

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Impactos Provocados pelos Afundamentos de Tensão em  
Redes Elétricas com Geração Distribuída**

**Letícia Lúcia da Silva Pessoa**

**Letícia Lúcia da Silva Pessoa**

**Impactos Provocados pelos Afundamentos de Tensão em  
Redes Elétricas com Geração Distribuída**

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Processamento de Energia.

Orientador: Milde Maria da Silva Lira, *D. Sc.*

Coorientador: Manoel Afonso de Carvalho Júnior, *Ph.D.*

Recife, Brasil

Agosto de 2016.

# CATALOGAÇÃO

## **PARECER DA BANCA**

*Dedico este trabalho a minha querida vó  
Lúcia, aos meus estimados pais Luiz e Cleide,  
ao meu amado marido Thiago, à minha cara  
irmã Laís, e a todos que acreditaram que a  
conclusão deste trabalho seria possível.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, toda a minha gratidão. Obrigado Senhor, pelo dom precioso da vida, pelo amor infinito, pois sei que jamais conseguirei agradecê-lo o suficiente por tudo a mim concedido.

Agradeço aos meus pais, Luiz e Cleide, e a Laís, minha irmã, pelo amor, dedicação, apoio e incentivo constante em minha vida e, em especial a meus pais, pelo esforço despendido ao longo desse tempo na minha criação e educação. O suporte de vocês foi fundamental para meu crescimento pessoal e intelectual.

Ao meu marido Thiago, pelo carinho, apoio e companhia incondicional, compartilhando todos esses momentos ao meu lado.

Agradecimento especial à professora Milde Maria da Silva Lira pela orientação, incentivo, paciência e dedicação dispensada e pela confiança em sempre acreditar que eu alcançaria meus objetivos.

A meus amigos da UFPE, em especial aos presentes no LDSP, Ândria, Guilherme, Isadora, Jonata, José, Jussara, Regina, Ramón, Rodrigo, Suellen e Valdete pela amizade sincera, apoio, compreensão, estímulo acadêmico, pelas convivências agradáveis e companhias divertidas.

A CAPES, por possibilitar suporte financeiro no desenvolvimento da pesquisa por meio da concessão de bolsa de mestrado.

*Portanto, não se preocupem com o amanhã, pois o amanhã trará as suas próprias preocupações. Basta a cada dia o seu próprio mal.*

***Mateus 6:34***

## RESUMO

A crescente inserção da geração distribuída em sistemas de potência, devido à necessidade de atender ao aumento da demanda por energia elétrica, de maneira confiável e sustentável, direciona esforços para a avaliação dos impactos causados pela conexão destas com o sistema de distribuição. Dentre as diversas vertentes de análise, a influência dessas conexões no âmbito da qualidade da energia elétrica é de vital importância para todos os utilitários ligados a rede de distribuição, sejam consumidores, agentes de geração ou concessionários. Dos fenômenos associados à qualidade da energia elétrica, este trabalho avalia os impactos das conexões de gerações e minigerações distribuídas sob a óptica dos afundamentos de tensão. Os afundamentos foram registrados em simulações computacionais quando da ocorrência de curtos-circuitos em uma rede de distribuição real, sem e com a presença das gerações e minigerações distribuídas, quais sejam: pequenas centrais hidrelétricas, térmicas à biomassa e fontes fotovoltaicas. A partir dos resultados encontrados, estrutura-se a matriz de tensões durante a falta, que permite avaliar a propagação dos afundamentos de tensão, bem como definir as áreas afetadas e de vulnerabilidade, mapeando assim as áreas de risco do sistema, ou seja, as regiões mais sensíveis a esse distúrbio e como as gerações e minigerações distribuídas alteram o modo de propagação da variação de tensão de curta duração. De posse desses resultados é possível definir a robustez e confiabilidade do sistema, quando sujeito às faltas na presença de gerações descentralizadas.

**Palavras-chave:** Geração distribuída. Qualidade da energia elétrica. Afundamentos de tensão. Áreas de risco. Robustez.

## ABSTRACT

The increasing integration of distributed generation in power systems due to necessity to meet the increased demand for electricity, reliable and sustainable way, directs efforts to assess the impacts caused by the connection of these with the distribution system. Among the various forms of analysis, the influence of these connections within the power quality is of vital importance to all utilities connected to the distribution network, as consumers, generation agents or dealers. About the phenomena associated with the power quality, this study evaluates the impacts of connections with generation and small generation distributed from the perspective of voltage sags. The voltage sags were recorded in computer simulations due to the event of short circuits in a real distribution network, with and without the presence of generation and small distributed generation, namely: small hydro, thermal, biomass and photovoltaic sources. From the results found structured voltages array during the fault, designed to measure the propagation of voltage sags and define the affected and vulnerable areas and mapping system risk areas, that is, the most sensitive regions to these disturbances and as the generation and small distributed generation changes the mode of propagation of short duration voltage variation. With these results it is possible to define the robustness and system reliability when subject to faults in the presence of decentralized generation.

**Keywords:** Distributed generation. Power quality. Voltage sags. Risk areas. Robustness.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – .....	
Figura 2 – .....	
Figura 3 – .....	
Figura 4 – .....	
Figura 5 – .....	
Figura 6 – .....	
Figura 7 – .....	
Figura 8 – .....	
Figura 9 – .....	
Figura 10 – .....	
Figura 11 – .....	
Figura 12 – .....	
Figura 13 – .....	
Figura 14 – .....	
Figura 15 – .....	
Figura 16 – .....	
Figura 17 – .....	
Figura 18 – .....	
Figura 19 – .....	
Figura 20 – .....	
Figura 21 – .....	
Figura 22 – .....	
Figura 23 – .....	
Figura 24 – .....	
Figura 25 – .....	
Figura 26 – .....	
Figura 27 – .....	
Figura 28 – .....	
Figura 29 – .....	
Figura 30 – .....	
Figura 31 – .....	
Figura 32 – .....	
Figura 33 – .....	
Figura 34 – .....	
Figura 35 – .....	
Figura 36 – .....	
Figura 37 – .....	
Figura 38 – .....	
Figura 39 – .....	
Figura 41 – .....	

Figura 42 – .....  
Figura 43 – .....

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – .....	.....
Tabela 2 – .....	.....

## LISTA DE ACRÔNIMOS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CGH	Centrais Geradoras Hidrelétricas
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EOL	Centrais Geradoras Eólicas
IEA	
IEEE	
LDSP	Laboratório Digital de Sistemas de Potência
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
SIN	Sistema Interligado Nacional
UFV	Centrais Geradoras Solar Fotovoltaicas
UTE	Usinas Termelétricas



## **LISTA DE SÍMBOLOS**

# SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 .....	18
1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Objetivos do Trabalho .....	23
1.2 Organização Textual.....	24
CAPÍTULO 2 .....	25
2GERAÇÃO DISTRIBUÍDA .....	25
2.1 Considerações Iniciais .....	25
2.2 Definição e Normas Aplicáveis.....	28
2.3.1 Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCHs.....	32
2.3.2 Térmicas à Biomassa.....	33
2.3.3 Energia Solar Fotovoltaica .....	35
2.3.4 Tipos de Conexão da Geração Distribuída.....	36
2.4 Impactos da Inserção da Geração Distribuída.....	37
2.4.1 Benefícios da Aplicação de Geração Distribuída.....	37
2.4.2 Desvantagens da Aplicação de Geração Distribuída .....	39
2.5 Considerações Finais .....	42
CAPÍTULO 3 .....	44
3MODELAGEM DO SISTEMA E O ESTUDO DE CASO.....	44
3.1 Sistema Elétrico Analisado .....	44
3.1.1 Implementação do Sistema Via Software ATP.....	46
3.1.2 Fonte de Tensão e Barra de Referência.....	47
3.1.3 Linhas de Distribuição .....	48
3.1.4 Transformadores .....	51
3.1.5 Regulador de Tensão .....	51
3.2 Representação das Gerações Distribuídas .....	52
3.2.1 PCH.....	52
3.2.2 Térmica à Biomassa .....	54
3.2.3 Solar Fotovoltaica .....	55
3.3 Simulação de Curtos-Circuitos.....	56

