

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROPOSTA DE PROJETO DE GRADUAÇÃO**



MATHEUS BASSANI LUCHINI

**ANÁLISE DO IMPACTO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM REDES
DE DISTRIBUIÇÃO SOB A ÓTICA TOPOLÓGICA DA TEORIA DE
GRAFOS**

VITÓRIA
2020

MATHEUS BASSANI LUCHINI

**ANÁLISE DO IMPACTO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM REDES
DE DISTRIBUIÇÃO SOB A ÓTICA TOPOLOGICA DA TEORIA DE
GRAFOS**

Parte manuscrita da Proposta de Projeto de Graduação do(a) aluno(a) **Matheus Bassani Luchini**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para aprovação na disciplina ELE08552 – Projeto de Graduação I.

Profa. Dra. Carla C.M. Cunha
Professora da disciplina

Profa. Dra. Marcia Helena Moreira Paiva
Orientadora

Prof. Dr.Sc. Oureste Elias Batista
Coorientador

Matheus Bassani Luchini
Aluno

VITÓRIA
2020

RESUMO

O fornecimento de energia elétrica é um serviço essencial não apenas por si só, mas também para que outros sistemas funcionem adequadamente. É imprescindível, então, que as redes de transmissão e distribuição sejam corretamente planejadas e operadas a fim de garantir uma energia com qualidade, confiabilidade e continuidade. Com o surgimento de novos elementos e tecnologias, como os geradores distribuídos, essa tarefa tem se mostrado ainda mais necessária e complexa, o que torna importante a execução de estudos sobre o assunto e a elaboração de novas ferramentas para análise do Sistema Elétrico de Potência. O objetivo desta pesquisa experimental é de avaliar como o posicionamento dos geradores distribuídos impacta numa rede de distribuição de energia de forma a afetar os valores de grandezas elétricas nos alimentadores. Um estudo de caso será feito utilizando como modelo a rede de distribuição de 13 barras do IEEE. Como metodologia, tal rede será modelada via grafos considerando suas características elétricas. Os geradores distribuídos fotovoltaicos serão posicionados ao longo da rede criando diferentes cenários, os quais serão analisados utilizando métricas de centralidade a fim de chegar-se naqueles pontos de maior importância, de acordo com as definições adotadas, para o sistema. Espera-se, dessa forma, relacionar a posição dos geradores com o impacto por eles causado na rede de forma a subsidiar estudos referentes ao planejamento e operação do sistema.

Palavras-chave: Geração Distribuída. Teoria de Grafos. Métricas de Centralidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de grafo (6,7)	19
Figura 2 – Multigrafo do problema das sete pontes de Königsberg	20
Figura 3 – Exemplos de redes com 10 nós (a) completa, (b) árvore, (c) árvore enraizada e (d) estrela.....	21
Figura 4 – Diagrama unifilar do alimentador de 13 nós do IEEE	25

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Evolução no número de unidades consumidoras com geração distribuída no Brasil	10
---	-------	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Cronograma de execução das atividades 27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONFAZ	Conselho Nacional de Política Fazendária
GD	Geração Distribuída
GDVF	Geração Distribuída fotovoltaica
GW	<i>Gigawatts</i>
ICMS	Imposto sobre Operações relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestações de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
kV	<i>Kilovolt</i>
kvar	Kilovolt-ampere reativo
kW	<i>Kilowatt</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia no Sistema Elétrico Nacional
REN	Resolução Normativa
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
UCs	Unidades Consumidoras
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

LISTA DE SÍMBOLOS

G	Grafo
V	Conjunto de vértices
v	Vértice
E	Conjunto de arestas
e	Aresta
n	Número de vértices
m	Número de arestas
$\deg_G V$	Grau de um vértice v de um grafo G
$\delta(G)$	Grau mínimo de um vértice de G
$\Delta(G)$	Grau máximo de um vértice de G
P	Caminho
C_n	Ciclo
$d_G(u, v)$	Distância entre dois vértices, u e v, de um grafo G
A(G)	Matriz de adjacências de um grafo G
C_v	Centralidade de grau
C_b	Centralidade de <i>betweenness</i>
C_e	Centralidade de autovetor
C_c	Centralidade de <i>closeness</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	OBJETIVOS.....	13
2.1	Objetivo Geral.....	13
2.2	Objetivos Específicos	13
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
3.1	Geração Distribuída.....	15
3.1.1	Benefícios da geração distribuída	16
3.1.2	Impacto da penetração de geração distribuída na rede.....	17
3.2	Teoria de Grafos.....	18
3.2.1	Definições.....	19
3.2.2	Métricas de centralidade.....	21
3.2.3	Aplicações em Sistemas de Energia.....	23
4	METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO.....	24
4.1	Metodologia	24
4.2	Etapas de Desenvolvimento.....	24
5	CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO.....	26
5.1	Lista e Descrição das Atividades Previstas	26
5.2	Cronograma de Execução	26
6	ALOCAÇÃO DE RECURSOS	28
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

1 INTRODUÇÃO

A evolução da sociedade ao longo dos anos, em especial após a Primeira Revolução Industrial, impactou de maneira relevante a maneira como diversos bens são gerados, transportados e consumidos. Em se tratando de itens tais como energia, água e alimentos, verifica-se que a distribuição destes tem se tornado mais complexas não apenas pela demanda por maiores quantidades, mas também pela inserção de novos elementos e tecnologias no processo. Diante deste cenário, é imprescindível o desenvolvimento de mecanismos que auxiliem na análise e subsidiem a operação segura e contínua dos sistemas, garantindo assim o abastecimento dos consumidores e, finalmente, o adequado funcionamento das demais atividades que deles dependem.

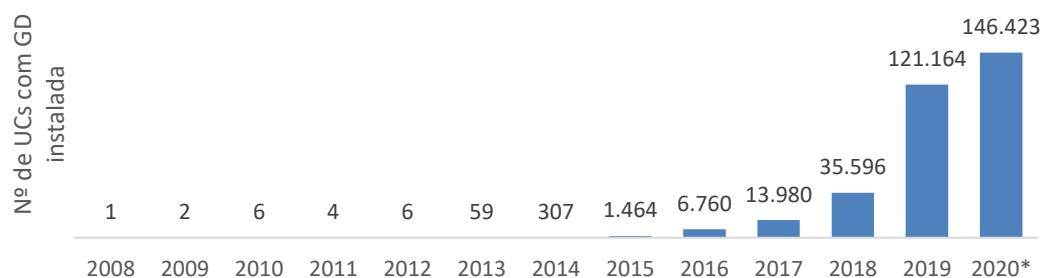
Dos sistemas mencionados, os de transmissão e distribuição de energia elétrica destacam-se como especialmente complexos, principalmente por serem compostos por uma variedade de componentes e diferentes tecnologias. Nesse sentido, é fundamental o desenvolvimento de novas tecnologias e ferramentas para lidar com as redes nas configurações que se apresentam atualmente e para o que se espera delas no futuro, conforme mostrado por *National Academies Of Sciences, Engineering, And Medicine* (2016). No Brasil, o Sistema Interligado Nacional (SIN) dispõe de mais de 140.000 km de linhas de transmissão que são responsáveis por entregar 99% da energia elétrica produzida no país (ONS, 2020).

