

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

ALECIANA VASCONCELOS ORTEGA

**IMPLEMENTANDO O MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DO
USO DE REDES COMPLEXAS**

Ilha Solteira
2017

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

ALECIANA VASCONCELOS ORTEGA

**IMPLEMENTANDO O MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ATRAVÉS DO USO DE REDES COMPLEXAS**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica Área de conhecimento Automação.

Orientador Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato.

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

O771i Ortega, Aleciana Vasconcelos.
Implementando o modelo de distribuição de energia através do uso de
redes complexas / Aleciana Vasconcelos Ortega. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017
93 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia
de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2017

Orientador: Luiz Fernando Bovolato
Inclui bibliografia

1. Redes de distribuição. 2. Energia elétrica. 3. Redes complexas.

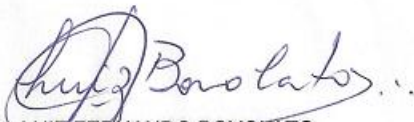
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: IMPLEMENTANDO O MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DO USO DE REDES COMPLEXAS

AUTORA: ALECIANA VASCONCELOS ORTEGA

ORIENTADOR: LUIZ FERNANDO BOVOLATO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: AUTOMAÇÃO pela Comissão Examinadora:



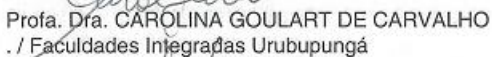
Prof. Dr. LUIZ FERNANDO BOVOLATO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



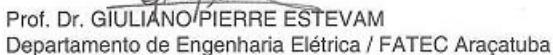
Profa. Dra. CHRISTIANE MARIE SCHWEITZER
Departamento de Matemática / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. LUIS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Profa. Dra. CAROLINA GOULART DE CARVALHO
/ Faculdades Integradas Urubupungá



Prof. Dr. GIULIANO PIERRE ESTEVAM
Departamento de Engenharia Elétrica / FATEC Araçatuba

Ilha Solteira, 01 de setembro de 2017

Ao meu querido e amado filho Daniel Vasconcelos Ortega e meu esposo Alcides
Ortega.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

As minhas professoras queridas Christiane Marie Schweitzer e Mariângela de Carvalho Bovolato, sem elas jamais teria conseguido chegar até aqui.

Ao meu orientador Professor Luiz Fernando Bovolato pelo apoio e ensinamentos.

A minha querida irmã Érica Vasconcelos de Moraes Oliveira.

Aos meus pais Alvaro Andrade Vasconcelos e Nair Candida de Moraes Vasconcelos que sempre me apoiaram e cuidaram com carinho do meu filho para que pudesse me ausentar e conseguir alcançar mais este objetivo na minha vida.

Ao meu amado Alcides Ortega pelo apoio.

A todos os amigos do Departamento de Engenharia Elétrica.

Agradeço também a Capes pelo apoio financeiro.

RESUMO

As Redes Complexas podem descrever vários tipos de sistemas importantes através da representação dos grafos. Com o aumento da capacidade de processamento e armazenamento dos computadores, tornou-se possível o acesso e a análise de várias bases de dados de diversas áreas, o que permitiu a comparação de redes do mundo real com os modelos de redes já existentes. Essas redes complexas apresentam propriedades que são úteis nas análises dos mais diversos aspectos das redes e com os mais variados propósitos. O presente trabalho tem por objetivo investigar as propriedades estruturais e de funcionamento das redes de distribuição de energia, considerando suas diferentes topologias, a fim de definir um modelo através do uso de Redes Complexas com o propósito de analisar o comportamento da rede, considerando, características de desempenho, resiliência e identificação de falhas. Nesta tese foi utilizada uma rede padrão chamada de Rede Modelo de distribuição de energia elétrica a qual foi modelada e simulada para servir de referência para comparar as métricas da Rede de Distribuição da cidade de Ilha Solteira. Nestes modelos analisados, os transformadores referem-se aos vértices da rede enquanto que as ligações entre eles representam as arestas do grafo. Um fato importante na utilização dos modelos é a possibilidade de estudar e detectar qualquer característica dos relacionamentos e assim direcionar recursos para uma proposta. Os alimentadores analisados em questão comparados a rede padrão apresentada, tiveram um desempenho bom no que diz respeito a sua aplicação que puderam ser demonstrados através de suas propriedades ou métricas. O modelo adotado forneceu a característica real das redes analisadas. Pode-se perceber que conforme as redes aumentam o tamanho, o número de vértices se torna de baixo grau, o que possibilita o crescimento desta rede. Os estudos desenvolvidos nesta tese se tornam muito relevantes porque a análise da rede complexa permite a operadores e engenheiros praticidade na operação e gerência da rede, bem como, planejamento e otimização no uso de seus recursos.

Palavras- Chave: Redes de distribuição. Energia elétrica. Redes complexas.

ABSTRACT

Complex Networks can describe several types of important systems through the representation of graphs. With the increase in the processing and storage capacity of the computers, it became possible to access and analyze several databases from different areas, which allowed the comparison of real-world networks with existing network models. These complex networks present properties that are useful in the analysis of the most diverse aspects of the networks and for the most varied purposes. The objective of this work is to investigate the structural and operational properties of the energy distribution networks, considering their different topologies, in order to define a model through the use of Complex Networks with the purpose of analyzing the network behavior, considering characteristics Performance, resiliency, and fault identification. In this thesis was used a standard network called Model Electric Distribution Network which was modeled and simulated to serve as reference to compare the metrics of the Distribution Network of the city of Ilha Solteira. In these analyzed models, the transformers refer to the vertices of the network while the connections between them represent the edges of the graph. An important fact in the use of models is the possibility of studying and detecting any characteristic of relationships and thus directing resources to a proposal. The analyzed feeders in question compared to the standard network presented, had a good performance with respect to their application that could be demonstrated through their properties or metrics. The adopted model provided the real characteristic of the analyzed networks. It can be noticed that as the networks increase in size, the number of vertices becomes low-grade, which allows the growth of this network. The studies developed in this thesis become very relevant because the analysis of the complex network allows to the operators and engineers practicality in the operation and management of the network, as well as, planning and optimization in the use of its resources.

Keywords: Distribution networks. Electricity. Complex networks.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

QUADRO 1 – TENSÕES USUAIS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA.....	15
FIGURA 1 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA..	15
FIGURA 2 – DIAGRAMA UNIFILAR DE SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA.....	16
FIGURA 3 – ESQUEMATIZAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO.....	16
FIGURA 4 - BARRA SIMPLES – UM CIRCUITO DE SUPRIMENTO	18
FIGURA 5 - BARRA SIMPLES – DOIS CIRCUITOS DE SUPRIMENTO.....	18
FIGURA 6 - BARRA DUPLA COM DOIS CIRCUITOS DE SUPRIMENTO – SAÍDA DOS ALIMENTADORES PRIMÁRIOS	19
FIGURA 7 - BARRA DUPLA COM DISJUNTOR DE TRANSFERÊNCIA	20
FIGURA 8 - SUBESTAÇÃO COM BARRA PRINCIPAL E BARRA DE TRANSFERÊNCIA	21
FIGURA 9 - CIRCUITO AÉREO RADIAL SIMPLES	22
FIGURA 10 - TIPOS DE ESTRUTURAS E ACESSÓRIOS UTILIZADOS EM REDE PROTEGIDA COMPACTA	24
FIGURA 11 - CONFIGURAÇÃO RADIAL SIMPLES.....	26
FIGURA 12 - CONFIGURAÇÃO RADIAL COM RECURSO	26
FIGURA 13 - CONFIGURAÇÃO EM ANEL.....	28
FIGURA 14 - CURVA DE DEMANDA MEDIDA COM INTERVALO DE 15 MINUTOS	29
FIGURA 15 – CURVA DE CARGA DE UM SISTEMA	33
QUADRO 2 - FATOR K.....	36
FIGURA 18 - DEMONSTRAÇÃO DE DUAS CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DAS FUNÇÕES DE UM DETERMINADO NÓ EM UMA REDE COMPLEXA.	41
FIGURA 19 - DUAS REDES COMPLEXAS E SUAS MATRIZES DE ADJACÊNCIAS	42
FIGURA 20 - REDE ALEATÓRIA DE ERDÖS E RÉNYI.....	44
FIGURA 21 - REDE <i>SMALL WORLD</i>	46
FIGURA 23 – FREQUÊNCIA DAS REDES RANDÔMICA (A). MUNDO PEQUENO (B) E LIVRE DE ESCALA (C, D).....	52
FIGURA 24 – TELA DE ABERTURA DO PROGRAMA B-A	66

FIGURA 26 – GRÁFICO DE FREQUÊNCIA DE DISTRIBUIÇÃO DOS GRAUS DOS NÓS	67
FIGURA 27 – TIPO DE REDE LIVRE DE ESCALA IMPLEMENTADA NO NETLOGO	69
FIGURA 28 – MAPA DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – CIDADE DE ILHA SOLTEIRA – SP.....	74
FIGURA 29 – GRAFO DA REDE MODELO.....	75
QUADRO 4 - MÉTRICAS DOS ALIMENTADORES.....	78
FIGURA 30 – GRAFO DO ALIMENTADOR 9.....	79
FIGURA 31 – CENTRALIDADE DOS VÉRTICES NA REDE DO ALIMENTADOR 16	80
FIGURA 32 – GRAFO DO ALIMENTADOR 14.....	81
FIGURA 33 – GRAFO DO ALIMENTADOR 15.....	82
FIGURA 34 – CENTRALIDADE DOS VÉRTICES NA REDE DO ALIMENTADOR 15	83

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	11
2	REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA	14
2.1	ELEMENTOS DA REDE.....	14
2.2	ARRANJOS PRINCIPAIS DE SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	17
2.2.1	Barra simples (circuito de suprimento)	17
2.3	BARRA SIMPLES (DOIS CIRCUITOS DE SUPRIMENTO)	18
2.4	BARRA DUPLA (DOIS CIRCUITOS DE SUPRIMENTO).....	19
2.5	BARRA DUPLA COM DISJUNTOR DE TRANSFERÊNCIA (DOIS CIRCUITOS DE SUPRIMENTO).....	19
2.6	BARRA DUPLA COM BARRA DE TRANSFERÊNCIA.....	20
2.7	CONFIGURAÇÕES DAS REDES AÉREAS	21
2.8	TOPOLOGIAS DE REDES AÉREAS.....	25
2.8.1	Radial simples.....	25
2.8.2	Radial com recurso.....	26
2.9	ESTUDO DAS CARGAS	28
2.10	SMART GRID – REDES INTELIGENTES	38
3	REDES COMPLEXAS.....	41
3.1	TEORIA DE GRAFOS ALEATÓRIOS.....	43
3.2	REDES DE MUNDO-PEQUENO – MODELO <i>SMALL WORLD</i> DE <i>WATTS- STROGATZ</i>	44
3.3	REDES SEM-ESCALA	47
4	MÉTRICAS DOS MODELOS DE REDES COMPLEXAS	50
4.1	INTRODUÇÃO.....	50
5	FALHAS	54
5.1	FALHAS ALEATÓRIAS	54
5.2	FALHAS DETERMINÍSTICAS	55
5.3	CONFIABILIDADE DA REDE	55
6	USO DO MODELO DE REDES COMPLEXAS	60
7	ESTUDO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO	64
8	RESULTADOS E DISCUSSÃO	74

9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
9.1	CONTRIBUIÇÕES	86
10	PUBLICAÇÃO DOS RESULTADOS – ARTIGOS ACEITOS E PUBLICADOS	87
	REFERÊNCIAS	88

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

As redes complexas são estruturas formadas por um conjunto de nós e de ligações entre esses nós. Estas estruturas podem ser desde redes que seguem algum padrão regular até redes completamente aleatórias. Estas redes estão espalhadas pela natureza e presentes no cotidiano, como redes de esgoto, redes de neurônios, redes de amigos de um indivíduo, redes de distribuição de energia elétrica. O estudo das redes complexas se faz necessário devido a importância de se saber como se comportam e qual a sua estrutura. (REDES COMPLEXAS, 2013).

Pode-se comparar ao reducionismo que foi muito importante e uma chave para alcançar o tratamento quantitativo das propriedades dos átomos, moléculas até sofisticadas estruturas como sólidos cristalinos. Na verdade, decifrar a estrutura da matéria foi decisivo para muitos desenvolvimentos, não apenas na Física, mas também em Química, Ciência dos Materiais e mais recentemente em Biologia (BARABÁSI, 2004).

A evolução do campo de redes complexas se encaixa perfeitamente dentro de um quadro científico, pois suas origens remontam à solução em Leonhard Euler do Königsberg, conforme apresenta Barabási (2003), que defende a ideia de que a teoria dos grafos é muito útil para as áreas de Biologia, Economia, Sociologia e Física teórica no entanto, a maioria desses estudos são focados em gráficos estáticos, ou seja, gráficos cuja estrutura se mantém fixa.

Erdős e Rényi (1960) abordaram importantes desenvolvimentos em redes dinâmicas, entre outros, as chamadas redes aleatórias, incluindo o modelo agora conhecido pelo nome Erdős e Rényi — ER (BALOBÁS, 1990, 2001). Este tipo de rede caracteriza-se pelo recurso de uma rede inicialmente com N nós isolados, onde novas conexões são estabelecidas progressivamente com probabilidade uniforme entre qualquer par de nós. Essas redes são bem descritas em termos de grau médio, implicando que eles têm uma estrutura relativamente simples.

Essas redes aleatórias provaram ser ótimos modelos de estruturas utilizados para representar fenômenos naturais. Assim, foi principalmente graças aos esforços dos sociólogos ao longo das últimas décadas como, por exemplo, Wasserman e Faust (1994) e Scott (2000) que a teoria dos grafos começou a ser sistematicamente

aplicada para representar e modelar fenômenos naturais tais como nas relações sociais. Esta análise realizada nas redes sociais iniciaram a partir dos coeficientes de *clustering*, ou seja, coeficientes de clusterização que tiveram o propósito de definir o conceito de que os fenômenos do mundo pequeno em redes, são caracterizados por comprimentos pequeno e médio entre pares de nós chegando ao modelo das redes de mundo pequeno presentes e estudadas desde sua descoberta até os dias atuais.

O sucesso de redes complexas é uma consequência da sua aptidão natural para representar virtualmente qualquer sistema discreto, mesmo sendo redes distintas as propriedades topológicas são muito parecidas. Além disso, a organização e a evolução de tais redes, bem como processos dinâmicos nelas descritos por Boccaletti; Latora; Moreno; Chaves e Hwang (2006) e Costa; Rodrigues e Travieso (2007), envolvem os efeitos e modelos não-lineares. A conectividade das redes é um dos pontos mais importantes na análise o que possibilita definir muitos aspectos da dinâmica de sistemas.

As redes complexas tem um pontencial muito grande e apresenta uma diversidade de aplicações o que abrange áreas como Ecologia, Genética, Epidemiologia, Física, Internet e WWW, Computação, etc. Na verdade, aplicações de redes complexas estão redefinindo o método científico, com a incorporação dos aspectos dinâmicos e multidisciplinares da física estatística e ciência da computação.

A motivação deste estudo foi apresentar os conceitos das redes complexas com o objetivo de investigar as propriedades estruturais e de funcionamento das redes de distribuição de energia, considerando diferentes topologias, a fim de definir um modelo através do uso de Redes Complexas com o propósito de analisar o comportamento da rede, considerando, características de desempenho, resiliência e identificação de falhas comparados a uma rede padrão chamada de Rede Modelo.

A rede foi modelada e simulada para servir de referência para comparar as métricas da rede em questão de distribuição de energia elétrica da cidade de Ilha Solteira. Nestes modelos analisados, os transformadores referem-se aos vértices da rede as ligações entre eles representam as arestas do grafo.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta tese está organizada em 10 tópicos, inicia-se com uma introdução onde descreve sucintamente os objetivos da tese, bem como o tema abordado, posteriormente serão descritas as Redes de Distribuição de Energia com suas respectivas características de topologia, as Redes Complexas, com suas características e modelos, bem como as Métricas dos Modelos de Redes Complexas para que a possamos entender que a partir da aplicação dessas propriedades no modelo podemos interpretar esses resultados.

São apresentadas as falhas nas Redes de Distribuição de Energia, será descrito e apresentado um exemplo do uso do modelos de Redes Complexas, e um estudo sobre as ferramentas computacionais para implementação do modelo de redes complexas, ao finalizar esta tese serão apresentados os resultados e discussão e as considerações finais, posteriormente as publicações realizados dos resultados obtidos.

2 REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

2.1 ELEMENTOS DA REDE

Os sistemas elétricos de potência têm a função essencial de fornecer energia elétrica aos usuários, com qualidade adequada, no instante em que for solicitada. Os sistemas elétricos de potência podem ser subdivididos em três grandes blocos:

- **Geração:** que perfaz a função de converter alguma forma de energia em energia elétrica.
- **Transmissão:** que é responsável pelo transporte de energia elétrica dos centros de produção aos de consumo.
- **Distribuição:** que distribui energia elétrica recebida do sistema de transmissão aos grandes, médios e pequenos consumidores.

De acordo com Kagan et al. (2005), os transformadores desempenham papel preponderante nos sistemas de distribuição, quer no suprimento da rede de média tensão, quer no suprimento da rede de baixa tensão. No Sistema de Distribuição temos os Transformadores que são máquinas elétricas estáticas que têm a finalidade de transformar, por indução eletromagnética, a tensão e a corrente alternada entre dois ou mais enrolamentos. A frequência da tensão alternada é constante e, geralmente, os valores das tensões e correntes são diferentes.

No suprimento da rede de média tensão, transformadores de SE, utilizam-se, predominantemente, transformadores de dois ou de três enrolamentos. Por outro lado, no suprimento da rede de baixa tensão, transformadores de distribuição, utilizam-se transformadores monofásicos, bancos de dois ou três transformadores monofásicos e transformadores trifásicos.

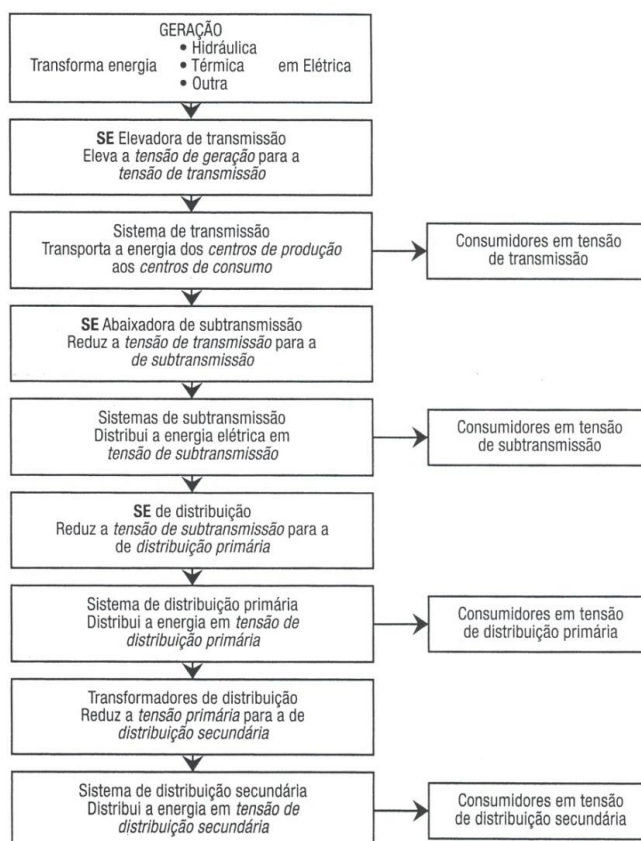
Os valores eficazes das tensões com frequência de 60 Hz, utilizados no Brasil estão fixados por decreto do Ministério de Minas e Energia, as quais são apresentadas no Quadro 1. Apresenta-se também algumas tensões não padronizadas, ainda em uso.

Quadro 1 – Tensões Usuais em Sistemas de Potência

Tensões Usuais em Sistemas de Potência			
Tensão (kv)		Campo de Aplicação	Área do Sistema de Potência
Padronizada	Existente		
0,220/0,127	0,110	Distribuição Secundária (BT)	Distribuição
0,380/0,220	0,230/0,115		
13,8	11,9	Distribuição Primária (MT)	
34,5	22,5		
34,5	88,0	Subtransmissão (AT)	
69,0			
138,0			
138,0	440,0 750,0	Transmissão	Transmissão
230,0			
345,0			
500,0			

Fonte: Kagan et al. (2005)

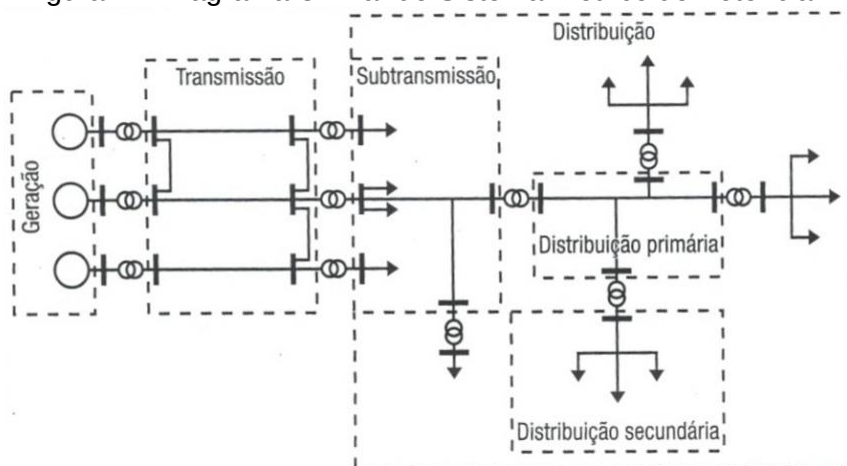
Figura 1 – Diagrama de blocos do Sistema Elétrico de Potência



Fonte: Kagan et al. (2005)

A Figura 2 apresenta um diagrama unifilar típico de um sistema elétrico de potência, destacando a existência de três usinas, um conjunto de linhas de transmissão, uma rede de subtransmissão, uma de distribuição primária e três de distribuição secundária.

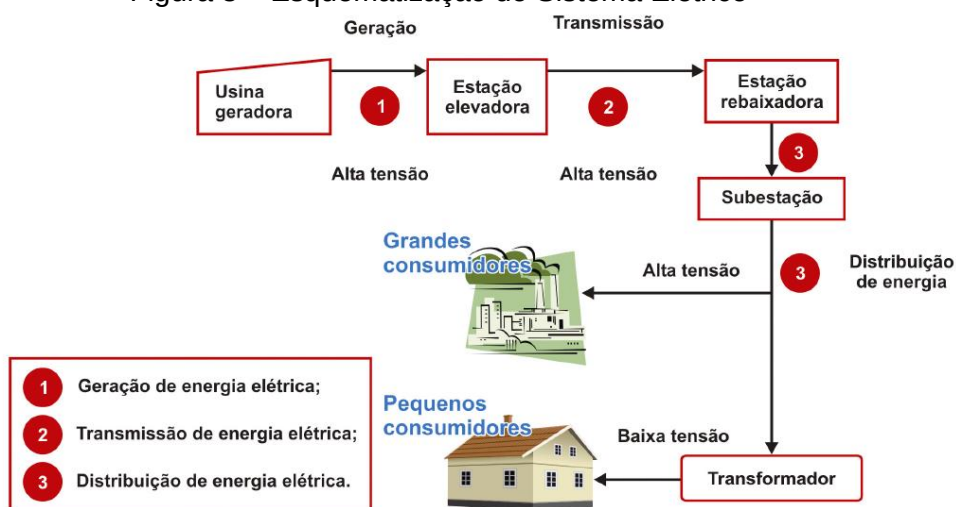
Figura 2 – Diagrama Unifilar de Sistema Elétrico de Potência



Fonte: Kagan et al. (2005)

Pode-se observar que o sistema de transmissão opera, no caso geral, em malha, o de subtransmissão opera radialmente, podendo, desde que se tomem cuidados especiais, operar em malha. Os sistemas de distribuição, objeto deste estudo, o sistema primário opera geralmente de forma radial, e o de distribuição secundária pode operar quer em malha ou radialmente. A Figura 3 descreve como está organizado o Sistema Elétrico.

Figura 3 – Esquemática do Sistema Elétrico



Fonte: Brasil (2004).

2.2 ARRANJOS PRINCIPAIS DE SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO

O arranjo de uma subestação de distribuição é a combinação adequada do chaveamento de alta tensão, dos transformadores abaixadores e chaveamento de tensão primária (chaves, disjuntores e religadores) de modo a obter um desempenho pré-estabelecida. Este desempenho pode considerar o aspecto funcional e o econômico.

Quando se analisa os diagramas unifilares de subestações, procura-se obter uma avaliação considerando, dentre muitos, os seguintes aspectos:

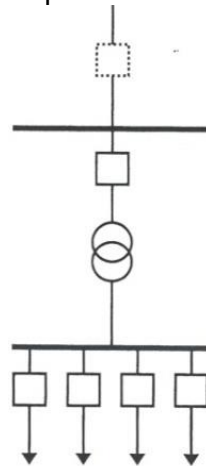
- segurança do sistema;
- flexibilidade de operação;
- habilidade na redução de correntes de curto-circuito;
- simplicidade dos dispositivos de proteção;
- facilidade de manutenção e seu efeito na segurança;
- facilidade de expansão;
- área total;
- custo.

