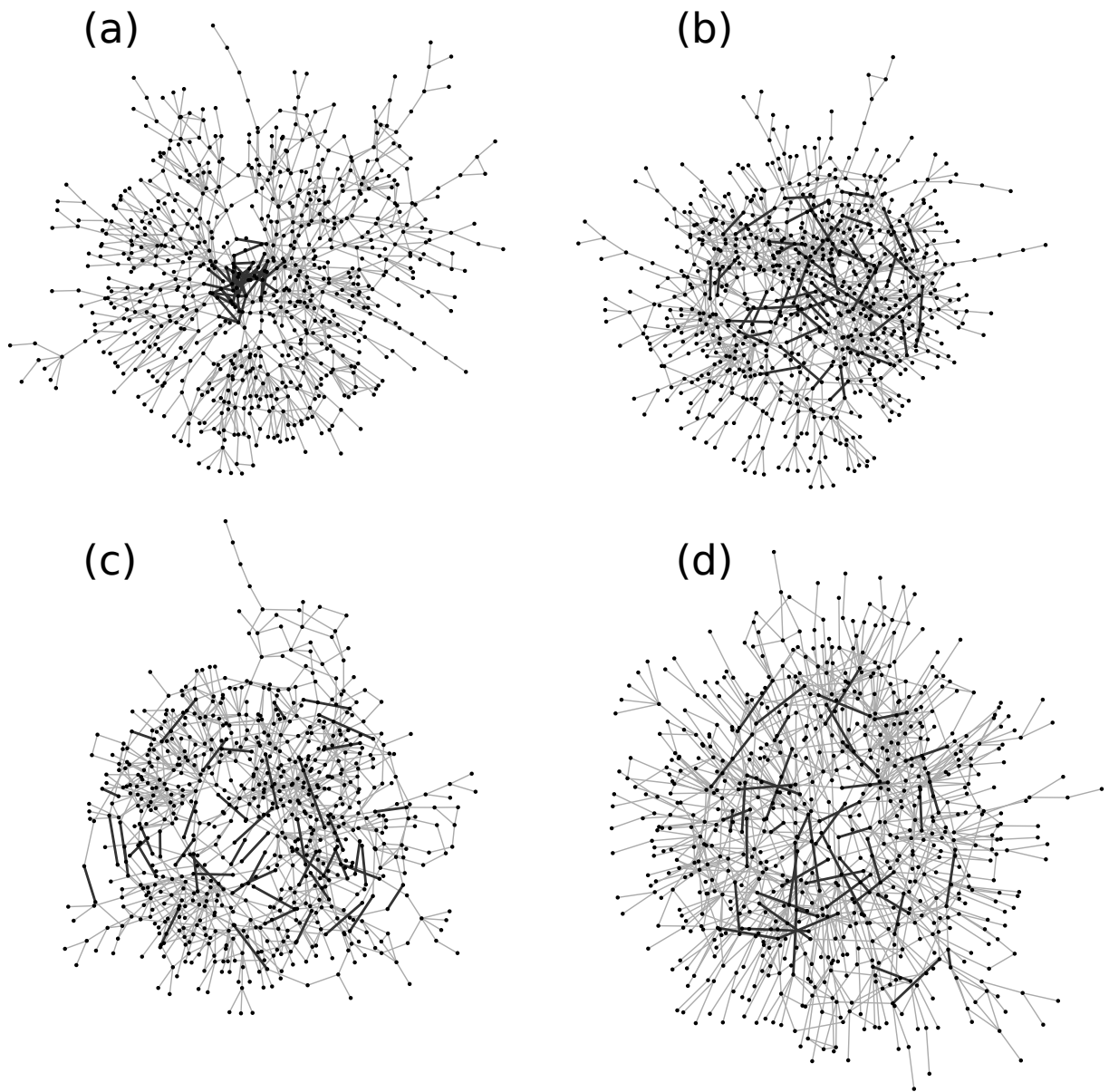


Figura 4.2: *Grafos resultantes após a inserção de 50 arestas, utilizando as 4 estratégias, com o auxílio do procedimento min-cut. (a) VVz. (b) MCa. (c) MGr. (d) CMd. As novas arestas adicionadas a cada rede estão destacadas em negrito.*

Com todas as redes geradas e armazenadas, iniciou-se então a etapa seguinte: calcular o aumento de eficiência obtido com cada estratégia.