A característica de geração centralizada adotada no Brasil devido à predominância de grandes usinas, principalmente hidrelétricas, e às dimensões continentais do país resultam em um sistema bastante extenso, conforme mencionado no parágrafo anterior. Essa peculiaridade resulta em perdas relevantes no processo, as quais são inerentes ao transporte de energia (e a transformações que ocorrem nesse processo), e que chegaram, em 2018, a 7,5% da energia injetada (ANEEL, 2019).

Diante deste cenário, percebe-se a necessidade de maior utilização de fontes localizadas próximas aos consumidores, no que se denomina geração distribuída (GD). Em diversos países, essa modalidade de geração de energia já está consolidada (CASTRO; DANTAS, 2018). No Brasil, embora as primeiras unidades consumidoras (UCs) com GD tenham sido homologadas em 2008, somente em 17 de abril de 2012 a atividade foi regulamentada pela Resolução

Normativa nº482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A partir daí o crescimento foi acelerado no país, chegando em outubro de 2020 a 325.772 consumidores responsáveis por gerar sua própria energia, contribuindo com mais de 4 GW de potência instalada na matriz elétrica (ANEEL, 2020). O Gráfico 1 mostra essa evolução ao longo dos últimos anos.

Gráfico 1 – Evolução no número de unidades consumidoras com geração distribuída no Brasil



Fonte: ANEEL (2020).

Nota: Adaptado pelo autor.

*Até 31 de outubro de 2020.

Além da descentralização proporcionada e das vantagens ambientais considerando que a geração distribuída é representada por fontes renováveis em praticamente a sua totalidade (ANEEL, 2020), esses novos elementos trazem ainda diversos desafios aos setores responsáveis pelo planejamento e operação dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Diversos autores, como Balamurugan, Srinivasan e Reindl (2012), Walling (2008) e Pepermans e outros (2005), discutem os impactos provocados pela inserção de geradores distribuídos no SEP. Entre as principais constatações, destacam-se alterações no perfil de tensão da rede, a necessidade de reajustar-se os dispositivos de proteção, mudança nos procedimentos para definição da previsão de demanda, a inversão do fluxo de potência (agora bidirecional), entre outros. Em alguns desses estudos, no entanto, como em Mendes (2018), não foi possível determinar um fator, como a potência ou a quantidade de geradores instalados, que resultou em um cenário de maior alteração nos valores de corrente nominal dos alimentadores. Uma hipótese levantada foi tratar-se de um problema topológico, ou seja, a posição desses equipamentos na rede pode caracterizar um impacto maior ou menor.

A topologia diz respeito a um conjunto de elementos e as relações (conexões) entre eles, dando origem, dessa forma, a uma rede. Nesse contexto, credita-se a Leonhard Euler um possível

pioneirismo na utilização de conceitos da Teoria de Grafos para a solução de um problema real. Conhecido como as sete pontes de Königsberg¹, o problema foi analisado por Euler em 1736, quando o matemático sanou a dúvida de muitos moradores desta pequena cidade da antiga Prússia. Para alcançar tal feito, foi necessário eliminar variáveis irrelevantes para a análise, como distância e formato das pontes e, com isso, foi elaborada uma representação para o problema com o que é considerado um dos primeiros grafos da história (HARARY, 1969).

Embora Euler tenha apresentado uma solução simples para um problema não muito complicado, o raciocínio desenvolvido foi fundamental para a elaboração da Teoria de Grafos (ou Teoria de Redes). Por meio desta, possibilitou-se representar de maneira clara os elementos de um sistema e as conexões entre eles, o que justifica um esforço maior dos pesquisadores em desenvolver estudos nessa área (BARABÁSI; PÓSFAI, 2016). A simplicidade inerente a essa ferramenta se mostra fundamental tendo em vista o aumento na complexidade dos sistemas reais da atualidade, no que, devido a esse número cada vez maior de elementos e interconexão entre eles, denomina-se Redes Complexas.

Na sociedade moderna, o conceito introduzido anteriormente aparece nas mais diferentes áreas do conhecimento, dentre as quais podemos citar: biologia (JEONG et al, 2000), logística (GUIMERÀ; AMARAL, 2004), redes de computadores (FALOUTSOS; FALOUTSOS; FALOUTSOS, 1999) e internet (ALBERT; JEONG; BARABÁSI, 1999), etc. É importante salientar que as métricas utilizadas na análise de tais redes, bem como as características dadas aos elementos dos grafos devem ser especificadas de acordo com a aplicação em questão. Além das áreas citadas, a rede elétrica aparece como uma candidata relevante para utilização da Teoria de Grafos e Redes Complexas devido a sua já citada complexidade e importância para a humanidade (PAGANI; AIELLO, 2013).

Os esforços atuais dos pesquisadores que utilizam as ferramentas aqui mostradas em redes de transmissão/distribuição de energia têm se concentrado em analisar a vulnerabilidade da rede elétrica quando em contingência (retirada de um ou mais nós/arestas). As redes analisadas, em sua maioria, estão localizadas nos EUA e na Europa. Além disso, utilizam-se modelos reais ou

¹ Na cidade de Königsberg, 6 pontes conectavam duas ilhas às margens do Rio Pregel e uma sétima fazia a ligação entre tais ilhas. O desafio posto aos moradores da região era de passear pela cidade visitando as sete pontes e, atravessando apenas uma vez cada uma delas, retornar, no fim do percurso, ao ponto de partida da caminhada. Euler provou ser impossível tal façanha.

ainda aqueles criados para esse fim, grupo este que tem como maior exemplo as redes modeladas pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE, do inglês *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) (PAGANI; AIELLO, 2013).

No âmbito da modelagem das redes por grafos, os primeiros estudos a realizavam sem a adoção de propriedades (como peso, por exemplo), para as arestas e sem caracterização dos vértices, como em (HOLMGREN, 2006) e (SUN, 2005). No entanto, alguns estudos passaram a adotar propriedades elétricas das redes elétricas para caracterização dos grafos, como abordado em (BOMPARD; NAPOLI; XUE, 2009) e (HINES; COTILLA-SANCHES; BLUMSACK, 2010).