São apresentados alguns dos arranjos de subestações mais usuais, que vão desde a barra simples e disjuntor singelo até barra dupla e disjuntor duplo.

2.2.1 Barra Simples (Circuito de Suprimento)

Conforme Kagan et. al. (2005), o arranjo designado Barra Simples (Figura 4), apresenta um custo bastante baixo, é utilizado para suprir regiões de baixa densidade de carga. Normalmente, o transformador da SE apresenta potência nominal de 10MVA. Este tipo de SE pode contar com uma única linha de suprimento. Este arranjo conta, na alta tensão de um único dispositivo para a proteção do transformador. Sua confiabilidade é baixa, pois quando ocorre uma contingência na subtransmissão, há a perda de suprimento da SE.

Figura 4 - Barra Simples – Um circuito de suprimento

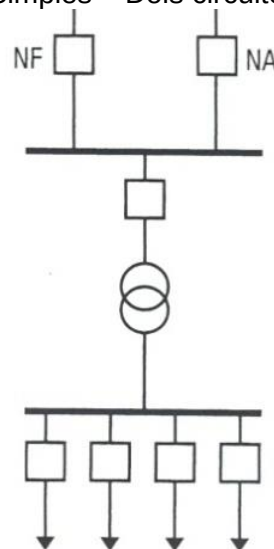


Fonte: Elektro (2013).

2.3 Barra Simples (Dois Circuitos de Suprimento)

Neste tipo de arranjo (Figura 5), aumenta a confiabilidade do sistema, dotando a SE de dupla alimentação radial, o alimentador de subtransmissão é construído em circuito duplo operando a SE com uma das duas chaves de entrada Normalmente Aberta (NA). Quando houver uma interrupção no alimentador em serviço, abre-se a chave de entrada Normalmente Fechada (NF), e fecha-se a chave NA do circuito de reserva. Para a manutenção do transformador ou do barramento é necessário o desligamento da SE.

Figura 5 - Barra Simples – Dois circuitos de suprimento

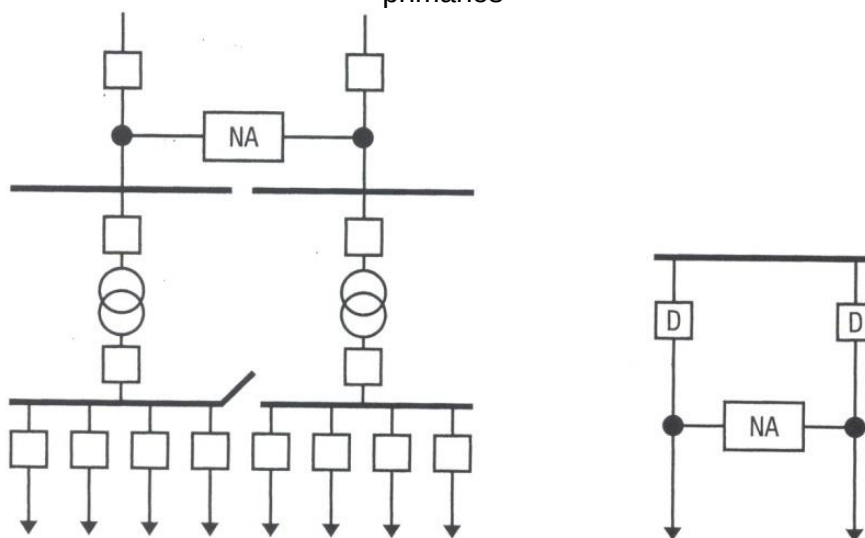


Fonte: Elektro (2013)

2.4 BARRA DUPLA (DOIS CIRCUITOS DE SUPRIMENTO)

No arranjo barra dupla com dois circuitos de suprimento (Figura 6), é utilizado em regiões com maior densidade de carga. Aumenta-se o número de transformadores o que torna a SE com maior confiabilidade e maior flexibilidade operacional. O diagrama unifilar desta SE apresenta dupla alimentação, dois transformadores, barramentos de Alta Tensão independentes e barramento de Média Tensão seccionado. Quando ocorre um defeito ou manutenção em um dos transformadores, abrem-se as chaves anterior e posterior ao transformador, isolando-o. Fecha-se a chave NA de seccionamento do barramento e opera-se com todos os circuitos supridos à partir do outro transformador.

Figura 6 - Barra dupla com dois circuitos de Suprimento – Saída dos alimentadores primários

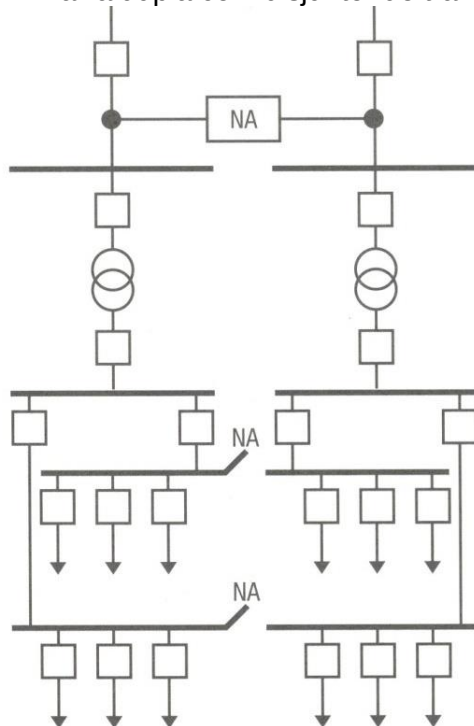


Fonte: Elektro (2013)

2.5 BARRA DUPLA COM DISJUNTOR DE TRANSFERÊNCIA (DOIS CIRCUITOS DE SUPRIMENTO)

O arranjo barra dupla com disjuntor de transferência (figura 7), é uma evolução do arranjo anterior, onde se distribui os circuitos de saída em vários barramentos, permitindo-se maior flexibilidade na transferência de blocos de carga entre os transformadores, e a manutenção dos disjuntores é realizada através do disjuntor de transferência.

Figura 7 - Barra dupla com disjuntor de transferência



Fonte: Kagan et al. (2005).

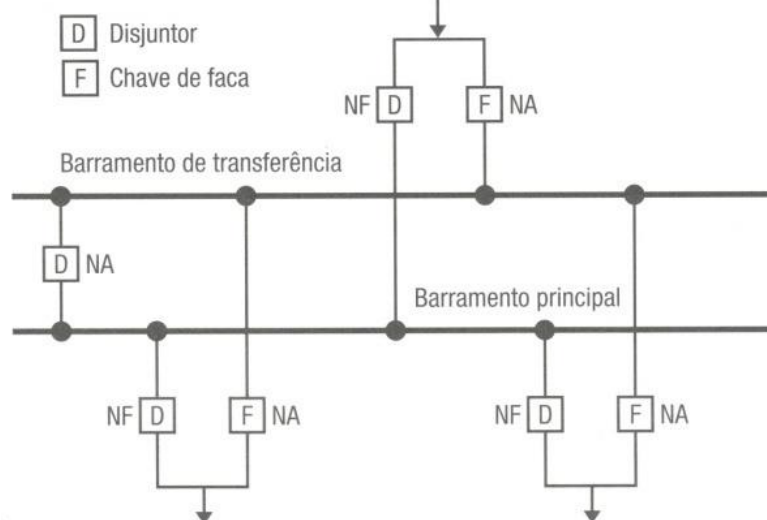
2.6 BARRA DUPLA COM BARRA DE TRANSFERÊNCIA

Conforme Kagan et. al. (2005), o arranjo de barra principal e barra de transferência conforme ilustra a figura 8, é utilizado para aumentar a flexibilidade para atividades de manutenção dos disjuntores. O destaque deste arranjo é que todos os disjuntores são do tipo extraível, ou contam com chaves seccionadoras em ambas as extremidades. O disjuntor que faz a interligação entre os barramentos é definido como disjuntor de transferência. Em operação normal, o barramento principal é mantido energizado e o de transferência desenergizado, o disjuntor de transferência é mantido aberto.

Na realização de uma manutenção corretiva ou preditiva, em um dos disjuntores, fecha-se o disjuntor de transferência, energizando a barra de transferência; fecha-se a chave seccionadora do disjuntor que vai ser desativado, passando a saída do circuito a ser suprida pelas duas barras; abre-se o disjuntor e procede-se à sua extração do cubículo, ou abre-se suas chaves seccionadoras, isolando-o; transfere-se a proteção do disjuntor que foi desenergizado para o de transferência. Ao termino da manutenção, o procedimento é o inverso do que foi

realizado. Neste arranjo, para a manutenção do barramento principal, é necessário desenergizar a SE, impossibilitando o suprimento aos alimentadores. Este inconveniente pode ser eliminado utilizando-se um barramento auxiliar definido como barramento de reserva.

Figura 8 - Subestação com barra principal e barra de transferência



Fonte: Kagan et. al. (2005).

Geralmente as SEs empregam transformadores trifásicos. Nas contingências, a SE pode operar com capacidade reduzida, o que não é possível com transformadores trifásicos. A utilização de quatro unidades monofásicas permitiria a SE operar a plena capacidade, com uma unidade fora de serviço.

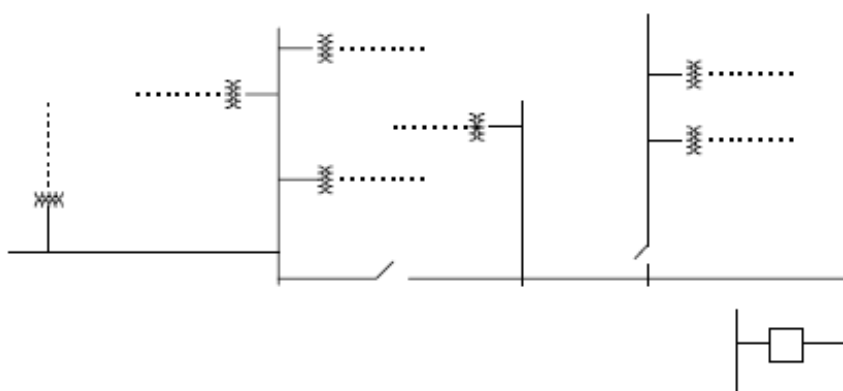
2.7 CONFIGURAÇÕES DAS REDES AÉREAS

As redes de distribuição primária podem ser tanto aéreas como subterrâneas, sendo as primeiras de uso mais difundido, pelo seu menor custo, e as segundas, encontrando grande aplicação em áreas de maior densidade de carga, por exemplo: zona central de uma metrópole, ou onde há restrições paisagísticas.

As redes aéreas são construídas utilizando-se de postes de concreto, em zonas urbanas, ou de madeira tratada, em zonas rurais. Suportam em seu topo a cruzeta, usualmente de madeira, com cerca de dois metros de comprimento, na qual são fixados os isoladores de pino ou de disco. Utilizam-se condutores de alumínio com alma de aço CAA, ou sem alma de aço CA, nus ou protegidos.

Conforme Kagan et. al. (2005), as redes aéreas, na maioria das vezes operam de forma radial (figura 8), com possibilidade de transferências de blocos de carga entre circuitos para o atendimento da operação em condições de contingência, devido à manutenção corretiva ou preventiva. Os troncos dos alimentadores empregam, usualmente, condutores de secção 336,4MCM permitindo, na tensão de distribuição – 13,8kV, o transporte de potência máxima de 12MVA, que, face à necessidade de transferência de blocos de cargas entre alimentadores, fica limitada a cerca de 8MVA.

Figura 9 - Circuito Aéreo Radial Simples



Fonte: Kagan et al. (2005).

Estas redes atendem aos consumidores primários e aos transformadores de distribuição que suprem a rede secundária ou de baixa tensão. Dentre os consumidores primários destacam-se indústrias de médio porte, conjuntos comerciais (*shopping centers*), instalações de iluminação pública, etc. A rede de distribuição pode ser constituída de vários tipos de cabos:

A Rede Aérea com cabo Nu é o tipo de cabo convencional, os condutores são de alumínio e sua isolação é feita através de um verniz apropriado, já a Rede Aérea com cabo Pré-Reunido, é utilizada quando houver dificuldades locais para a instalação da rede aérea convencional, tais como:

- locais com arborização intensa onde deve se preservar a ecologia, ou onde a poda de árvores é proibida;
- locais de ruas estreitas e a rede convencional acarreta problemas de segurança com relação a luminosos, marquises, janelas e sacadas de edificações;

- saídas de SEs, para evitar congestionamento de estruturas, com circuitos aéreos convencionais;
- locais com alto índice de poluição ambiental;
- ruas onde as estruturas estejam congestionadas e seja necessária a instalação de novos alimentadores;
- saída de SE, como alternativa econômica à utilização de cabos subterrâneos;
- travessias sob viadutos, linhas de transmissão, etc., como alternativa econômica à utilização de cabos subterrâneos;
- travessias sobre rios, através de pontes, como alternativa técnica ao circuito aéreo convencional com estruturas especiais.

Também é considerado sua aplicação, quando os índices de interrupção – DEC, FEC da rede existente forem ocasionados por alguns fatores citados anteriormente e estiverem acima dos limites estabelecidos pelas resoluções da ANEEL e quando a carga a ser alimentada justifique a aplicação do cabo pré-reunido aumentando a confiabilidade do sistema, pois é em cabo comercial e caro devido a tecnologia utilizada.

A Rede Aérea com Cabo Protegido é a denominação adotada para identificar um cabo de alumínio dotado de cobertura protetora de composto extrudado de polímero termofixo ou termoplástico, cuja cobertura tem a função de reduzir a corrente de fuga em caso de contato acidental do cabo com objetos aterrados e diminuir o espaçamento entre os condutores. A cobertura não confere, ao mesmo, a característica de cabo isolado, ou seja, não apresenta confinamento de campo elétrico no dielétrico da isolação e, portanto, não deve ser tocado.

Este cabo é uma alternativa ao cabo pré-reunido e poderá ser utilizado em locais onde são constantes os desligamentos causados por contato entre a linha e objetos aterrados ou objetos lançados na rede; a carga do sistema justifique melhores índices de confiabilidade; existam áreas densamente arborizadas; existam ruas com calçadas estreitas; existam vielas com balcões, sacadas ou janelas próximas à rede.

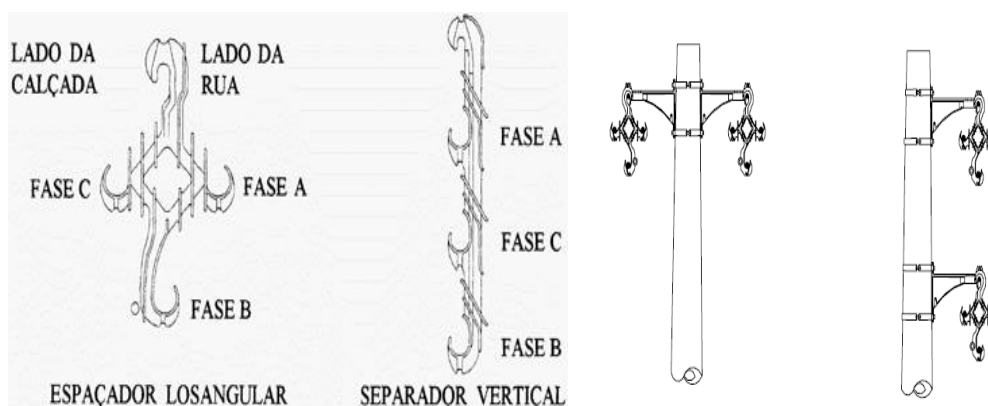
E por último a Rede Aérea Protegida Compacta que é uma rede aplicada em áreas com características urbanas e rurais, apresentam um melhor desempenho

face as adversidades e condições ambientais quando comparadas às redes com condutores nus. Elas minimizam e podem até mesmo eliminar problemas como: congestionamentos de estruturas, arborização, segurança, etc., garantindo uma melhoria no desempenho, na confiabilidade e na qualidade de energia elétrica distribuída.

Este tipo de rede, pela sua própria configuração e por utilizar cabos protegidos que permitam eventuais contatos dos condutores energizados com galhos e folhas de árvores, permite uma melhor convivência do circuito elétrico com a arborização pois requerem uma menor área de podas, possibilitando assim, que sejam menos rigorosas e intensas.

A rede protegida compacta emprega cabos protegidos numa configuração compacta, separados por espaçadores poliméricos em formato losangular e sustentados por um cabo mensageiro (Figura 10), o cabo de alumínio é o mesmo usado em redes com cabos protegidos.

Figura 10 - Tipos de estruturas e acessórios utilizados em rede protegida compacta



Fonte: CPFL (2013)

As redes protegidas compactas se aplicam para as seguintes situações:

- regiões arborizadas, pela maior confiabilidade deste tipo de rede ao toque de galhos de árvores, permitir menor área de podas e possibilitar um maior espaçamento na periodicidade das podas de árvores, além do mensageiro servir como proteção da rede contra queda de galhos;
- áreas com frequentes ações de vandalismo, neste caso a implantação da rede protegida compacta deve ser somente nos trechos detectados de vandalismo;

- locais com congestionamento de circuitos, pela possibilidade de instalação de até 4 (quatro) circuitos na mesma estrutura, principalmente em saídas de SEs;
- circuitos onde se exige um alto índice de confiabilidade devido as características dos consumidores especiais;
- locais com redes próximas às edificações;
- locais com grande incidência de descargas atmosféricas;
- em áreas rurais próximas a vegetação preservada por lei.

Não é recomendada a rede protegida compacta em regiões litorâneas e zonas industriais poluídas, pelo fato de empregar cabo protegido não isolado, que sob presença de contaminação, passa a conduzir correntes superficiais na cobertura polimérica, causando o fenômeno de trilhamento elétrico (*tracking*). Nestes casos, devem ser usados em soluções alternativas como:

- elevação do nível básico de impulso da rede (NBI), mantendo-se a configuração compacta;
- mudança para rede isolada.

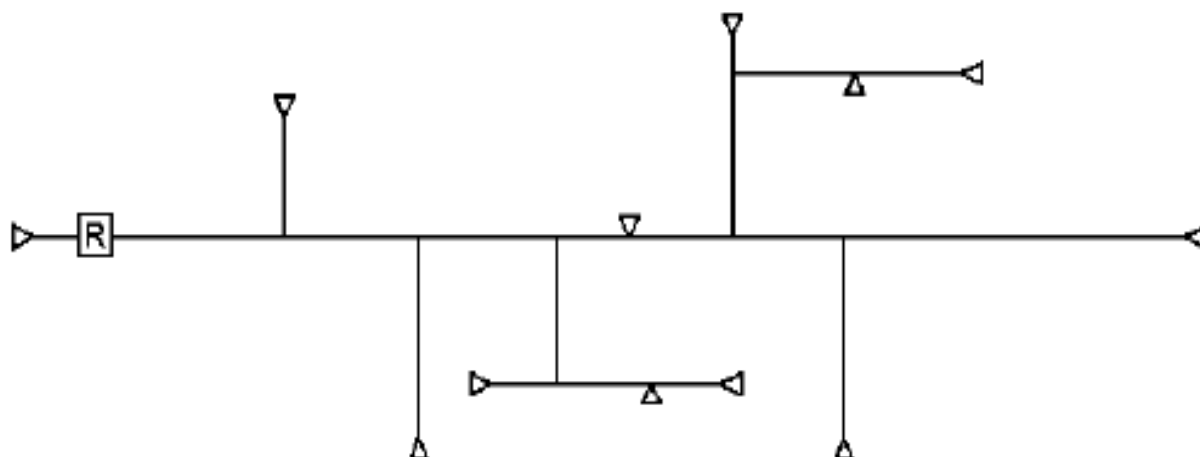
2.8 TOPOLOGIAS DE REDES AÉREAS

A configuração da rede aérea primária será definida em função do grau de confiabilidade a ser adotado em um projeto de rede de distribuição, com cabos nus, pré-reunidos ou protegidos, compatibilizando com a importância da carga ou da localidade a ser atendida. Poderão ser utilizadas as seguintes configurações para o sistema primário:

2.8.1 Radial Simples

Os sistemas radiais simples deverão ser utilizados em áreas de baixa densidade de carga, nas quais os circuitos tomam direções distintas, face às próprias características de distribuição da carga, tornando antieconômico o estabelecimento de pontos de interligação conforme Figura 11.

Figura 11 - Configuração Radial Simples

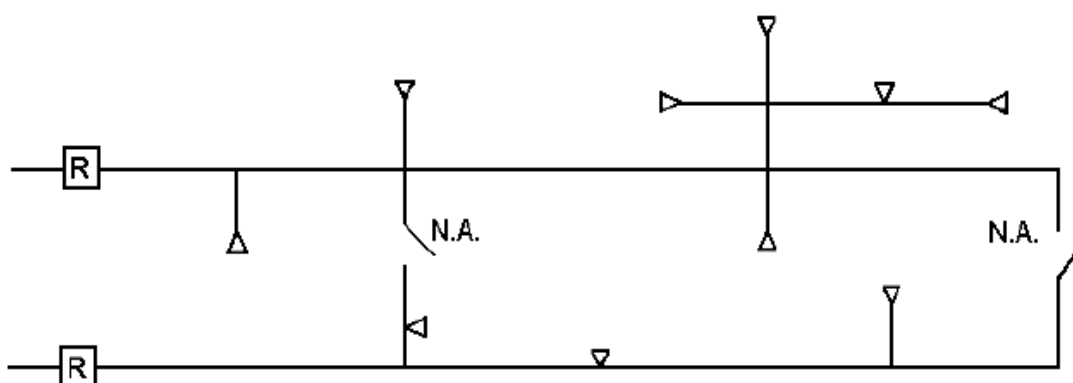


Fonte: Elektro (2013)

2.8.2 Radial Com Recurso

Os sistemas radiais com recursos ilustrado na Figura 12 deverão ser utilizados em áreas que demandem maiores densidades de carga ou requeiram maior grau de confiabilidade devido às suas particularidades (hospitais, centro de computação).

Figura 12 - Configuração Radial com Recurso



Fonte: Elektro (2013)

Este sistema caracteriza-se pelos seguintes aspectos: existência de interligações normalmente abertas, entre alimentadores adjacentes da mesma ou de subestações diferentes; ser projetado de forma que exista certa reserva de capacidade em cada circuito, para a absorção de carga de outro circuito na

eventualidade de defeito; limita o número de clientes interrompidos por defeitos e diminui o tempo de interrupção em relação ao sistema radial simples.

É usual instalar-se num mesmo circuito ou entre circuitos diferentes, chaves que operam abertas, chaves normalmente abertas (NA), que podem ser fechadas em manobras de transferência de carga.

O critério usual para fixação do carregamento de circuitos, em regime normal de operação, é o de se definir o número de circuitos que irão receber a carga a ser transferida. Usualmente dois circuitos socorrem um terceiro, e estabelece-se que o carregamento dos circuitos que receberão carga, não exceda o correspondente ao limite térmico. Assim sendo (1):

$$S_{term} = S_{reg} + \frac{S_{reg}}{n} \quad (1)$$

onde :

n – número de circuitos que irão absorver carga do circuito em contingência;

S_{term} – carregamento correspondente ao limite térmico do circuito;

S_{reg} – carregamento do circuito para operação

O carregamento do circuito é dado por (2):

$$S_{reg} = \frac{n}{n+1} S_{term} \quad (2)$$

2.8.3 Sistema em Anel (Loop)

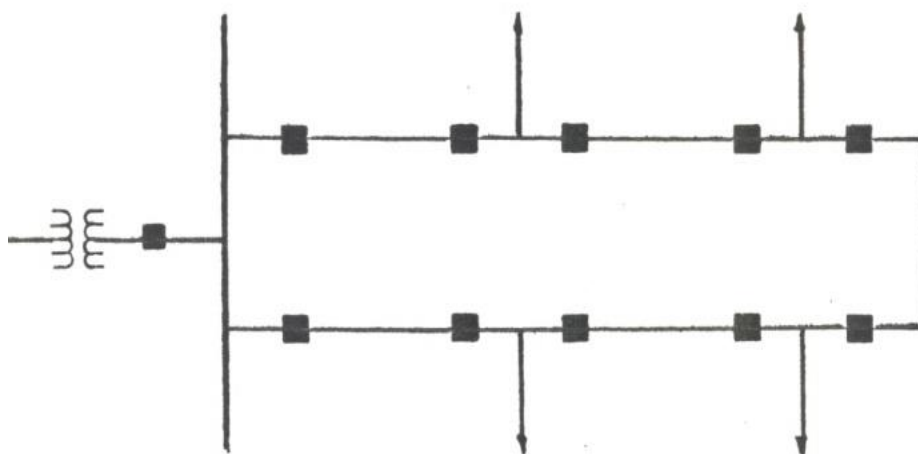
Com a finalidade de aumentar a confiabilidade do sistema, sistema radial com recursos de emergência, passou-se a um esquema mais elaborado em que os dispositivos de seccionamento e religamento, permitem a alimentação do consumidor por duas fontes, alternativamente, por circuitos provenientes da mesma SE ou SE diferentes.

A operação destes dispositivos poderá ser manual ou automática. Quando manual, o tempo de manobra influi negativamente no tempo de restauração do serviço, no entanto, o comando automático eleva o preço da instalação e exige manutenção frequente, o que constitui um fator econômico a ser considerado. O custo do sistema em anel, é mais elevado que o radial, não só pela multiplicidade dos equipamentos de proteção e manobra, como pela necessidade de maior bitola

dos condutores que devem trabalhar com folgas para permitirem as transferências de alimentação.