3.3.1 Curtos-Circuitos Simulados .....	56
3.3.2 Obtenção dos Afundamentos de Tensão Via <i>Software ATP</i> .....	57
3.3.3 Obtenção dos Afundamentos de Tensão Via <i>Software MATLAB</i> .....	57
3.4 Etapas de Desenvolvimento do Estudo .....	58
3.5 Considerações Finais .....	59
CAPÍTULO 4 .....	60
4 RESULTADOS .....	60
4.1 Caso Base .....	60
4.1.1 Curto-Circuito Monofásico .....	61
4.1.2 Curto-Circuito Bifásico com Terra .....	62
4.1.3 Curto-Circuito Trifásico com Terra .....	63
4.2 Caso Base com Geração Distribuída - PCH .....	64
4.2.1 Geração Distribuída PCH – 9,45MW .....	64
4.2.2 Minigeração Distribuída PCH – 2,25 MW .....	67
4.3 Caso Base com Geração Térmica- UTE .....	70
4.3.1 Geração Distribuída Térmica– 22MW .....	70
4.3.2 Minigeração Distribuída UTE – 3 MW .....	73
4.4 Caso Base com Geração Solar Fotovoltaica- SOL .....	76
4.4.1 Geração Distribuída Solar– 6MW .....	76
4.4.2 Minigeração Distribuída SOLAR – 1 MW .....	79
4.5 Comparações Realizadas .....	82
4.5.1 Quanto a Geração Distribuída .....	82
4.5.2 Quanto a Minigeração Distribuída .....	84
4.6 Considerações Finais .....	86
CAPÍTULO 5 .....	87
5 ROBUSTEZ E CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO .....	87
5.1 Robustez do Sistema de Distribuição .....	87
5.1.1 A Influência da Potência de Curto-Circuito .....	87
5.1.2 Índice da Robustez .....	87
5.2 Confiabilidade do Sistema de Distribuição .....	88

5.2.1 Índices de Confiabilidade .....	89
5.3 Considerações Finais .....	90
CAPÍTULO 6 .....	91
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	91
6.1 Conclusões.....	91
6.2 Trabalhos futuros.....	92
REFERÊNCIAS .....	93

# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUÇÃO

---

O desenvolvimento tecnológico aliado à evolução econômica mundial impulsiona o setor energético na produção de energia das mais diversas fontes, quais sejam: o petróleo, o gás natural, o carvão, o urânio, a energia solar e dos ventos, o bagaço de cana e outras.

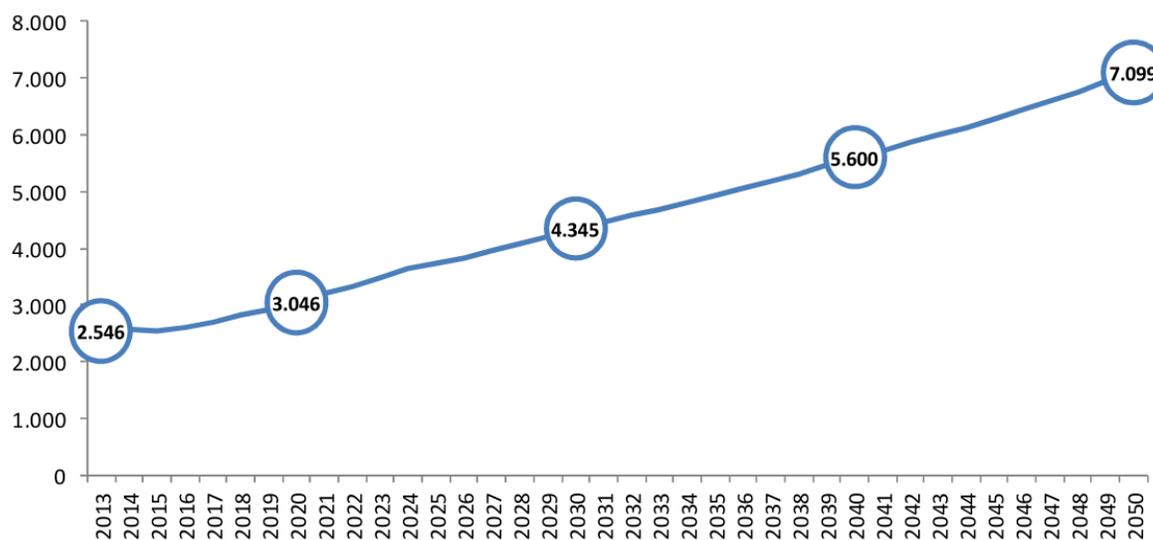
Essa necessidade por energia advém da forte modernização das indústrias, do agronegócio, da construção civil, dos transportes e do aumento do consumo pela população, pois o insumo indispensável para o funcionamento de todos esses setores é a Energia Elétrica proveniente das fontes mencionadas.

Este cenário favorece o aumento da demanda e consumo de energia elétrica, desta maneira estudos da Demanda de Energia realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) apresentam uma visão de longo prazo para a demanda brasileira de energia, com projeção para 2050, além de contribuir para o planejamento energético nacional (MME, 2016).

No Estudo da Demanda de Energia, no horizonte de longo prazo, está indicada a evolução estimada do consumo per capita de eletricidade, em kWh/habitante no Brasil, conforme Figura 1.

O crescimento continuado do consumo de energia elétrica justifica-se por fatores relevantes como o aumento do número de consumidores, assim como o aumento no nível de renda per capita da população.

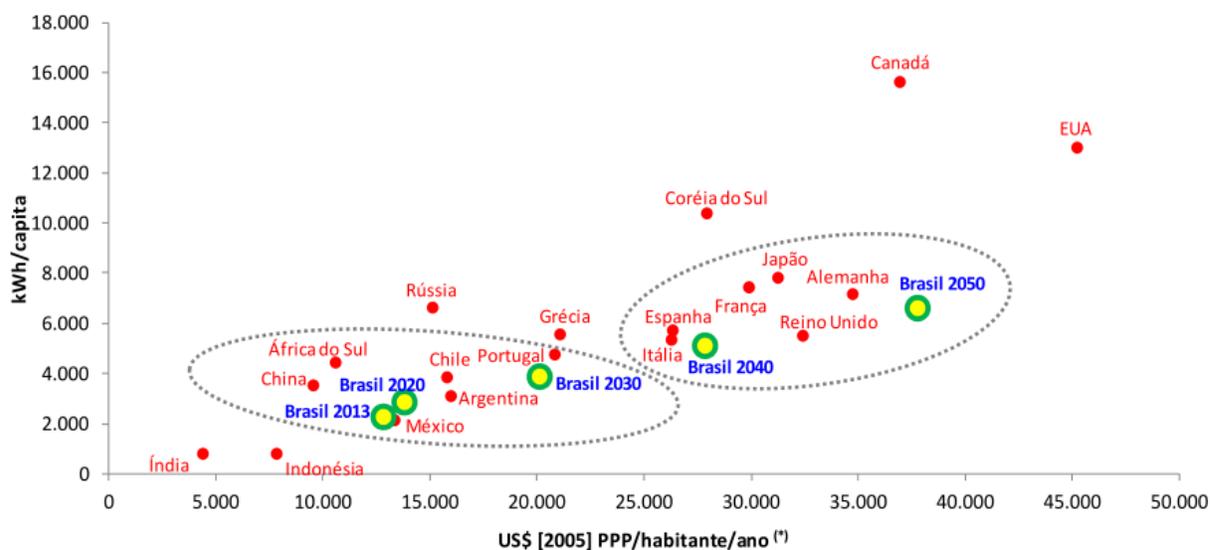
Figura 1 – Evolução do Consumo per Capita de Eletricidade, no horizonte até 2050.



Fonte: MME, 2016.

A título de comparação, a Figura 2, ilustra uma estimativa da trajetória brasileira no longo prazo do consumo per capita de eletricidade, em comparação com os níveis de consumo de outros países em 2013.

Figura 2 – Consumo per Capita de Eletricidade, comparação internacional.



Fonte: MME, 2016.

De acordo com a Figura 2, o Brasil hoje está posicionado nos mesmos patamares que o México e Argentina. Enquanto na projeção do consumo de eletricidade para 2050, o Brasil evolui no sentido de um maior consumo elétrico per capita, se mantendo no mesmo patamar que a Alemanha em 2013.

No que tange ao planejamento energético, para suprir o aumento da demanda de energia elétrica, uma solução está na expansão da oferta descentralizada de energia, ou seja, uma produção de energia perto do ponto de consumo, com atendimento prioritário à demanda e com escalas relativamente reduzidas, o que caracteriza a definição e uso de uma Geração Distribuída (GD) (MME, 2007; MME, 2016).

De maneira complementar, a geração distribuída é definida pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), como uma central de geração suficientemente menor do que usinas geradoras centrais de forma a permitir a interligação em redes de distribuição e próxima ao consumidor, conforme exposto em (IEEE apud DONDI et al., 2002).

Outros estímulos e benefícios que justificam a utilização da GD em sistemas elétricos foram identificados pela International Energy Agency (IEA) em cinco principais fatores (IEA, 2002):

O desenvolvimento das tecnologias de geração distribuída associado à diversificação da matriz energética;

- As restrições sobre a construção de novas linhas de transmissão;
- O aumento da demanda dos clientes por energia elétrica altamente confiável;
- A liberalização do mercado de eletricidade;
- As preocupações sobre a mudança climática e a sustentabilidade ambiental.