Percebe-se que os estudos nessa área muitas vezes não abordam todos os elementos do SEP. Em (BESSANI, 2019), por exemplo, é realizada uma análise da vulnerabilidade e resiliência em redes de distribuição, abordando características dinâmicas e diferentes cenários climáticos. O trabalho, no entanto, não considera a presença de geradores distribuídos, sugerindo a inserção desses elementos em trabalhos futuros.

Diante do exposto e considerando se tratar de uma área em constante evolução, além do fato de que os SEP ao redor do mundo tem características topológicas e diversidade de elementos específicas, a justificativa do presente trabalho está no fato deste apresentar-se como uma extensão nas análises disponíveis das redes de distribuição para que os agentes responsáveis por planejá-las e operá-las tenham subsídios na busca por suprir a necessidade de sistemas cada vez mais robustos, seguros, sustentáveis e inteligentes. Além disso, os resultados podem contribuir para a criação, por parte das agências reguladoras e de órgãos públicos, de políticas públicas relacionadas à maior utilização de fontes renováveis por meio da GD e ainda ajudar na elaboração/atualização das resoluções normativas e normas técnicas do setor.

O problema de pesquisa a ser abordado no Projeto de Graduação é: qual o impacto da inserção de geradores distribuídos na rede de distribuição de energia no que diz respeito à alteração dos valores de corrente e sua relação com a posição de instalação desses elementos ao longo do sistema?

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa experimental e estudo de caso é avaliar como a posição dos geradores distribuídos numa rede de distribuição de energia afeta os valores de grandezas elétricas nos alimentadores. O estudo de caso será feito utilizando o modelo de 13 barras do IEEE.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos, os quais auxiliarão no cumprimento do objetivo geral, estão listados a seguir:

- Analisar sistemas de distribuição de energia elétrica como uma aplicação da Teoria de Grafos;
- Analisar modelos de grafos para a rede de 13 barras do IEEE levando em conta características elétricas de seus elementos; e
- Avaliar a aplicação de métricas de centralidade para análise do impacto da penetração de geração distribuída na rede elétrica.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

A centralização da geração de energia e sua transmissão em alta tensão por longas distâncias foi a estrutura escolhida por sistemas de países ao redor do planeta numa tendência global. Diversos são os benefícios que justificaram essa escolha: viabilidade técnica e econômica no transporte de grandes blocos de energia por elevadas distâncias, possibilidade de localização das usinas próximo às matérias primas de geração, etc (MARTÍN-MARTÍNEZ et al, 2017).

No entanto, ainda segundo Martín-Martínez e outros (2017), esse cenário vem sendo alterado com o surgimento de novas alternativas que lançam mão de conceitos distribuídos, tais como a GD, o armazenamento de energia e as redes inteligentes (do inglês *smart grids*). Essa nova abordagem se coloca como uma solução para alguns dos problemas apresentados pelo modelo anterior, como as perdas inerentes ao processo de transmissão e distribuição de energia e a necessidade de grandes investimentos para construção das linhas de transmissão.

Outra vantagem bastante relevante na transição de sistemas centralizados para os distribuídos se dá por motivos ambientais. As emissões de dióxido de carbono (CO₂) no setor energético são as maiores em comparação às outras atividades, sendo assim responsável relevante pelas mudanças climáticas, em especial no aumento do efeito estufa (IPCC, 2014). Isso ocorre uma vez que grande parte da geração de energia no mundo provém de fontes que utilizam combustíveis fósseis, como as termelétricas. A fim de mitigar esse impacto negativo, o modelo distribuído é uma excelente alternativa, já que em geral conta com fontes alternativas de energia (solar, eólica, biomassa), sendo essa mudança na matriz elétrica mundial apontada como imprescindível para que os países alcancem os objetivos de diminuir as emissões de CO₂ em 50% até 2050 traçado pelos governos em um acordo mundial (HAN et al, 2012).

Embora o Brasil possua uma matriz majoritariamente renovável baseada na hidroeletricidade (EPE, 2020), a diversificação das fontes é sempre recomendada (ANEEL, 2016). Para chegar a essa conclusão, basta considerar, por exemplo, a crise hídrica vivida pelo país num passado recente (CIRILO, 2015).

3.1 Geração Distribuída

Dentre os conceitos abordados na seção anterior, a GD já se apresenta como bastante consolidada, e a expectativa para o futuro é animadora. Define-se como geração distribuída:

[...] a micro e a minigeração distribuída consistem na produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais geradoras que utilizam fontes renováveis de energia elétrica ou cogeração qualificada, conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2016, p. 9).

Mais especificamente, rotula-se como microgeração quando a potência instalada é de até 75 kW e minigeração se maior que 75 kW e menor ou igual a 5 MW (ANEEL, 2015). Em termos regulatórios, dois documentos merecem atenção: o Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição de Energia no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) e a Resolução Normativa (REN) 687/2015 da ANEEL.

O PRODIST versa, no módulo citado, sobre o Acesso ao Sistema de Distribuição, seja por geradores distribuídos ou não. Nele são abordados os critérios técnicos e operacionais, os requisitos de projeto, as informações, os dados e a implementação da conexão. São indicadas, por exemplo, todas as proteções elétricas necessárias para cada faixa de potência dos geradores instalados, dentre elas: elementos de desconexão e interrupção, proteção de sub e sobrefrequência e tensão, proteção contra ilhamento, etc (ANEEL, 2017).

Já a REN 687/2015, a qual atualizou a pioneira REN 482/2012 e alterou os Módulos 1 e 3 do PRODIST, aborda de maneira geral a GD, definindo, por exemplo, o sistema de compensação conforme segue:

[...] sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa (ANEEL, 2015, p. 1).

Dessa forma, a energia injetada na rede, ou seja, a diferença entre a gerada e a consumida, é recebida pelo titular da unidade consumidora na forma de créditos, os quais podem ser consumidos na própria UC, no que se denomina autoconsumo, ou em outra UC sob mesma titularidade, na forma de autoconsumo remoto. Ainda, estão previstas as modalidades de Geração Compartilhada, para consórcios e cooperativas e Empreendimento com Múltiplas Unidades Consumidoras, como é o caso dos condomínios. Os créditos podem ser utilizados em até 60 meses (5 anos).

Sob o ponto de vista legislativo e de impostos, destaca-se a Lei nº 13.169, a qual desonerou o Programa de Integração Social (PIS) e o Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público (Pasep), além da Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social COFINS da energia compensada por meio dos créditos obtidos após injeção na rede (BRASIL, 2015). Da mesma forma, o convênio 16/2015 do Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ) formalizou a isenção de ICMS na energia consumida da concessionária após injeção na rede, com exceção da parcela referente ao custo de disponibilidade, à energia reativa e à demanda, aos encargos de conexão ou uso do sistema de distribuição, e a outras cobranças da distribuidora. (CONFAZ, 2015).