O carregamento do circuito é ilustrado através da Figura 13:

Figura 13 - Configuração em Anel



Fonte: Kagan et al. (2005).

2.9 ESTUDO DAS CARGAS

Os estudos de um Sistema de Distribuição e seu planejamento permitem aos engenheiros alguma liberdade na seleção de fatores correlacionados a este sistema distribuidor. O fator que mais influencia neste estudo são, sem dúvida, os diferentes tipos de cargas a serem supridas pelo sistema.

O conceito de carga está relacionado com a potência elétrica absorvida de uma determinada fonte de suprimento. Assim, em um Sistema de Distribuição, conforme a fonte considerada, pode-se distinguir vários tipos de cargas como: carga de um consumidor; carga de um transformador; carga de uma rede primária ou linha de distribuição; carga de uma SE.

A carga de um consumidor é considerada como a potência absorvida por todos os seus motores e aparelhos elétricos, lâmpadas, etc. A carga de um transformador será a potência absorvida pela totalidade dos consumidores a ele ligados. A carga de uma rede primária será a potência absorvida por todos os transformadores que ela alimenta. A carga de uma SE, será considerada como a

potência absorvida por todos os alimentadores que saem de seus barramentos de distribuição.

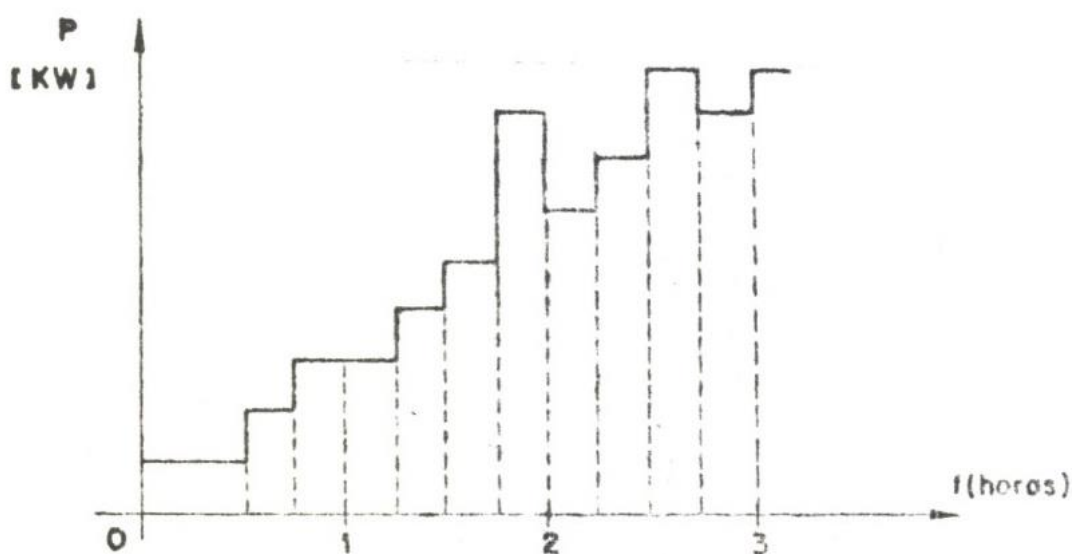
É importante considerar que o regime dessas cargas não é fixo, varia de um valor mínimo a um valor máximo. O sistema de distribuição deve estar preparado para atender a esse valor máximo, sendo que estes valores não ocorrem ao mesmo tempo, e para que não haja um super dimensionamento do sistema, uma diversidade de consumo deve ser considerada para cada um dos níveis de cargas mencionados anteriormente. As definições básicas e os fatores típicos utilizados em Sistemas de Distribuição são Carga Instalada e Demanda.

A Carga Instalada é a soma das potências nominais dos equipamentos de uma unidade de consumo que, após concluídos os trabalhos de instalação, estão em condições de entrar em funcionamento.

A demanda de uma instalação é a carga nos terminais receptores tomada em valor médio num determinado intervalo de tempo. Entende-se por carga, a aplicação que está sendo medida em termos de potência (ativa, reativa, aparente), ou em termos de valor eficaz da intensidade de corrente.

O período no qual é tomado o valor médio é designado por “*intervalo de demanda*”, geralmente é de 15 minutos. (Figura 14).

Figura 14 - Curva de Demanda medida com intervalo de 15 minutos



Fonte: Elektro (2013)

A demanda máxima de uma instalação é a maior de todas as demandas que ocorreram num período especificado de tempo. Não confundir o período durante o qual a demanda foi observada com o intervalo de tempo de demanda. Este período pode ser diário, semanal, mensal, anual, etc.

Existe em todo o sistema uma diversidade entre os vários consumidores, o que faz com que a demanda máxima de um conjunto de cargas seja menor que a soma das demandas máximas individuais.

Quando da execução de um projeto de distribuição, não se leva em conta a demanda máxima de cada consumidor individualmente, mas sim a demanda máxima do conjunto dos consumidores, evitando-se assim o super dimensionamento do sistema.

Define-se **demanda diversificada** de um conjunto de consumidores de um mesmo grupo, como a relação entre a demanda do conjunto e o número de consumidores apresentada na equação (3).

$$D_{div} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i(t)}{n}, \quad (3)$$

onde:

D_{div} = Demanda Diversificada ao conjunto no instante (t);

$D_i(t)$ = Demanda do consumidor (i), no instante (t);

n = número de consumidores do conjunto.

Quando a demanda do conjunto é considerada como o seu valor máximo

($\sum_{i=1}^n D_i(t)$ é máximo), tem-se a Demanda Diversificada Máxima do conjunto.

Quando considera-se o somatório das demandas máximas individuais pelo n° de consumidores, estaremos determinando a “Demanda Máxima não Coincidente” do conjunto. A equação (4) mostra como calcular este fator:

$$D_{max\ nc} = \frac{\sum_{i=1}^n D_{max}(i)}{n}, \text{ onde:} \quad (4)$$

$D_{max\ nc}$ = Demanda máxima não coincidente do conjunto;

$D_{max}(i)$ = Demanda máxima individual do consumidor i ;
 n = número de consumidores.

O fator de demanda num determinado intervalo de tempo (t) de um sistema, ou parte do sistema ou de uma carga é a relação entre a sua demanda máxima, que ocorreu no intervalo de tempo (t), e a sua potência instalada.

$$f_d = \frac{D_{max}}{P_{inst}} \quad (5)$$

No caso de um grupo de n consumidores, pode-se obter:

$$f_d = \frac{D_{max} \times n}{P_{inst}} \quad (6)$$

O fator de demanda é geralmente menor que a unidade, podendo, no entanto, ser maior que 1, nos casos de sobrecarga.

Em cada caso, o fator de demanda correto seria obtido medindo-se a demanda máxima do consumidor e conhecendo-se a sua potência instalada. Na maioria dos casos, no entanto, os consumidores ainda não estão ligados e para o projeto de rede se faz necessário arbitrar um fator de demanda, com base em valores estatísticos. Na caracterização do fator de demanda influem inúmeros fatores como: classe de consumidor, magnitude de sua carga, nº de máquinas ou aparelhos ligados, época do ano, etc.

O fator diversidade de um conjunto de cargas é a relação entre a soma das demandas máximas das cargas e a demanda máxima do conjunto.

$$f_{div} = \frac{\sum_{i=1}^n D_{max}(i)}{D_{max}} \quad , \quad (6)$$

Onde:

$D_{max}(i)$ = demanda máxima do consumidor (i);

D_{max} = demanda máxima do conjunto.

O fator diversidade, que é um adimensional, será portanto maior que a unidade, só sendo unitário quando as demandas máximas coincidirem no tempo.

O fator de coincidência é o inverso do fator de diversidade, isto é:

$$f_{coinc.} = \frac{1}{f_{div}} = \frac{D_{div,max}}{\sum_{i=1,n} D_{max,i}} \quad (7)$$

Como o fator diversidade, é também um adimensional, porem não maior que um.

O fator de contribuição de cada uma das cargas do conjunto é definido pela relação, em cada instante, entre a demanda da carga considerada e sua demanda máxima, isto é:

$$D_{max,conj.} = D_{div,max} = \sum_{i=1,n} D_{max,i} \cdot f_{contr,i} \quad (8)$$

Este fator, que é adimensional, é sempre não maior que um. Seu valor é unitário quando, no instante considerado, sua demanda coincide com a demanda máxima. Portanto, o fator de contribuição é importante para o instante de demanda máxima do conjunto, quando é definido como fator de contribuição para demanda máxima.

O fator de utilização de um sistema, em um determinado período de tempo, é a relação entre a máxima demanda, do período referido e a capacidade nominal do sistema.

$$f_u = \frac{D_{max}}{C}, \quad (9)$$

Onde :

D_{max} = demanda máxima do sistema no período definido;

C = capacidade do sistema;

f_u = fator de utilização do sistema.

Pode-se observar que enquanto o fator de demanda indica a porcentagem de carga instalada que está sendo alimentada, o fator de utilização informa qual a porcentagem da capacidade nominal do sistema está sendo utilizada no instante de demanda máxima.

Este fator é adimensional, é calculado definindo-se a demanda máxima e capacidade nas mesmas unidades. A capacidade do sistema é obrigatoriamente expressa em unidades de corrente (A) ou potência aparente (VA).

O fator de carga de um sistema pode ser definido como sendo a relação entre a demanda média num determinado intervalo de tempo e a demanda máxima verificada neste intervalo de tempo.

$$f_{carga} = \frac{D_{média}}{D_{máx}} = \frac{D_{média} \times \Delta t}{D_{máx} \times \Delta t} = \frac{\text{Energia absorvida em } \Delta t}{D_{máx} \times \Delta t} \quad (10)$$

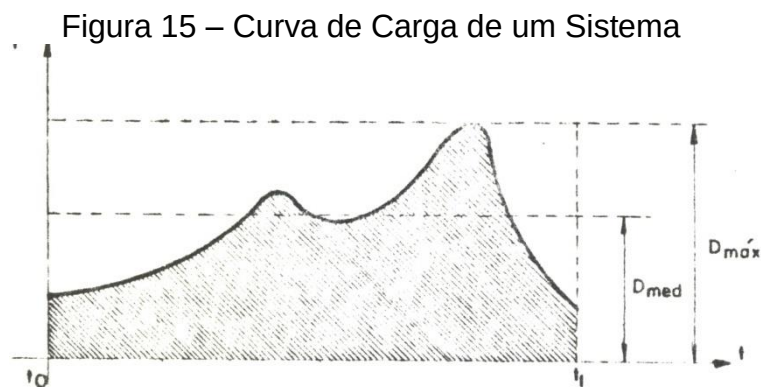
$D_{média}$ = demanda média do sistema

$D_{máx}$ = demanda máxima do sistema

f_{carga} = fator de carga do sistema

Deve-se observar que o valor da demanda é considerado segundo um intervalo de demanda (normalmente 15 minutos) e que o período de tempo para o que se deseja determinar o fator de carga pode ser um dia, uma semana, um mês, etc.

A Figura 15, dá uma melhor conceituação do fator de carga.



Fonte: Elektro (2013)

Na Figura 15 $D_{média}$, f_c são obtidos por:

$$D_{média} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} p dt}{t_1 - t_0} \quad (11)$$

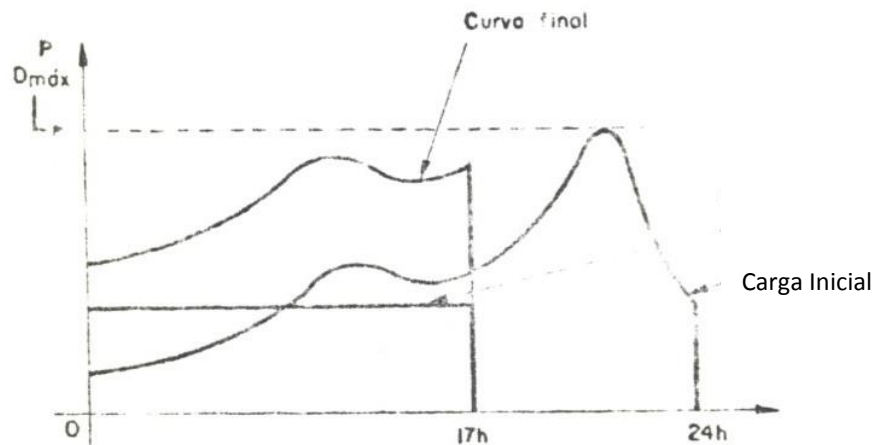
$$f_c = \frac{D_{média}}{D_{max}} \Rightarrow f_c = \frac{\int_{t_0}^{t_1} p dt}{D_{max}(t_1 - t_0)} \therefore f_c = \frac{\int_{t_0}^{t_1} p dt}{D_{max}(t_1 - t_0)} \quad (12)$$

Nota-se, portanto que o fator de carga f_c pode ser expresso pela relação entre o consumo real de energia e o consumo que haveria se a carga solicitasse durante todo o tempo uma potência constante e igual a demanda máxima

Como o custo da energia elétrica é função dos custos fixos, que por sua vez independem da quantidade de energia que está sendo consumida, o custo por kWh cai quando o custo fixo é rateado em uma quantidade maior de kWh vendido. Desta forma, nota-se que o fator de carga deve ser o mais próximo possível da unidade.

Para melhorar o fator de carga, algumas concessionárias fornecedoras de energia elétrica oferecem tarifas mais baixas nas horas de *off-peak* (fora do período de ponta da carga). A Figura 16, mostra uma melhor utilização de energia elétrica, com a melhoria do fator de carga do sistema, pela instalação de um consumidor industrial no período de *off-peak*.

Figura 16 - Curva de carga da instalação de consumidor industrial fora de ponta



Fonte: Elektro (2013)

Observa-se na figura que o faturamento da empresa aumentou com a instalação da carga em *off-peak* sem envolver investimento adicional, pois a demanda máxima não sofreu alteração.

De uma maneira geral, os consumidores da classe residencial apresentam o fator de carga médio em torno de 40%, para classe comercial este fator atinge média

de 70%, para a indústria 60% e a iluminação pública caracteriza-se pelo fator de carga de 50%.

Define-se, para um sistema, ou parte do sistema, o “fator de perda” com sendo a relação entre os valores médio, $p_{\text{médio}}$, e máximo $p_{\text{máximo}}$, da potência dissipada em perdas, num intervalo de tempo determinado, τ , isto é:

$$f_P = \frac{\text{Perda média em } \tau}{\text{Perda média em } \tau} = \frac{p_{\text{média}}}{p_{\text{máxima}}} = \frac{\int p(t).dt}{p_{\text{máxima}} \cdot \tau} \quad (13)$$

Onde $p(t)$ representa o valor da perda instantânea no instante t

Multiplicando-se numerador e denominador da equação acima pelo intervalo de tempo τ resulta:

$$f_P = \frac{p_{\text{média}} \cdot \tau}{p_{\text{máxima}} \cdot \tau} = \frac{\text{Energia perdida no intervalo } \tau}{p_{\text{máxima}} \cdot \tau} \quad (14)$$

ou seja, a energia perdida no intervalo de tempo τ é dada por:

$$\varepsilon_{\text{perdas}} = p_{\text{máxima}} \cdot \tau \cdot f_{\text{perdas}} = p_{\text{máxima}} \cdot H_{\text{eq.p}} \quad (15)$$

Onde, o produto do intervalo de tempo pelo fator de perdas exprime as “horas equivalentes para perdas”, $H_{\text{eq.p}}$, o número de horas que a instalação deve funcionar com a perda máxima para que o montante global de perdas seja igual àquelas verificadas no período considerado.

Em geral, o fator de perda não pode ser determinado do fator de carga. Entretanto, valores limites de relacionamento podem ser encontrados.

Para se encontrar a correlação entre estes dois fatores, será apresentada uma análise que terá como referência o consumidor cuja curva de carga, com duração de tempo T , apresenta uma demanda dada por:

$$D = D_1 \text{ para } 0 \leq t < t_1;$$

$$D = D_2 \text{ para } t_1 \leq t < T,$$

$$\text{Com } D_2 \leq D_1.$$

Temos que o fator de carga será dado por:

$$f_c = \frac{\frac{D_1 t_1 + D_2 (T - t_1)}{T}}{D_1} = \frac{D_1 t_1 + D_2 (T - t_1)}{D_1 \cdot T} = \frac{t_1}{T} + \frac{D_2}{D_1} \left(1 - \frac{t_1}{T} \right) \quad (16)$$

Considerando que no intervalo T, a tensão e o fator de potência da carga mantenham-se constantes e considerando que em sistemas trifásicos simétricos e equilibrados, as perdas são dadas pelo triplo do produto de ($I^2 \times R$), onde I é a intensidade de corrente pela resistência ôhmica do trecho em questão, pode-se afirmar que as perdas p(t), são proporcionais ao quadrado da demanda:

$$p(t) = K D^2(t) \quad (17)$$

Na equação 17 onde o valor de K, em função da natureza da demanda é apresentado no quadro 2:

Quadro 2 - Fator K

Natureza da demanda	Equação da constante K
Corrente	3 R
Potência Aparente	R/V^2
Potência Ativa	$R/(V \cdot \cos \varphi)^2$
Potência Reativa	$R/(V \cdot \sin \varphi)^2$

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Onde:

R – resistência ôhmica do trecho;

V – tensão de linha na carga;

φ - ângulo de rotação entre fase e corrente;

Considerando a expressão acima e substituindo na expressão do Fator de perda, teremos:

$$f_{perda} = \frac{\frac{KD_1^2 \cdot t_1 + KD_2^2 \cdot (T - t_1)}{T}}{KD_1^2} = \frac{D_1^2 t_1 + D_2^2 (T - t_1)}{D_1^2 \cdot T} = \frac{t_1}{T} + \frac{D_2^2}{D_1^2} \left(1 - \frac{t_1}{T} \right) \quad (18)$$

Considerando:

$$t' = \frac{t_1}{T} \quad e \quad d' = \frac{D_2}{D_1} \quad (19)$$

Pode-se escrever:

$$f_{c \arg a} = t' + d'(1 - t') = (1 - d')t' + d' \quad (20)$$

$$f_{perda} = t' + d'^2(1 - t') = (1 - d'^2)t' + d'^2 \quad (21)$$

Em um sistema de coordenadas cartesianas, as curvas dos fatores de carga e fatores de perdas, em função de t' , parametrizadas em d' , são retas, conforme figura a seguir, para as quais destacam-se três casos:

1 – quando t' tende a 1, ou d' tende a 1, representando curva de carga constante, tem-se :

$$f_{perdas} = f_{c \arg a} = 1 \quad (22)$$

2 - quando d' tende a 0, representando carga constante durante tempo t' e demanda nula após este tempo, tem-se :

$$f_{perdas} = f_{c \arg a} = t' \quad (23)$$

3 – quando t' tende a 0, representando curva de carga com ponta de duração muito pequena, tem-se:

$$\begin{aligned} f_{c \arg a} &= d' \\ f_{perda} &= d'^2 \end{aligned} \quad (24)$$

ou seja:

$$f_{perdas} = f_{c \arg a}^2 \quad (25)$$

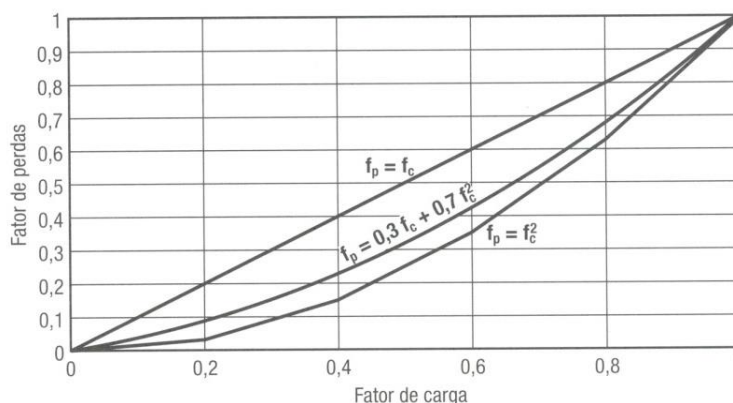
Assim, o valor do fator de perdas deve estar compreendido entre aqueles dois valores limites e, a quaisquer outros valores dos parâmetros, t' e d' . Este corresponderá a um valor interno a este intervalo, assegurado pela equação do tipo:

$$f_{perdas} = k f_{c \arg a} + (1 - k) f_{c \arg a}^2 \quad (26)$$

onde k apresenta valor entre 0 e 1.

Na figura 17, apresentam-se duas curvas limites e uma curva intermediária, com $k=0,3$

Figura 17 – Correlação entre Fator de Carga e Fator de Perda



Fonte: Kagan et al. (2005)

2.10 SMART GRID – REDES INTELIGENTES

De acordo com Toledo (2012) as redes elétricas inteligentes não podem ser definidas como uma rede, mas sim como uma filosofia de acordo com as necessidades do mercado onde será implementado e tomando em conta múltiplas perspectivas, entre elas, tecnológica, ambiental, socioeconômica e político-regulatória.

Conforme Oliveira e Vieira Júnior (2012) *Smart Grid* é um conceito que é responsável pelo monitoramento, análise, controle e capacidade de comunicação nos sistemas elétricos, maximizando a utilização do sistema elétrico de transmissão e distribuição, estimulando o consumo racional de energia elétrica, com o objetivo de reduzir perdas existentes.

Para que se alcance esses objetivos se faz necessário a utilização de tecnologia acrescentando os recursos da comunicação e controle na otimização do funcionamento de toda a rede elétrica por meio da integração e aplicação de comunicação, informática e eletrônica.

Esses sistemas que se definem em *Smart Grid* propõem desafios técnicos, como exemplo pode-se citar o desenvolvimento de novos sistemas para as necessidades das distribuidoras e seus clientes:

- Medição para faturamento;
- Automação de redes aéreas;
- Automação de redes subterrâneas;
- Integração de geração distribuída;
- Tratamento de cargas especiais (veículos elétricos);
- Processamento, armazenamento e mineração de dados para geração de informações;
- Ações de gestão pelo lado da demanda. (TOLEDO, 2012, p. 8).

Redes inteligentes podem ser definidas de acordo com Chiang et al. (2008) como a transição de um modelo caracterizado pela geração centralizada e redes passivas de distribuição de energia elétrica para um modelo caracterizado pelo gerenciamento e controle da geração realizada pelas diversas fontes que passarão a fazer parte das chamadas micro redes conectadas de forma distribuída à rede elétrica, e do controle do trânsito de carga pela rede de transmissão e distribuição que passará a ser definida como macro rede. Dessa forma, atinge-se o objetivo de aumentar a capacidade de integração de geração distribuída das centrais de micro geração ou microprodução de energia nas redes elétricas, principalmente em redes de baixa tensão definidas como micro redes.

Como vantagem do *Smart Grid* pode-se citar o estímulo do consumidor a participar mais ativamente na gestão de sua energia e permitir as concessionárias avaliar os benefícios e as demandas na adaptação a nova realidade.

Toledo (2012) defende a ideia de que a rede inteligente não é apenas interesse da concessionária, as práticas adotadas para sua implementação e os resultados alcançados são estratégicos e de interesse também da sociedade como um todo. Os benefícios dessa tecnologia de redes inteligentes se estendem a diversos atores do mercado, como por exemplo, clientes, meio ambiente, órgãos reguladores e sistema elétrico nacional.

As principais vantagens ou benefícios das redes inteligentes no ponto de vista do cliente são:

- Possibilidade de participação ativa do consumidor no mercado por meio do conceito de “prosumidor”, em que o produtor-consumidor pode fornecer energia para a rede.
- Informações em tempo real sobre o serviço prestado e o consumo de energia.
- Melhor planejamento e controle dos gastos com energia elétrica e adequação de seu consumo ao orçamento doméstico.
- Mais produtos e serviços oferecidos pela concessionária de energia e por parceiros.
- Capacidade de gerenciar a carga e de se beneficiar de tarifas diferenciadas de energia, adequadas ao consumo.

- Redução do tempo de atendimento.
- Melhoria na qualidade do serviço prestado.
- Maior privacidade em decorrência da não necessidade de visitas frequentes de funcionários das concessionárias para realizar leituras de dados dos medidores de energia, salvo em casos específicos. (TOLEDO, 2012, p. 15).

Dentre os benefícios para o sistema elétrico e também para a sociedade durante o processo de revisão tarifária, através da modicidade, pode se citar:

- Detecção e correção inteligente de falhas na rede em tempo real.
- Reconfigurações automáticas da rede.
- Gestão preventiva via monitoramento dos ativos da rede.
- Monitoramento da qualidade do fornecimento de energia, melhoria dos índices associados e da confiabilidade do sistema elétrico.
- Suporte à geração e ao armazenamento distribuídos de energia.
- Gestão pelo lado da demanda.
- Gestão e monitoramento de ativos de rede em tempo real.
- Fornecimento de informações aos clientes em tempo real, tarifas, produtos e serviços inovadores, apropriados a sua realidade, que inspirem uma mudança de hábito e o consumo eficiente de energia, bem como a adequação de seu consumo com seu orçamento e a consequente redução de emissões de CO₂.
- Ampliação dos canais de interação com os clientes e detalhamento do serviço prestado.
- Gestão em tempo real da oferta versus demanda de energia.
- Medição inteligente.
- Ações intensificadas de combate ao furto de energia e redução dos índices de inadimplência.
- Redução de perdas técnicas.
- Expansibilidade e suporte a novos tipos de consumidores (veículos elétricos e/ou híbridos recarregáveis).
- Melhorias na eficiência operacional. (TOLEDO, 2012, p. 16).