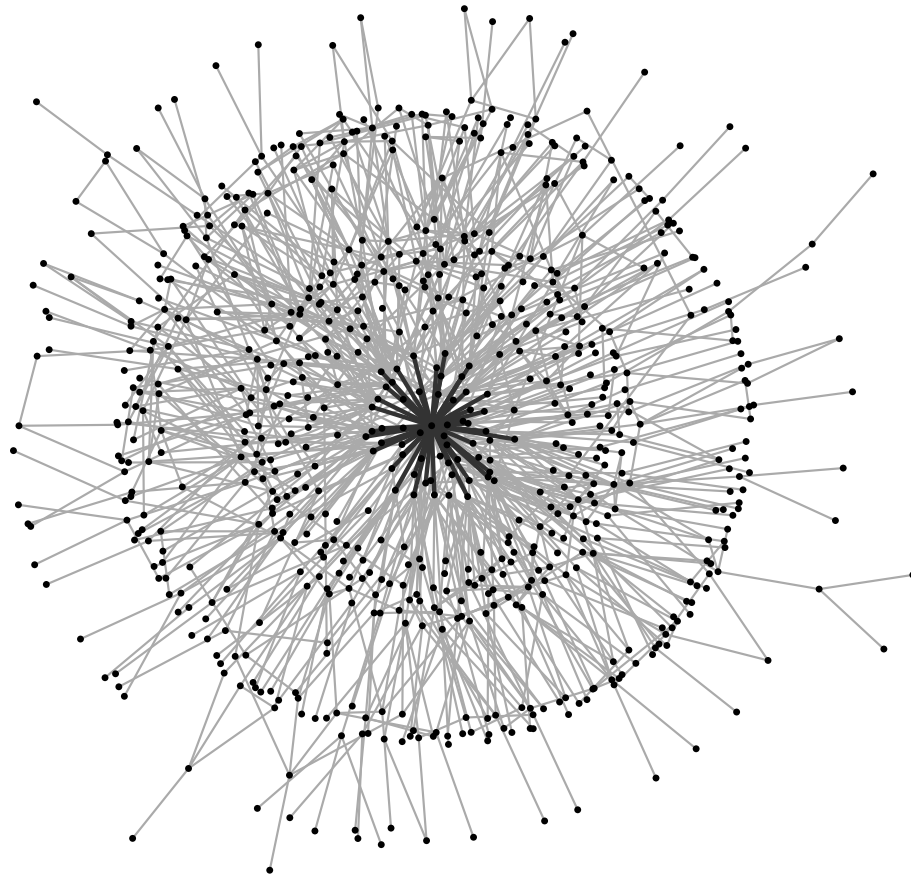


Figura 4.3: *Grafo resultante pela inserção de 50 arestas através da AAI. Nota-se que o grafo começou a se aproximar de uma topologia estrela, onde vários vértices efetuam uma ligação a um vértice central.*

4.2 Aumento de eficiência na rede de alta tensão

Calculou-se o aumento de eficiência obtido com cada uma das redes geradas pelas estratégias. Isso foi feito a cada nova aresta adicionada, para que fosse possível verificar a evolução da eficiência em cada rede. Pode-se observar na Figura 4.4 que o aumento de eficiência foi maior para todas as estratégias quando aliadas ao procedimento *min-cut* (b). Observando-se individualmente cada gráfico desta figura, nota-se que as mesmas estratégias se sobressaíram em ambos, sendo que a CMd foi a que apresentou os melhores resultados.

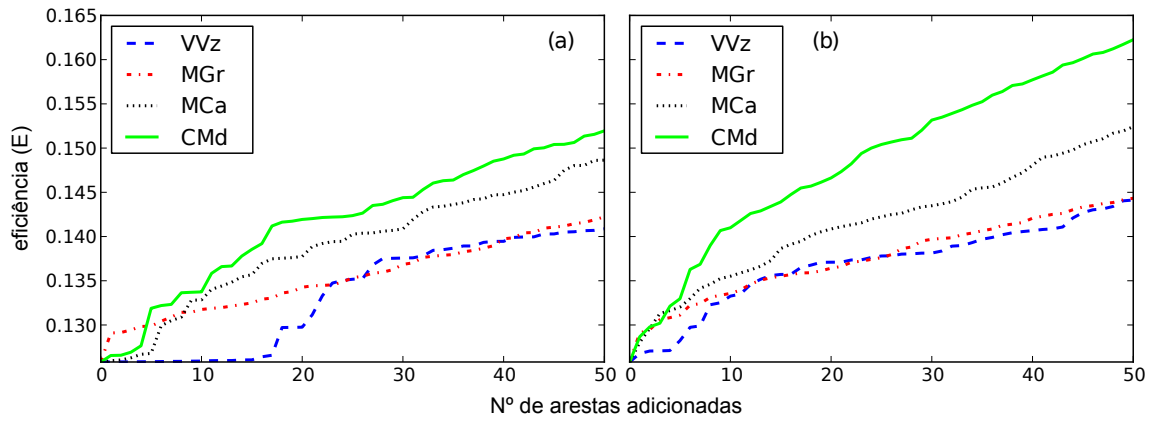


Figura 4.4: Aumento de eficiência para adição de 50 arestas utilizando todas as estratégias, sem o auxílio do procedimento min-cut (a) e com o auxílio do mesmo (b).

Comparou-se então a estratégia CMd, com e sem *min-cut*, ao aumento proveniente do procedimento AAI, ilustrado na Figura 4.5. Nota-se que houve uma diferença grande, de 47,17% a mais de aumento pelas arestas ideais comparado à CMd com *min-cut*.