Por fim, destaca-se que o foco deste trabalho será na geração distribuída fotovoltaica (GDFV), já que esta fonte é a que está presente na grande maioria das UCs com GD instalada no Brasil (ANEEL, 2020). É relevante pontuar que o território brasileiro apresenta excelentes índices de radiação solar. A região de menor incidência solar no país assume valores maiores que a média nacional de diversos países europeus, como a Alemanha, onde o mercado de energia solar é mais consolidado quando comparado ao brasileiro (SALAMONI; RÜTHER, 2007).

3.1.1 Benefícios da geração distribuída

Além das vantagens já mencionadas para os sistemas distribuídos, outros benefícios são apontados por Viral e Khatod (2012) para explicar a maior difusão da GD, dentre eles:

- A proximidade das instalações ao consumo da energia diminui os custos com transmissão e distribuição (os quais tem aumentado);
- Os custos de instalação de geradores distribuídos têm diminuído;
- Os sistemas apresentam alta eficiência e elevada flexibilidade no que diz respeito à potência;
- Facilidade para encontrar locais de instalação;
- Menor custo de instalação e riscos de investimento não tão altos; e
- Existência de diferentes tecnologias que podem ser adotadas.

De maneira complementar, Jordehi (2015) aponta os seguintes benefícios, desde que os geradores sejam instalados em locais adequados e tenham sido corretamente dimensionados:

- Redução de perdas;

- Diminuição no stress das linhas de transmissão;
- Em geral, são baseados em energias renováveis;
- Excelente alternativa para eletrificação rural ou de áreas isoladas; e
- Alívio na sobrecarga dos alimentadores;

3.1.2 Impacto da penetração de geração distribuída na rede

Muitos são os benefícios obtidos na utilização de geradores distribuídos conectados à rede de distribuição de energia, conforme mostrado na seção anterior. Não obstante, é importante ressaltar que diversas pesquisas têm encontrado impactos provocados por esta expansão no número de instalações.

Balamurugan, Srinivasan e Reindl (2012) analisaram o modelo de teste de 34 barras da IEEE e puderam observar melhorias nos níveis de tensão da rede e na diminuição das perdas. Por outro lado, chamaram atenção para a necessidade de realizar o correto balanceamento de fase nas instalações e, em alguns pontos específicos, observou-se a necessidade de utilizar capacitores ou reguladores de tensão para que esta se mantenha dentro dos limites estabelecidos pelas normas.

Muitas dessas alterações devem-se a uma mudança no fluxo de potência, que passa a ser bidirecional. Bhise, Kankale e Jadhao (2017) apontam que essas mudanças nas características da rede, bem como a alteração dos níveis de corrente, nominal e de curto-círcuito, têm impactado nos dispositivos de proteção, os quais precisarão ter seus ajustes revisados quando em redes com alta penetração de GD.

Dugan, McDermott e Ball (2001) destacam a importância do planejamento em redes com GD a fim de evitar os impactos negativos, considerando os apresentados anteriormente e ainda incluindo problemas com a frequência e, em se tratando de fontes como a solar e a eólica, a intermitência de geração destas.

Já Mendes (2018) utilizou um modelo próprio de gerador fotovoltaico e a rede de 13 barras do IEEE a fim de analisar o impacto da inserção de tais elementos, os quais foram posicionados em nove pontos distintos (individualmente e agrupados, gerando assim 512 cenários), no que

diz respeito ao valor da corrente nominal em regime permanente nos ramos onde havia um dispositivo de proteção presente. As alterações verificadas dessa grandeza indicaram ser imprescindível que os ajustes dos dispositivos de proteção sejam repensados em redes com alta penetração de GD, uma vez que esse novo cenário pode não garantir a sensibilização e, portanto, a correta atuação destes.

Diante da situação apresentada, em 2019 a ANEEL realizou uma consulta pública para discutir a necessidade de adequação na regulamentação da GD no Brasil. Foi apontado por especialistas a não consideração, na análise da Agência, dos benefícios trazidos por essa modalidade de geração, o que resultou em sugestões no sentido de alterar o sistemas de compensação de créditos de forma que a instalação de geradores distribuídos por parte dos consumidores se tornaria muito menos viável.

Além disso, a Associação Brasileira de Energia Solar (ABSOLAR) têm percebido um movimentos das concessionárias de energia no sentido de dificultar o acesso das UCs ao sistema de distribuição, não cumprindo os prazos estabelecidos, exigindo componentes diferentes daqueles previstos nas normas e ainda tornando difícil o entendimento correto dos processos a serem seguidos para solicitar à incorporação da GD à rede. É imprescindível, então, que a academia se envolva na discussão, apresentando estudos que subsidiem decisões técnicas a serem adotadas em qualquer alteração da legislação vigente sobre o tema no Brasil (informação verbal)².

3.2 Teoria de Grafos

Quando Leonhard Euler resolveu o problema das sete pontes de Königsberg (ver seção 1), a Teoria de Grafos começou a traçar seu caminho. O primeiro artigo puramente teórico a abordar o tema, no entanto, data de 1891 e é de autoria do matemático dinamarquês Julius Petersen (1839-1910). Acredita-se que nesse trabalho o nome grafo foi utilizado pela primeira vez (BENJAMIN; CHARTRAND; ZHANG, 2015).

² Informações fornecidas por Rodrigo Lopes Sauaia, Presidente Executivo da Associação Brasileira de Energia Solar (ABENS), durante o VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS) realizado em outubro de 2020 em Fortaleza, Ceará com transmissão pela internet para os inscritos.

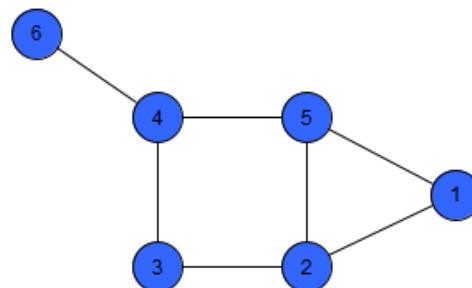
Desde então, esta ferramenta evoluiu e passou a ser utilizada nas mais diversas áreas do conhecimento, inclusive nos SEP, como alternativa para solução de problemas de ordem prática. Aos longos dos anos, as definições foram se estabelecendo e, até hoje, novas métricas têm sido elaboradas por estudiosos para que tal teoria, dada sua multidisciplinaridade, se adapte a aplicações específicas.

3.2.1 Definições

Diversas são as formas de definir um grafo, dentre as quais a apresentada por Benjamin, Chartrand e Zhang (2015), conforme segue.