Conforme defende Cabello (s.d.), a promessa das redes inteligentes é trazer benefícios para as distribuidoras, os consumidores e também a sociedade. Dentre as principais vantagens, podem-se mencionar serviços mais eficientes a um custo menor – com melhor detecção e, conseqüentemente, resposta mais rápida a eventuais problemas – e redução do consumo por meio de uma melhor gestão do uso de energia. No Brasil, acredita-se ainda que um melhor monitoramento da rede possibilite uma queda expressiva nas perdas sofridas pelas concessionárias com fraude e roubo de energia.

3 REDES COMPLEXAS

As redes complexas tem sido aplicadas em várias áreas e se tornam importantes porque a partir da análise de suas métricas pode-se obter resultados para um modelo eficiente, serão descritos neste tópico seus modelos, suas principais características.

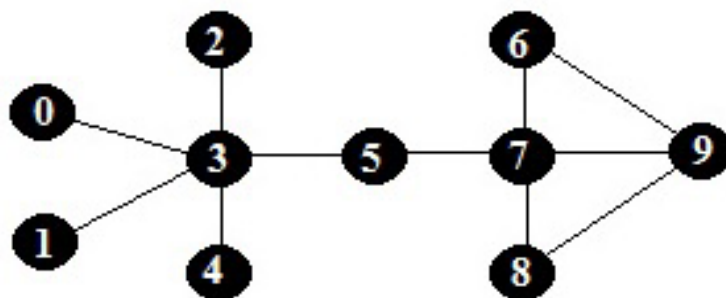
A rede complexa pode ser definida de acordo com Angelis (2005) como uma estrutura que não segue um padrão regular. Existe uma dificuldade muito grande em encontrar na literatura um conceito do que é um padrão regular para uma rede complexa.

Podem-se encontrar várias definições de redes complexas, alguns autores referenciam o fato dela modelar sistemas de grande porte, dando ênfase ao tamanho. A teoria das redes complexas tem sua origem na teoria dos grafos e nos conceitos de sistemas complexos, mecânica estatística e física não-linear.

A partir década de 50, a sociologia utilizou a teoria dos grafos para fazer uma análise em redes de indivíduos conectados por alguma forma de interação social (WASSERMAN; FAUST, 1994), onde a partir dessa análise descobriu-se que a teoria dos grafos pode ser usada para analisar qualquer tipo de rede ou sistemas que tem como base as conexões de elementos.

As redes complexas tem um caráter multidisciplinar o que proporciona a sua aplicação nas mais diversas áreas de pesquisa, como física, biologia, computação, medicina, atividade empresarial, etc. (BARABASI, 2003). Os vértices podem exercer uma função importante na rede complexa, como exemplos, a ligação de dois, relativamente, grandes blocos de vértices conectados, e o intermédio entre vários nós, sendo esse denominado de *hub*. A figura 18 apresenta um exemplo.

Figura 18 - Demonstração de duas características importantes das funções de um determinado nó em uma rede complexa



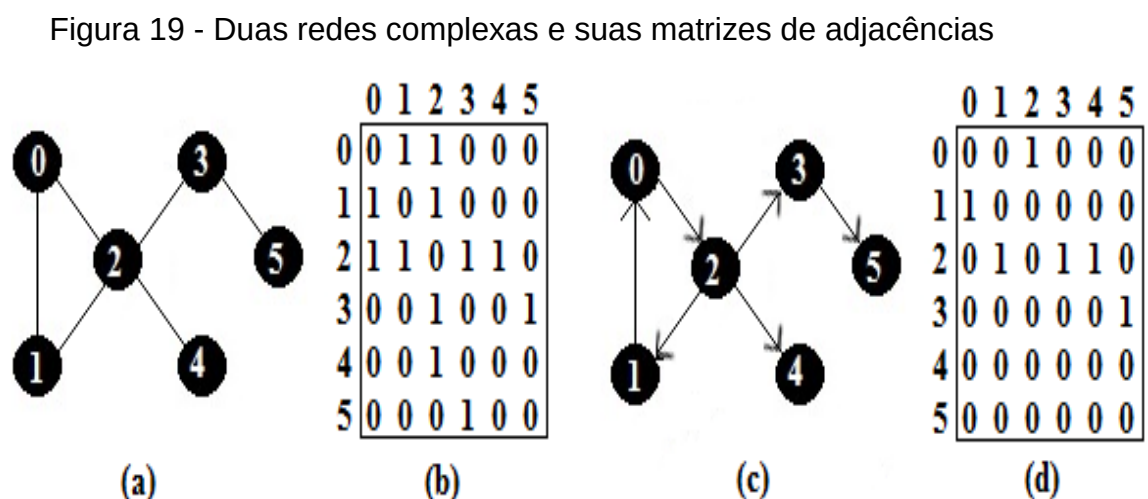
Fonte: Barabási, (2003).

Nesta figura pode-se perceber que o vértice 5 faz a interligação de dois blocos relativamente grandes, e os vértices 3 e 7 são considerados *hubs*, pois são os nós com maior número de conexões

Da mesma forma que os grafos, redes complexas são constituídas por uma tripla ordenada de $(V(G), E(G), \psi G)$, onde $V(G)$ é o conjunto de vértices, $E(G)$ o conjunto de arestas e ψG uma função de incidência. Podendo ser dirigidas se for relativamente importante mostrar a direção na qual a ligação “caminha”. Nos casos em que as ligações possuem intensidade, cada aresta recebe um peso.

Para representar a rede complexa na área da computação pode-se utilizar uma matriz de adjacência ou lista de adjacências. O uso de listas permite uma economia de memória quando a rede complexa em análise detém de grande porte, ou seja, tem um elevado número de nós, já que estas redes são esparsas. O acesso as conexões se torna mais difícil, pois exige uma busca, que no pior caso, irá percorrer por todas as ligações do vértice. Já a matriz de adjacência requer mais memória se comparada às listas de adjacências, pois ela guarda posições de memória nas quais não se têm ligação, mas o acesso às conexões existentes é feito de forma direta, a partir dos índices i e j da matriz bidimensional. A representação através da matriz de adjacência é mais utilizada.

A Figura 19 ilustra como é a matriz adjacência.



Fonte: Barabási, (2003).

A figura (a) apresenta uma rede com 6 nós; (b) descreve a matriz de adjacência correspondente de (a); (c) mostra uma rede dirigida com 6 nós e (d) descreve a matriz de adjacência correspondente de (c).

De uma forma geral uma rede complexa pode ser representada como um grafo onde os nós simbolizam os elementos que se relacionam, podendo ser pessoas, elementos químicos, cidades, etc. As conexões (arestas) representam a presença de relacionamento ou interação entre os vértices, como amizade, profissão, parentesco, ligações químicas, rodovias, etc.

3.1 Teoria de Grafos Aleatórios

Em 1959 foi proposto o modelo de redes aleatórias de Erdős e Rényi, possivelmente foi um dos primeiros estudos apresentados sobre grafos e suas propriedades onde o modelo tem a capacidade de descrever de forma coerente redes de variados tamanhos, este modelo consiste em gerar grafos aleatórios com n vértices e m arestas, este modelo foi desenvolvido junto com Alfred Rényi, matemático. (WATTS, 2003; BARABÁSI, 2003; BUCHANAN, 2002).

A construção de uma rede complexa no modelo aleatório inicia-se com um conjunto V com n vértices desconectados, em seguida são adicionadas às conexões através de m arestas escolhidas ao acaso, sem repetir tais arestas (COSTA; BOAS, 2007). Erdős e Rényi defenderam a ideia em vários trabalhos sobre sua teoria de grafos randômicos que em uma festa basta a conexão entre cada um dos convidados para que todos fiquem conectados ao final da festa, ou seja, maior a probabilidade de gerar grupos (*clusters*) de nós conectados.

Eles acreditavam que nesse processo os nós eram randômicos, ou seja, nós se conectavam aleatoriamente, sem que haja um sentido determinado, concluindo assim que todos os nós poderiam ter a mesma quantidade de conexões ou a mesma probabilidade de receber novas conexões, quanto mais complexa seria a rede maiores as chances de receber vários nós (BARABÁSI, 2003)

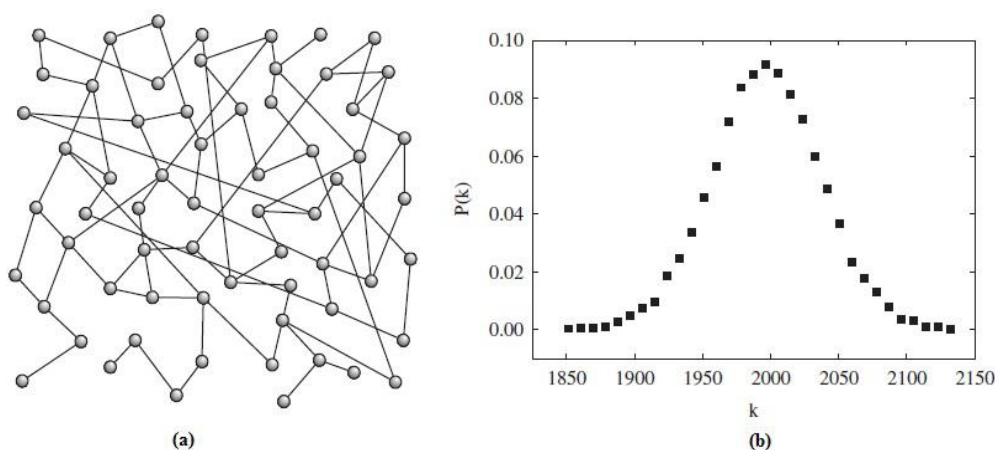
Uma rede aleatória pode ser representada por um sistema rodoviário que é constituído por nós posicionados aleatoriamente com suas conexões. Neste tipo de sistema, a maioria dos nós tem aproximadamente o mesmo número de ligações, sendo que poucos vértices diferem em uma escala maior da média global do grau. Assim, se houver uma apresentação do gráfico cujos eixos são o número de vértices

por grau, os nós obedecem a uma distribuição de *Poisson*, em forma de sino (BARABÁSI; BONABEAU, 2003).

Erdős e Rényi apenas se preocuparam com a matemática envolvida nas redes aleatórias e não em suas aplicações práticas, mas mencionaram que os grafos poderiam ser um modelo muito simplificado de certas redes de comunicação, como estradas de ferro e rodovias (BARABÁSI, 2003).

A Figura 20 demonstra uma rede aleatória de Erdős e Rényi, com suas ligações, onde (a) descreve os nós e suas ligações; (b) descreve um gráfico que considera a distribuição de grau médio, com $n = 10.000$ e probabilidade de conexão igual 0.2 (COSTA; BOAS, 2007).

Figura 20 - Rede Aleatória de Erdős e Rényi



Fonte: Barabási (2003).

3.2 Redes de Mundo-Pequeno – Modelo *Small World* de Watts-Strogatz

Em 1967, através de um experimento feito por Stanley Milgram, um psicólogo social na Harvard University, foi descoberto o efeito chamado mundo pequeno, este pesquisador observou os graus de separação entre as pessoas (DÉGENE; FORSÉ, 1999; BUCHANAN, 2002).

O experimento de Milgram consistia na questão: quantos conhecidos separam duas pessoas selecionadas aleatoriamente? Para responder essa pergunta foram realizados o envio de centenas de cartas a pessoas localizadas em Kansas e Nebraska, onde os participantes deveriam encaminhar essas cartas até que elas chegassem a um alvo, nessa carta havia algumas instruções tais como (BARABÁSI, 2003):

- Se o participante conhecer o alvo deveria encaminhar a carta para ele, caso contrário deveria encaminhar a algum outro conhecido;
- O participante deveria enviar um cartão postal para *Harvard* toda vez que encaminhasse a carta, para que *Milgram* pudesse acompanhar o andamento da carta.

Em um total de 160 cartas foram enviadas, 42 chegaram ao alvo e através disso *Milgram* concluiu que o grau de separação entre quaisquer duas pessoas é em média 5,5 arredondando para 6, onde chegou-se na propriedade mundo pequeno. (BARABÁSI, 2003, p. 108)

O sociólogo Mark Granovetter em 1973 deu uma importante contribuição sobre um problema da estruturação das redes sociais, ao estudar os relacionamentos entre pessoas dentro da sociedade. Verificou-se que os relacionamentos mais fracos, chamados de laços fracos (*weak ties*) são mais importantes do que os relacionamentos mais fortes, chamados laços fortes (*strong ties*). Os relacionamentos mais fortes como familiares e amigos próximos são altamente agrupados, o que não oferece diversidade de características. Já os relacionamentos mais fracos, como colegas ou amigos distantes conectam diferentes grupos sociais, o que forma uma rede, onde sem esses laços fracos, seriam vários *clusters* separados (GRANOVETTER, 1973).

Granovetter realizou várias entrevistas com trabalhadores, perguntando quem havia indicado o emprego atual de cada um, os números mostraram que na maioria dos casos foram os conhecidos ou colegas e não amigos próximos. Esse fato acontece, pois amigos próximos compartilham as mesmas informações, enquanto que colegas podem ter informações desconhecidas. O que prova a importância dos laços fracos em uma rede (GRANOVETTER, 1995). Granovetter também reforça a importância dos chamados *loops* de ordem 3 ou tríades, pois nas redes sociais duas pessoas que tem um amigo em comum tem mais chances de se conhecerem em algum momento.

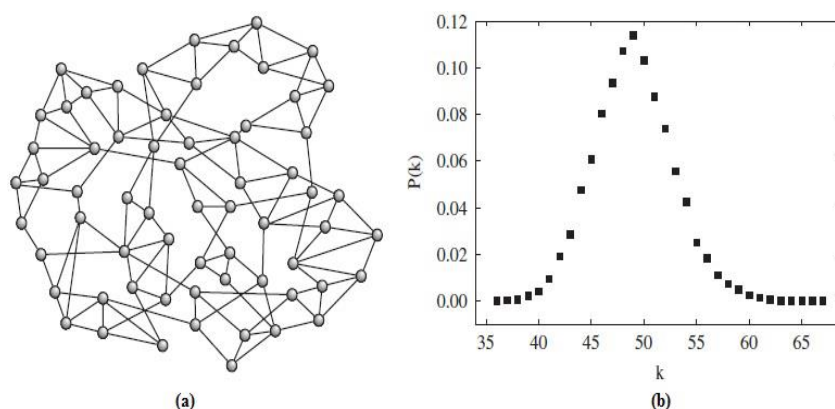
Isso tira a possibilidade das redes sociais serem simplesmente aleatórias, pois elas possuem alguma ordem de crescimento. O modelo mais popular de redes aleatórias com características do mundo pequeno e com elevado número de *loops* de tamanho 3 é chamado de modelo *small world* de *Watts-Strogatz* apresentado na Figura 21. Ele recebe esse nome em comparação ao experimento de Milgram, e envolve as teorias de *Granovetter*. Em 1998 *Duncan Watts* e *Steven Strogatz*, pesquisadores das Universidades de Columbia e Cornell, mostraram que a propriedade mundo pequeno está presente em uma variedade de domínios como as

redes neurais de *Caenorhabditis elegans* e a rede de distribuição dos Estados Unidos (COSTA; BOAS, 2007).

Para definir melhor o que é *loop* de tamanho 3, pode-se considerar um vértice i conectado com dois vértices j e k . Então existe uma alta probabilidade de j e k estarem ligados (COSTA; BOAS, 2007). Quando j e k realmente estão conectados caracteriza o chamado *loop* de tamanho 3. O número de loops de tamanho 3 em redes reais é muito maior que nas redes aleatórias com o mesmo número de vértices e arestas (WATTS; STROGATZ, 1998).

Granovetter, Watts e seu orientador Strogatz, chegaram a conclusão de que as redes sociais são altamente conectadas que resultam em uma quantidade pequena de conexões para cada indivíduo (WATTS, 2003).

Figura 21 - Rede *Small World*



Fonte: Costa e Boas, (2007).

A figura 21 representa no item (a) um exemplo de uma rede *small world*, onde se percebe facilmente a presença elevada de *loops* de três; (b) representa a distribuição da conectividade para uma rede *small world*, formada por 10.000 vértices, $k = 25$ e $p = 0,3$ (COSTA; BOAS, 2007).

Em uma rede social é muito bem representada a partir das características do modelo *small world* de *Watts-Strogatz*, pois cada pessoa têm vários amigos e conhecidos espalhados pelo mundo, que por sua vez também tem outros amigos e conhecidos. Por esse motivo, pode-se chegar a qualquer indivíduo partindo de outro por um pequeno número de pessoas intermediárias, o que mostra o mundo pequeno. Em relação aos *loops* de tamanho 3, se uma pessoa A é amigo próximo

de B e C, então muito provavelmente B e C também se conhecem (COSTA; BOAS, 2007).

3.3 REDES SEM-ESCALA

Watts tratava suas redes sociais com o modelo de redes aleatórias, onde essas redes apresentavam as conexões entre os nós de modo randômico, como Erdos e Rényi representavam anteriormente (BARABÁSI, 2003).

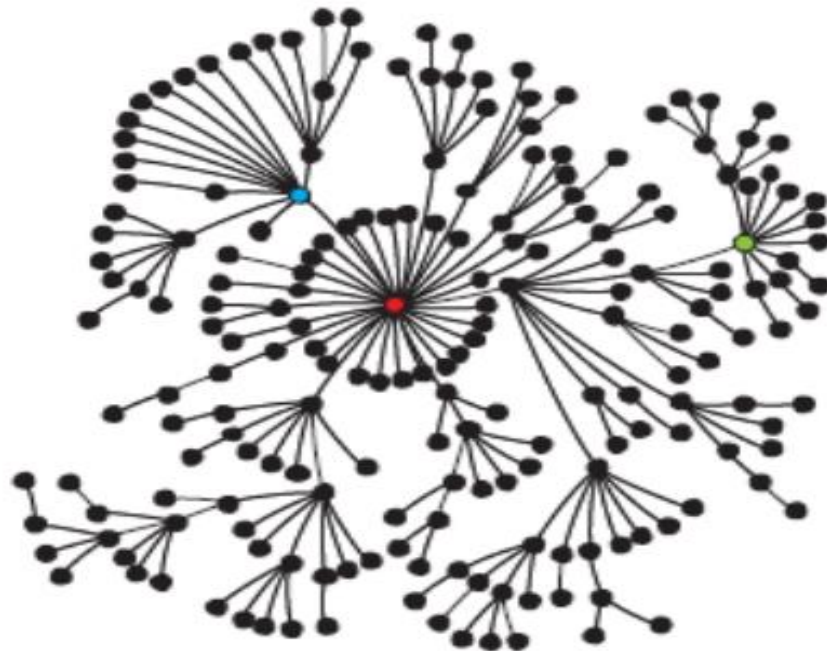
Diferentemente dos modelos aleatórios de Erdös e Rényi e *small world* de Watts-Strogatz, que tem um padrão aleatório nas conexões, e um grau característico na maioria dos nós, o modelo de Barabási-Albert sugere que as ligações têm um padrão de ligações preferenciais chamada de *rich get richer*, onde resulta em alguns vértices altamente conectados e outros com baixo número de ligações e a ausência de um grau característico nos vértices (COSTA; BOAS, 2007).

Conforme Barbási (2003) defendeu a ideia de que quanto mais conexões um nó possui, maiores as chances de estabelecer novas conexões, assim determinando de conexão preferencial. A partir dessa ideia não existiriam nós iguais, ou seja, com a possibilidade de ter mais ou menos o mesmo número de conexões, essas redes possuiriam poucos nós altamente conectados e vários nós com poucas conexões, os nós tenderiam a receber sempre mais conexões. Scharnhorst (2003) defende a ideia da existência de uma relação entre os modelos de redes sem escala e de mundos pequenos.

Em 1998 Albert-Laszlo Barabási e Reka Albert iniciaram um projeto para mapear a Internet, esperavam encontrar uma rede aleatória, partindo da premissa que as pessoas seguem seus próprios interesses para decidir a que sites irão vincular seus documentos da Web. Onde existe uma diversidade de interesses de todas as pessoas e uma enorme quantidade de páginas entre as quais é possível escolher quais serão vinculadas, o padrão de conexões resultantes deveria parecer aleatório, as medições dos resultados obtidos mostraram o contrário (BARABASI; BONABEAU, 2003).

A Figura 22 ilustra uma Rede Barabási-Albert.

Figura 22 - Exemplo de uma rede Barabási-Albert



Fonte: Strogatz,(2001).

Esse modelo de redes complexas apresenta 200 vértices e 199 arestas com a presença de *hubs* ou pólos, que são os vértices com alto grau de ligação, o que muito provavelmente não será encontrado em redes aleatórias. (COSTA; BOAS, 2007). Os vértices em diferentes cores possuem maior grau, onde k: vermelho, k=33; K: azul, K=12; K: verde, K=11. (STROGATZ, 2001).

O modelo Barabási-Albert baseia-se em duas premissas:

1. Crescimento: Inicia-se com um pequeno número de vértices N_0 , e adicionam-se vértices com m ($m \leq N_0$) arestas que se conectam com nós já existentes na rede;
2. Ligação preferencial: Cada nó adicionado é ligado aos nós existentes com uma probabilidade proporcional ao grau de cada nó. Dessa forma os nós tendem a se conectar com nós com mais conexões, sendo esta premissa o coração do modelo (HAVLIN e COHEN, 2010).

A probabilidade de conexão é dada pela equação (27) a seguir:

$$P(i) = \sum_a \frac{k_a}{a1} \quad (27)$$

Através disso pode-se dizer que os ricos ficam mais ricos (*rich get richer*), porque quanto maior forem suas “conexões” maior será sua preferência. Por exemplo, atores de Hollywood, quanto mais “amigos” tiverem ou mais trabalhos tiverem realizados, maior é a probabilidade de ser convidado a fazer algum papel.

Da mesma forma um artigo qualquer, quanto mais for citado, mais atraente ele torna, estimulando outros a ler e citá-lo também (BARABÁSI; BONABEAU, 2003).

As redes sem escala apresentam uma grande resistência a falhas acidentais, pois a remoção aleatória de um nó, na maioria dos casos, exclui nós com poucas ligações o que não afeta a rede como um todo. Isso ocorre porque são os pólos que mantêm toda a conectividade da rede. A dependência de pólos pode ou não ser vantajosa, no caso de pesquisadores farmacêuticos, eles podem aderir a novas estratégias onde os alvos dos medicamentos passam a ser os pólos de bactérias ou células prejudiciais. Já no caso de um grupo de *hackers* com boas informações, pode acontecer de derrubarem toda a infraestrutura de comunicação da *Web* atacando os pólos (BARABÁSI; BONABEAU, 2003).

4 MÉTRICAS DOS MODELOS DE REDES COMPLEXAS

4.1 INTRODUÇÃO

As redes complexas apresentam métricas para realização das análises dos mais diversos aspectos das redes e com os mais variados propósitos. Seguem as principais encontradas na literatura.

O grau de Distribuição ou grau da rede (*Degree*) é número de arestas conectadas a um determinado vértice. Define-se " p_k " como o número de vértices da rede que possuem grau igual a k , também é definida a probabilidade de um vértice escolhido aleatoriamente tenha um grau k . A distribuição de grau da rede é dada por um histograma.

Diâmetro é o parâmetro que determina o maior dos menores caminhos entre cada par de vértices, é um parâmetro base para análise do tipo de rede complexa, quanto menor o seu diâmetro mais interconectada será a rede. O cálculo do diâmetro de um grafo é feito a partir de sua matriz de adjacências, e de algoritmos de busca em largura e/ou busca em profundidade.

A conectividade é o parâmetro que fornece o menor número de vértices cuja sua retirada desconecta o grafo, é também parâmetro base para a análise de tipo de rede complexa, quanto mais fortemente conectado mais interconectada será a rede.

Coefficiente de clusterização é definido como a razão entre o número de arestas existentes no grafo e o número de arestas possíveis. Parâmetro importante de análise para determinar o tipo de rede complexa que se está trabalhando, indica a relação do grafo analisado com um grafo totalmente conectado. Os valores do coeficiente de clusterização variam de $0 \leq cc \leq 1$, sendo que o valor $cc = 0$ indica um grafo totalmente desconectado com vértices isolados sem nenhuma aresta, o valor $cc = 1$ indica um grafo totalmente conectado com todos os vértices conectados entre si.

Os agrupamentos intrínsecos às redes são quantificados por meio do coeficiente de aglomeração, também conhecido como fenômeno de transitividade. Esse fenômeno ocorre quando um vértice A está conectado a um vértice B , e o vértice B está conectado a um vértice C , aumentando as chances do vértice A também estar conectado ao vértice C . Em outras palavras, a transitividade indica a presença de um número elevado de triângulos na rede, i.e., conjuntos de três

vértices conectados uns aos outros. Para entender melhor, considere a analogia com uma rede social. Nesse caso, pode-se dizer que se A é amigo de B e B é amigo de C, existem grandes chances de A e C também serem amigos.