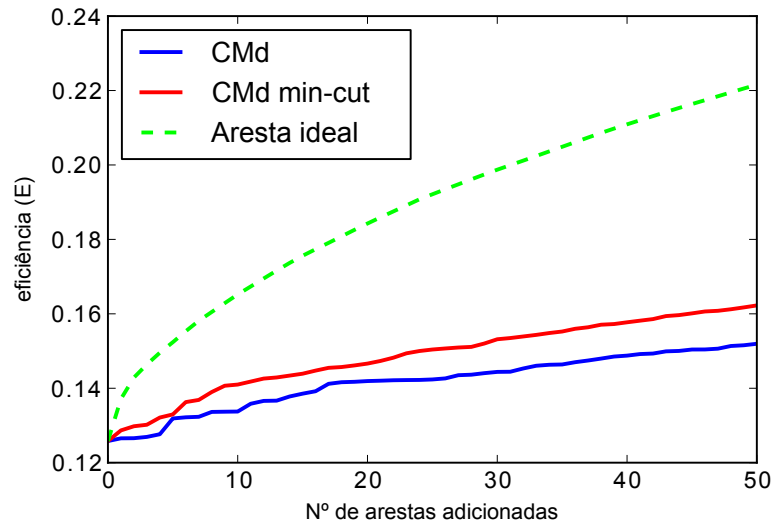


Figura 4.5: Comparação entre a estratégia CMd sem e com *min-cut* diante do aumento trazido pela AAI. A estratégia CMd sem *min-cut* aumentou em 20,77% a eficiência final, a CMd com *min-cut* aumentou em 28,96% e a AAI aumentou em 76,10%.

Com estes dados, pôde-se verificar como as estratégias se comportam no modelo da rede de alta tensão brasileira. Na seção a seguir, verifica-se se as estratégias apresentam o mesmo comportamento em outros grafos.

4.3 Aumento de eficiência em redes *Scale-Free* e redes aleatórias

Após os testes das estratégias na rede de alta tensão brasileira, decidiu-se verificá-las em redes diferentes e investigar se o aumento da eficiência se comporta da mesma maneira. Para tal, criaram-se 2 mil redes com aproximadamente 739 vértices e 1460 arestas, a mesma quantidade de vértices e arestas da rede brasileira, sendo mil redes do tipo *Scale-Free*, construídas segundo o modelo de Barabási-Albert, e mil redes Aleatórias, segundo o modelo de Erdős-Rényi. Foi adicionada uma aresta a cada rede utilizando cada uma das estratégias, calculando-se a seguir a média do aumento da eficiência. Os resultados são apresentados na Figura 4.6.

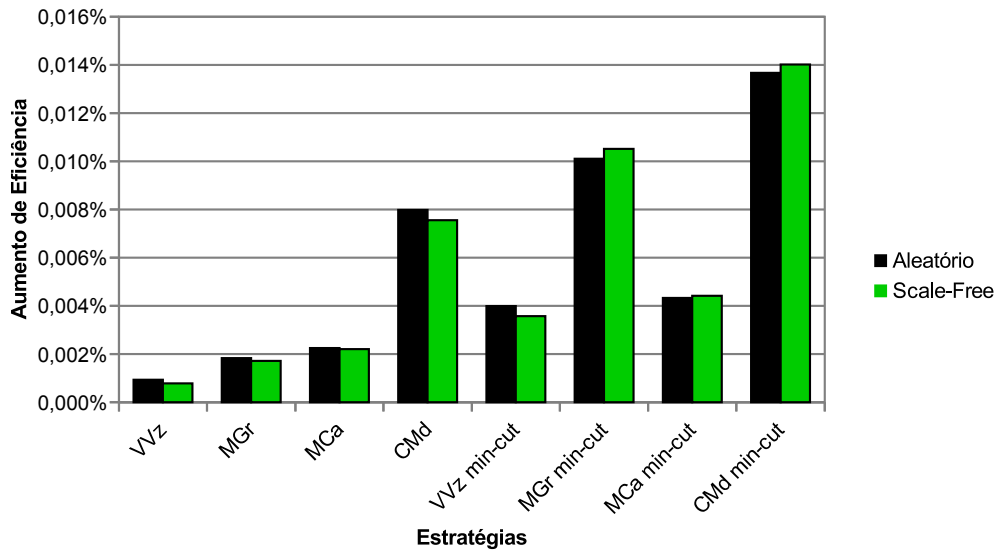


Figura 4.6: Aumento médio de eficiência para inclusão de 1 aresta em 1000 grafos artificiais do modelo de Barabási-Albert e 1000 Aleatórios do modelo de Erdős-Rényi, usando todas as estratégias.

A variância foi pequena, ficando abaixo de $1,48 \times 10^{-4}$ para as redes *Scale-Free* e abaixo de $1,42 \times 10^{-4}$ nas redes Aleatórias.

Comparando-se o aumento de eficiência nas redes artificiais e o aumento na rede de alta tensão através da Figura 4.7, verifica-se que as estratégias se comportaram de forma semelhante. O método CMd *min-cut* apresentou o maior aumento de eficiência em todos os casos e o CMd sem *min-cut* foi o melhor entre os que não usaram *min-cut*. Isso permite supor que as estratégias aumentariam a eficiência com um bom grau de acurácia em outras redes. Deve-se notar que na figura os gráficos tem escalas diferentes.