Um grafo G consiste em um conjunto não vazio e finito V de elementos denominados vértices (ou pontos, nós) e um conjunto E de pares não ordenados de vértices distintos pertencentes a V . Cada elemento $e = \{u,v\}$ é uma aresta (ou linha) de G , e se diz que e conecta u e v . Além disto, quando existe a aresta $e = \{u,v\}$, os vértices u e v são ditos adjacentes. Dados esses conjuntos, um grafo é normalmente indicado por $G = (V,E)$. Um grafo com n vértices e m arestas é denominado grafo (n,m) . Um grafo $(6,7)$ é mostrado na Figura 1.

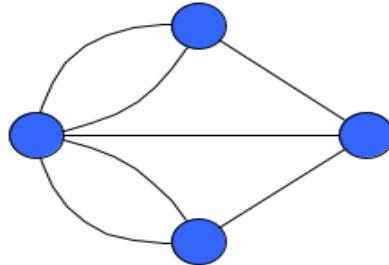
Figura 1 – Exemplo de grafo $(6,7)$



Fonte: Produção do próprio autor.

Vale ressaltar que a definição adotada de grafos não permite *loops* (uma aresta ligando um vértice a ele mesmo). Não admite, ainda, que um par de vértices seja ligado por mais de uma linha (aresta múltipla). Neste caso, tratar-se-ia de um multigrafo. Se laços e arestas múltiplas estiverem presentes, define-se um pseudografo. Com base nessas informações, o grafo da Figura 2, o qual representa a modelagem do problema das sete pontes de Königsberg, é, na verdade, um multigrafo.

Figura 2 – Multigrafo do problema das sete pontes de Königsberg



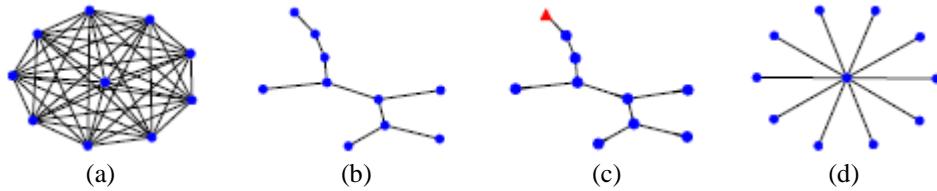
Fonte: Produção do próprio autor.

É imprescindível que se conheçam outros conceitos fundamentais relacionados aos grafos. Ainda em Benjamin, Chartrand e Zhang (2015), algumas dessas características são apresentadas:

- Grau: refere-se ao número de arestas incidentes em um vértice v de um grafo G , e é representado como $\deg_G v$. Um vértice de grau 0 é isolado e um de grau 1 é um vértice terminal. O grau mínimo de um vértice de G é representado por $\delta(G)$ e o grau máximo por $\Delta(G)$;
- Caminho: um caminho P em um grafo G consiste em um subconjunto de G tal que os vértices podem ser listados de alguma forma, como $P = (u = v_0, v_1, \dots, v_k = v)$, com $v_0v_1, \dots, v_{k-1}v_k$ sendo arestas de P . P é, então, chamado um caminho $u - v$ de G ;
- Conexidade: um grafo G é conexo se é possível andar de um vértice qualquer a outro vértice qualquer por meio de arestas de G . Em outras palavras, se G possui pelo menos um caminho $u - v$ para cada par de vértices (u, v) ;
- Ciclo: um caminho C_n de um grafo G que começa e termina no mesmo vértice. Se $n = 3$, por exemplo, o grafo é um triângulo;
- Distância: representada por $d_G(u, v)$, é o menor número de arestas entre um vértice u e outro vértice v de G ;
- Diâmetro: é a maior das distâncias em um grafo; e

Além das características apresentadas, alguns modelos de redes representadas por grafos foram discutidos de maneira abstrata, não havendo, inicialmente, relação com redes reais. Hoje, no entanto, esses modelos são prontamente associados a diversas áreas. Alguns deles são: grafo completo, árvore, árvore enraizada, floresta e estrela, conforme apresentado em Cui, Kumara e Albert (2010, apud BESSANI, 2018). A Figura 3 ilustra alguns desses modelos.

Figura 3 – Exemplos de redes com 10 nós (a) completa, (b) árvore, (c) árvore enraizada e (d) estrela



Fonte: Bessani (2018).

O modelo de árvore, ou seja, uma rede com o menor número de arestas para garantir a conectividade, é especialmente interessante para o presente trabalho, uma vez que os sistemas de distribuição de energia elétrica usualmente possuem tal característica.

Por fim, é relevante comentar a representação matricial de um grafo. Define-se como matriz de adjacências, $A(G) = [a_{ij}]$, de um grafo G com n vértices, como a matriz $n \times n$ na qual $a_{ij} = 1$ se v_i é adjacente a v_j e 0 caso contrário (HARARY, 1969). A matriz de adjacências do grafo mostrado na Figura 2 é:

$$A(G) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Observa-se que a soma dos valores de uma linha resulta no grau do vértice correspondente.

3.2.2 Métricas de centralidade

As métricas de centralidade objetivam medir a importância de cada um dos vértices para o grafo. Devem ser escolhidas e aplicadas de maneira específica para cada situação a fim de obter-se uma classificação dos elementos mais centrais para os menos centrais. A seguir serão apresentadas algumas das métricas de centralidade mais utilizadas na análise de grafos.

- Centralidade de grau (C_v)

O grau de um vértice v , conforme apresentado na seção anterior, por si só já define uma métrica de centralidade, ou seja, $C_v = \deg(v)$.

- Centralidade de *betweenness* (C_b)

A centralidade de intermediação (do inglês *betweenness*), definida por Freeman (1977) indica a frequência com que um vértice v encontra-se no menor caminho entre todos os pares de vértices do grafo. A equação (1) mostra a formulação matemática da métrica.

$$C_b(v) = \sum_{s \neq v \neq t \in V} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}}, \quad (1)$$

onde $\sigma_{st}(v)$ é o número de menores caminhos que passam por v e ligam s a t e σ_{st} são todos os caminhos que conectam s a t . Vértices com valores mais elevados de C_b podem, então, ser mais importantes para a rede como um todo quando comparado àqueles que apresentam valores mais baixos.

- Centralidade de autovetor (C_e)

A centralidade de autovetor mede a importância de um vértice v por meio da avaliação dos vértices ao qual este está conectado (NEWMAN, 2010). Para um grafo G , considera-se $A(G)$ e seus respectivos autovalores e autovetores, λ e x , os quais satisfazem a igualdade $\lambda x = Ax$. A formulação matemática é mostrada da equação (2).

$$C_e(v) = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^j a_{ij} x_j, \quad (2)$$

onde x_j é o j-ésimo elemento do autovetor associado ao maior autovalor.