Apesar dos atrativos que fomentam grandes esforços mundiais, os estudos e a aplicação de diferentes tecnologias à geração distribuída se encontram em fase de desenvolvimento.

Neste contexto, embora haja um constante interesse em novas fontes alternativas de energia elétrica, tendo em vista a crescente preocupação com a confiabilidade do sistema e com a sustentabilidade ambiental, para que os geradores distribuídos possam de fato beneficiar a operação das redes elétricas, seus impactos técnicos devem ser cuidadosamente estudados, sobretudo em sistemas de distribuição.

A integração e interconexão de uma geração distribuída podem provocar, portanto, efeitos nas redes de distribuição, que destoam de uma abordagem de operação tradicional, e podem ser classificados em três aspectos: técnico, comercial e regulatório (LOPES et al., 2007).

Com a penetração da geração distribuída, as questões técnicas e operacionais confrontam os usuários da rede com os problemas de regulação de tensão, qualidade de energia, proteção e estabilidade (LOPES et al., 2007; DONDI et al., 2002; SANTOS et al., 2013).

Enquanto os aspectos comerciais e regulatórios possuem obstáculos que devem ser contornados para incentivar a conexão de geração distribuída, através de regras definidas sobre as responsabilidades do agente no acesso, regulação das tarifas vigentes, regulamentação para os requisitos ambientais de conexão e de políticas adequadas que apoiem a integração da GD (LOPES et al., 2007; ROMAGNOLI, 2005).

Dos impactos técnicos causados pela influência das gerações distribuídas, o escopo deste trabalho avaliará as dificuldades com a Qualidade da Energia Elétrica (QEE), que segundo (DUGAN, 2003) pode ser definida como qualquer problema no sistema elétrico expresso em desvios da tensão, corrente ou frequência que resultem em falha ou má operação de equipamentos dos consumidores.

A relação entre a geração distribuída e qualidade da energia é ambígua. Por um lado, muitos autores enfatizam os efeitos curativos da geração distribuída para os problemas de qualidade da energia (PEPERMANS et al., 2005). Por exemplo, em áreas onde o suporte da tensão é difícil, a geração distribuída pode contribuir para um aumento da tensão na rede (BAYOD-RÚJULA, 2009).

Por outro lado, a introdução em larga escala de unidades de geração de energia descentralizada pode levar à instabilidade do perfil da tensão: devido a GD permitir a inversão do fluxo de potência ativa e gestão do fluxo de potência reativa, podendo fornecer ou absorver reativo do sistema (BAYOD-RÚJULA, 2009).

Além disso, o fluxo de potência bidirecional dificulta os ajustes do sistema de proteção da rede, pois curtos-circuitos e sobrecargas são supridos por várias fontes, onde cada uma independentemente pode não detectar as anomalias ocorridas. (PEPERMANS et al., 2005; MARTINEZ-VELASCO et al., 2007).

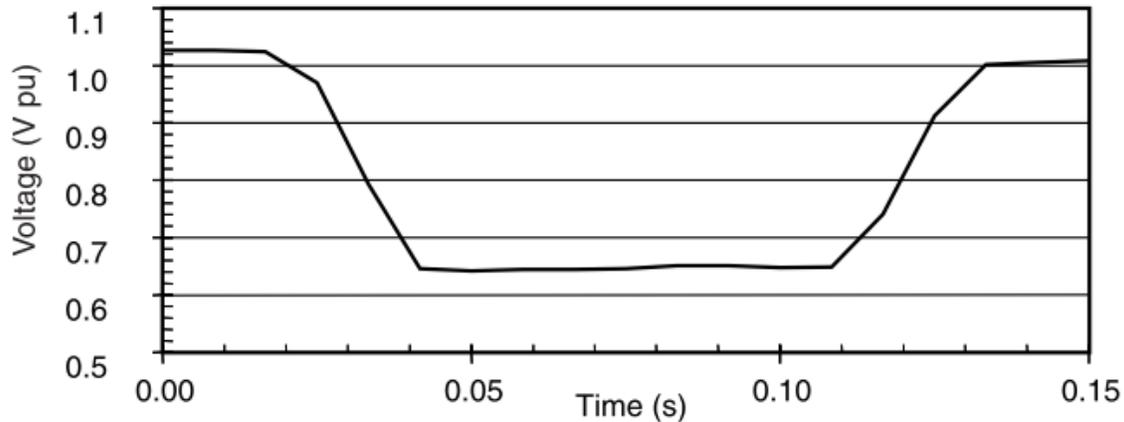
Eventualmente uma situação de "ilhamento", operação ilhada da GD, ocorre quando a rede local mantém uma parte da rede desconectada, enquanto o gerador está energizado levando à situação de perigo as equipes que estejam realizando reparação nas proximidades (PEPERMANS et al., 2005; LOPES et al., 2007).

Entre os principais distúrbios de QEE afetados pela geração distribuída, como interrupções sustentadas, regulação de tensão, harmônicos e afundamentos de tensão, como descrito em (DUGAN et al, 2003), destaca-se o comportamento dos afundamentos de tensão na presença de geração e minigeração distribuída.

Os afundamentos de tensão podem ser definidos como uma redução no valor eficaz da tensão, igual ou superior a 0,1 p.u., e inferior a 0,9 p.u., com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto, na frequência fundamental do sistema (DUGAN, 2003; GOSWAMI et al., 2008).

De acordo com (BOLLEN, 2002) os afundamentos de tensão são caracterizados como reduções de curta duração da tensão rms, causado por curtos-circuitos, sobrecargas ou pela partida de grandes motores. A Figura 3 ilustra o comportamento de um afundamento de tensão típico associado a uma falta fase-terra em um alimentador.

Figura 3 – Forma de onda do evento de afundamento de tensão.



Fonte: DUGAN, 2003.

O interesse em afundamentos de tensão é apontado como um dos principais fatores, que justificam análise da QEE devido aos problemas que eles causam no sistema, visto que são capazes de sensibilizar dispositivos de proteção, ocasionar paradas nos processos

produtivos e danos em equipamentos, provocando grandes prejuízos financeiros a clientes conectados ao sistema de fornecimento de energia (KEMPNER et al, 2013).

Em vista disso, os estudos dos impactos e da severidade dos afundamentos de tensão mediante presença de geração distribuída são de fundamental importância para o estabelecimento da análise da propagação dos afundamentos e verificação de sensibilidade de cada barra conectada ao sistema, demarcando assim as áreas de risco do sistema onde os afundamentos serão mais críticos e evidentes. Além de contribuir para verificação da robustez e da confiabilidade nos pontos de suprimento de energia.

A apreciação desse trabalho aborda a avaliação dos impactos dos afundamentos de tensão, mediante curtos-circuitos monofásicos, bifásicos com terra e trifásicos aplicados em todas as barras de um sistema de distribuição, diante das seguintes gerações distribuídas: pequenas centrais hidrelétricas, térmicas à biomassa e fontes fotovoltaicas.

Cada uma das gerações distribuídas citadas é inserida na rede de conexão de acordo com sua capacidade instalada, ou seja, apresentam duas formas de representação, uma como geração distribuída e outra como minigeração distribuída, conforme classificação definida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em (ANEEL, 2012).

Dessa maneira, outra análise realizada nesse trabalho será examinar as diferenças no comportamento da propagação dos afundamentos de tensão, com a aplicação de minigeração e geração distribuídas, conforme localização, tipo e tamanho da geração distribuída.

## **1.1 Objetivos do Trabalho**

Os objetivos dessa pesquisa de mestrado estão listados abaixo:

- Avaliar a severidade dos impactos dos afundamentos de tensão através da propagação destes, demarcando assim as áreas de risco do sistema, e determinando as posições mais sensibilizadas pelo afundamento.
- Comparar os níveis dos impactos dos afundamentos causados pela geração distribuída e pela minigeração distribuída, traçando análises por tipo de geração estudada e por tipo de curto-circuito aplicado.

- Estabelecer os índices que definem a robustez e confiabilidade do sistema estudado, após a conexão da geração distribuída e da minigeração distribuída, tomando como critério de avaliação a severidade dos impactos dos afundamentos de tensão.

## 1.2 Organização Textual

Além do capítulo introdutório, este trabalho é desenvolvido em cinco capítulos adicionais:

- Capítulo 2 – Revisão bibliográfica dos impactos em redes de distribuição com a inserção de vários tipos de geração distribuída, sob o ponto de vista dos afundamentos de tensão.
- Capítulo 3 - Apresenta a modelagem de cada componente do sistema de distribuição em análise, inclusive a modelagem de cada geração distribuída utilizada, bem como as considerações aplicadas no problema e a base de dados adotada.
- Capítulo 4 - Expõe os resultados das simulações computacionais e da propagação dos afundamentos de tensão, com delimitação das áreas de risco do sistema em análise. Comparação dos efeitos dos afundamentos de tensão de acordo com cada curto-circuito aplicado e geração distribuída analisada.
- Capítulo 5 - Define os índices de robustez e confiabilidade do sistema de distribuição, através da severidade dos impactos dos afundamentos de tensão.
- Capítulo 6 - Apresenta as conclusões da pesquisa de mestrado e sugestões para trabalhos futuros.