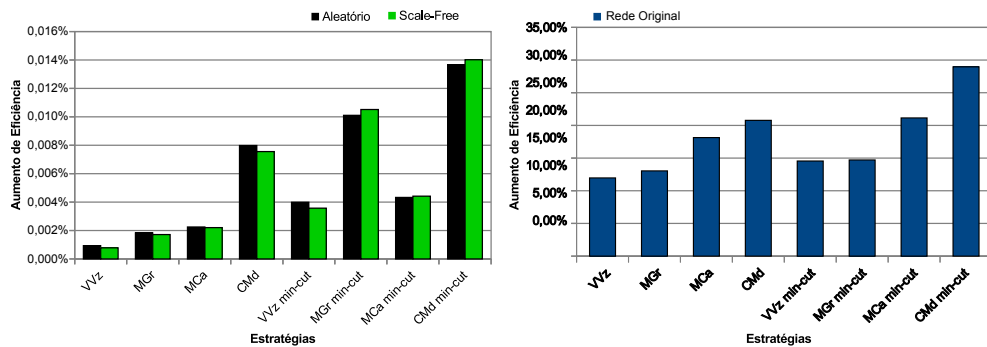


Figura 4.7: Comparação entre aumento de eficiência na rede original e nas redes artificiais.

Comprovou-se, assim, que é possível aumentar a eficiência da rede com as estratégias propostas neste trabalho.

Apresentam-se adiante os resultados de teste de resiliência da rede após a inserção das novas arestas.

4.4 Resiliência a falhas planejadas e falhas aleatórias

A resiliência da rede foi testada diante de falhas planejadas e falhas aleatórias, para todas as estratégias, com ou sem *min-cut* e para a rede original. Com isso, é possível comparar a mudança da resiliência que cada estratégia trouxe.

Na Figura 4.8, tem-se o gráfico do dano (Equação 3.6) para o caso de falhas aleatórias. O gráfico da esquerda (a) relaciona-se às estratégias sem uso do *min-cut* e pode-se ver que as linhas da evolução do dano em relação à capacidade cruzam-se bastante, tornando difícil diferenciar qual delas trouxe maior dano. Já no gráfico (b) é perceptível que a linha relacionada à estratégia MGr esteve acima das outras em boa parte do gráfico, o que significa que a rede a ela relacionada se tornou mais vulnerável.

Olhando os dois gráficos, nota-se que, quando houve o uso do *min-cut*, os danos foram maiores. No gráfico (a), quando a capacidade atinge aproximadamente 1,3 o dano não mais ultrapassa o valor de 0,1. No caso do gráfico (b), o dano deixa de ultrapassar 0,1 quando a capacidade atinge aproximadamente 1,37. O dano máximo quando não houve auxílio do *min-cut* foi de 0,37 contra 0,44 com o uso do *min-cut*.

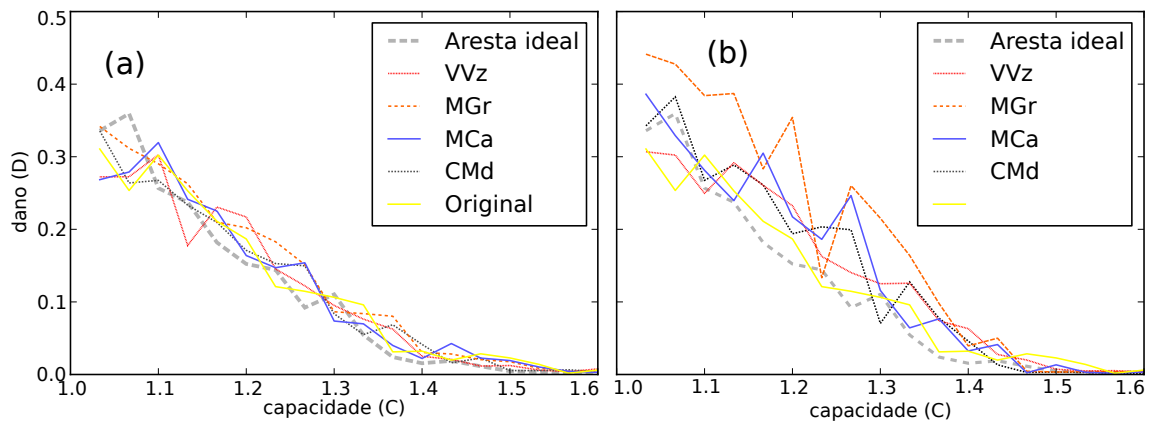


Figura 4.8: *Dano na rede para todas as estratégias diante de falhas aleatórias sem o auxílio do procedimento min-cut (a) e com o auxílio do procedimento (b).*

Diante de falhas planejadas (Figura 4.9), os gráficos se diferenciaram um pouco mais. Como a indução da falha foi na aresta de maior carga, esperava-se danos maiores à rede, o que de fato ocorreu, com o dano máximo atingindo 0,67 nas redes sem *min-cut* (a) e 0,77 nas redes com *min-cut* (b). No geral, as estratégias com auxílio do *min-cut* trouxeram maior dano à rede.