- Centralidade de *closeness* (C_c)

A centralidade de proximidade (do inglês *closeness*) é definida por meio do inverso da distância média entre um vértice v e todos os outros vértices do grafo (BOCCALETI et al, 2006). A equação (3) indica matematicamente essa medida.

$$C_c(v) = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_{ij}}, \quad (3)$$

onde d_{ij} é o caminho geodésico (menor caminho) entre os vértices v_i e v_j e n é o número de vértices.

É importante ressaltar que as métricas apresentadas acima comumente são modificadas a fim de se adaptarem às aplicações propostas.

3.2.3 Aplicações em Sistemas de Energia

A modelagem de uma rede elétrica com um grafo se dá definindo os elementos (que podem ser cargas, barras do alimentador, transformadores, dispositivos de proteção, etc) como vértices e a conexão entre eles (linhas de distribuição, transmissão) como arestas. Embora possa parecer simples, escolher corretamente o modelo é imprescindível para que o resultado esperado seja alcançado.

Uma característica importantíssima a ser analisada é o peso dos componentes do grafo. É possível utilizar, para tal caracterização, informações elétricas tais como admitância e potência, ou ainda medidas como a distância física entre dois componentes e o número de consumidores conectados a um determinado ponto, por exemplo. A adoção desses pesos altera significativamente a análise do grafo, o que justifica sua elevada relevância, como indica Coelho e outros (2015).

Por esse motivo, Coelho (2019) optou por adotar um modelo sem pesos para avaliar de maneira puramente topológica a vulnerabilidade em *smart grids*. Tal decisão resultou em resultados que dialogaram de maneira mais convincente com a literatura clássica. Rosas-Casals, Valverde e Solé (2007) também utilizaram grafos sem peso nas arestas para analisar a vulnerabilidade em de uma rede de energia europeia sob ataques e/ou erros. Os resultados encontrados foram surpreendentes no que diz respeito a características semelhantes nas diferentes redes consideradas no trabalho, e concordaram com os achados de outros estudos.

A vulnerabilidade é uma característica bastante avaliada nos estudos desenvolvidos ao longo dos anos. Outro exemplo é Bessani (2017), o qual analisou diversas redes de distribuição (de Taiwan, do Brasil e ainda modelos apresentados em artigos de outros autores) com relação não apenas a vulnerabilidade, mas também a resiliência em cenários dinâmicos e de condições ambientais severas. Tal trabalho utilizou grafos sem e com pesos, sendo esse último cenário obtido por meio da modificação das métricas tradicionais.

4 METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO

A fim de alcançar os objetivos traçados, este trabalho utilizará os métodos e seguirá as etapas descritas nas duas seções seguintes.

4.1 Metodologia

No que diz respeito à classificação deste trabalho, conclui-se ser uma pesquisa aplicada quanto à sua natureza, uma vez que se espera a aplicação dos resultados esperados não apenas em outros trabalhos, mas também por parte dos órgãos regulamentadores/concessionárias do setor de energia elétrica no país.

Em se tratando dos objetivos, trata-se de uma pesquisa explicativa, já que “Visa a identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos” (PRODANOV; FREITAS, 2013, p. 53) ao investigar os fatores relacionados aos geradores distribuídos que impactam em grandezas elétricas de uma rede de distribuição. Isso será possível com a análise de tal rede após ser modelada utilizando os conceitos da Teoria de Grafos.

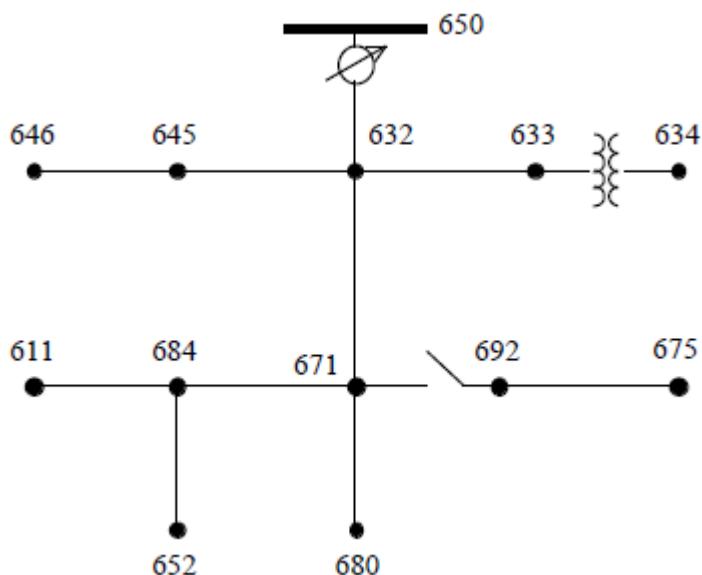
Já quanto aos procedimentos técnicos, o presente trabalho é uma pesquisa experimental e um estudo de caso, adotando um sistema modelo do IEEE de 13 barras (KERSTING, 2001). Por fim, o problema apresentado será analisado sob uma perspectiva quantitativa, por meio das métricas de centralidade de grafos.

4.2 Etapas de Desenvolvimento

Inicialmente, será dada continuidade no estudo dos temas pertinentes à pesquisa, em especial: Teoria de Grafos e geração distribuída. Na sequência, a rede de distribuição adotada na análise será modelada como um grafo. Para tal, será utilizada a linguagem *Python* (ROSSUM, 1995) e a biblioteca de código aberto *networkX* (HAGBERG; SCHULT; SWART, 2008), a qual conta com a implementação de diversas funções de representação e análise de grafos. Neste ponto, serão verificadas as melhores formas de representar os geradores distribuídos no grafo e ainda quais pesos serão utilizados e de que forma serão incorporados ao modelo.

A rede utilizada será a desenvolvida por um grupo de estudos do IEEE. Resultado de vários anos de pesquisa, o Instituto fornece modelos para diversas redes com características diferentes, os quais são mundialmente utilizados em avaliações referentes ao fluxo de potência e a presença de GD. O modelo adotado será o de 13 barras, A13N (KERSTING, 2001), cujo diagrama unifilar é mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Diagrama unifilar do alimentador de 13 nós do IEEE



Fonte: Kersting (2001).

Trata-se de um alimentador de 115 kV com um transformador no nó 650, o qual reduz a tensão para 4,16 kV. É majoritariamente trifásico, mas apresenta trechos mono e bifásicos. A potência total consumida pelas cargas é de 3.466 kW e 2.102 kvar. Mais informações e uma análise completa da rede estão disponíveis em (KERSTING, 2001).