# CAPÍTULO 2

## **2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

---

Neste Capítulo é realizada uma análise acerca da utilização da geração distribuída em redes de distribuição.

Detalha-se ao longo do capítulo, uma visão histórica sobre a aplicação das gerações distribuídas, definindo suas características e normatização correlata, explicitando de forma lacônica as peculiaridades de suas tecnologias analisadas neste escopo, bem como identificando os benefícios e impactos na conexão com sistemas de potência.

### **2.1 Considerações Iniciais**

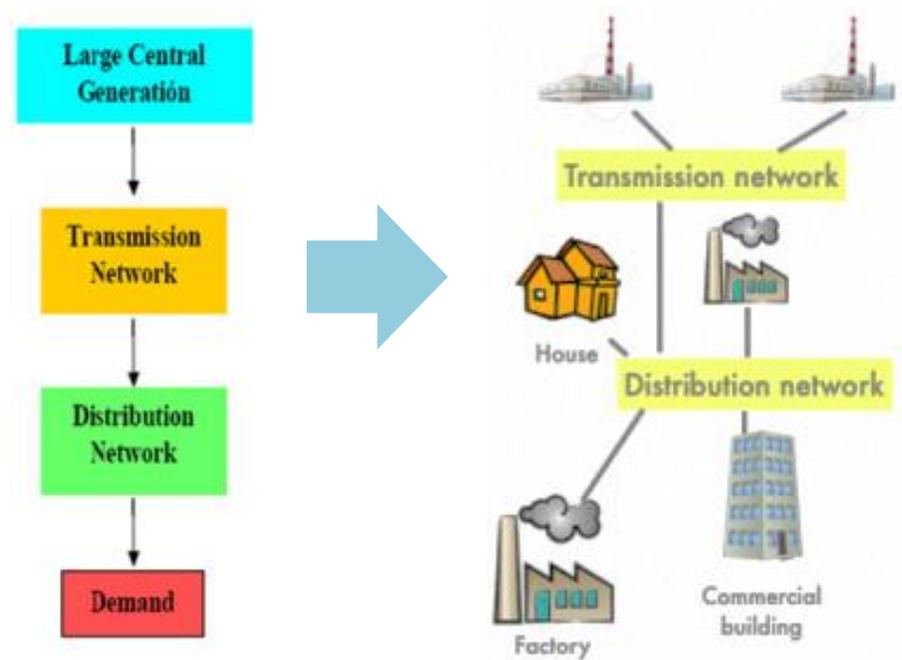
Os primeiros sistemas elétricos de potência entraram em funcionamento, por volta dos anos de 1880, com geração e transmissão em corrente contínua, para atender cargas destinadas essencialmente à iluminação pública local. Na configuração dos sistemas, havia limitações do uso de corrente contínua nos transportes de energia, apresentando problemas como o aumento das perdas por efeito Joule, que provoca aquecimento nos condutores.

Dessa maneira, à medida que se afastava das usinas, transportando energia a distâncias maiores, era obrigatório à construção de novas usinas, ou seja, unidades geradoras eram instaladas próximas aos centros de carga. Sob esse aspecto, pode-se concluir que os primeiros sistemas de energia elétrica eram constituídos por gerações distribuídas.

No entanto, com o avanço das tecnologias e necessidade da transmissão de energia a maiores distâncias, os sistemas de energia foram substituídos por grandes usinas e uma ampla rede de linhas de transmissão, tornando a estrutura energética centralizada, com topologia radial, sem presença de fontes de energia em seus centros de carga e fluxo de potência

unidirecional (RAMOS, 2009). Na Figura 4, segue a representação de um sistema centralizado.

Figura 4 – Sistemas Centralizados de Energia

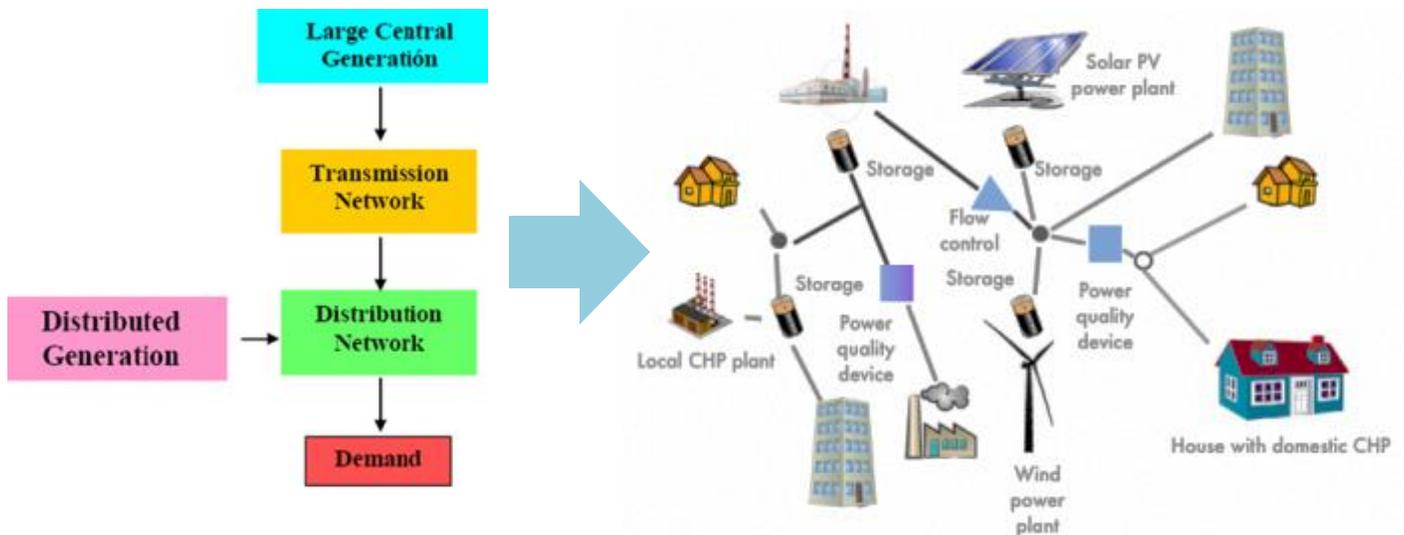


Fonte: adaptado de Bayod-Rújula (2009)

Em contrapartida, devido a fatores diversos, tais como: rápida expansão da demanda, tempo exigido para construção ou ampliação dos sistemas já existentes, questões ambientais com uso de energia limpa e menores impactos causados por grandes construções e sobrecarga das linhas de transmissão, favorecem o aproveitamento da geração de pequeno porte.

Por conseguinte, a estrutura energética descentralizada de uma geração distribuída vem novamente tomando espaço nos sistemas elétricos mundiais, apresentando vários benefícios nos âmbitos de confiabilidade, sustentabilidade ambiental e qualidade da energia. Na Figura 5, segue a representação de um sistema distribuído de energia.

Figura 5 – Sistemas Distribuídos de Energia



Fonte: adaptado de Bayod-Rújula (2009)

No Brasil, a operação desse sistema distribuído de energia só teve início na década de 90, a partir da reestruturação do setor elétrico, que proporcionou um aumento do interesse de empresas privadas em investir na produção de energia elétrica, a partir de incentivos governamentais. Por exemplo, a ANEEL, através da Resolução N° 77/2004, que estabelece que os empreendimentos com potência instalada inferior a 30 MW podem requerer descontos que chegam a até 50% nas tarifas de uso dos sistemas de distribuição e transmissão (ANEEL, 2004; LUIZ, 2012).

Assim a reestruturação do setor elétrico, possibilitou a alteração do paradigma da estrutura do sistema elétrico ser baseada unicamente na centralização da geração, trazendo novos desafios e tornando economicamente interessante a operação de geradores em paralelo com os sistemas de distribuição. Essa nova alternativa de topologia a cada dia se consolida como uma tendência.

## 2.2 Definição e Normas Aplicáveis

O conceito de GD não está completamente definido, pois vários autores, agências e órgãos reguladores interpretam-na de maneiras distintas.

Diferentemente dos conceitos da EPE e do IEEE, já expostos no Capítulo 1, seguem mais algumas definições:

De acordo com ANEEL (2016a), em seu glossário, a geração distribuída é definida como centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas - ou não - pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Terminologia usada para um conjunto de tecnologias de geração elétrica eficiente e de porte reduzido, de equipamentos de controle e de armazenamento de eletricidade que aproximam a geração elétrica do consumidor (ANEEL, 2016a).