O coeficiente de aglomeração CA de uma rede é obtido a partir da equação (28), onde $\#\Delta$ refere-se ao número de triângulos na rede e, $\#v$ representa o número de “vértices triplamente conectados”, i.e., vértices com arestas não direcionadas para o outro par de nós. O fator 3 no numerador refere-se ao fato de que cada triângulo apresenta três triplas e também para garantir que o coeficiente de aglomeração seja um valor entre 0 (zero) e 1 (um).

$$CA = \frac{3x\#\Delta}{\#v} \quad (28)$$

O coeficiente de aglomeração utiliza a transitividade para definir e indicar a densidade da rede, formar grupos coesos e identificar os vértices centrais. (COSTA; RODRIGUES; TRAVIESO; BOAS, NEWMAN 2005).

Quando se tem um resultado de um alto valor de aglomeração, indica que os vizinhos desses vértices estão conectados entre si. Para realizar este cálculo, faz-se a relação entre o número de triângulos e o número de triplas que o participa, descrita na equação (29). (NEWMAN, 2001.)

$$C_i = \frac{NT}{NL} \quad (29)$$

$$C_r = \frac{\sum NT}{\sum NL} \quad (30)$$

A equação (30) apresenta a relação entre o número de triângulos conjuntos de três vértices interligados e o número de triplas (NEWMAN, 2001).

O grau de distribuição de um vértice qualquer em uma rede define o número de arestas que incidem (conectam) aquele vértice. Desse modo, a distribuição de graus é uma função de distribuição probabilística que indica a probabilidade de um determinado vértice ter grau fixo. Uma maneira de quantificar essa distribuição é por meio de uma função de distribuição cumulativa representada na equação (31), onde p_k é a fração de nós da rede com grau k e P_k é a função cumulativa de distribuição de probabilidades.

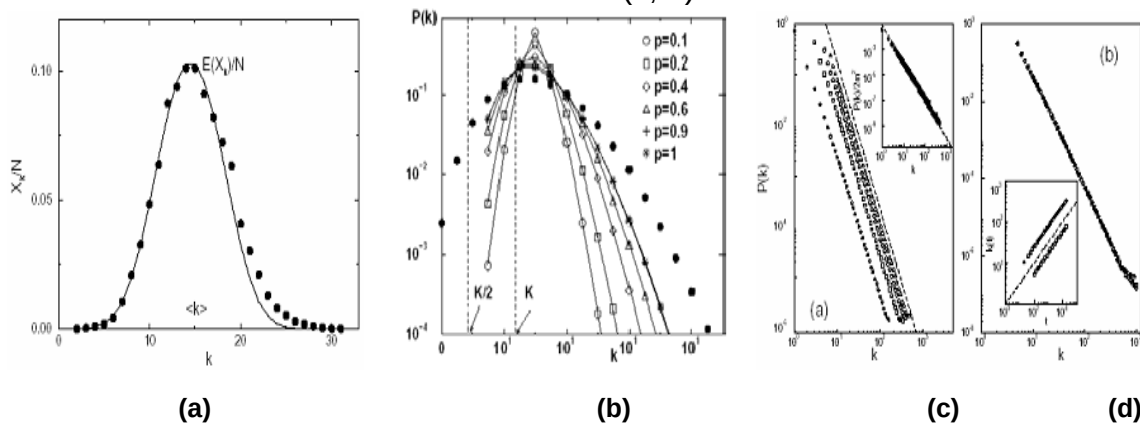
$$P_k = \sum_{k'=k}^{\infty} P^{k'} \quad (31)$$

Em um dígrafo, por outro lado, cada vértice tem um grau de entrada e de saída, acarretando em uma equação diferente para o cálculo da distribuição de graus. Essa nova equação é escrita em função de P_{jk} com duas variáveis, representando a fração de vértices que têm, simultaneamente, um grau de entrada j e um grau de saída k .

A distribuição de graus nas redes aleatórias segue a distribuição de Poisson, no entanto, em muitas redes reais a distribuição de graus segue a Lei de Potência, em que $p_k \sim k^{-\alpha}$ para uma constante α qualquer.

No exemplo da Figura 23, Albert e Barabási apresentam a frequência em função do grau de distribuição para redes Randômica (a), redes Mundo Pequeno (Figura b) e redes Livre de Escala (c, d), para definição da topologia da rede. (NEWMAN, 2003)

Figura 23 – Frequência das redes Randômica (a). Mundo Pequeno (b) e Livre de Escala (c, d)



Fonte: Newman (2006).

Na Rede Randômica, de acordo com a figura 23, (a) representa a existências de muitos vértices com o grau de distribuição médio. Nas redes de Mundo Pequeno (b), já apresenta um número de vértices sem ligação maior, ainda com grau médio. Nas redes Livre de Escala (c,d), representa uma grande quantidade de vértices em grau de distribuição baixo que diminui conforme o grau de distribuição aumenta.

A resistência/resiliência vindica a capacidade de resistência da rede quanto às remoções de alguns vértices, sem que haja perda de sua funcionalidade. Essa propriedade está diretamente relacionada com a distribuição de graus dos vértices,

pois a remoção de vértices pode resultar na perda de conexão entre pares de vértices ou, ainda, aumentar significativamente o caminho de um vértice a outro.

Alguns tipos de redes apresentam uma mistura de padrões diferentes onde os vértices podem representar diferentes tipos de objetos. Em geral, a probabilidade de conexão entre esses vértices é dependente do seu tipo.

O grau de correlação indicam se as arestas em uma rede associam vértices com graus parecidos. Essa correlação é usada, principalmente, em redes com variações de padrões, para investigar a probabilidade de conexão dos vértices de diferentes tipos.

Para definir o grau hierárquico de uma rede complexa é necessário definir os conceitos de distância e anel. A distância entre os nós i e j é o número de arestas necessárias para se chegar do nó i ao nó j . Por exemplo, os vizinhos (diretos) de um nó sempre têm distância 1 do mesmo. Pode ser realizada a diferenciação pela direção das arestas, resultando em graus hierárquicos de saída e de entrada.

A centralidade é o ponto de localização de cada vértice e sua importância em relação a seus vizinhos, é responsável por identificar o nó central e pode ser vista como uma medida de elasticidade da rede (NEWMAN, 2001)

O vértice central possui um alto grau de distribuição, número de vizinhos elevados e menores caminhos em suas ligações. O número de vizinhos representa o grau de distribuição dos vértices relacionados ao par da ligação em análise. Esses vértices são candidatos a gerar uma redefinição na rede quando ocorre sua retirada.

A centralidade indica a importância do vértice na rede, ou seja, o que possui uma melhor conexão e maior influência (NEWMAN, 2001). A remoção de um vértice com alta centralidade provoca a queda de desempenho da rede (COSTA; RODRIGUES; TRAVIESO; BOAS, 2005).

A Estrutura de Comunidade em uma rede complexa é determinada pelo conjunto de vértices fortemente interligados com a existência de poucas ligações entre os grupos. (COSTA; RODRIGUES; TRAVIESO; BOAS, 2005). Tem o objetivo de verificar se a rede é formada por grupos de mesma característica.

A métrica dos caminhos mínimos indica a medida da distância entre os vértices, é realizada para considerar a estrutura global de uma rede complexa. (COSTA et al. 2006). O caminho entre dois vértices é a sequência de arestas que leva um vértice a outro e o comprimento do caminho é o número de arestas contidas nesta sequência.

5 FALHAS

Uma rede pode ser robusta, ou seja, robustez em uma rede é a capacidade de operar na presença de falhas. Essa definição depende do contexto da rede e das funcionalidades que a mesma exerce. As falhas nas redes complexas e a capacidade da mesma operar, diante dessas falhas, estão diretamente ligados às propriedades estruturais da rede. É importante se analisar o tamanho relativo da maior componente conexa, pois indica a maior fração de vértices que estão conectados entre si.

Em algumas redes, dependendo da área a qual se destina, ter um vértice altamente conectado está relacionado com a sua capacidade de operar. Por exemplo, considere a Internet, enquanto a fração relativa da maior componente conexa é 1, todos os vértices podem se comunicar entre si; quando esta fração é 0.5 então apenas a metade dos vértices o que diminui a capacidade da rede de operar.

Uma métrica importante são as distâncias entre os vértices, pode-se citar o diâmetro da rede ou a distância média, uma rede com distâncias curtas opera melhor que uma rede com distâncias longas. Tomando como exemplo a Internet, a distância está diretamente relacionada com o atraso para entregar informações.

O modelo de falha de vértice precisa determinar quais vértices irão falhar. Existem apenas duas alternativas fundamentais para isto: falha aleatória e falha determinística. Na falha aleatória, os vértices falham aleatoriamente e uma distribuição de probabilidade é necessária para determinar a probabilidade de um vértice específico falhar. Na falha determinística os vértices falham deterministicamente e é necessária então definir uma ordenação dos vértices, que determina a ordem em que os mesmos irão falhar. Repare que a escolha de falha aleatória ou determinística, assim como a probabilidade de falha e critério de ordenação dos vértices, devem ser feitas de forma que o modelo de falha capture a essência do real processo de falha a ser representado.

5.1 FALHAS ALEATÓRIAS

O mais simples modelo de falha aleatório assume que todos os vértices falham com igual probabilidade (distribuição uniforme), em que os eventos de falha

ocorrem de forma independente (i.e., a falha de um vértice não influencia na falha de nenhum outro) e que todos os vértices tem uma chance de falhar.

5.2 FALHAS DETERMINÍSTICAS

Um modelo de falha alternativo ao aleatório é o modelo determinístico. Neste modelo, os vértices são ordenados de forma a definir a sequência em que irão falhar. É necessário, desta forma, usar um critério para ordenação dos vértices. Este critério está relacionado ao processo real de falha que se deseja capturar com o modelo.

Um critério interessante e bastante utilizado é a ordenação decrescente dos graus dos vértices. Ou seja, o vértice de maior grau irá falhar primeiro, o de segundo maior grau irá falhar segundo, e assim por diante. Este critério é bastante representativo de falhas propositais, realizadas com o intuito de tentar desconectar a rede o mais rápido possível.

5.3 CONFIABILIDADE DA REDE

No contexto atual, do mercado e da regulação das empresas de distribuição, requisitos importantes da busca e do encaminhamento para a excelência estão associados à qualidade dos serviços prestados. No sistema elétrico brasileiro, o aperfeiçoamento dessa qualidade é perseguido e incentivado de diversas maneiras, entre as quais se ressaltam o estabelecimento de padrões de qualidade técnica do serviço e a avaliação da satisfação dos consumidores.

Os padrões de qualidade técnica são estabelecidos pelo órgão regulador como metas a serem atingidas pelas empresas. De acordo com a visão regulatória, tais metas buscam considerar de forma justa o desejado equilíbrio entre a modicidade tarifária, a saúde financeira da empresa e o fornecimento de um serviço adequado e seguro. Para garantir que o sistema se encaminhe ao nível de qualidade almejado, penalidades são aplicadas aquelas empresas que não cumprem os requisitos da regulação. (FONSECA; REIS, 2012, p. 38)

Por outro lado, a avaliação da satisfação dos consumidores tem sido efetuada através de duas vertentes. Uma conduzida pelo próprio órgão regulador, a ANEEL, por meio do Índice ANEEL de Satisfação do Consumidor (IASC). Outra conduzida pela Associação Brasileira das Empresas de Distribuição de Energia Elétrica (ABRADEE), por meio do Índice de Satisfação com a Qualidade Percebida (ISQP).

A qualidade técnica dos serviços das distribuidoras de energia elétrica apresenta duas vertentes básicas de avaliação: uma relacionada à continuidade do fornecimento de energia, a Qualidade do Serviço; outra relacionada à qualidade da energia elétrica fornecida, a Qualidade do Produto.

Define-se Qualidade de Serviço (QoS) como sendo o efeito coletivo provocado pelas características de desempenho de um serviço, determinando o grau de satisfação do usuário. Tal definição engloba originalmente, vários aspectos de diversas áreas de atuação, incluindo o grau de satisfação do usuário.

Para definir corretamente qualidade e orientar o seu emprego e obtenção, conforme o planejado, um ponto importante é considerar a qualidade como um conjunto de atributos e elementos que compõem o produto ou serviço e, com isto, a sua modelagem passa a ganhar importância uma vez que considera que existe um processo natural de transferências de valores, ou seja, que existam atividades e um fluxo de realização para a transferência de valores.

As Políticas de Distribuição de Energia Elétrica, a qualidade dos serviços de fornecimento de energia elétrica, está em processo de evolução, devido às exigências dos consumidores perante a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que é o órgão regulador, e da crescente fiscalização exercida por este órgão nas concessionárias de distribuição de energia elétrica, em benefício da sociedade.

O sistema de distribuição de energia tem importância fundamental dentro do contexto de um sistema elétrico, não só pelo volume de investimentos que ele exige, como também pela sua elevada responsabilidade na qualidade de serviço prestado ao consumidor.

O planejamento, essencial a qualquer sistema, torna-se imprescindível a distribuição, de forma a atender o crescimento da carga em níveis de qualidade de serviço compatíveis com suas características, procurando aperfeiçoar a aplicação dos recursos financeiros disponíveis relativamente escassos.

A qualidade se obtém através da elevação dos níveis de investimentos ou de maior desembolso por parte do produtor, no caso, pelas empresas distribuidoras de energia elétrica. Quando se tem a garantia do funcionamento contínuo, seguro e adequado dos equipamentos elétricos, sem afetar o meio ambiente e o bem estar das pessoas, pode-se dizer que a energia elétrica é de boa qualidade.

A qualidade de serviço entendido como continuidade de fornecimento de acordo com Kagan et al. (2005), é resultado das interrupções no sistema elétrico, provocadas por falhas no sistema, que podem ser denominadas de manutenção corretiva, e por atividades de manutenção programada ou preventiva, em função de serviços necessários a serem realizados no sistema. A qualidade do produto é caracterizada, de uma forma geral, pela forma de onda de tensão dos componentes do sistema elétrico.

O monitoramento da qualidade de serviço oferecido pelas concessionárias, baseia-se em índices de desempenho do fornecimento, definidos pela ANEEL, que são denominados como índices operativos coletivos: DEC, FEC.

O índice Duração Equivalente por Consumidor (DEC), exprime o espaço de tempo em que, em média cada consumidor na área de estudo considerada ficou privado de fornecimento de energia elétrica no período. Este índice, tem dimensão de tempo (usualmente o minuto ou hora).

O índice Frequência Equivalente de interrupção por Consumidor (FEC), exprime o número de interrupções que, em média, cada consumidor considerado sofreu, no período considerado. Este índice é adimensional, pois representa o número de interrupções sofridas pela média de consumidor da área em estudo no período considerado.

Um outro índice, Energia Não Distribuída (END), corresponde à energia não fornecida aos consumidores (ou a um consumidor individual) de um sistema, durante um período de observação T, também é utilizado pelas concessionárias de energia.

De acordo com a ANEEL (1995), “a apuração dos indicadores DEC e FEC deverá ser efetuada conforme disposto na Portaria DNAEE nº 046, de 17/04/78, obedecendo as equações (31) e (32):

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^n Ca(i) \times t(i)}{Cs} \quad (32)$$

Sendo:

DEC = Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor, expresso em horas e centésimos de hora;

- n = Número de interrupções no período de observação;
 i = Contador do número de interrupções, variando de 1 a n ;
 $Ca(i)$ = Número de consumidores, do conjunto considerado, atingidos na interrupção (i);
 $t(i)$ = Tempo de duração da interrupção (i), em horas;
 Cs = Número total de consumidores do conjunto considerado.

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^n Ca(i)}{Cs} \quad (33)$$

Sendo:

- FEC = Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor, número adimensional expresso com duas casas decimais;
 N = Número de interrupções no período de observação;
 I = Contador do número de interrupções, variando de 1 a n ;
 $Ca(i)$ = Número de consumidores, do conjunto considerado, atingidos na interrupção (i);
 Cs = Número total de consumidores do conjunto considerado

Conforme a ANEEL, as equações (34) e (35), podem ser utilizadas para conjuntos de consumidores, individualmente, como alternativa, o critério de correlação entre o número de consumidores alimentados em baixa tensão (BT) e a respectiva potência instalada do conjunto considerado, em kVA.

O número de consumidores atingidos na interrupção (i) poderá ser calculado utilizando a equação 10:

$$Ca(i) = Kx E + F + G \quad (34)$$

Onde:

$K \rightarrow$ correlação (consumidor/kVA)

$$K = \frac{A - B - C}{D} \quad (35)$$

Sendo:

Ca(i) = Número de consumidores, do conjunto considerado, atingidos na interrupção (i);

E = Potência que alimenta as cargas dos consumidores de baixa tensão (BT), exceto a das cargas dos consumidores situados na zona rural, atingidos na interrupção (i);

A = Número de consumidores alimentados em baixa tensão (BT) do conjunto considerado;

B = Número de consumidores Rurais do conjunto considerado;

C = Número de consumidores primários do conjunto considerado;

D = Potência instalada que alimenta as cargas dos consumidores de baixa tensão (BT), exceto as cargas dos consumidores situados na zona rural, no conjunto considerado;

F = Número de consumidores da zona rural atingidos na interrupção (i);

G = Número de consumidores alimentados em tensão primária de distribuição, atingidos na interrupção (i).

6 USO DO MODELO DE REDES COMPLEXAS

O sistema de transmissão de energia elétrica é um exemplo de redes complexas desenvolvidas por seres humanos. Ele é composto por linhas de transmissão e subestações diversas, que incluem geradores, o poder da fonte de eletricidade; subestações de transmissão, que conectam as linhas de transmissão de alta tensão e centros de carga, que entrega a eletricidade para os consumidores. Conhecido como rede de energia, o sistema de transmissão de energia elétrica tem uma estrutura complexa, incluindo caminhos redundantes para rotear o poder de qualquer gerador a qualquer centro de carga. A principal razão para esta redundância é a garantia de que cada centro de carga pode ser fornecido por qualquer gerador. Em outras palavras, se um gerador falhar, os centros de carga irão receber a energia necessária de outros geradores. Da mesma forma, se uma subestação de transmissão falha, os outros têm que ser capazes de lidar com a carga adicional e manter a trabalho de toda a rede.

Mesmo com a redundância de linhas, algumas em cascata, ainda acontecem falhas e apagões e vários centros param de receber carga de energia. Pode-se citar um dos mais graves apagões que afetou 50 milhões de pessoas nos EUA e no Canadá, no dia 14 de agosto de 2003 e resultou em um enorme prejuízo, aproximadamente 30 bilhões dólares. (BAI; ZHOU; FU; CHEN; WANG, 2006). Obviamente, este tipo de rede é crucial para a economia de um país e merece uma atenção especial em Engenharia e Ciência.

Os primeiros estudos em sistemas de transmissão de energia baseou-se na criação de modelos dinâmicos simples que simulam cada componente da rede para compreender a dinâmica de apagões de todo a sistema conforme citam os autores (DOBSON; CARRERAS; LYNCH; NEWMAN, 2001; CARRERAS; LYNCH; SACHTJEN; DOBSON; NEWMAN, 2001; CARRERAS; LYNCH; DOBSON; NEWMAN, 2002; CARRERAS; LYNCH; DOBSON; NEWMAN, 2004; CARRERAS; NEWMAN; DOBSON; POOLE, 2004).

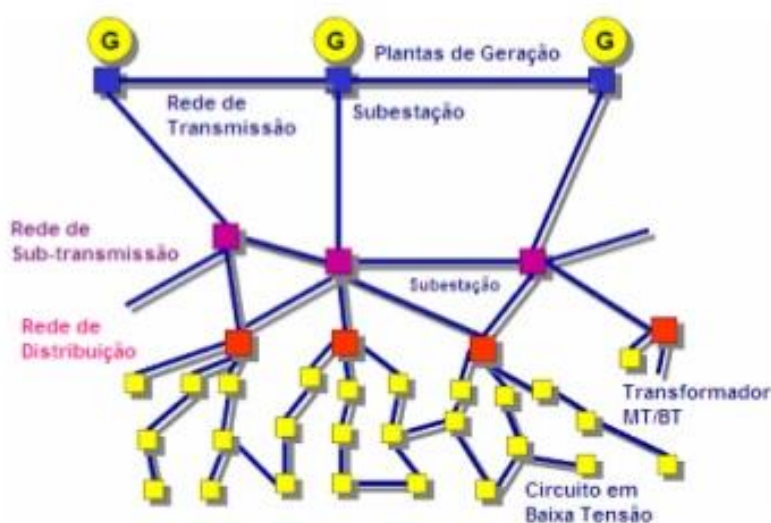
As redes eram estruturas simples, como anéis, árvores ou grades matemáticas e os apagões foram considerados eventos instantâneos causados por falhas em cascata das linhas de transmissão. Quando uma linha de transmissão falhou, todo o fluxo de energia foi redistribuído para as outras linhas, mas novas falhas podem acontecer devido ao excesso de carga, levando a um efeito em

cascata. Estes processos dinâmicos foram simulados nos trabalhos de (DOBSON; CARRERAS; LYNCH; NEWMAN, 2001; CARRERAS; LYNCH; SACHTJEN; DOBSON; NEWMAN, 2001; CARRERAS; LYNCH; DOBSON; NEWMAN, 2002; CARRERAS; LYNCH; DOBSON; NEWMAN, 2004; CARRERAS; NEWMAN; DOBSON; POOLE, 2004) dos quais tiveram como objetivo inferir o tamanho dos cortes de energia que não são comuns.

Embora úteis para prever apagões e encontrar os componentes críticos do poder da rede de transmissão, esta abordagem foi limitada para topologias de rede simples, que não correspondem às redes de transmissão de potência real. Na verdade, estas redes têm a propriedade de Mundo Pequeno, pelo exemplo apresentado no (BAI; ZHOU; FU; CHEN; WANG, 2006), o grau de distribuição em um exponencial de *clustering* formulário de Amaral; Scala, Barthèlemy e Stanley (2000) e Albert, Albert e Nakarado (2004) e a configuração de "laço" de Chassin and Posse (2005). Para uma rede de 314.123 nós, Chassin and Posse (2005), consideradou um vértice qualquer independentemente da tensão (as redes utilizadas apresentaram diversos tamanhos)

Os geradores estão no centro, com subestações de transmissão no meio e a carga de centros na fronteira, na configuração chamada de "laço" o que nas redes complexas são consideradas as de Mundo Pequeno (BRODER, et. al., 2000). Essa rede é representada pela Figura 24.

Figura 24 – Estrutura de uma Rede Elétrica



Fonte: Aneel (1995)

Na análise da topologia dessas redes, foi demonstrado que a remoção de nós conectados (sem distinção entre seus tipos) podem levar a quedas em certas regiões das redes (MOTTER; LAI, 2002; CRUCITTI; LATORA; MARCHIORI, 2004; KINNEY; CRUCITTI, ALBERT; LATORA, 2005), dependendo do número de caminhos curtos que passam através dos nós.

Albert, Albert e Nakarado (2004), mostraram que apenas a remoção de subestações de transmissão altamente conectadas podem provocar apagões, já que as outras subestações de transmissão podem falhar por causa da sobrecarga adicional. Este não é o caso de falhas do gerador, porque mesmo a remoção do gerador altamente ligado é incapaz de causar quedas. Esta é uma consequência da redundância dessas redes onde todos os geradores podem ser encaminhados a todos os centros de carga. Quando um gerador falhar, os outros fornecem energia adicional para toda a rede.

O quadro 3 apresenta os bancos de dados das redes de energia elétrica:

Quadro 3 – Bancos de dados de rede de energia elétrica. Redes completas contendo todas as subestações, independentemente da tensão

Rede	Tamanho (nº de nós)
Western US power	4,941
US power network	14,099
Complete US power	314,123
Italian power network	341
Chinese power	8,092

Fonte: Watts e Strogatz (1998) Albert, Albert e Nakarado (2004), Chassin e Posse (2005), Crucitti, Latora e Marchiori (2004) e Sun (2005).

Foi desenvolvido um modelo de rede complexa mais realista por Kinney, Crucitti, Albert, Latora (2005), o qual descreve uma rede de transmissão de energia elétrica sob perturbações aleatórias (por exemplo, linha ou subestação com falhas e sobrecargas) e a resposta do operador para os eventos de contingência é um sistema para reparar as linhas danificadas ou subestações. Neste modelo, cada evento aleatório foi estocástico e poderia ser provocado em qualquer altura. O modelo foi capaz não só de prever apagões, mas também encontrar a melhor estratégia para minimizar o impacto de falhas de componentes aleatórios.

Em geral, os sistemas de transmissão de energia representam redes muito grandes, com centenas de milhares de vértices e a propriedade de mundo pequeno,

com alto coeficiente de *cluster* e grau de exposição de distribuição em uma configuração de formulário e laço de curva exponencial. Quedas são causadas pela remoção das subestações de transmissão altamente conectadas como as outras subestações não podem levar a sobrecarga adicional.

Os primeiros modelos desenvolvidos para sistemas de transmissão de energia tinham topologias simples, com o objetivo na simulação de apagões. Atualmente existem modelos mais realistas que incluem topologias mais sofisticadas e baseia-se em eventos estocásticos.

7 ESTUDO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

Neste tópicos serão apresentadas as principais ferramentas computacionais existentes para o cálculo das métricas em redes complexas, sendo que para este trabalho foi selecionado o software Gephi por englobar as características de todas apresentadas e ser um software livre.