Após a modelagem do alimentador, serão criados os cenários com os geradores distribuídos fotovoltaicos, os quais serão dispostos em cada uma das cargas individualmente e também combinados. A próxima etapa será a avaliação e seleção das métricas de centralidade disponíveis para análise dos grafos e, posteriormente, sua aplicação na análise dos casos.

Ressalta-se que as etapas do trabalho serão devidamente documentadas e registradas para que se possa relatar fielmente o desenvolvimento da pesquisa a ser incluído no relatório final elaborado ao fim da disciplina de Projeto de Graduação II para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

5 CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO

5.1 Lista e Descrição das Atividades Previstas

As atividades a serem desenvolvidas durante a execução do Projeto de Graduação estão listadas e brevemente descritas a seguir:

- a) **Referencial Teórico:** continuação da leitura de artigos, livros e revistas que tratam do tema a ser explorado no Projeto de Graduação para aprimorar a contextualização e atualização no assunto.;
- b) **Estudo:** estudo das ferramentas a serem utilizadas no desenvolvimento do trabalho;
- c) **Modelagem:** definição e implementação do modelo a ser utilizado para representar o sistema em análise;
- d) **Definição das métricas:** escolha das métricas de centralidade que serão aplicadas na análise do grafo;
- e) **Análise:** realização das análises no grafo por meio das métricas selecionadas;
- f) **Resultados:** discussão dos resultados;
- g) **Redação:** elaboração da parte escrita do Projeto de Graduação;
- h) **Apresentação:** elaboração da apresentação do Projeto de Graduação;
- i) **Defesa:** defesa do Projeto de Graduação para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

5.2 Cronograma de Execução

O Projeto de Graduação será realizado em cerca de 3 meses e meio, referentes ao semestre letivo, conforme cronograma de execução mostrado no Quadro 1 com base nas atividades previstas na seção 5.1. A data de início do projeto será 01 de fevereiro de 2021 e a data prevista para encerramento, 15 de maio de 2021.

Quadro 1 – Cronograma de execução das atividades

Meses	Fevereiro 2020				Março 2020				Abril 2020				Maio 2020			
Semanas	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2		
Referencial Teórico																
Estudo																
Modelagem																
Definição das métricas																
Análise																
Resultados																
Redação																
Apresentação																
Defesa																

Fonte: Produção do próprio autor.

6 ALOCAÇÃO DE RECURSOS

O presente trabalho será executado em um computador pessoal de posse do autor, com as seguintes especificações: (i) Sistema Operacional Windows 10, (ii) Processador *Core i7 - 7500* 2,9 Ghz e (iii) memória RAM de 8 GB. A máquina conta com o pacote *Office* devidamente instalado e licenciado para a elaboração da parte escrita e da apresentação final desta pesquisa.

A modelagem e análise das configurações propostas para a rede serão desenvolvidas em linguagem *Python* (ROSSUM, 1995) com auxílio da biblioteca *networkX* (HAGBERG; SCHULT; SWART, 2008), ambos tendo licença de código aberto. O Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE, do inglês *Integrated Development Environment*) para programação utilizado será a *Colaboratory* (GOOGLE, 2020), ferramenta oferecida sem custos pela Google.

A base de dados utilizada (alimentador de 13 nós da IEEE) é fornecida gratuitamente pelo Instituto em seu site.

Os livros, artigos e demais documentos a serem consultados são de posse do autor, serão obtidos por empréstimo de terceiros ou ainda estão disponibilizados digitalmente de maneira livre ou por meio da autenticação com as credenciais de aluno da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERT, R.; JEONG, H.; BARABÁSI, A.-L. Internet: diameter of the World-Wide Web. **Nature**. London, v. 401, p. 130-131, 1999.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Perdas de Energia Elétrica na Distribuição. Brasília, DF: ANEEL, 2019, 21 p. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/documents/654800/18766993/Relat%C3%B3rio+Perdas+De+Energia+_Edi%C3%A7%C3%A3o+1-2019.pdf/b43e024e-5017-1921-0e66-024fa1bed575. Acesso em 21 out 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Unidades Consumidoras com Geração Distribuída: Informações compiladas e mapa. Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZjM4NjM0OWYtN2IwZS00YjViLTllMjItN2E5MzBkN2ZIMzVkiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9>. Acesso em 19 out. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Cadernos Temáticos ANEEL, Micro e Minigeração Distribuída. Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Brasília, DF: ANEEL, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa Nº 687 de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. **Diário Oficial da União:** seção 1, Brasília, DF, ano 152, n. 230, p. 45, 2 dez. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional: Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição. Brasília, DF: ANEEL, 2017.

BALAMURUGAN, K.; SRINIVASAN, D.; REINDL, T. Impact of distributed generation on power distribution systems. **Energy Procedia**, Singapura, v. 25, p. 93–100, 2012. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1876610212011757?token=52FC5466F07431913000EE681666362F90A03833DCD64AD893DEDB8242167C51218CBCF96EA2EB9744FBD344A3CFE741>. Acesso em: 15 nov. 2020.

BARABÁSI, A.-L.; PÓSFAI, M. **Network Science.** Cambridge: Cambridge University, 2016.

BENJAMIN, A; CHARTRAND G.; ZHANG, P. **The Fascinating World of Graph Theory.** 1. ed. New Jersey: Princeton University, 2015.

BESSANI, M. **Resilience and vulnerability of power distribution systems:** approaches for dynamic features and extreme weather scenarios. 2018. Tese (Doutorado em Sistemas Dinâmicos) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18153/tde-11072018-165318/publico/Michel.pdf>. Acesso em:

- BHISE, D. R.; KANKALE, R. S.; JADHAO, S. Impact of distributed generation on protection of power system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIVE MECHANISMS FOR INDUSTRY APPLICATIONS, 2017, Bangalore. **Proceedings [...]**. Bangalore: IEEE, 2017. p. 399–405.
- BOCCALETTI, S.; LATORA, V.; MORENO, Y.; CHAVEZ, M.; HWANG, D.-U. Complex Network: Structure and dynamics. **Physics Reports**, [S. l.], v. 424, n. 4-5, p. 175-308, 2006.
- BOMPARD, E.; NAPOLI, R.; XUE, F. Analysis of structural vulnerabilities in power transmission grids. **International Journal of Critical Infrastructure Protection**, [S. l.], v. 2, n. 1-2, p. 5-12, 2009.
- BRASIL. Lei nº 13.169, de 6 de outubro de 2015. Altera a Lei nº 7.689, de 15 de dezembro de 1988 [...]. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 152, n. 192, p. 1, 7 out. 2015.
- CASTRO, N. J.; DANTAS, G (org.). **Experiências internacionais em geração distribuída: motivações, impactos e ajustes**. Rio de Janeiro: Publit, 2018. Disponível em: http://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/IFES/BV/livro_experiencias_internacionais_em_gd.pdf. Acesso em: 27 out. 2020.
- CIRILO, J. A. Crise hídrica: desafios e superação. **Revista USP**, São Paulo, n. 106, p. 45-58, 2015. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/110102>. Acesso em: 12 nov. 2020.
- COELHO, E. P. R.; THOMAZELLI, J. C.; PAIVA, M. H. M.; SEGATTO, M. E. V. A complex network analysis of the brazilian power test system. In: INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES LATIN AMERICA, 2015, Montevideo. **Proceedings [...]**. Montevideo: IEEE, 2016. p. 113–118.
- COELHO, E. P. R. **Análise de Vulnerabilidade em Smart Grid Utilizando Métricas de Centralidade em Grafos**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.
- CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA FAZENDÁRIA. Convênio ICMS 16 de 22 de abril de 2015. Autoriza a conceder isenção nas operações internas relativas à circulação de energia elétrica [...]. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 56, n. 78, p. 28, 27 abr. 2015.
- CUI, L.; KUMARA, S.; ALBERT, R. Complex networks: Na engineering view. **IEEE Circuits and Systems Magazine**, New Jersey, v. 10, n. 3, p. 10-25, 2010 *apud* BESSANI, M. **Resilience and vulnerability of power distribution systems**: approaches for dynamic features and extreme weather scenarios. 2018. Tese (Doutorado em Sistemas Dinâmicos) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.
- DUGAN, R. C.; McDERMOTT, T. E.; BALL, G. J. Planning for distributed generation. **IEEE Industry Applications Magazine**, New Jersey, v. 7, n. 2, pp. 80-88, 2001.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional – Ano Base 2019: Relatório Síntese. Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topicos-521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019_Final.pdf. Acesso em: 14 out. 2020.

FALOUTSOS, M.; FALOUTSOS, P.; FALOUTSOS, C. On power-law relationships of the internet topology. **ACM SIGCOMM Computer Communication Review**, [S.l.], v. 29, n. 4, pp. 251-262, 1999.

GOOGLE. **Google Colaboratory**. Mountain View, 2020. Disponível em: <https://colab.research.google.com/notebooks/intro.ipynb>. Acesso em: 08 nov. 2020.

GUIMERÀ, R.; AMARAL, L. A. N. Modeling the world-wide airport network. **The European Physical Journal B**, [S. l.], v. 38, p. 381–385, 2004.

HAGBERG, A. A.; SCHULT, D. A.; SWART, P. J. Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX. In: PYTHON IN SCIENCE CONFERENCE, 7., 2008, Pasadena. **Proceedings [...]**. Pasadena: SciPy, 2008. p. 11–15. Disponível em: <http://aric.hagberg.org/papers/hagberg-2008-exploring.pdf>. Acesso em: 29 out. 2020.

HAN, J.; FONTANOS, P.; FUKUSHI, K.; HERATH, S.; HEEREN, N.; NASO, V; CECCHI, C.; EDWARDS, P; TAKEUCHI, K. Innovation for sustainability: toward a sustainable urban future in industrialized cities. **Sustainability Science**, [S. l.], v. 7, p. 91–100, 2012.

HARARY, F. **Graph Theory**. 1. ed. [S. l.]: Addison-Wesley, 1969.

HINES, P.; COTILLA-SANCHES, E.; BLUMSACK, S. Do topological models provide good information about electricity infrastructure vulnerability? **Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science**. Woodbury, v. 20, n. 3, p. 1-11, 2010. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1002.2268.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2020.

HOLMGREN, A. J. Using graph models to analyze the vulnerability of electric power networks. **Risk Analysis**, New Jersey, v. 26, n. 4, p. 955–969, 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Geneva: IPCC, 2014.

JEONG, H.; TOMBOR, B.; ALBERT, R.; OLTVAI, Z.N.; BARABÁSI, A.L. The large-scale organization of metabolic networks. **Nature**, London, v. 407, p. 651–654, 2000.

KERSTING, W. H. Radial distribution test feeders. In: POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, 2001, Columbus. **Proceedings [...]**. Columbus: IEEE, 2002. p. 908–912.

MARTÍN-MARTÍNEZ, F.; SÁNCHEZ-MIRALLES, A.; RIVIER, M.; CALVILLO, C. F. Centralized vs distributed generation. A model to assess the relevance of some thermal and

electric factors. Application to the Spanish case study. **Energy**, [S. l.], v. 134, p. 850–863, 2017.

MENDES, M. A. Análise dos Impactos da Alta Inserção de Geração Distribuída Fotovoltaica na Proteção de Sobrecorrente Temporizada. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. Analytic Research Foundations for the Next-Generation Electric Grid. Washington, DC: The National Academies Press, 2016.

NEWMAN, M. E. J. Networks: an introduction. Oxford: OUP Oxford, 2010.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. O que é o SIN? Brasília, DF: ONS, 2020. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em: 21 out 2020.

PAGANI, G. A.; AIELLO, M. The Power Grid as a complex network: a survey. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**. [S. l.], v. 392, n. 11, p. 2688–2700, 2013.

PEPERMANS, G.; DRIESEN, J.; HAESELDONCKX, D.; BELMANS, R.; D'HAESELEER, W. Distributed generation: definition, benefits and issues. **Energy Policy**. [S. l.], v. 33, n. 6, p. 787–798, 2005.

PRODANOV, C. C., FREITAS, C. E. de. Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

ROSAS-CASALS, M; VALVERDE, S; SOLÉ, R.V. Topological vulnerability of the European power grid under errors and attacks. **International Journal of Bifurcation and Chaos**. Singapore, v. 17, n. 07, p. 2465-2475, 2007.

ROSSUM, G. van. Python tutorial. Amsterdam: Stichting Mathematisch Centrum, 1995.

SALAMONI, I.; RÜTHER, R. O Potencial Brasileiro da Geração Solar Fotovoltaica conectada à Rede Elétrica: Análise de Paridade de Rede. In: ENCONTRO NACIONAL, 9.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5., 2007, Ouro Preto. **Anais[...]**. Ouro Preto: UFOP, 2007. p. 1658–1667. Disponível em: https://www.lepten.ufsc.br/publicacoes/solar/eventos/2007/ENCAC/salamoni_ruther.pdf. Acesso em: 4 nov. 2020.

SUN, K., Complex networks theory: a new method of research in power grid. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXHIBITION: ASIA AND PACIFIC, 2005, Dalian. **Proceedings [...]**. Nova Jersey: IEEE, 2005.

WALLING, R. A. et al. Summary of distributed resources impact on power delivery systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**. New Jersey, v. 23, n. 3, p. 1636–1644, 2008.