Entretanto, observa-se no gráfico (b) que o dano em várias redes tem uma queda brusca após ultrapassar uma certa capacidade. Como exemplo, a estratégia CMd cai de um dano próximo de 0,5 para um valor aproximado de 0,05 quando a capacidade está ao redor de 1,45. Vale destacar também que no gráfico (a) o dano não teve uma queda abaixo de 0,09 para todas as estratégias, mesmo com a capacidade atingindo o valor 2, enquanto no gráfico (b), acima de 1,7 de capacidade, em 4 estratégias o dano já estava abaixo de 0,05.

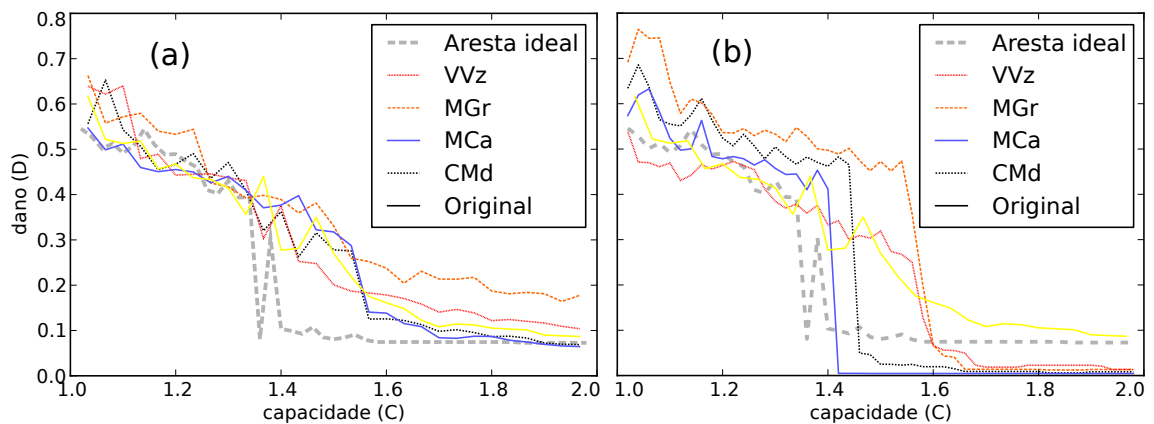


Figura 4.9: *Dano na rede para todas as estratégias diante de falhas planejadas sem o auxílio do procedimento min-cut (a) e com o auxílio do procedimento (b).*

Com o teste do dano na rede, finaliza-se a apresentação dos resultados para esta pesquisa. Os ganhos que a pesquisa trouxe com estes resultados são o assunto do capítulo seguinte.

5 *Discussão*

A ideia de tentar melhorar a topologia da rede surgiu de outros trabalhos, que tentaram fazer algo semelhante, mas com enfoque diferente. A estratégia MGr e o procedimento *min-cut* foram utilizados por outros autores e, analisando seus trabalhos acreditou-se que seria possível encontrar outros métodos capazes de mudar a topologia e aumentar a robustez da rede.

A estratégia VVz se mostrava promissora. Em um modelo simples, como o da Figura 3.3, parecia claro que um caminho alternativo seria criado, aliviando a aresta de maior carga. Dessa forma, quando essa aresta fosse perdida, este caminho alternativo seria usado, aumentando assim a resiliência da rede. Apesar disso, nas simulações esta estratégia foi a que menos aumentou a eficiência em todos os casos (Figura 4.4) e a resiliência da rede resultante permaneceu praticamente a mesma da rede de alta tensão original (Figuras 4.8 e 4.9).

Após os testes com as estratégias MGr, VVz e MCa, fez-se a busca pelas melhores arestas (AAI). Esse último procedimento é computacionalmente custoso e levou cerca de 30 dias, utilizando processamento paralelo em 5 computadores com processadores de 4 núcleos de 2,5Ghz, pertencentes ao cluster Beowulf da Faculdade de Tecnologia.

Ao ver que o aumento de eficiência era muito maior com a AAI do que as outras estratégias, pensou-se que estas últimas iriam falhar. Após uma análise mais profunda, notou-se que todas as arestas obtidas com a AAI tinham em comum um mesmo vértice, fazendo com que a rede começasse a parecer uma topologia estrela. Em se tratando de redes de alta tensão, isso é inviável, pois, uma única subestação ou usina não suportaria uma quantidade de linhas de transmissão tão grande ligadas a ela. Outro problema, que não foi simulado no trabalho, mas já foi demonstrado em [1, 25], é que a perda de um vértice de carga alta teria um impacto muito grande na resiliência da rede. Seria muito arriscado manter um vértice com 50 ou mais arestas numa rede de alta tensão, visto que sua perda provavelmente levaria o sistema ao colapso.