Segundo a IEA (2002), a GD é uma planta de geração servindo a um consumidor no local ou fornecendo suporte para uma rede de distribuição, conectada na rede no nível de tensão de distribuição.

Por sua vez o CIGRÈ, interpreta a GD como unidades de geração com capacidade máxima de 100 MW, que geralmente são conectadas à rede de distribuição e que não têm seu despacho centralizado (CIGRÈ apud ACKERMANN et al., 2001).

Todas essas definições, como outras encontradas na literatura, convergem em algumas características específicas, como:

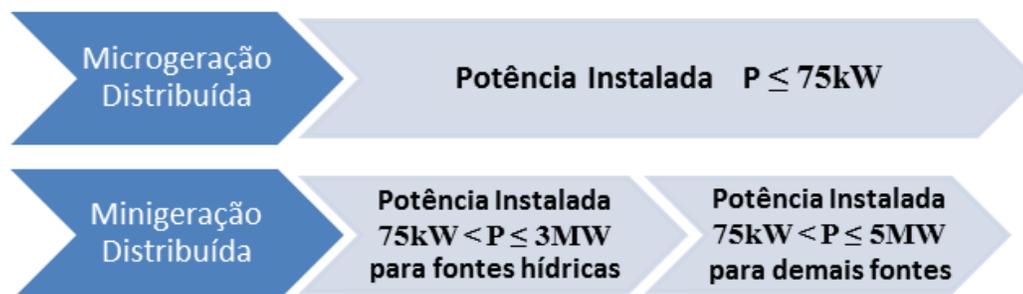
- Geração de energia elétrica próxima aos centros de cargas;
- Capacidade de geração de energia de pequeno porte;
- Despacho não centralizado.

Diante das diferentes abordagens sobre o significado da geração distribuída, adota-se nesse trabalho a seguinte definição pra GD: Central geradora de energia elétrica interligada em redes de distribuição, próxima ao ponto de consumo.

Na literatura, também é bastante comum, haver distintos tratamentos para classificação da geração distribuída quanto sua capacidade instalada. Desse modo, a categorização adotada

no texto é a indicada pela ANEEL, através da Resolução Normativa N°482/2012, que teve essa subclassificação alterada recentemente pela Resolução Normativa N°687/2015, como explicitado na Figura 6 (ANEEL, 2012; ANEEL, 2015a).

Figura 6 – Classificação Atual da Geração Distribuída



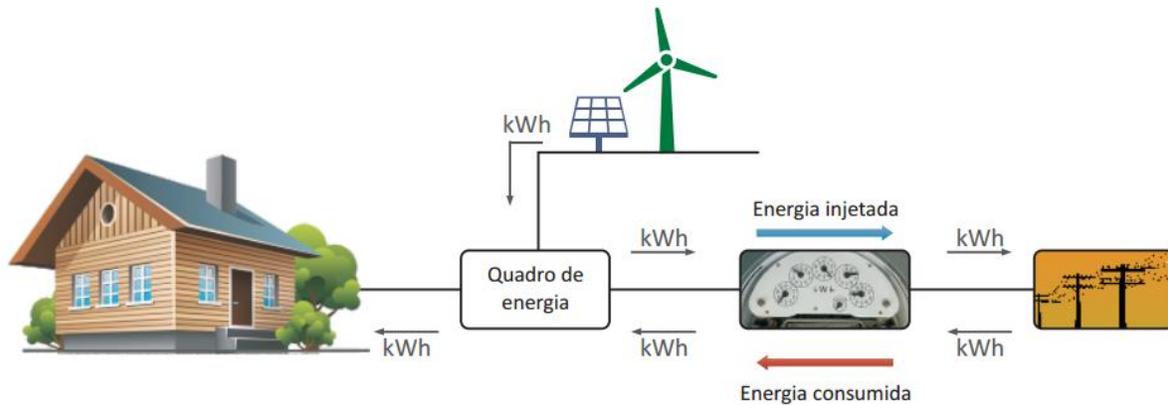
Fonte: próprio autor.

Para gerações distribuídas com potência instalada acima de 3MW para fontes hídricas e maiores que 5MW para demais fontes de energia, é adotado a terminologia de geração distribuída, apenas.

A Resolução N°482/2012 dispõe, ainda, das condições gerais para acesso de geração de energia nas unidades consumidoras, destinadas a reduzir barreiras para instalação de GD de pequeno porte.

A nova resolução cria o Sistema de Compensação de Energia, que permite ao consumidor instalar pequenos geradores em sua unidade consumidora e trocar energia com a distribuidora local, sendo válida para geradores que utilizem fontes incentivadas de energia como hídrica, solar, biomassa, eólica e cogeração (ANEEL, 2016b). A Figura 7 indica como funciona o fluxo de energia elétrica no sistema de compensação.

Figura 7 – Sistemas de Compensação de Energia Elétrica

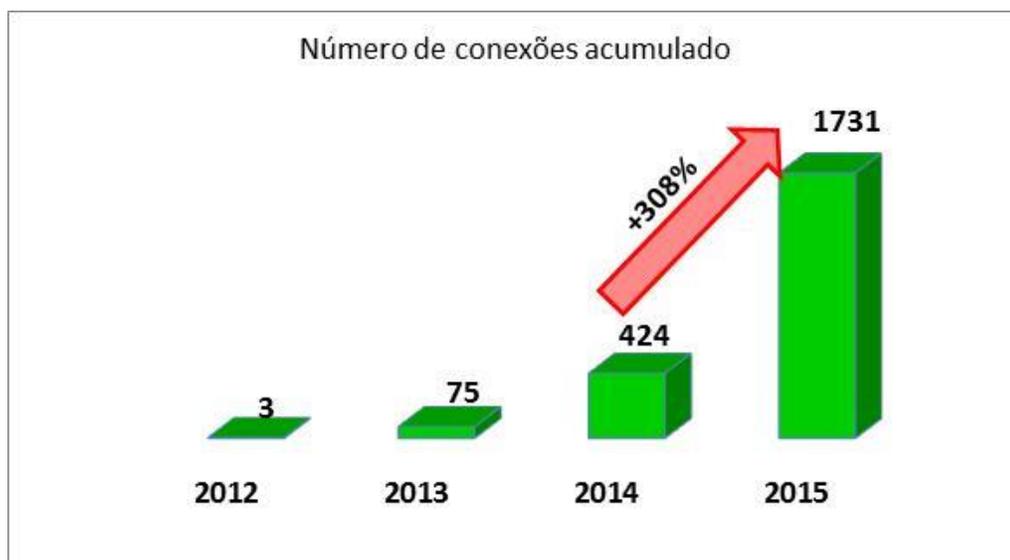


Fonte: ANEEL, 2016b.

Pelo sistema da Figura 7, a unidade geradora instalada em uma residência, por exemplo, produzirá energia e o que não for consumido será injetado no sistema da distribuidora, que utilizará o crédito para abater o consumo dos meses subsequentes.

O sistema de compensação de energia proporcionou o crescimento significativo nas conexões de geração distribuída, como comprovado por dados publicados pela ANEEL em 2016, apresentando o número de conexões acumuladas nos anos de 2012 a 2015 aos sistemas de distribuição, conforme Figura 8 (ANEEL, 2016c).

Figura 8 – Número de Conexões das Gerações Distribuídas



Fonte: ANEEL, 2016c

Em 2012 eram apenas três conexões no território nacional e em 2015, 1.731 consumidores produzem energia em suas instalações, um aumento expressivo em um curto espaço de tempo, justificado pelas permissões e facilidades previstas nas resoluções mencionadas.

Existem, ainda, instrumentos normativos internacionais e nacionais que visam regular a conexão da GD à rede de distribuição. Podem-se citar, como exemplos, respectivamente as normas IEEE Std 1547-2003 “IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System, e os Procedimentos de Distribuição (PRODIST) apresentados pelo Módulo 3, de Acesso ao Sistema de Distribuição (IEEE, 2003; ANEEL 2016d). Regras para conexões de gerações distribuídas também são definidas por cada concessionária, responsável pela rede de distribuição, a qual se deseja ligação.