Segundo Matheus (2005), a Análise de Redes Complexas utiliza de *softwares* para visualização de grafos a fim de se obter imagens das redes. Esses *softwares* geram dados que são entendidos como matrizes e grafos. A visualização desses dados pode demonstrar informações e *insight* para as organizações e pesquisadores.

Dentre essas ferramentas utilizadas, pode-se citar a Agna, a Stocnet, a Cytoscape, e a Ucinet. Elas variam quanto ao modo de comercialização/distribuição, preço, métricas utilizadas e capacidade de lidar com redes complexas (BENTA, 2005; BOER et al., 2007; CYTOSCAPE CONSORTIUM, 2008).

O Agna é um *software* de distribuição livre sem nenhum custo de licença que foi desenvolvido com o objetivo de auxiliar na análise das relações em sociedade, da relação de parentesco entre grupos e complexidade comportamental humana. A versão mais recente dessa ferramenta é o Agna 2.1.1 (BENTA, 2005). Ela possui algumas características como independência de plataforma, facilidade de uso, edição gráfica simples e integrada e distribuição livre.

É uma ferramenta que se destaca em redes sociais por ser intuitiva, e isso a torna eficaz para aprender os conceitos de Redes Complexas. As redes mostradas através dos gráficos do Agna podem ser alteradas usando uma planilha e um editor visual. Com ela é possível criar, editar, armazenar, analisar e visualizar redes, e manipular redes de cadeias comportamentais (BENTA, 2005).

O Stocnet é um sistema de código fonte aberto com distribuição gratuita para análise de redes sociais que utiliza modelos estatísticos avançados. O *software* disponibiliza também métodos de análise que podem ser integrados facilmente e que podem ser melhorados com a ajuda da comunidade de *softwares* livres. Para tal, o Stocnet possui também um fórum para ajudar aquele que necessita obter informações ou ajuda técnica (BOER et al., 2007).

O Stocnet tem como principais funções: realização de estatísticas; cálculo de alguns princípios comuns como estatísticas descritivas de rede; transformação de dados; simulação de possibilidades (BOER et al., 2007).

O Cytoscape é um *software* de distribuição livre, sem custo de licença, utilizado na bioinformática para a visualização de interações moleculares e biológicas, registrar percursos e integrar estas por meio de anotações, expressão gênica e outros perfis. Embora o Cytoscape tenha sido originalmente concebido para a investigação biológica, agora é uma plataforma global para a complexa rede de análise e visualização. Este programa proporciona um conjunto de funcionalidades básicas para a integração de dados e visualização (CYTOSCAPE CONSORTIUM, 2008).

Os *plugins*, uma das características adicionais do Cytoscape, podem ser desenvolvidos por qualquer pessoa que estiver utilizando a tecnologia Java, desenvolvendo a comunidade de rede (CYTOSCAPE CONSORTIUM, 2008).

Esta ferramenta suporta um conjunto de normas de rede e anotação de formatos de arquivos, incluindo: SIF, GML, XGMML, BioPAX, PSI-MI, SBML, OBO e *Gene Association*. Arquivos de textos e Microsoft Excel também são suportados além de ser possível criar arquivos em formatos próprios. Ao utilizar este recurso, é possível carregar e salvar os atributos arbitrários sobre os nós, arestas e redes. (CYTOSCAPE CONSORTIUM, 2008).

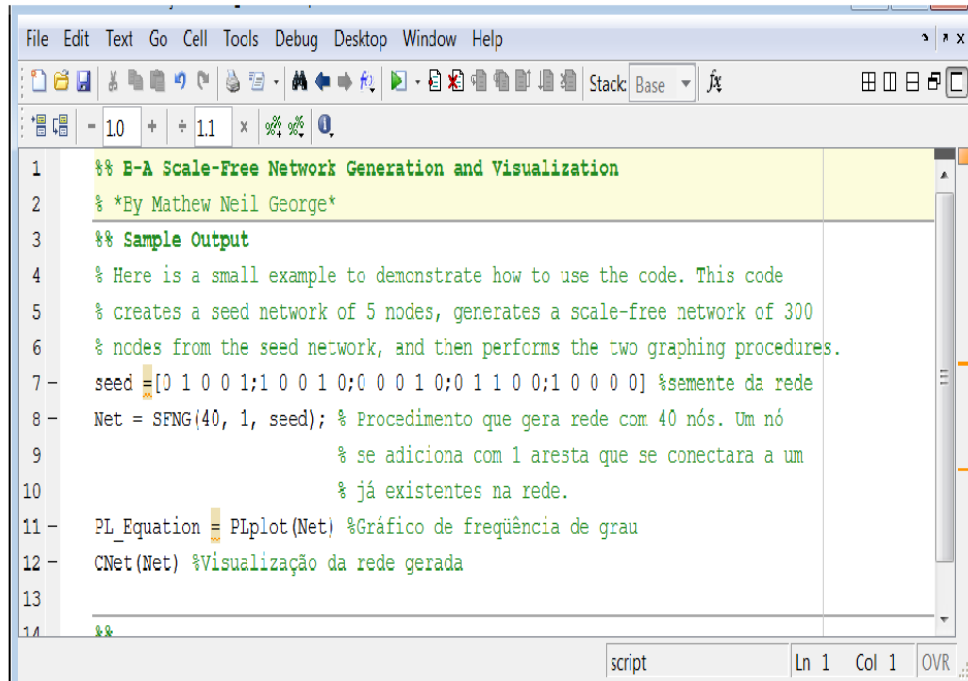
O programa B-A permite a geração de redes de topologia livre de escala com até 15 mil nós. A geração da rede pelo programa B-A é baseada em dois princípios fundamentais, o crescimento e a conexão preferencial, propostos por Barabási e Albert. O programa B-A foi desenvolvido por Mathew George. (VERA, 2011)

A geração parte de uma rede inicial de tamanho pequeno, por exemplo, com 5 nós interligados, como semente. Semente é um termo atribuído a uma matriz de adjacência não orientada que pode ser criada manualmente (n_0). A partir desta semente, o algoritmo B-A adiciona um novo nó que é conectado aos m nós da rede, preferencialmente aos nós com alto grau, e continua este processo até que o tamanho desejado da rede seja alcançado. (VERA, 2011)

A Figura 24 mostra a tela de abertura do programa B-A com os parâmetros iniciais com a semente para 5 nós interligados, o número total de nós da rede, 40, e $m=1$. O programa B-A fornece uma visualização gráfica da rede gerada em forma

circular, um gráfico da frequência de distribuição de graus dos nós e sua linha de aproximação por lei de potência (VERA, 2011)

Figura 24 – Tela de abertura do programa B-A



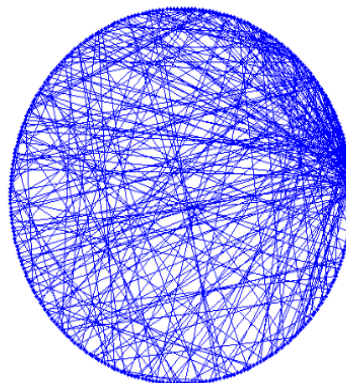
```

1  %% E-A Scale-Free Network Generation and Visualization
2  % *By Mathew Neil George*
3  %% Sample Output
4  % Here is a small example to demonstrate how to use the code. This code
5  % creates a seed network of 5 nodes, generates a scale-free network of 300
6  % nodes from the seed network, and then performs the two graphing procedures.
7  seed = [0 1 0 0 1; 1 0 0 1 0; 0 0 0 1 0; 0 1 1 0 0; 1 0 0 0 0] %semente da rede
8  Net = SFNG(40, 1, seed); % Procedimento que gera rede com 40 nós. Um nó
9                           % se adiciona com 1 aresta que se conectara a um
10                          % já existentes na rede.
11  PL_Equation = PLplot(Net) %Gráfico de frequência de grau
12  CNet(Net) %Visualização da rede gerada
13
14  %%
  
```

Fonte: (VERA, 2011)

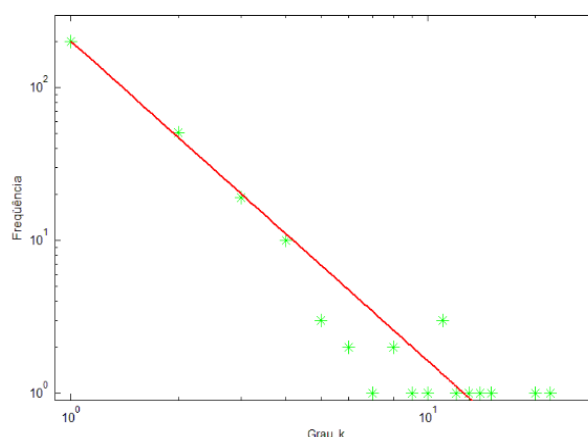
A Figura 25 ilustra uma visualização gráfica de uma rede livre de escala de 300 nós, $m=1$; e a Figura 26 mostra o gráfico de frequência de distribuição de graus dos nós e sua linha de aproximação por lei de potência com expoente $y=2,096$.

Figura 25 – Rede livre de escala com 300 nós



Fonte: (VERA, 2011)

Figura 26 – Gráfico de frequência de distribuição dos graus dos nós



Fonte: (VERA, 2011)

Para redes livres de escala a frequência de distribuição dos graus dos nós da rede está representada por uma curva de lei de potência com o expoente entre 2 e 3 (valores fora desse intervalo correspondem a redes aleatórias).

Como o programa B-A possui uma rotina para o cálculo do expoente da lei de potência, pode-se utilizar essa rotina para determinar se uma rede é de topologia livre de escala ou aleatória.

Conforme Pajek (2008), o programa Pajek foi desenvolvido para analisar e visualizar redes extensas com dezenas e milhares de nós, como redes de WWW e internet. O Pajek foi desenvolvido por Vladimir Batagelj e Andrej Mrvar.

O tipo de arquivo de rede gerada pelo Pajek (extensão “.net”) é muito popular entre as ferramentas de análise de rede social (PAJEK, 2008). Representa-se em um arquivo de texto primeiramente os vértices (um por linha) e depois as arestas. Esse tipo de arquivo não é frequentemente tratado em outras implementações, exceto no programa Pajek.

O NetLogo é uma ferramenta versátil de visualização baseada na linguagem Logo. É um ambiente programável de modelagem e simulação de sistemas complexos, multiagente, sistemas biológicos, simulações sociais e redes adaptativas complexas (NIAZI; HUSSAIN, 2009).

O NetLogo está baseado em um novo paradigma de modelagem: o uso de agentes. Um agente é uma entidade autônoma, que toma decisões sem a interferência de um sistema ou entidade. Um agente pode ser uma pessoa, uma formiga, um organismo celular, um computador, uma empresa ou corporação, ou

uma nação. Quando se trata de sistemas adaptativos complexos, os agentes têm a capacidade de interagir com o meio ambiente e com outros agentes. Eles podem seguir as instruções ou regras. Os agentes são flexíveis e têm a capacidade de aprender e adaptar o seu comportamento com base na experiência e, para isso, é necessária alguma forma de memória. Os agentes podem ainda ter regras para mudar de comportamento.

No mundo NetLogo existem quatro tipos de agentes que são as tartarugas *patches*, conexões e observador, conforme segue a descrição:

1. Tartarugas: são os agentes que se movem ao redor no mundo;
2. *Patches*: o mundo é bidimensional e está dividido numa malha de *patches*. Cada *patch* é um pedaço quadrado de “terreno” sobre o qual as tartarugas podem movimentar-se;
3. Conexões: são os agentes que conectam duas tartarugas;
4. Observador: o observador não tem localização, mas pode ser entendido como o criador que contempla o mundo formado pelas tartarugas e pelos *patches*.

Na criação de um programa NetLogo pode-se elaborar um programa para um conjunto de procedimentos. A opção “*button*” é tipicamente usada para executar procedimentos. Normalmente, a maioria dos programas tem (pelo menos) dois botões na interface do usuário: um botão “*setup*” (que roda o procedimento que inicia o mundo) e um botão “*Go*” (que roda o procedimento que executa alguns conjuntos de comandos executados em cada etapa do modelo). Geralmente, o procedimento “*Go*” é para rodar indefinidamente (ou até que algum critério ser encontrado).

Ao invés de pressionar uma vez para cada etapa do modelo, usa-se o botão “*forever*”. Em outras palavras, uma vez pressionado, este comando continuará a ser executado até o usuário pressionar o botão novamente (ou que algo interno ao programa faça). (NIAZI; HUSSAIN, 2009).

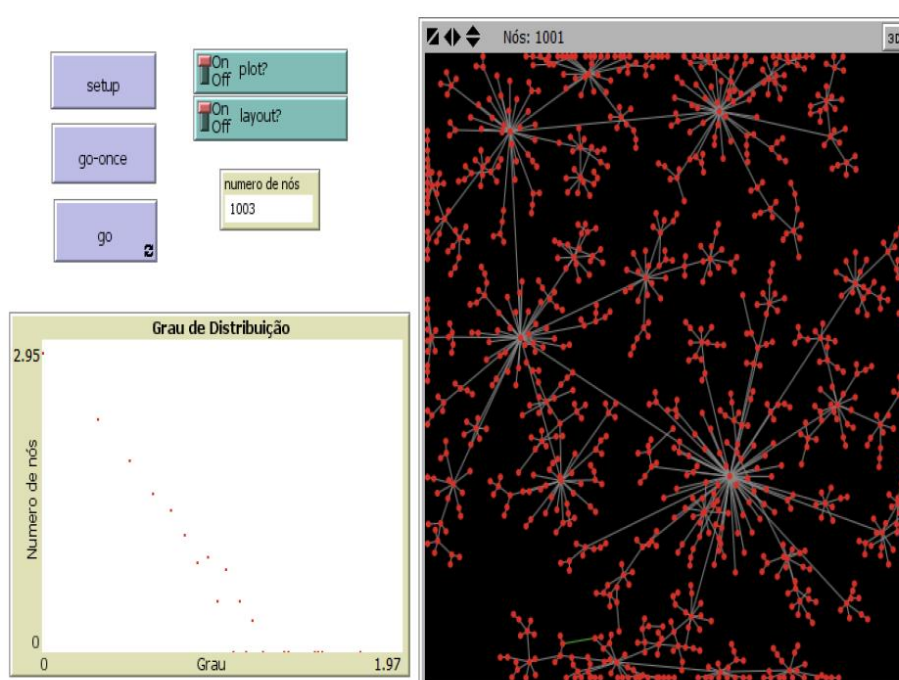
O NetLogo tem a capacidade de implementar grafos. Isto permite implementar modelos de redes sofisticados. Por exemplo, os agentes podem agora viver em uma rede de tipo aleatória ou livre de escala. Este modelo gera essas redes por meio de um processo de “conexão preferencial” (NIAZI; HUSSAIN, 2009).

Pode-se observar na Figura 27 que a frequência de distribuição de grau da rede segue uma lei de potência. O modelo começa com dois nós conectados por

uma aresta (botão “*setup*” este procedimento). Uma aresta é uma tartaruga que tem a forma de uma linha. A aresta tartaruga é de tamanho variável que liga duas outras tartarugas do tipo nó.

Ao pressionar o botão “*go-once*” o programa acrescenta um novo nó. Para adicionar nós continuamente pressiona-se “*Go*”. Uma vez pressionado, este comando continuará adicionando nós até ser pressionado novamente. Na figura 27 observa-se uma rede com 1003 nós.

Figura 27 – Tipo de rede Livre de Escala implementada no NetLogo



Fonte: (VERA, 2011)

A simulação foi executada de acordo com regras de rede livre de escala. Há uma grande quantidade de documentação incluindo exemplos e comunidade de usuários, como simulações sugestivas de auto-organização em redes complexas utilizando NetLogo (NIAZI; HUSSAIN, 2009).

O Graphviz é uma coleção de *softwares* para a visualização e manipulação de grafos abstratos. É capaz de gerar visualização de grafos para aplicativos e sites da *web* para as mais diversas áreas, como a engenharia de *software*, redes, banco de dados, representação do conhecimento e bioinformática. (WATTS, 2003).

A essência do Graphviz consiste na implementação de vários padrões de grafos. Estes padrões podem ser utilizados através de uma biblioteca de interface na

linguagem C, aplicativos de linha de comandos, interface gráfica e *web browsers*. Os aspectos que diferenciam esse *software* incluem uma retenção de interfaces baseadas em fluxos em conjunção com uma variedade de ferramentas para a manipulação de grafos, além de suportar uma grande quantidade de ferramentas gráficas e formatos de saída. O primeiro possibilita escrever programas em alto nível capazes de solicitar, modificar e mostrar um grafo. O último permite ao Graphviz ser útil em várias áreas, indo além das aplicações acadêmicas. (WATTS, 2003)

Muitas aplicações utilizam o Graphviz para produzir visualizações de grafos de modo a obter o melhor entendimento de informações e realizar alguma tarefa visualmente. Em particular, o modelo de fluxo do Graphviz permite que ele possa ser inserido em aplicações que necessitam de um serviço externo de visualização de grafos com uma interface gráfica ou *web*. É muito simples gerar modelos de grafos na linguagem dot e então carregá-los em um visualizador Graphviz, ou então em conteúdos *web* (WATTS, 2003)

Pode-se citar as seguintes áreas como exemplo de sucesso na utilização do Graphviz:

- Engenharia de Software
- Bioinformática
- Internet e estruturas de redes

A implementação do Graphviz reflete a época em que sua parte principal foi escrita, no começo dos anos 90. A maior parte do Graphviz foi escrita em C. As bibliotecas que dão suporte a ele somam aproximadamente quarenta e cinco mil linhas de código.

O design do Graphviz incorpora um nível de interface que possibilita o processamento de filtros para o uso de linguagens de *script*. Apesar de possuir uma biblioteca de API, assim como uma interface de usuário, a interface de *scripts* torna o *software* ainda mais útil.

Outro aspecto que distingue o Graphviz de outros *softwares* é a ênfase em prover ao usuário uma grande quantidade de primitivas gráficas e formatos de saída, implementando vários padrões para visualizar um grafo abstrato, formando uma visualização concreta na qual o usuário pode escolher como as informações semânticas e os atributos contextuais serão codificados, etc.

Existe uma grande variedade de formatos para serem atribuídos aos vértices, assim como vários tipos de setas e linhas para as arestas.

O Graphviz possui uma arquitetura convencional em camadas. No centro está a coleção de bibliotecas. A biblioteca *libgraph* provê o modelo fundamental do grafo, implementando grafos, vértices, arestas e subgrafos, assim como seus atributos, além de funções para arquivos de entrada e saída. A biblioteca *libcdt* é utilizada para implementar operações como o espalhamento de árvores. O Graphviz possui uma versão da biblioteca *libgd* que permite ao *software* gerar uma saída em *bitmap* em vários formatos. Há também uma biblioteca responsável por separar os grafos em componentes conexas, e depois combinar as componentes em um único desenho. (WATTS, 2003)

No próximo nível, há o centro da biblioteca de desenho de grafo. Isto encapsula as partes em comum de todos os algoritmos de desenho de grafos. Esta biblioteca é responsável por receber um grafo da entrada, configurar as estruturas de dados comuns e os atributos, e disponibilizar os *drivers* para todos os tipos de saída suportados pelo Graphviz. (WATTS, 2003)

O próximo nível consiste em um programa *stand-alone*. Com as bibliotecas fornecidas, este é basicamente o fluxo principal, que processa uma linha de comando e então utiliza a biblioteca apropriada para ler, gerar e mostrar um grafo (WATTS, 2003).

O nível superior dos visualizadores de grafos e editores é construído, em sua maioria, em linguagens comuns e interface gráfica, utilizando o Graphviz como um co-processo.

O Neato é uma ferramenta que desenha grafos não-dirigidos, que são muito comuns em telecomunicação e programa de computadores. O Neato desenha um grafo construindo um modelo físico virtual e tenta de maneira interativa encontrar a configuração com menor energia (GUIMERA; AMARAL, 2004).

Isto é feito substituindo as arestas por molas ideais, de modo que seu tamanho seja o menor caminho entre os vértices. As molas empurram os vértices de modo que suas distâncias geométricas no desenho se aproximem de suas distâncias correspondentes no grafo, gerando um *layout* razoável.

O Neato é compatível com o programa DOT, para desenho de grafos dirigidos, compartilhando o mesmo tipo de formato de arquivo de entrada. Desde que o formato do arquivo inclua grafos dirigidos e não-dirigidos, ele desenha grafos preparados para o DOT, e vice-versa. Os dois programas têm as mesmas opções de rótulos, cores, formatos, fontes de texto, paginação e geração de código em

linguagens gráficas comuns. Ambos funcionam com o DOTTY, um visualizador de grafos (GUIMERA; AMARAL, 2004).

Para melhorar o entendimento, muitas vezes é necessário eliminar a sobreposição de vértices e arestas. Uma maneira de fazer isso é aumentando a escala do *layout* o quanto for necessário.

Esta transformação preserva as relações geométricas, mas, nos piores casos, pode requerer fatores escalares muito altos. Uma outra maneira de se eliminar a sobreposição de vértices é utilizando heurística iterativa. (GUIMERA; AMARAL, 2004).

Em cada iteração, um diagrama de Voronoi do ponto central do vértice é computado, e cada vértice é movido para o centro de sua célula de Voronoi. Isso é repetido até que todas as sobreposições sejam eliminadas. A sobreposição de arestas pode ser prevenida utilizando curvas para desenhar as arestas.

Visual Social Network é uma ferramenta desenvolvida na Universidade de Konstanz e Universidade de Passau, ambas na Alemanha, tendo como pesquisadores Dorothea Wagner e Ulrik Brands respectivamente. Implementada em C++ e utilizando a biblioteca *LEDA (The Library of Efficient Data Types and Algorithms)* é um *software* livre para propósitos acadêmicos, roda em ambiente *Linux*, *Solaris* e *Windows* (BRANDES; WAGNER, 2003).

Utiliza uma classe *GraphWin* para editoração de grafos. A entrada de dados é feita através de uma sublinguagem *XML* denominada *GraphML (Graph Markup Language)*, mas aceita também outros formatos através de importação. Esta linguagem permite a definição de atributos de estilo, largura, cor e intensidade para as arestas e cor, largura, altura, nome e valor para os nós. Permite diversas formas de apresentação do grafo e possibilita a visualização da importância de cada ator através de regras como aumento de tamanho, mudança de cor ou posição. (BRANDES; WAGNER, 2003).

Possui mecanismo para seleção de atributos especificados nos nós e arestas, que facilitam a exploração permitindo incluir, alterar e esconder os objetos. Não identifica o conteúdo transacional das ligações. Na atual versão a ferramenta apresenta análise apenas para o nível do indivíduo ou do ator. (BRANDES; WAGNER, 2003).

O NetVis é uma ferramenta livre de código aberto baseada na *Web*, em ambiente *Apache/mysql/php* que também pode executar no Windows ou MAC, para analisar e visualizar redes complexas (CUMMINGS, 2004).

Usa como entrada arquivos CSV e calcula métricas de centralidade, medidas de coesão e analisa redes egocêntricas. Possui uma *Applet Java* para visualização da rede através de grafos em 2D e 3D. Desenvolvida por Jonathan Cummings, professor da MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), permite interações para incluir ou apagar atores e ligações. Interage com os atributos dos atores utilizando cores. Quando solicitada alguma métrica, representa a diferença de valores entre os atores por mudança de cores ou tamanho. Não permite atributos nem interação com as ligações (CUMMINGS, 2004).

Ferramenta desenvolvida por *Waren Sack* da MIT *Media Laboratory* que se propõe a analisar textos de mensagens arquivadas por ferramentas *Usenet newsgroups* e gerar saídas gráficas que podem ser utilizadas para pesquisar e ler este arquivamento. O sistema incorpora uma série de procedimentos de análise que detalha quem está falando com quem no grupo, o que estão falando, ou seja, qual o tema das discussões e que temas centrais em discussão estão associados com outros temas. Os procedimentos são escritos linguagem *PERL*, os resultados são armazenados como *HTML* e mostrados em uma *Applet Java* (SACK, 2000).