Mesmo a AAI sendo inadequada para redes de alta tensão, seu aumento de eficiência levou ao questionamento de qual seria o critério de escolha dos vértices para se ligar uma nova aresta e trazer um grande aumento de eficiência. Observando as propriedades dos vértices escolhidos

pelas 50 arestas (*betweenness*, grau e coeficiente de cluster), a escolha pareceu ser aleatória. Notou-se apenas que os valores dessas propriedades eram medianos, em relação aos seus valores máximo e mínimo. Foi então que surgiu a ideia da estratégia CMd.

A CMd se mostrou melhor que as outras estratégias na questão do aumento de eficiência. Observando o grafo resultante, é possível notar que a maioria das suas arestas quase não tem vértices em comum umas com as outras e estão mais espalhadas pelo grafo. Apesar de não ter analisado a localização geográfica dos vértices para saber qual a extensão das linhas que a estratégia propõe, o fato de não concentrar a carga em um único vértice já a torna mais propensa para sugerir novas linhas no sistema.

Foi então incorporado às estratégias o procedimento *min-cut*, sugerido em [11] como um método capaz de evitar que a rede seja dividida em componentes, fazendo assim com a robustez da rede aumente. Todas as estratégias mostraram maior aumento de eficiência quando aliadas a este método.

Para verificar que as estratégias dariam resultados semelhantes em outras redes, as simulações foram efetuadas em grafos artificiais, sendo 1000 de topologia *Scale-Free* e e 100 de topologia aleatória (Figura 4.6). Os aumentos foram pequenos, atingindo a média máxima de aproximadamente 0,014% para a estratégia CMd com *min-cut*. Porém, houve uma variância pequena em uma quantidade grande de testes, e os resultados foram semelhantes em ambos os tipos de rede. Isso demonstra que as estratégias se comportam de forma parecida em redes diferentes, sugerindo assim que ao utilizar as estratégias em uma rede, os aumentos serão proporcionais aos encontrados neste trabalho.

Iniciou-se assim a última etapa da pesquisa, que foi a de testar a resiliência da rede a falhas aleatórias e falhas planejadas em linhas de transmissão, visto que nas referências encontradas, as falhas que causam apagões tiveram início em algum problema em linhas, não em subestações ou usinas [4–6]. Pode-se dizer que, em sua maioria, as estratégias não mantiveram a mesma resiliência da rede original, por vezes até mesmo piorando a robustez. Em poucos casos, para falhas planejadas nas estratégias aliadas ao *min-cut* com capacidade acima de 1,4, houve uma melhora na robustez. Pode-se observar estes valores nas Figuras 4.8 e 4.9.

Mesmo assim, vale destacar a estratégia CMd. Observando os gráficos de dano na rede, pode-se notar que em quase todos os momentos a robustez da rede gerada por esta estratégia esteve próxima à da rede original, estando por vezes melhor, o que pode ser visto na Figura 4.9b para capacidades acima de 1,45. Apesar de não dar aumentos tão significativos na robustez, essa estratégia trouxe bons aumentos de eficiência da rede. Este não era um objetivo inicial da pesquisa, porém, é um resultado que pode ser útil, visto que pode ajudar a planejar uma

rede com melhor eficiência de transmissão energética sem modificar a robustez de uma rede já estabelecida.

Por mais que a AAI garanta que a eficiência será a maior desejada, o tempo de execução da mesma cresce exponencialmente em relação à quantidade de vértices da rede em questão. Como exemplo, a rede de alta tensão teve 739 vértices e levou em torno de 30 dias para executar a AAI sobre esta. Se fosse uma rede com 5 mil vértices, levaria aproximadamente 1500 dias para executá-la nas mesmas condições em que foi foram feitos os testes desta pesquisa.

Tratando-se apenas de Redes Complexas, a estratégia CMd pode ser utilizada quando se deseja aumentar a eficiência de uma rede qualquer, mantendo sua robustez, sem que seja exigido que haja o aumento de eficiência máximo. A execução da CMd, em um único núcleo de um processador de 2.2Ghz, levou cerca de 2 segundos. Seu tempo de execução é proporcional à quantidade de arestas, o que permite que sugira-se que levaria aproximadamente 14 segundos para uma rede de 5 mil vértices, nas mesmas condições.

Neste capítulo, mostrou-se como o modelo desenvolvido pode ser aplicado no planejamento de novas linhas em redes de alta tensão para que tenham maior eficiência de transmissão energética, buscando manter ou até mesmo aumentar a tolerância a falhas da rede. Demonstrou-se que das estratégias propostas, a ligação de vértices de carga mediana com o auxílio do *min-cut* foi a que deu os melhores resultados.

No capítulo a seguir, apresentam-se as conclusões obtidas pela pesquisa.

6 *Conclusões*

Este trabalho se propôs a gerar técnicas para auxiliar o planejamento de instalação de novas linhas de transmissão em redes de alta tensão, utilizando um modelo em forma de grafo da rede brasileira de geração e transmissão.