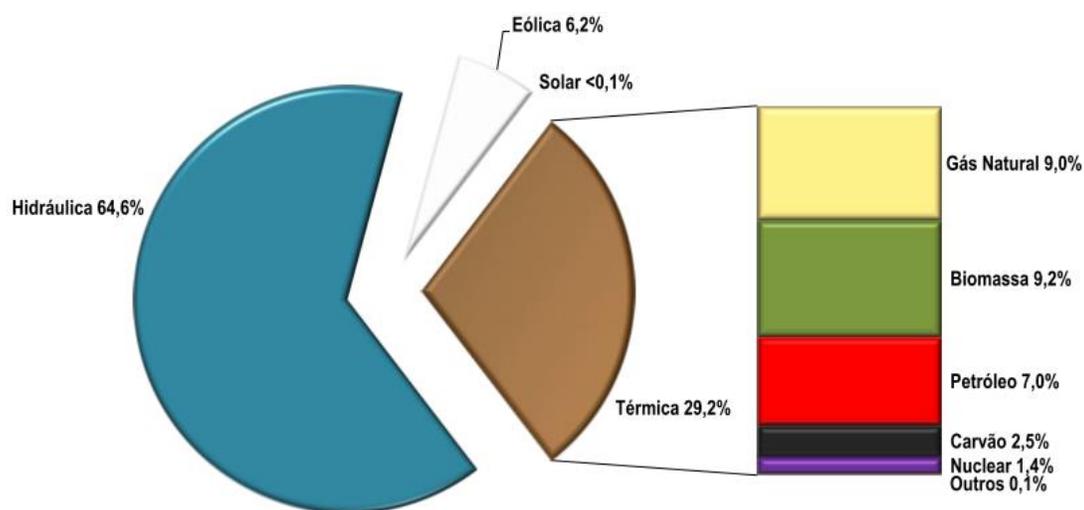
Apesar dos avanços significativos alcançados em relação à inserção da GD em redes de distribuição, as normas e diretrizes encontram-se em fase de construção, pois os efeitos da interação entre a GD e a rede de distribuição não foram completamente estudados e compreendidos, principalmente para um grande número de GD conectada no sistema.

### **2.3 Tecnologias de Geração Distribuída**

Com o consumo crescente de energia elétrica e o impacto ambiental e social causados pelas fontes de energia tradicionais, a implantação de GD tornou-se muito atrativa, em virtude da possibilidade de utilização de fontes limpas e renováveis ocasionando menores consequências ambientais.

Nesse sentido, a matriz energética brasileira vem diversificando a participação de fontes renováveis na produção de energia elétrica, conforme indicado na Figura 9, que apresenta a participação atual de todas as fontes de energia que compõem a capacidade instalada de geração do país (MME, 2016b; ANEEL, 2016e).

Figura 9 – Matriz de Capacidade Instalada de Geração de Energia Elétrica



Fonte: MME, 2016b.

As principais tecnologias de GD utilizando fontes renováveis são as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), térmicas alimentadas por biomassa, geradores eólicos e painéis fotovoltaicos.

O aproveitamento dessas fontes é um importante instrumento para a diversificação da matriz energética do país. Elas proporcionam a apropriação dos benefícios técnicos, ambientais e socioeconômicos na definição da competitividade econômico-energética de projetos de geração de fontes alternativas, garantindo maior confiabilidade e segurança ao abastecimento.

A seguir será caracterizada de maneira sintetizada, cada fonte de energia estudada no escopo desse trabalho, que compreende as PCHs, térmicas à biomassa e a geração fotovoltaica.

### 2.3.1 Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCHs

As pequenas centrais hidrelétricas são hidrelétricas de pequeno porte, que possui uma classificação definida de acordo com sua potência instalada e o tamanho do seu reservatório (EPE, 2016). A ANEEL conceitua as PCHs, como: empreendimentos destinados a

autoprodução ou produção independente de energia elétrica, cuja potência seja superior a 3.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW, com área de reservatório de até 13 km<sup>2</sup> (ANEEL, 2015b).

De acordo com o Banco de Informações da Geração (BIG) da ANEEL, em agosto de 2016, existem em operação 449 PCHs, que corresponde a 4859 MW de potência instalada, representando 3,29% da potência total em operação no país (ANEEL, 2016e).

A participação dessa fonte de energia na matriz energética nacional é incentivada pelos órgãos governamentais, por suas características de possibilitar um melhor atendimento da demanda a pequenos centros de carga, em áreas periféricas ao sistema de transmissão.

Por isso, incentivos como, a isenção de pagamento da taxa de compensação financeira aos estados e municípios e redução da Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão e Distribuição (TUST e TUSD) foram estabelecidos com o intuito de aumentar a expansão da oferta dessa energia.

Outros pontos relevantes sobre PCHs são apresentados por (PINTO, 2014; SILVA, 2014):

- O custo da geração de uma PCH é menor que o de uma Usina Hidrelétrica (UHE), bem como os impactos ambientais, visto que praticamente não há área alagada;
- As PCHs ainda apresentam tempo de instalação elevado, o qual pode chegar a três anos. Soma-se a esse, o tempo de construção, em torno de dois anos;
- As PCHs não são despachadas pelo ONS.

Em função das PCHs serem empreendimentos rentáveis e atrativos, o mercado mostra-se promissor. Há a possibilidade de aumentar em mais de nove vezes o atual potencial de geração de PCHs, o que agregaria ao parque gerador brasileiro em torno de mil novas plantas (LUIZ, 2012).

### **2.3.2 Térmicas à Biomassa**

As termelétricas a biomassa são mais uma alternativa para a diversificação da matriz energética nacional, a qual utiliza como combustível matéria orgânica.

O termo biomassa abrange várias matérias primas, a saber: bagaço da cana de açúcar, lenha, carvão vegetal, resíduos urbanos, biogás, lixívia, óleos vegetais, resíduos vegetais (casca de arroz, por exemplo) e outras culturas plantadas (EPE, 2016).

Dentre as matérias primas citadas, há algumas que estão vinculadas a processos industriais, com no caso do bagaço de cana-de-açúcar que já vem sendo tradicionalmente utilizado nas usinas de açúcar e etanol para obtenção de energia elétrica e calor, em um processo de cogeração de energia.

O uso da biomassa para geração de energia elétrica apresenta vantagens para o sistema elétrico, tanto em termos técnico-operacionais quanto em termos socioambientais.

Em termos técnico-operacionais é importante destacar o fato de que, as usinas termelétricas a biomassa são facilmente despacháveis, além de serem implantadas próximas ao centro de carga, evitando a construção de extensas linhas de transmissão.

Quanto aos aspectos socioambientais, uma das vantagens do uso da biomassa é o fato de ser uma energia renovável e que contribui para a mitigação das mudanças climáticas.

Apesar da queima da biomassa gerar emissões de CO<sub>2</sub>, entende-se que o carbono emitido é o mesmo que foi absorvido pela planta no processo de fotossíntese e, assim, o balanço é nulo (EPE, 2016; SILVA, 2014).

Os principais entraves ao uso da biomassa na geração de energia são a baixa eficiência termodinâmica das plantas e os custos relativamente altos de produção e transporte. Esses entraves tendem a ser contornados, a médio e longo prazo, pelo desenvolvimento, aplicação e aprimoramento de novas e eficientes tecnologias de conversão energética da biomassa ou através dos processos de cogeração (BOLLEN, 2011; LUIZ, 2012).

O instrumento normativo que estabelece os requisitos necessários à outorga de autorização para exploração de Usinas Termelétricas encontra-se na Resolução Normativa N°390/2009 da ANEEL.

Atualmente, observa-se a participação da biomassa em 9,2% dos empreendimentos de geração termelétrica em operação no país, conforme ilustrado na Figura 9, anteriormente mencionada. Em médio e longo prazo, a exaustão de fontes não renováveis e pressões ambientalistas poderão acarretar maior aproveitamento energético da biomassa.

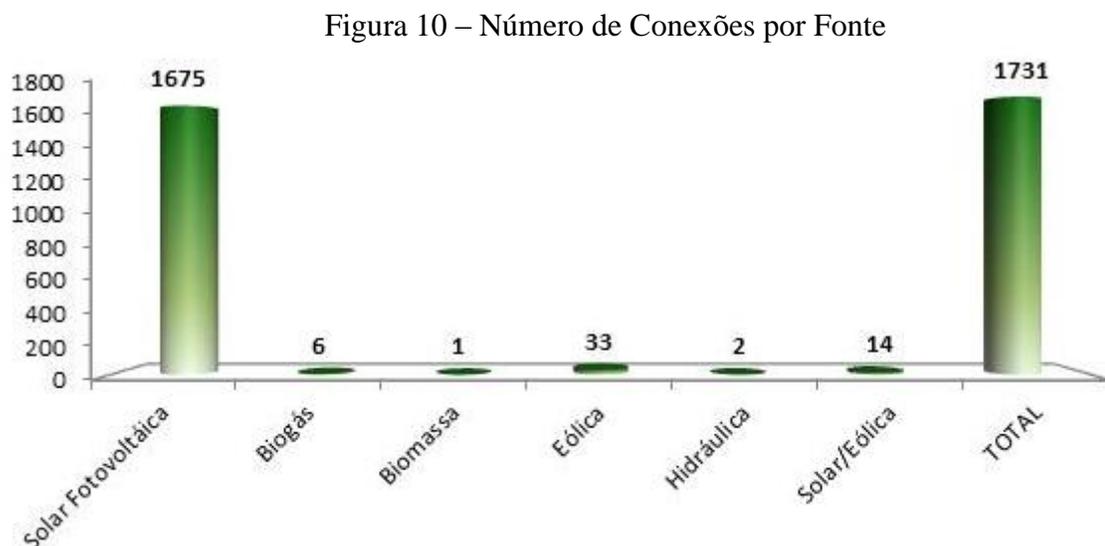
### 2.3.3 Energia Solar Fotovoltaica

A geração solar ocorre através da conversão da energia luminosa do sol em energia elétrica a partir de células fotovoltaicas.