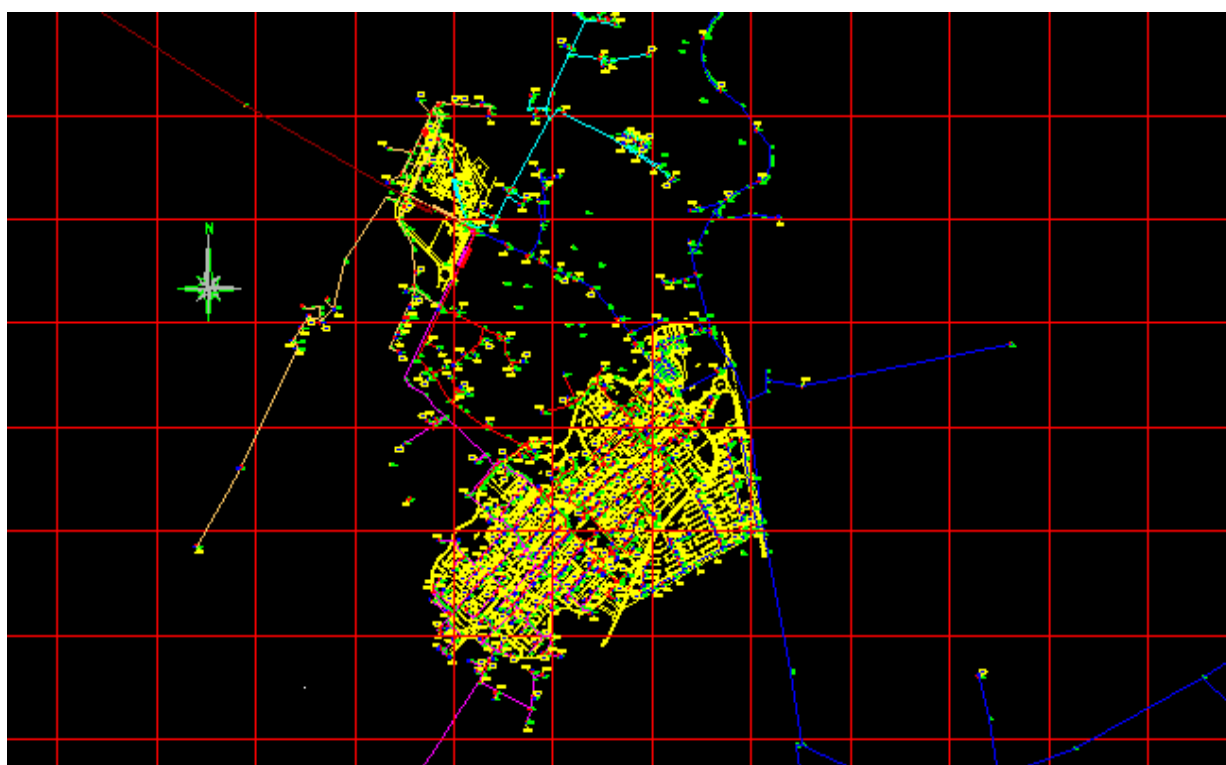
Conforme Oliveira (2013), o Gephi é uma plataforma que permite a manipulação e compreensão dos dados por meio de grafos dinâmicos e também a aplicação das métricas para análise dos mais diferenciados tipos de grafos aplicados as redes complexas.

Este software é considerado pelos pesquisadores o mais completo e eficiente para estudos estatísticos de um determinado modelo de redes complexas, assim destaca-se pela possibilidade de gerar redes que variam entre 50.000 nós e 1.000.000 de arestas.

8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As redes complexas são analisadas através de informações coletadas pelos próprios pesquisadores e apresentadas através de grafos e tabelas. O que vem contribuindo para a melhoria das análises são os programas geradores dos grafos, um dos mais conhecidos é o Gephi, com o qual foi gerado o grafo correspondente à rede em estudo, que se trata de uma Rede de Distribuição de Energia Elétrica da Cidade de Ilha Solteira-SP representada pelo mapa ilustrado através da Figura 28.

Figura 28 – Mapa da Rede de Distribuição de Energia Elétrica – Cidade de Ilha Solteira – SP



Fonte: Elaboração do próprio autor.

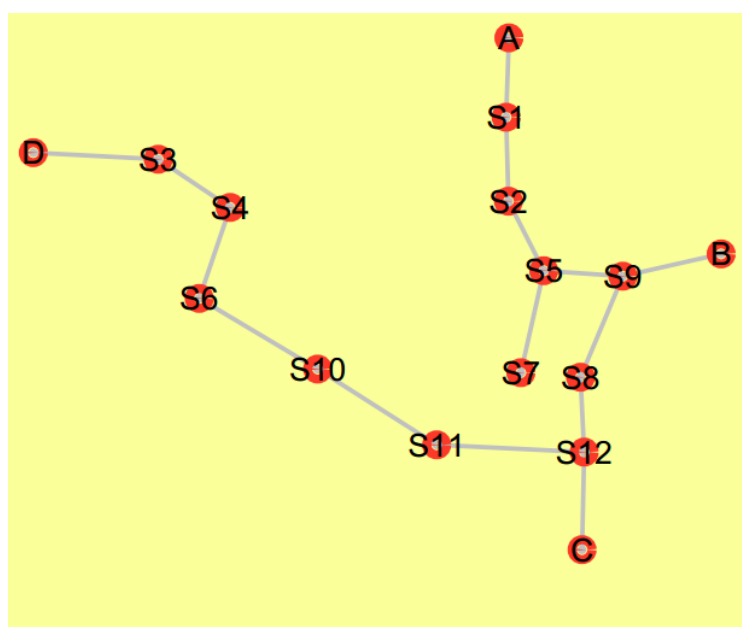
O software Gephi possui código aberto e é utilizado para analisar redes. Permite acesso fácil e amplo aos dados de rede e a importação, visualização, filtragem, navegação e agrupamentos dos dados (*clustering*). Permite o trabalho com conjuntos de dados complexos, pode também plotar várias formas de *layouts* com ótimos resultados visuais.

Dentre os elementos deste modelo de rede complexa pode-se destacar que os transformadores referem-se aos vértices e as ligações referem-se as arestas tomado como referência a distância entre os transformadores.

A sistemática de criar um grafo e desenvolver análises de suas propriedades estruturais tem o objetivo de obter dados referentes ao desenvolvimento do projeto de análise da Rede de Distribuição de Energia Elétrica.

Através do grafo de uma rede considerada Rede Modelo representada pela Figura 29 composta por 16 vértices ligados por 15 arestas que não apresenta falhas pode-se direcionar valores para as métricas que são considerados como valores padrão de qualidade.

Figura 29 – Grafo da Rede Modelo



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O Grafo da Figura 29 foi obtido através de um conjunto de vértices $V = \{1, 2, 3, \dots, n\}$, onde todo par de vértices u e v ($u, v \in V$) tem probabilidade $0 \leq p \leq 1$ de existir uma aresta entre eles.

Foi calculado o coeficiente de clusterização, o qual chegou-se ao valor 0 (zero), indica que os nós (vértices) inseridos nesta rede não formam triângulos, ou seja, não tem um fechamento isso representa de forma clara as redes de distribuição de energia.

O Grau Médio é dado pela média aritmética do grau de todos os vértices, conforme equação (21).

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i \in V} di = \frac{2m}{n} \quad (36)$$

A soma do grau de todos os vértices é igual ao dobro do número de arestas na rede, dado pela equação (22).

$$\sum_{i \in V} di = 2m \quad (37)$$

Obteve-se como resultado o valor 1,875, sabe-se que o grau de um vértice sempre estará entre 0 e n-1, caso ele possua relacionamentos ou se relacione com todos os outros vértices da rede.

O grau ponderado ou *Weighted Degree* foi criado por Abbasi e Altmann (2011) o qual representa a soma de todos os pesos das arestas ligadas a um nó, representado pela equação (23).

$$G_p(i) = \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (38)$$

Onde n é o número de nós, w_{ij} representa o peso da aresta entre o nó i e o nó j , a quantidade de vezes que os dois nós se relacionam, essa métrica foi criada para evidenciar a importância das relações entre os nós, obteve-se o resultado 1,875

O diâmetro da rede (D) indica a distância geodésica entre os pares de nós conectados na rede, considerando a distância geodésica entre i e j , o valor do diâmetro da rede é expresso através da equação (24):

$$D = \frac{1}{g(g+1)/2} \sum_{i \geq j} p_{ij} \quad (39)$$

O valor do diâmetro da rede em questão é 12, considera-se uma rede pequena, conclui-se que o número de ligações necessárias para sair de um nó e alcançar outro na rede é 12, é considerado como a distância geodésica entre eles.

O caminho médio em uma rede complexa é estabelecido através da quantidade de ligações entre os nós da rede, na maioria das vezes não existe um único caminho entre eles, o melhor caminho percorrido é chamado de menor caminho. O comprimento entre dois vértices é calculado pela soma do número total de arestas entre eles. O menor caminho médio na rede define o envio de informações na rede em questão a transferência de energia entre os transformadores, dessa forma é importante analisar essa métrica por trazer o melhor caminho para ligações na rede. O menor caminho é definido através da média de d_{ij} tomada sobre todos os $N(N-1)/2$ pares de vértices (i,j) .

Na rede em questão, chegou-se ao valor 4.1666.

$$\bar{l} = \frac{2}{(N)(N-1)} \sum_{i < j} d_{ij} \quad (40)$$

Quando dois transformadores estão conectados a uma distância pequena podem ser caracterizados como uma rede de mundo pequeno. O raio da rede em questão foi considerado de tamanho 6, é considerado como a excentricidade mínima da rede: $\min_{i=1}^N \{ecc(i)\}$. (17)

O valor para densidade (K_{dem}) do grafo foi calculado através da equação (25) chegou-se ao valor 0,125 que possibilita o quão agrupado pode estar um conjunto de nós dentro da rede. Se o valor K_{dem} é alto, significa que se trata de uma rede com muitas ligações, possibilitando assim chama-lo de cluster, neste caso o número foi baixo, sendo assim considerada uma rede com poucas conexões em cluster.

Para a modularidade da rede foi considerada o valor 0,509 definindo assim que se trata de uma rede sem clusters agrupados. O número de interações entre os componentes dessa rede foi 100, o que significa que pode-se estabelecer ainda esse valor para novas conexões sem que haja alterações na topologia.

Com base no grafo da Rede Modelo (Figura 29), calculou-se as métricas dos alimentadores da rede de distribuição de energia da cidade de Ilha Solteira-SP, para que fosse realizada uma análise em termos de falhas e expansão desta mesma rede. Os alimentadores analisados foram: 9, 14, 15 e 16.

Este estudo das redes analisadas e comparadas a rede modelo em questão foi realizado por meio das métricas: coeficiente de clusterização, grau médio, grau

ponderado, diâmetro da rede, caminho médio, menor caminho médio, densidade e modularidade.

Após análise, chegou-se aos valores apresentados no quadro 4:

Quadro 4 - Métricas dos Alimentadores

ALIMENTADORES	MÉTRICAS					
	GRAU MÉDIO	GRAU PONDERADO	DIÂMETRO DA REDE	CAMINHO MÉDIO	DENSIDADE	MODULARIDADE
9	1,975	1,975	27	10.111002921129504	0,025	0
14	1,500	1,500	3	1.6666666666666667	0,500	0,167
15	1,96	1,96	31	8,806	0,020	0,810
16	1,985	1,975	43	14.2883046237534	0,015	0
Rede Modelo	1,875	1,875	12	4,1666	0,125	0,509

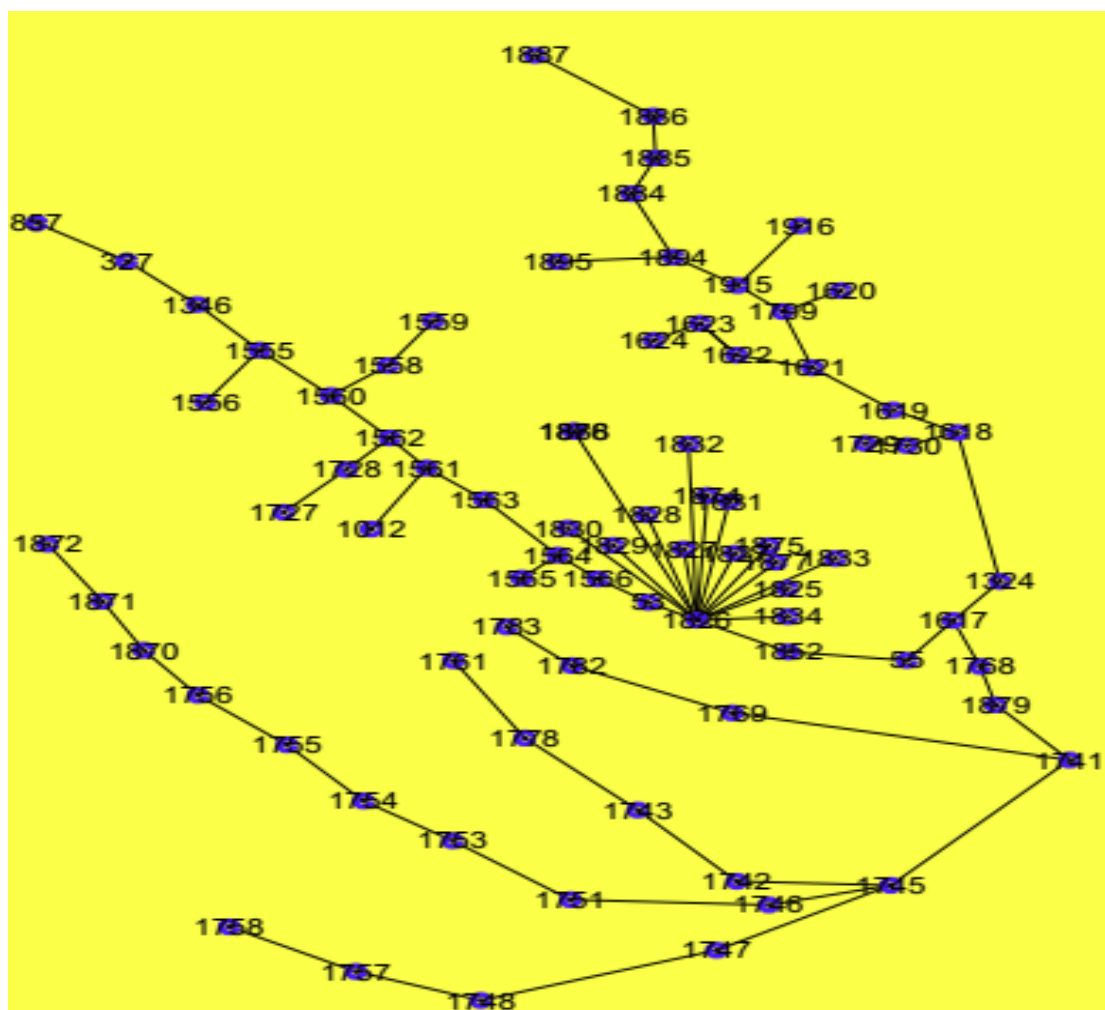
Fonte: Elaboração do próprio autor.

As redes complexas são estudadas a partir das propriedades dos modelos estruturais, ou seja, sua estrutura está relacionada a forma como os vértices se conectam e são organizados nesta rede. Para as redes em questão o modelo ao qual se classificam foi considerado as Redes sem Escala, ou seja, modelo de Barabasi Albert (BA) pois este se baseia em redes de propriedades estruturais em crescimento que é o caso das redes de distribuição de energia que estão sempre em expansão.

No modelo BA, conforme Antiquera (2011) a rede se inicia com um conjunto de m_0 vértices e conforme essa rede vai crescendo vão surgindo novos vértices com m arestas. São redes que apresentam resistência a falhas principalmente a apagões pois se houver uma remoção em um determinado vértice, geralmente são os que possuem poucas ligações o que leva esta rede a buscar um novo caminho para conexão evitando assim falhas na rede como um todo, pois quem mantém a conectividade na rede são os chamados Hubs.

Conforme apresenta o quadro 3 foram calculadas as métricas com base no modelo de BA para os alimentadores 9, 14, 15 e 16 e a Rede Padrão utilizada que foi chamada de Rede Modelo, as quais serão representados pelos seus respectivos grafos.

Figura 30 – Grafo do Alimentador 9

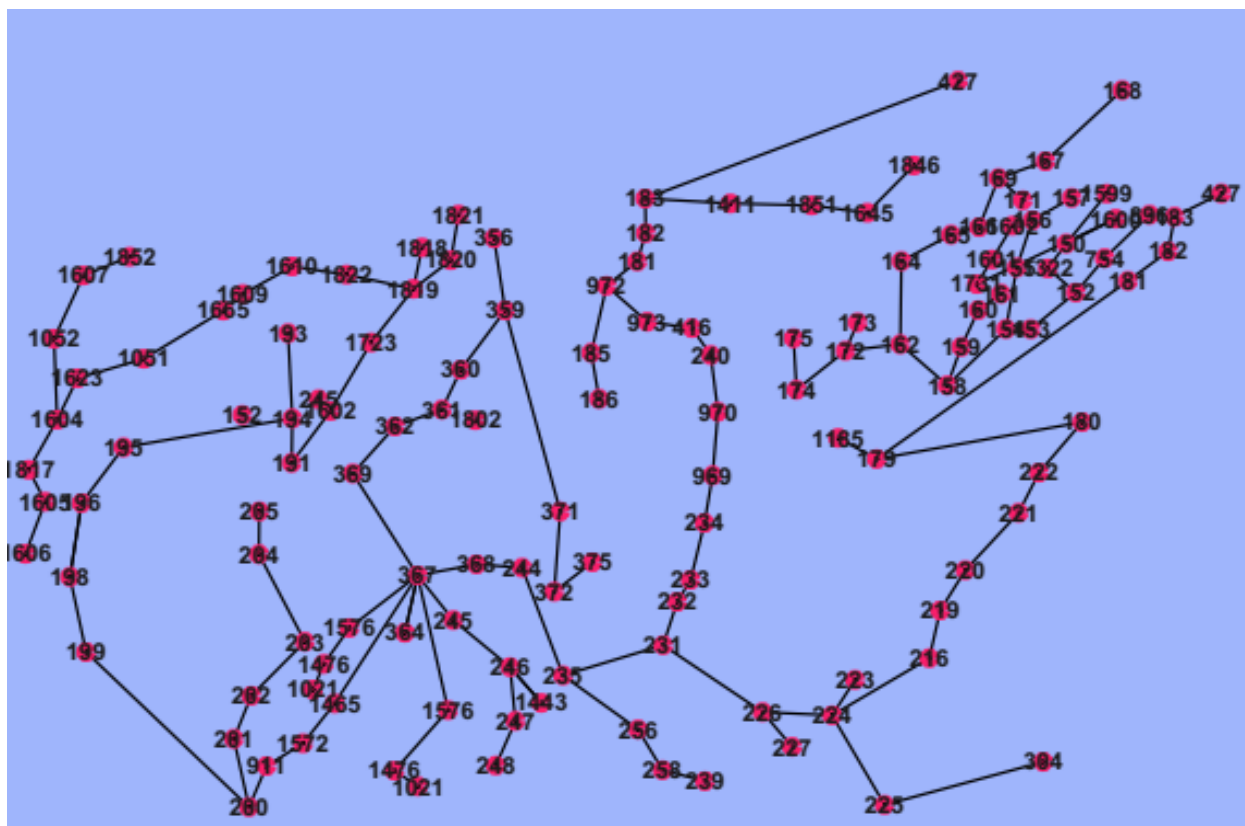


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Após a geração do grafo do alimentador 9 (Figura 30), foram analisados, os valores das métricas e foi considerado o alimentador que possui um valor médio que indica clusterização na rede, ou seja, grupos de vértices agrupados indicando várias ligações em um único transformador. Uma falha em um desses transformadores poderá acarretar em apagões isolados nesta rede.

Conclui-se que através do cálculo da métrica da centralidade um vértice na rede (*betweenness centrality* ou *betweenness*) que é a medida que quantifica a centralidade um vértice, pode-se determinar que o vértice que possui clusterização é considerado o mais importante sob o aspecto analisado.

Figura 31 – Centralidade dos vértices na rede do Alimentador 16



Fonte: Elaboração do próprio autor.

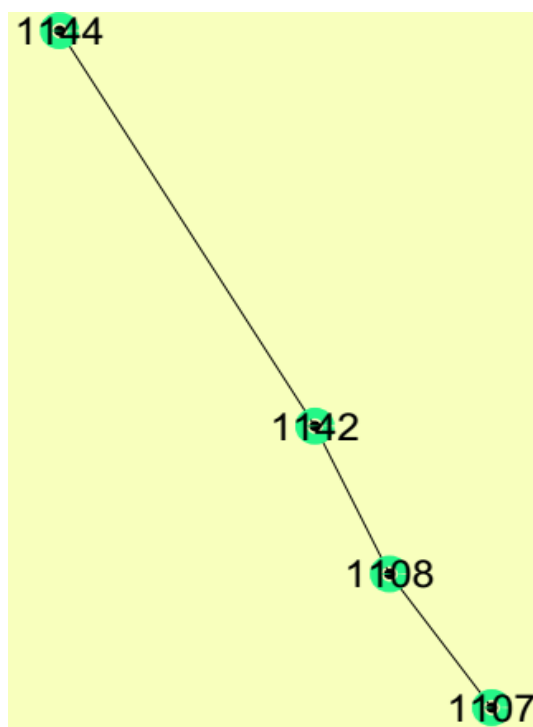
As redes possuem um grau médio entre 1.500 e 1.975 o que indica que no alimentador 16 (Figura 31) é o que mais possui relacionamentos entre os transformadores, ou seja o que significa que no caso de uma falha, poderá ser o que acarretará maior prejuízo na rede por conta de seus relacionamentos representando o mesmo que o grau ponderado sendo identificado através de seus valores a importância que existe na conexão entre os nós.

No diâmetro da rede, considera-se o alimentador 16 com maior número de ligações necessárias para sair de um nó e alcançar outro nesta rede, ou seja, é a distância geodésica entre eles, o que vem a classificar este alimentador como o mais vulnerável a falhas ou resiliência.

O cálculo do caminho médio das redes em questão, foi realizado através da quantidade de ligações entre os nós da rede, para esta métrica destaca-se o alimentador 14 (Figura 32) que é o que possui menor número de arestas possuindo assim um caminho médio com poucas ligações que poderá ter um crescimento e

proporcionar mais ligações o que possibilita uma expansão nesta rede, com probabilidade menor a falhas.

Figura 32 – Grafo do Alimentador 14



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Quando analisamos a densidade das redes em questão, chegamos ao alimentador 14 que é considerado uma rede dispersa por resultar em um valor maior se comparado a densidade máxima que é igual a 1, mas pode-se justificar esse resultado por se tratar de uma rede com quantidade bem menor de conexões entre os nós existentes.

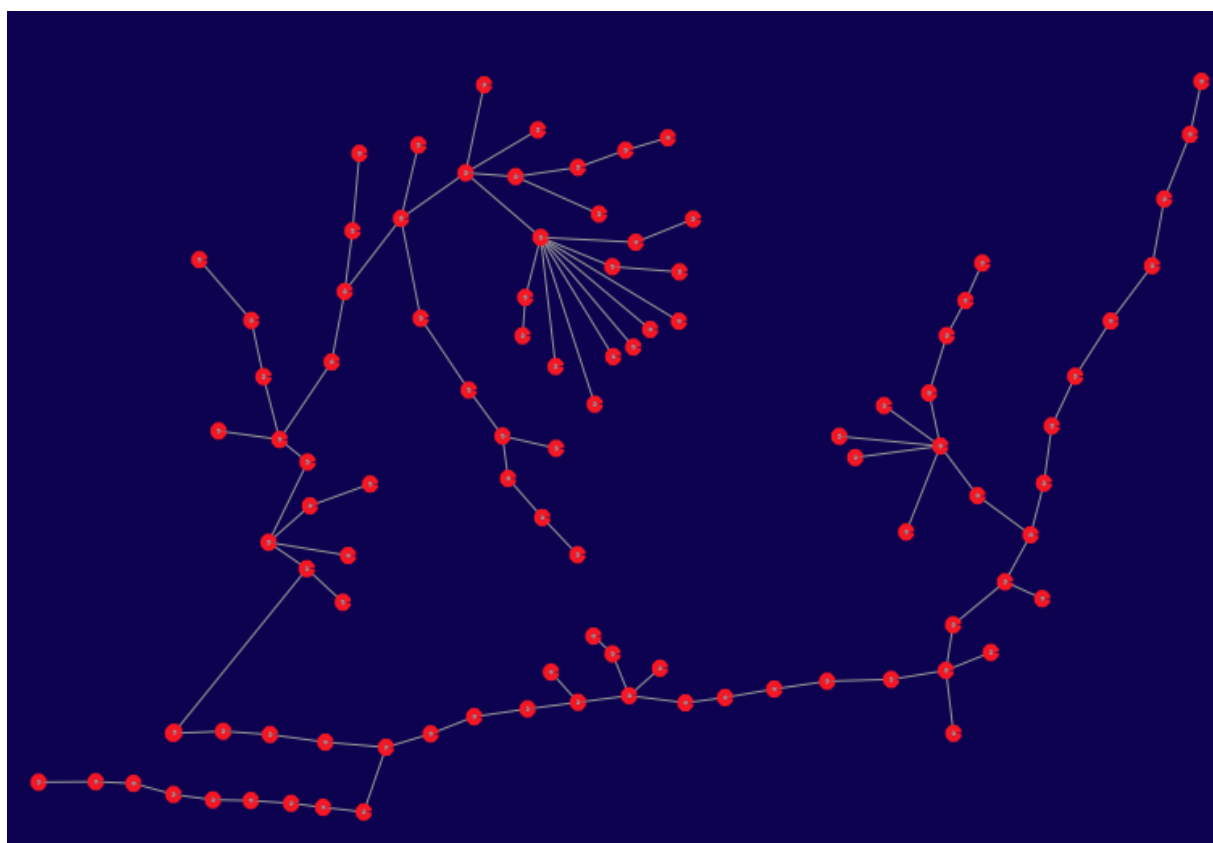
A modularidade indica se a rede pode ser particionada em comunidades, ou seja, hubs menores isolados a utilização desta métrica se torna importante a partir do momento que indica a capacidade de se organizar grupos de conexões dentro da rede.

O único alimentador que possui valor para modularidade foi considerado o 14 porque através da simples análise da topologia da rede podemos chegar a conclusão de que seus vértices não são agrupados, sendo assim, tem uma probabilidade também maior para expansão principalmente quando se trata de criar novas ligações determinando assim novos hubs nesta rede.