Definido o objetivo, foi feita uma revisão bibliográfica e citaram-se no trabalho as de maior relevância. A bibliografia abordou a área de redes complexas, suas aplicações em redes de alta tensão e estudos na rede elétrica do Brasil.

A coleta de dados não foi demorada, visto que apenas uma fonte de dados esteve disponível para a criação do modelo. Tais dados foram processados por vários programas desenvolvidos especificamente para este fim, gerando e analisando um modelo da rede em forma de grafo, utilizando como base a Teoria das Redes Complexas.

Testaram-se todas as estratégias, que foram bem sucedidas em aumentar a eficiência da rede. Apesar do aumento utilizando as AAI ser maior que todas as estratégias, na prática essa técnica se mostrou inviável devido a todas as arestas se ligarem a um único vértice, o que poderia sobrecarregá-lo. Sendo assim, a técnica CMd obteve os melhores resultados, aumentando a eficiência e mantendo as arestas com poucos vértices em comum umas com as outras.

Verificou-se em seguida que as estratégias não causaram aumento significativo na resiliência da rede. Porém, a estratégia CMd conseguiu manter a robustez próxima da que se tem na rede original, por vezes até mesmo aumentando-a. Concluiu-se então que esta estratégia pode ser bem sucedida em auxiliar no planejamento de novas linhas para a rede de alta tensão, visto que trouxe bons resultados, é simples de ser aplicada e seu tempo de execução rápido. Porém, deve ser aliada a outros métodos que possam garantir com mais confiança que as linhas trarão benefícios para a rede.

Esta pesquisa contribuiu para o conhecimento na área de Redes Complexas, através do desenvolvimento de técnicas de aumento de eficiência com custo computacional baixo. Contribuiu para o planejamento de redes de alta tensão, criando estratégias que permitem sugerir a instalação de linhas de transmissão e um maior entendimento da topologia e seu impacto no

funcionamento da rede.

Avaliou-se a hipótese inicial de aumentar a resiliência da rede pela inserção de arestas, conseguindo este aumento em alguns casos. As estratégias de adição de arestas trouxeram aumento de eficiência em todos os testes. Dessa forma, consideram-se atingidos os objetivos da pesquisa.

7 Trabalhos Futuros

O modelo proposto apresentou resultados satisfatórios, mas existem possibilidades de dar continuidade ao estudo com trabalhos que podem melhorar a inserção de linhas no sistema usando as estratégias aqui propostas.

Não houve preocupação com a distância física e obstáculos reais para instalar as linhas propostas pelas estratégias. Um trabalho efetuando ligações entre subestações dentro de um raio geográfico máximo pode ser feito para evitar que linhas de comprimento muito longo sejam sugeridas. Uma outra possibilidade, é a de limitar as novas linhas entre subestações de estados adjacentes.

Obtendo-se um histórico de onde iniciaram-se os apagões na rede brasileira e a configuração da rede quando dada a ocorrência dos apagões, pode-se efetuar as simulações de resiliência da rede tendo os pontos iniciais de contingências ocorridas como alvo inicial. Isso poderia comprovar se as simulações são capazes de prever o colapso da rede nos pontos e, adicionando-se algumas novas arestas, efetuar a simulação novamente, verificando se o apagão poderia ser evitado.

Com um registro das linhas que foram instaladas ao passar dos anos, pode-se utilizar as estratégias para simular a instalação de linhas a partir da rede em um momento, verificando se as sugestões dos métodos são coerentes com as linhas que foram instaladas na rede de alta tensão no momento seguinte.

Referências Bibliográficas

- 1 CRUCITTI, P.; LATORA, V.; MARCHIORI, M. Model for cascading failures in complex networks. *Physical Review E*, Italy, v. 69, 2004.
- 2 PAHWA, S.; HODGES, A.; SCOGLIO, C.; WOOD, S. Topological analysis of the power grid and mitigation strategies against cascading failures. *4th Annual International IEEE Systems Conference*, Hefei, China, 2010.
- 3 CRUCITTI, P.; LATORA, V.; MARCHIORI, M. A topological analysis of the italian electric power grid. *Physica A*, Italy, v. 338, p. 92 – 97, 2004.
- 4 PAIVA, W. R. *Falhas em Cascata na Rede Brasileira de Alta Tensão*. 26 f. Monografia (Graduação) — Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil, 2011.
- 5 ÚLTIMO SEGUNDO. *Desligamento de proteção levou a apagão no Nordeste, diz ministério.*, *G1 Economia*. 2012. <http://g1.globo.com/economia/noticia/2012/10/desligamento-de-protecao-levou-apagao-no-nordeste-diz-ministerio.html>. [Online; acesso em 27 de Outubro de 2013].
- 6 ÚLTIMO SEGUNDO. *Apagão foi causado por queimada no Piauí, diz ministro.*, *G1 Economia*. 2013. <http://g1.globo.com/economia/noticia/2013/08/apagao-foi-causado-por-queimada-no-piaui-diz-lobao.html>. [Online; acesso em 27 de Outubro de 2013].
- 7 KINNEY, R.; CRUCITTI, P.; ALBERT, R.; LATORA, V. Modeling cascading failures in the north american power grid. *Eur. Phys. J. B*, v. 46, 2005.
- 8 ALBERT, R.; ALBERT, I.; NAKARADO, G. L. Structural vulnerability of the north american power grid. *Phys. Rev. E*, USA, v. 69, 2004.
- 9 WANG, J.-W.; RONG, L.-L. Cascade-based attack vulnerability on the us power grid. *Safety Science*, Liaoning, PR China, v. 47, 2009.
- 10 ARIANOS, S.; BOMPARD, E.; CARBONE, A.; XUE, F. Power grids vulnerability: A complex network approach. *Chaos*, Torino, Italy, v. 19, 2009.
- 11 ROSATO, V.; BOLOGNA, S.; TIRITICCO, F. Topological properties of high-voltage electrical transmission networks. *Electrical Power Systems Research*, Roma, Italy, 2006.
- 12 HAN, P.; DING, M. Analysis of cascading failures in small-world power grid. *International Journal of Energy Science*, Hefei, China, v. 1, 2011.
- 13 LI, L.; JIA, Q.-S.; GUAN, X.; WANG, H. Enhancing the robustness and efficiency of scale-free network with limited link addition. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, v. 06, 01 2012.