A produção de energia através do aproveitamento da radiação solar está condicionada tanto ao posicionamento geográfico do local de implantação dos painéis fotovoltaicos e quanto às condições atmosféricas, o que limita sua aplicabilidade (BOLLEN; HASSAN, 2011).

A eficiência de conversão das células solares é medida pela proporção da radiação solar incidente sobre a superfície da célula que é convertida em energia elétrica. Neste caso, o Brasil possui grande potencial para geração de energia elétrica a partir de energia solar ao longo de seu território, localizado próximo aos trópicos.

As células fotovoltaicas já constituem uma tecnologia aplicável em locais distantes ou de difícil acesso, e sua conexão ao sistema elétrico de distribuição está recebendo grandes incentivos governamentais, devido a recente regulação para sistema de compensação de energia (ANEEL, 2015a), apresentando um crescimento acentuado de conexão de micro e minigerações distribuídas nas redes de baixa tensão, adotados principalmente pelos consumidores residenciais. Conforme publicado pela ANEEL (2016c), pode-se visualizar na Figura 10, o número de conexões de unidades consumidoras por fonte utilizadas.



Fonte: MME, 2016c.

### 2.3.4 Tipos de Conexão da Geração Distribuída

Os tipos de conexão das gerações distribuídas com o sistema elétrico de potência podem ser significativamente diferentes quando comparadas aos sistemas tradicionais de geração.

Cada tipo de fonte de energia possui suas peculiaridades sobre a forma de conexão entre a GD e a rede elétrica. De uma maneira geral, as gerações de energia podem ser acopladas diretamente a rede elétrica ou serem conectadas através de interfaces eletrônicas.

No caso das gerações termelétricas e PCH utilizam geradores em Corrente Alternada (CA) em sincronismo com o restante do sistema elétrico de potência, acoplados, portanto diretamente com a rede.

Enquanto os sistemas fotovoltaicos devem ser conectados à rede elétrica por meio de inversores porque tais sistemas geram energia elétrica em Corrente Contínua (CC) (ACKERMANN et al, 2001).

A Tabela 1 apresenta um resumo das interfaces de conexão entre as gerações distribuídas, em análise deste trabalho, e a rede.

Tabela 1 – Interface das Tecnologias para Diferentes Fontes de Energia

<b>Tipo de Fonte de Energia</b>	<b>Gerador Elétrico</b>	<b>Equipamentos de Eletrônica de Potência</b>
PCH	GS	N/A
Termelétricas à Biomassa	GS/GI	N/A
Solar Fotovoltaica	N/A	CC/CA

GS: Gerador Síncrono; GI: Gerador de Indução; N/A: Não se Aplica; CC/CA: Inversor.

Fonte: adaptado de BOLLEN; HASSAN (2011).

Neste trabalho, as máquinas síncronas são utilizadas como interface nas fontes termelétricas e nas PCHs, onde a potência mecânica pode ser controlada, além de serem capazes de injetar na rede elétrica tanto energia ativa como reativa.

Ao passo que a fonte solar utiliza células fotovoltaicas na geração de energia elétrica, acopladas a rede de distribuição através de interfaces eletrônicas, que possui a função de condicionar a energia elétrica gerada, convertendo a energia elétrica gerada de CC para CA.

## **2.4 Impactos da Inserção da Geração Distribuída**

Redes de eletricidade são sistemas complexos, integrados e com uma interação sensível entre os geradores, os sistemas de transmissão e distribuição e as demandas.

Os sistemas tradicionais de energia, com estruturas centralizadas que controlam o despacho de potência de várias regiões de um lugar, com consumidores passivos e fluxo unidirecional, estão modificando sua disposição, com a inserção de gerações distribuídas.

A integração das gerações distribuídas provoca alterações na estrutura de transmissão e distribuição de rede, no planejamento e nos procedimentos operacionais. Os impactos resultantes dessa incorporação devem ser estudados, a fim de avaliar as consequências de sua conexão à rede elétrica.

Nesta seção, portanto, serão mencionadas as vantagens e desvantagens da inserção de GD, de acordo com os seguintes critérios: capacidade de geração, número de geradores conectados na mesma usina, tipo do gerador e localização da interconexão no sistema elétrico.

### **2.4.1 Benefícios da Aplicação de Geração Distribuída**

A conexão da geração distribuída ao sistema elétrico de potência pode trazer melhorias sobre diversas perspectivas, acarretando em benefícios aos consumidores, à concessionária, ao sistema elétrico interligado e aos agentes geradores, como enumerados a seguir:

**1. Atenuação da Capacidade de Transmissão e Distribuição de Energia:** a GD pode proporcionar redução do carregamento das redes em condições de sobrecarga ou congestionamento, garantindo maior flexibilidade operativa, devido a sua proximidade com os pontos de demanda. Esse benefício pode causar o adiamento de investimentos em subestações de transformação e em capacidade adicional de transmissão (DUGAN, 2002; DIAS et al., 2005; BAYOD-RÚJULA, 2009).

**2. Aumento dos Índices de Confiabilidade:** A inserção de geração distribuída pode proporcionar um aumento nos índices de confiabilidade do sistema elétrico, tanto do ponto de vista do consumidor, quanto do ponto de vista da concessionária, evitando interrupções de fornecimento de energia elétrica. Aumentando a confiabilidade do sistema próximo a geração local (RAMOS, 2009; BITTENCOURT, 2011).

**3. Melhoria do Perfil de Tensão:** A integração da GD nos sistemas de distribuição está sendo vista como a solução de problemas relacionados com os afundamentos de tensão, pois a unidade de GD contribui para o aumento no nível de tensão em sistemas de distribuição radiais. Além de melhorar a regulação de tensão da linha em regime permanente. (PEPERMANS, 2005; RAMOS, 2009).

**4. Requisitos Ambientais:** Regulamentações ambientais mais rígidas têm induzido os investidores a buscar opções por fontes de energia limpas, com menor impacto ambiental e com melhor relação custo-benefício. Com unidades de geração de menor porte, a GD ameniza a necessidade de construção de centrais geradoras de grande porte e de novas linhas de transmissão. Com isso a GD proporciona um atendimento mais rápido ao crescimento da carga. Um ganho sobre o aspecto ambiental é a característica da GD de emitir baixos níveis de poluentes, recebendo o título de energia verde (DUGAN et al., 2002; GONÇALVES, 2004; SOUZA, 2006).

**5. Reestruturação dos Mercados de Energia:** Com a grande variedade de tecnologias existentes e uma vasta possibilidade de emprego de diversos arranjos de venda e compra de energia, a GD tornou-se o foco de grande interesse dos investidores da área de energia elétrica.

Além disso, o interesse de consumidores em adotar o sistema de compensação de energia elétrica junto à concessionária local vem aumentando o número de investimentos em geração distribuída (DUGAN et al., 2002; GONÇALVES, 2004; ANEEL,2016c).

**6. Fornecimento de Energia em Áreas Remotas:** Com a utilização de geração distribuída pode-se fornecer energia elétrica para áreas remotas com baixa densidade de carga, de maneira mais econômica e tecnicamente viável (RAMOS, 2009; SILVA, 2014).