O sistema de distribuição de energia da cidade de Ilha Solteira-SP foi considerado como uma estrutura complexa, por este motivo utilizou-se de um modelo de redes complexas para análise, no qual poderá assumir diversos caminhos na rede em caso de uma falha em determinado transformador, ou seja, caso haja uma falha específica no transformador, a carga irá procurar por um novo caminho para que continue com a energia ativa, mantendo assim a continuidade do serviço de energia aos consumidores.

A Figura 30 apresenta o grafo do alimentador 15 da rede de distribuição da cidade de Ilha Solteira, constituído por 33 transformadores os quais tem 1237 consumidores.

Figura 33 – Grafo do Alimentador 15



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Após a geração do grafo (Figura 34), foi analisado também o Coeficiente de Clusterização que é calculado juntamente com o valor médio do caminho mais curto que pode indicar um efeito “*small-World*”. Indica como os nós estão inseridos em sua vizinhança. O valor médio fornece uma indicação geral da clusterização da rede.

Dentre os resultados obtidos após a aplicação da métrica como análise do grafo, o Coeficiente de Clusterização possui valor = 0,000 e um total de 0 triângulos, (Figura 30) ou seja, foi considerado um grafo totalmente desconectado com vértices isolados sem nenhuma aresta fechando, o que representa de maneira fiel a realidade das redes de distribuição porque não possuem em sua rede malhas fechadas, seja, formações de triângulos fechando a rede.

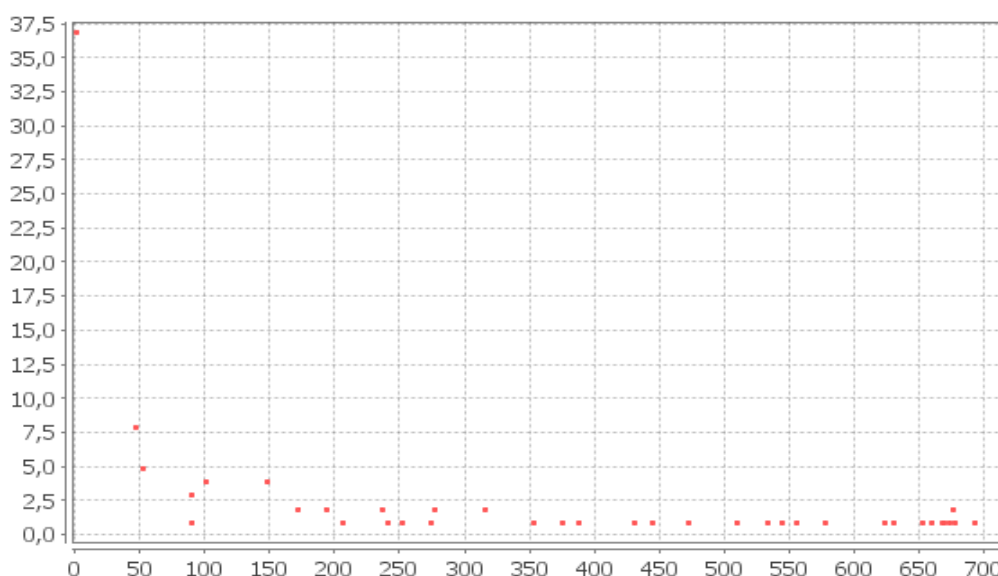
A sistemática de criar um grafo e desenvolver análises de suas propriedades estruturais tem por objetivo obter dados referentes ao desenvolvimento do projeto de análise da Rede de Distribuição de Energia Elétrica.

Foi aplicada a propriedade que analisado o Comprimento Médio do Caminho obteve-se como resultado o diâmetro da rede=31, o comprimento médio do caminho=8.806018706791379 e o número de caminhos mínimos=4918.

Foi calculada a centralidade um vértice na rede (*betweenness centrality* ou *betweenness*) que é a medida que quantifica a centralidade um vértice na rede. As medidas de centralidade são utilizadas para classificar, sob algum aspecto, os elementos (vértices ou arestas) mais importantes da rede.

As medidas de centralidade de um vértice têm como objetivo estimar sua importância topológica dentro da rede, i.e., vértices que concentram o fluxo de informação dentro da rede geralmente possuem importância vital para seu funcionamento.

Figura 34 – Centralidade dos vértices na rede do Alimentador 15



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Através da Figura 35 pode-se observar que o vértice 50 é o que tem o maior grau, ou seja, o grafo mais conectado na rede, uma falha no transformador representado por esse vértice pode causar problemas na rede.

Esse modelo de rede complexa é capaz de simular cada componente da rede para compreender os apagões de todo o sistema e antecipar falhas antes da implantação desta rede. A aplicação das propriedades da rede complexa possibilitou ainda analisar a rede do ponto de vista de quando um transformador falhar ela apresenta através do grafo quais os novos caminhos a percorrer possibilitando ainda encontrar uma estratégia eficiente para que o impacto das falhas não gere prejuízos maiores. De um modo geral as redes de distribuição de energia são muito grandes, as quais apresentam um número elevado de vértices, as quedas são causadas pela remoção desses vértices altamente conectados.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta desta tese foi apresentar os conceitos e a definição dos tipos de redes complexas com o objetivo de investigar as propriedades estruturais e de funcionamento da rede de distribuição de energia da cidade de Ilha Solteira tomando como referência uma rede considerada padrão. Foi definido e aplicado um modelo a rede de distribuição elétrica com a análise das propriedades grau médio, grau ponderado, diâmetro da rede, caminho médio, densidade e modularidade. Para esta rede foi considerado o modelo de Barabási Albert (BA) Redes sem Escala, o qual permite a expansão desta rede de distribuição ao tempo em que se cresce a cidade, aumenta-se a quantidade de ligações para energia. Destacou-se também neste trabalho outros modelos existentes os quais possibilitam classificar e analisar as redes complexas como um todo.

O modelo proposto foi inspirado na existência de uma rede padrão chamada de rede modelo onde apresenta resistência/resiliência a falhas, a qual tende-se a partir de problemas apresentados buscar novos caminhos para que não aconteça apagões. Desta forma, esses resultados indicaram que redes altamente interligadas tendem a estabelecer novas conexões com novas redes através do crescimento de novas ligações.

Um fato importante na utilização dos modelos é a possibilidade de estudar e detectar qualquer característica dos relacionamentos e assim direcionar recursos para uma proposta.

Os resultados encontrados corroboram que, a partir de um grafo criado da rede, pode-se realizar uma análise para detectar as características dos relacionamentos e assim direcionar recursos para uma proposta.

As Redes Complexas contribui em diversas áreas de pesquisa, não apenas pelo seu valor teórico mas pelo seu grande potencial para aplicação dos modelos no mundo real. Apesar de ser uma área relativamente nova, mas a pesquisa se estabeleceu especialmente através de sua relação com a teoria dos grafos sendo muito eficiente para representar e modelar sistemas complexos como uma rede de distribuição de energia elétrica. Se torna capaz não só de apresentar a estrutura de conectividade do sistema mas também a dinâmica envolvida nas ligações para que se realize uma análise eficiente.

Na presente pesquisa os alimentadores analisados em questão comparados a rede padrão apresentada, tiveram um desempenho bom no que diz respeito a sua aplicação que puderam ser demonstrados através de suas propriedades ou métricas as quais podem variar consideravelmente de uma área para a outra podendo atingir até 20 métricas diferentes. A maioria das aplicações, no entanto envolvem apenas 4 ou 5 métricas distintas. O modelo adotado fornece a característica real das redes analisadas possibilitando um trabalho eficiente por parte dos engenheiros. Pode-se perceber que conforme as redes aumentaram o tamanho, ou seja, o diâmetro, o número de vértices é de baixo grau. Possibilitando assim o crescimento desta rede cada vez mais, sendo assim, adição de novos vértices o que possibilita o aumento de ligações.

Este estudo oportunizou através do modelo de BA realizar uma análise de comportamento da rede de distribuição de energia elétrica, considerando características como falhas e possibilidade de expansão desta rede. Essas análises permitem a operadores e engenheiros proatividade na operação e gerência da rede, bem como, planejamento e otimização no uso dos recursos da rede.

Como trabalhos futuros sugiro que sejam realizadas novas métricas que possibilitam análise de uma rede inteligente, seria de fundamental importância para alcançarmos uma melhor análise através das redes complexas aplicadas a redes de distribuição de energia elétrica. Pode-se adotar também um método para expansão desta rede com uma análise dos mais variados níveis de conexões, onde várias medidas seriam realizadas nos subgrafos para calcular a probabilidade de uma expansão mais detalhada.

É importante também realizar cálculos com novas métricas que tenham a capacidade de avaliar o desempenho destas redes utilizadas na pesquisa e por fim até mesmo sugerir alterações em uma proposta de topologia eficiente.

9.1 CONTRIBUIÇÕES

A contribuição mais importante desta tese é apresentar o estudo das redes complexas como uma nova técnica de análise a partir de uma rede de distribuição de energia elétrica que possibilita um projeto mais eficiente através do modelo de BA

10 PUBLICAÇÃO DOS RESULTADOS – ARTIGOS ACEITOS E PUBLICADOS

- SCHWEITZER, C. M. ; MECA, L. B. ; BOMBARDA, F. ; ORTEGA, ALECIANA VASCONCELOS ; JARDIM JUNIOR, E. G. . Emprego de Redes Complexas para Modelar e Analisar a Disseminação de Microrganismos da Família Enterobacteriaceae em Pacientes Mantidos em Unidade de Terapia Intensiva. ARCHIVES OF HEALTH INVESTIGATION **JCR**, v. 3, p. 15-26, 2014

- ORTEGA, A. V. ; BOVOLATO, LUIZ FERNANDO ; BOVOLATO, MARIÂNGELA CARVALHO; SCHWEITZER, CHRISTIANE MARIE . IMPLEMENTANDO UM MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DO USO DE REDES COMPLEXAS. Proceedings of International Conference on Engineering and Technology Education **JCR**, v. 13, p. 123-127, 2014.

- CLAGTEE. Application of Complex Networks in Electric Power Distribution Grid of the City Ilha Solteira. 2015. (Congresso).

- II World Congress on Systems Engineering and Information Technology. UM MODELO DE REDES COMPLEXAS APLICADO A REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. 2015. (Congresso).

- Intertech 2014. Implementando o Modelo de Distribuição de Energia Através do Uso de Redes Complexas. 2014. (Congresso).

- Intertech 2016. Análise das Propriedades de Redes Complexas Aplicada a Rede de Distribuição de Energia. 2016. (Congresso)

- CLAGTEE. Application of Metric Complex Networks in Distribution Networks of Electrical Energy. 2017. (Congresso).

REFERÊNCIAS

- ABBASI, A., ALTMANN, J., HOSSAIN, L. Identifying the effects of co-authorship networks on the performance of scholars: a correlation and regression analysis of performance measures and social network analysis measures. **Journal of Informetrics**, Amsterdam, v. 5, n. 4, p. 594-607, 2011.
- AMARAL, L.; OTTINO, J. Complex networks: augmenting the framework for the study of complex systems. **The European Physical Journal B**, [S. l.], v. 38, n. 2, p. 147-162, 2004.
- ANGELIS, A. F. **Tutorial de redes complexas**. São Carlos: Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, 2005.
- ANTIQUERA, L. **Relações da estrutura de redes complexas com as dinâmicas do passeio aleatório, de transporte e de sincronização**. 171 f. 2011. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- BAI, W. J.; ZHOU, T.; FU, Z. Q.; CHEN, Y. H.; WU, X.; WANG, B. H. Electric power grids and blackouts in perspective of complex networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, CIRCUITS AND SYSTEMS, 4., 2006, [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.], 2006. p. 2687-2691.
- BARABÁSI, A.-L. and OLTVAI, Z. N. Network biology: understanding the cell's functional organization. **Nature Reviews Genetics**, London, n. 5, v. 2, p. 101–113, 2004.
- BARABÁSI, A. -L.; BONABEAU, E.. **Redes sem escala**. [S. l.]: Scientific American Brasil, 2003.
- BARABÁSI, A. -L. **Linked: how everything is connected to everything else and what it means for business**. Cambridge: Plume, 2003.
- BOCCALETTI, S.; LATORA, V.; MORENO, Y.; CHAVES, M.; HWANG, U. D. Complex networks: structure and dynamics. **Physics Reports**, Amsterdam, n. 424, p. 175–308, 2006.
- BOLLOBÁS, B. **Graph theory: an introductory course**. New York: Springer Verlag, 1990.
- BOLLOBÁS, B. **Random graphs**. Cambridge: Cambridge University, 2001.
- BRASIL. Ministério do Trabalho. comissão tripartite permanente de negociação do setor elétrico no estado de São Paulo. **Energia elétrica: geração, transmissão e distribuição**. [S. l.], 2013. Disponível em: <http://www.fundacentro.gov.br/dominios/ctn/anexos/cdNr10/Manuais/M%C3%B3dulo01/333_120INTRODU%C3%87%C3%83O%20A%20SEGURAN%C3%87A%20CO M%20ELETRICIDADE.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2013.

BRODER, A.; KUMAR, R.; MAGHOUL, F.; RAGHAVAN, P.; RAJAGOPALAN, S., R.; STATA, TOMKINS, A.; WIENER, J. Graph structure in the web. **Computer Networks**, Amsterdam, v. 309, n. 33, p. 320, 2000.

BUCHANAN, M. **Nexus**: small worlds and the groundbreaking theory of networks. New York: W.W. Norton e Company, 2002.

CABELLO, A. F. Redes elétricas inteligentes no Brasil: a necessidade de uma avaliação adequada de custos e benefícios. **Journal of Informetrics**, Amsterdam, v. 5, n. 4, p. 594-607, 2011. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/radar/120522_radar19_cap>. Acesso em: 24 fev. 2015.

CALDARELLI, G.; VESPIGNANI, A. **Large scale structure and dynamics of complex networks**: from information technology to finance and natural science (complex systems and interdisciplinary science). [S. l.]: World Scientific, 2007.

CARRERAS, B. A.; LYNCH, V. E.; DOBSON, I.; NEWMAN, D. E. Complex dynamics of blackouts in power transmission systems. **Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science**, New York, n. 14, v. 3, p. 643–652, 2004.

CARRERAS, B. A.; NEWMAN, D. E.; DOBSON, I.; POOLE, A. B. Evidence for self-organized criticality in a time series of electric power system blackouts: circuits and systems I: regular papers. **IEEE Transactions on Circuits and Systems**, Piscataway, n. 51, v. 9, f. 1733–1740, 2004.

CARRERAS, B.; LYNCH, V.; SACHTJEN, M.; DOBSON, I.; NEWMAN, D. Modeling blackout dynamics in power transmission networks with simple structure. In: ANNUAL HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES (HICSS-34), 34th., 2001, Washington. **Proceedings...** Piscataway: IEEE Computer Society, 2001. p. 2018

CARRERAS, B.A.; LYNCH, V.E.; DOBSON, I. and NEWMAN, D.E. Critical points and transitions in an electric power transmission model for cascading failure blackouts. **Chaos**, Melville, n. 12, v. 4, f. 984–995, 2002.

CHASSIN, D.P. and POSSE, C. Evaluating North American electric grid reliability using the Barabási–Albert network model. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Amsterdam, n. 355, v. 2-4, p. 667–677, 2014.

CHIANG, W. J.; JOU, H. L.; WU, J. C. Maximum power point tracking method for the voltage-mode grid-connected inverter of photovoltaic generation system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE SUSTAINABLE ENERGY TECHNOLOGIES (ICSET), 2008, [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.: s. n.], 2008. p. 1-6.

COSTA, L. da F.; BARBOSA, M. S. An analytical approach to connectivity in regular neuronal networks. **European Physical Journal B**, Heidelberg, n. 42, p. 573–580, 2004.

COSTA, L. da F.; RODRIGUES, F. A.; TRAVIESO, G.; VILAS BOAS, P. R. **Characterization of complex networks**: A survey of measurements. [S. l.]: Advances in Physics, 2007.

COSTA, L. da F.; RODRIGUES, F. A. **Superedges**: connecting structure and dynamics in complex networks. [S. l.]: Arxiv preprint arXiv:0801.4068, 2008.

COSTA, L. da F.; RODRIGUES, F. A.; TRAVIESO, G.; VILAS BOAS, P. R. **Characterization of complex networks**: a survey of measurements. São Paulo: Instituto de Física, 2005.

COSTA, L. da F.; RODRIGUES, F. A.; TRAVIESO, G. Protein domain connectivity and essentiality. **Applied physics letters**, Melville, v. 17, n. 89, 2006.

COSTA, L. da F.; RODRIGUES, F. A.; TRAVIESO, G. Analyzing trails in complex networks. **Physical Review E**, College Park, n. 76, v. 4, p. 46-106, 2007.

COSTA, L. da F.; SPORNS, O.; ANTIQUEIRA, L.; NUNES, M. G. V.; OLIVEIRA JR., O. N. Correlations between structure and random walk dynamics in directed complex networks. **Applied Physics Letters**, Melville, n. 91, p. 54-107, 2007.

COSTA, L. da F.; RODRIGUES, F.A. and TRAVIESO, G. Analyzing trails in complex networks. **Physical Review E**, College Park, n. 76, v. 4, p. 46-106, 2007.

CPFL Energia. Site. [S. l.], 2013. Disponível em: <<http://www.cpfl.com.br/>>. Acesso em: 18 mar. 2013.

CRUCITTI, P.; LATORA, V.; MARCHIORI, M. A topological analysis of the Italian electric power grid. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Amsterdam, n. 338, v. 1-2, p. 92–97, 2004.

CUMMINGS, J. **NetVis module**: dynamic visualization of social network. [S. l.], 2013. Disponível em: <<http://www.netvis.org/index.php>>. Acesso em: 20 ago. 2013.

DE ANGELIS, A. F. **Tutorial de redes complexas**. São Carlos: Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, 2005.

DOBSON, I.; CARRERAS, B. A.; LYNCH, V. E.; NEWMAN, D. E. An initial model for complex dynamics in electric power system blackouts. In: ANNUAL HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES, 34th, 2001, [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.: s. n.], 2001. p. 710–718.

DOROGOVTSSEV, S. N.; MENDES, J. F. F. Evolution of networks. **Advances in Physics**, Abingdon, v. 51, p. 1079–1187, 2002.

DEGENNE, A.; FORSÉ, M. **Introducing social networks**. London: Sage, 1999.

ELEKTRO. Site. São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.elektro.com.br/default.aspx>>. Acesso em: 22 abr. 2013.

ELETROPAULO - AES ELETROPAULO. Site. São Paulo, 2013. Disponível em: <<https://www.aeseletropaulo.com.br/Paginas/aes-eletropaulo.aspx>>. Acesso em: 20 abr. 2013.

ERDŐS, P.; RÉNYI, A. On the evolution of random graphs. **Bulletin of the International Statistical Institute**, The Hague, n. 38, v. 4, p. 343–347, 1960.

ERDŐS, P.; RÉNYI, A. **On random graphs**. Hungary: Institute of Mathematics Hungarian Academy of Sciences, 1959.

FALOUTSOS, M.; FALOUTSOS, P.; FALOUTSOS, C. On power-law relationships of the internet topology. **Computer Communication Review**, New York, n. 29, n. 4, p. 251-262, 1999.

FONSECA, J. N.; REIS, L. B. dos. **Empresas de distribuição de energia elétrica no Brasil: temas relevantes**. Rio de Janeiro: Synergia, 2012.

GASTNER, M. T.; NEWMAN, M. E. J. N. The spatial structure of networks. **The European Physical Journal B**, Heidelberg, n. 49, p. 247, 2006.

GRANOVETTER, M. (Ed.) The strength of weak ties. **American Journal of Sociology**, Chicago, v. 78, n. 6, p. 1360-1380, 1973.

GRANOVETTER, M. (Ed.) **Getting a Job: a study of contacts and careers**. Chicago: Chicago University, 1995.

GUIMERÀ, R. and NUNES AMARAL, L. A. Functional cartography of complex metabolic networks. **Nature**, London, n. 433, v. 7028, p. 895-900, 2005.

GUIMERÀ, R.; MOSSA, S.; TURTSCI, A.; AMARAL, A. N. L. The worldwide air transportation network: Anomalous centrality, community structure, and cities' global roles. **Proceedings of the National Academy of Science USA**, Tokyo, v. 102, n. 22, p. 7794–7799, 2005.

GUIMERA, R.; AMARAL, L.A.N. Modeling the world-wide airport network. **The European Physical Journal B**, Heidelberg, v. 38, n. 2, p. 381-385, 2004.

HAVLIN, S.; COHEN, R. (Ed.) **Complex networks structure, robustness and function**. Cambridge: Cambridge University, 2010.

INSTITUTO BLAISE PASCAL: TECNOLOGIA E EDUCAÇÃO. **Organizações, entes sociais complexos e relacionais**. [S. l.], 2009. Disponível em: <<http://www.institutopascal.org.br/canais/organizacoes/organizacoes.php>>. Acesso em: 12 abr. 2013.

JEONG, H.; MASON, S. P.; BARABÁSI, A.-L.; OLTVAI, Z. N. Lethality and centrality in protein networks. **Nature**, London, n. 411, v. 6833, p. 41–42, 2001.

KAGAN, N. et al. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. São Paulo: Edgar Blucher, 2005.

KINNEY, R.; CRUCITTI, P.; ALBERT, R.; LATORA, V. Modeling cascading failures in the north american power grid. **European Physical Journal B**, Heidelberg, n. 46, p. 101–107, 2005.

KRAUS, A. E.; FRANK, K. A.; MASON, D. M.; ULANOWICZ, R. E. and TAYLOR, W. M. Compartments exposed in food-web structure. **Nature**, London, n. 426, p. 282–285, 2003.

MOTTER, A. E. and LAI, Y.-C. Cascade-based attacks on complex networks. **Physical Review E**, College Park, n. 66, f. 65-102, 2002.

MATHEUS, R. F. **Introdução à análise de redes**. Rede CI: quem é quem na ciência da informação, Belo Horizonte, nov. 2005.

NIAZI, M.; HUSSAIN, A. Agent-based tools for modeling and simulation of self-organization in peer-to-peer, ad hoc, and other complex networks. **IEEE Communications Magazine**, Piscataway, v. 47, n. 3, p. 166-173, 2009.

NEWMAN, M. E. J.. The structure of scientific collaboration networks. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Kirkville, n. 98, v. 2, p. 404-409, 2001.

_____. Structure and function of complex networks. **SIAM Review**, Philadelphia, n. 45, v. 2, p. 167-256, 2003.

_____. **Modularity and community structure in networks**. Ann Arbor: Department of Physics and Center for the Study of Complex Systems, Randall Laboratory, University of Michigan, 2006.

OLIVEIRA, R. F. de. **Análise quantitativa das relações entre usuários do Twitter**. 2013. 104 f. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013. Disponível em: <<http://tede.biblioteca.ufpb.br/bitstream/tede/6104/1/arquivototal.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2015.

OLIVEIRA, R.D.; VIEIRA JÚNIOR, J. C. DE M. . BENEFÍCIOS E DESAFIOS DE REDES INTELIGENTES. **Revista Eletrônica de Energia**, Salvador, n. 2, v. 1, p. 3-14, 2012.

PASSERINO, L. M.; MONTARDO, S. P.; BENKENSTEIN, A. Análise de Redes Sociais em Blogs de Pessoas com Necessidades Especiais (PNE). **Novas Tecnologias na Educação**, Porto Alegre, v. 5, n. 2, p. 1-11, dez. 2007

PENNOCK, D. M.; FLAKE, G. W.; LAWRENCE, S.; GLOVER, E. J.; GILES, C. I. Winners don't take all: characterizing the competition for links on the web. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Kirkville, v. 99, n. 8, p. 5207-5211, 2002.

REDES complexas: da internet às redes sociais. [S. l.], 2007. Disponível em: <<http://cftc.cii.fc.ul.pt/PRISMA/capitulos/capitulo5/modulo2>>. Acesso em: 12 ago. 2013.

SACKS, W. Email visualization to aid communication. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT USER INTERFACES, 5., 2000, New Orleans. **Proceedings...** New York: ACM Press, 2000. v. 1, p. 233-240

SCOTT, J. P. **Social network analysis**: a handbook. 2. ed. London: Sage, 2000.

SPORNS, O.; CHIALVO, D. R.; KAISER, M.; HILGETAG, C. C. Organization, development and function of complex brain networks. **Trends Cogn Sci**, Kidlington, v. 8, n. 9, p. 418-25, 2004.

STROGATZ, S. H. Exploring complex networks. **Nature**, London, v. 410, p. 268-276, 2001. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/35065725>>. Acesso em: 05 maio 2013.

SUN, K. **Complex Networks Theory**: a new method of research in power grid. Asia and Pacific: Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005.

SCHARNOHORST, A. Complex networks and the web: insights from nonlinear physics. **Journal of Computer Mediated Communication**, Hoboken, v. 8, n 4., p. 0, 2003

VERA, A. M. **Propriedades de redes complexas em telecomunicações**. 2011. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

WASSERMAN, S.; FAUST, K. **Social network analysis**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

WATTS, D. **Small Worlds**: the dynamics of networks between order and randomness. Princeton: Princeton University Press, 2003.

WATTS, D. J.; STROGATZ, S. H. (Ed.). **Collective dynamics of small world networks**. New York: Cornell University, 1998.

WATTS, D. J. DEGREES, S. **The science of a connected age**. New York: W. W. Norton & Company, 2003.