- 14 GUO, Q.; LIU, J.-G.; NIU, D. Enhance robustness of scale-free networks. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, Dalian, P.R. China, v. 39, 2007.
- 15 ZHAO, J.; XU, K. Enhancing the robustness of scale-free networks. *CoRR*, abs/0905.2227, 2009.
- 16 ZHUO, Y.; PENG, Y.; LONG, K.; LIU, Y. On allocating redundancy links to improve robustness of complex communication network. *Proceedings of the SPIE*, v. 7633, 2009.
- 17 SHARGEL, B.; SAYAMA, H.; EPSTEIN, I. R.; BAR-YAM, Y. Optimization of robustness and connectivity in complex networks. *Physical Review Letters*, v. 90, 2003.
- 18 LEÃO, R. *GTD - Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica*. Ceará, Brasil, 2009.
- 19 AFFONSO, C. M.; SILVA, L. C. P.; SILVA, L. J. Avaliação da estabilidade de tensão do sistema brasileiro - um caso de estudo. *Revista Controle & Automação*, Brasil, v. 19, 2008.
- 20 ROCHA, L. E. C. Notícia ruim corre depressa! *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Sweden, v. 31, 2009.
- 21 PEREIRA, V. H.; MARTINS, P.; ANGELIS, A. F. de; TIMÓTEO, V. S. A simple model for cascading failures in scale-free networks. *SBAI-DINCON*, 2013.
- 22 MELLO, B. A. et al. *Teoria de Redes Complexas e o Poder de Difusão dos Municípios*. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília, Brasil, 2010.
- 23 CHEN, J.; THORP, J. S.; DOBSON, I. Cascading dynamics and mitigation assessment in power system disturbances via a hidden failure model. *Electrical Power and Energy Systems*, USA, v. 27, 2005.
- 24 MOTTER, A. E.; LAI, Y.-C. Cascade-based attacks on complex networks. *Physical Review E*, v. 66, 2002.
- 25 CRUCITTI, P.; LATORA, V.; MARCHIORI, M.; RAPISARDA, A. Error and attack tolerance of complex networks. *Physica A*, Italy, v. 340, p. 388 – 394, 2004.
- 26 NAMBOODIRI, S.; KRIPADAS, K. Specp: A tool for spectral partitioning of protein contact graph. *Bioinformation*, v. 06, 06 2013.
- 27 FERREIRA, A. C. B. *Um Estudo Comparativo de Segmentação de Imagens por Aplicações do Corte Normalizado em Grafos*. 94 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia, Limeira, SP, Brasil, 01 2011.
- 28 POTHEN, A.; SIMON, H. D.; LIOU, K.-P. Partitioning sparse matrices with eigenvectors of graphs. *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, USA, v. 11, n. 3, p. 430–452, maio 1990. ISSN 0895-4798. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1137/0611030>>.
- 29 BALDICK, R. et al. Vulnerability assessment for cascading failures in electric power systems. *IEEE Power and Energy Society Power Systems Conference and Exposition*, Seattle, WA, 2009.

- 30 US Energy Information Administration. *Energy Perspectives, Total Energy*. 2012. <http://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/perspectives.cfm>. [Online; acesso em 27 de Outubro de 2013].
- 31 COSTA, L. da F.; RODRIGUES, F. A.; TRAVIESO, G.; BOAS, P. R. V. Characterization of complex networks: A survey of measurements. *Advances in Physics*, v. 56, p. 167 – 242, 08 2006.
- 32 NETTO, P. O. B.; JURKIEWICZ, S. *Grafos: Introdução e Prática*. [S.l.: s.n.], 2009.
- 33 BRANDES, U. On variants of shortest-path betweenness centrality and their generic computation. *Social Networks*, v. 30, p. 136–145, 05 2008.