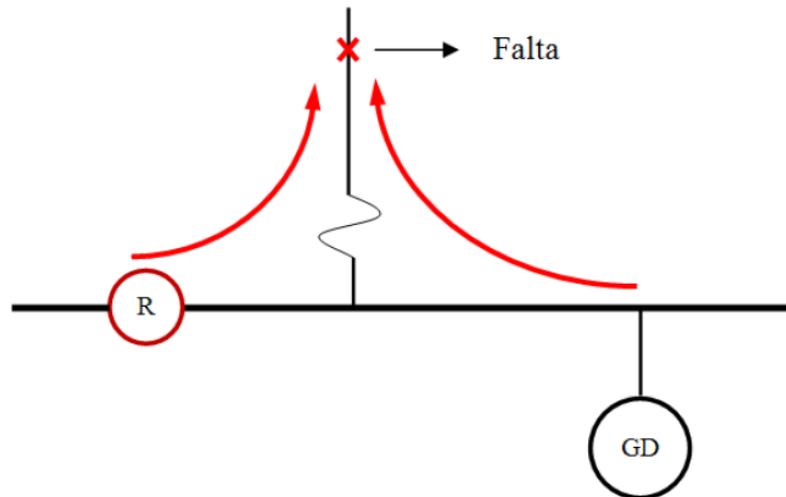
#### 2.4.2 Desvantagens da Aplicação de Geração Distribuída

As unidades de geração distribuída podem afetar de forma negativa o sistema elétrico de potência, conforme explicitado nos tópicos a seguir:

**1. Alterações nos Níveis de Curto-Circuito:** No projeto de um sistema de distribuição, a capacidade de curto-circuito é usada para especificar equipamentos, tais como: disjuntores, religadores e fusíveis. Esta medida também é considerada na coordenação dos equipamentos de proteção. Com a inserção da GD ocorrerá uma elevação nos níveis de curto-circuito da rede. Estes níveis não devem superar os valores do projeto antes da interconexão com a rede da concessionária, caso contrário, devem ser definidas medidas para a sua adequação. (BITTENCOURT, 2011).

**2. Perda da Coordenação do Sistema de Proteção:** Após a inserção de um gerador distribuído em uma determinada rede de distribuição com características radiais, se faz necessária à elaboração de um estudo detalhado da redistribuição dos fluxos de potência e conseqüentemente das correntes de curto-circuito, pois a fonte da GD colabora para as correntes de falta, como indicado na Figura 11. (RAMOS, 2009; BITTENCOURT, 2011).

Figura 11 – Contribuição dos geradores distribuídos para a corrente de falta.



Fonte: RAMOS (2009).

O estudo da coordenação da proteção após a inserção da GD abrange a reavaliação dos ajustes dos parâmetros dos equipamentos de proteção, sendo que estes são realizados considerando os geradores e os equipamentos do sistema existentes no momento da falta.

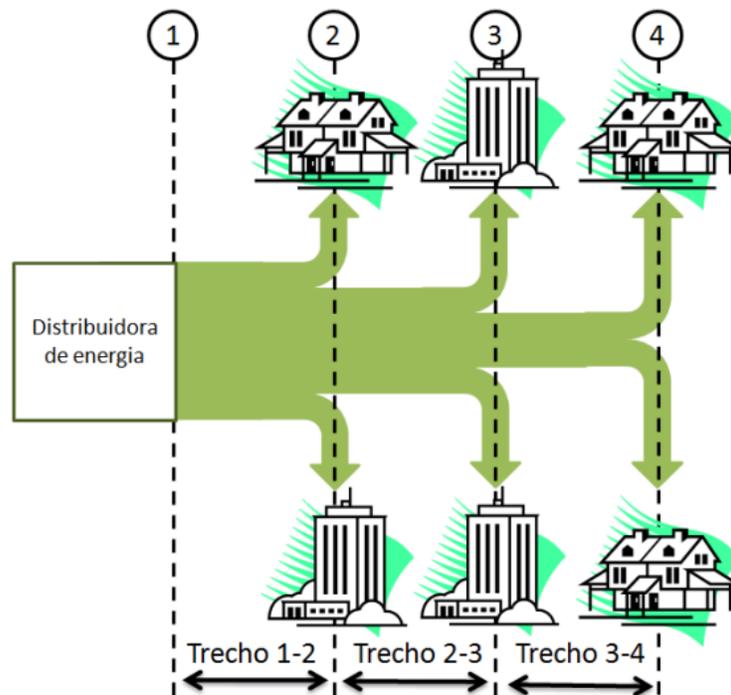
**3. Impactos do Ilhamento:** O fenômeno do ilhamento ocorre quando pelo menos uma unidade de GD na rede de distribuição permanece operando e alimentando alguma área, tendo o sistema sido desligado (intencionalmente ou não) por algum motivo. O ilhamento pode ser muito útil, pois pode-se manter cargas prioritárias alimentadas, mesmo que o restante do sistema esteja desenergizado. No entanto, alguns pontos negativos do ilhamento são indicados a seguir (SHAYANI, 2010 ; BITTENCOURT, 2011):

- Risco de morte para os funcionários da concessionária de distribuição que realizam manutenção nos alimentadores e até para a população desavisada, pois a linha pode manter-se energizada quando se espera que esteja desconectada de todas as fontes de energia;
- Dificuldade de manter respectivamente a frequência e a tensão dentro dos limites definidos quando operando ilhado. Risco para as concessionárias pelo não atendimento dos requisitos de qualidade de fornecimento;

- Possibilidade de danos físicos aos equipamentos da unidade consumidora, caso os parâmetros de tensão e frequência fiquem fora das faixas toleráveis, por não mais serem controlados pela concessionária no ilhamento;
- Recomposição do sistema fora de sincronismo, ou seja, no caso de não haver função para verificar o sincronismo do alimentador com a geração;

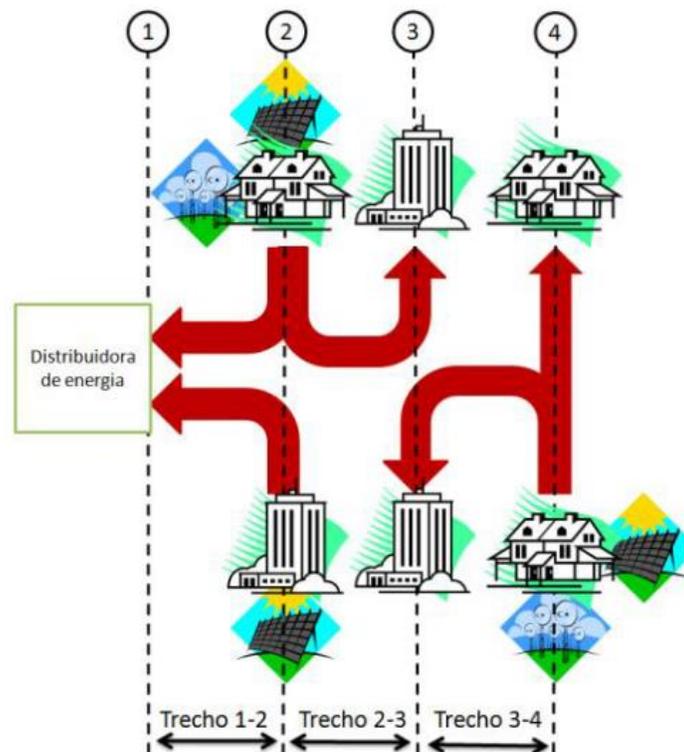
**4. Modificação do Fluxo de Potência em Redes Radiais de Distribuição:** Com a utilização da GD, passam a existir diversos pontos de geração interligados à rede de distribuição, alterando drasticamente o fluxo de potência. Nessa situação, o fluxo não é mais unidirecional e a subestação da distribuidora pode até receber potência ao invés de fornecê-la. Causando impactos na rede, principalmente do ponto de vista da proteção do sistema de distribuição, no que diz respeito aos ajustes de parâmetros e devida coordenação. A alteração do fluxo de potência pode ser mais bem visualizada nas Figuras 12 e 13.

Figura 12 – Fluxo de Potência em um alimentador radial de distribuição.



Fonte: SHAYANI (2010)

Figura 13 – Fluxo de Potência em um alimentador radial de distribuição com geração distribuída.



Fonte: SHAYANI (2010)

## 2.5 Considerações Finais

Esse capítulo tratou a geração distribuída por meio da contextualização do tema, indicando como, quando e porque ocorreu seu surgimento, bem como expôs suas diversas definições perante a literatura.

Além disso, abordou as características das fontes de gerações no universo de análise que compreendem esta dissertação, indicando os pontos relevantes de cada geração.

Por fim, listou os benefícios e os impactos da presença da geração distribuída em redes de distribuição, onde se pode destacar a influência desta conexão sob os aspectos da QEE, e mais estritamente ao comportamento do perfil de tensão, quando sujeito à faltas, conforme será analisado neste trabalho.

---

Diante da exposição dos impactos causados pela GD, nota-se que o modelo de um sistema de energia elétrica sustentável, com matriz energética diversificada e geração de energia limpa, ainda passa por um processo de transição e estruturação, que só alcançará melhores resultados baseado em estudos e pesquisas sobre o tema.

# CAPÍTULO 3

## **3 MODELAGEM DO SISTEMA E O ESTUDO DE CASO**

---

Como visto anteriormente, conectar geração distribuída em redes de distribuição é um desafio diante dos impactos negativos que refletem em todos os usuários do sistema elétrico, especialmente sobre o aspecto da qualidade da energia elétrica.

A fim de analisar o comportamento e o desempenho de um sistema elétrico, do ponto de vista dos afundamentos de tensão com a presença de geração distribuída, este capítulo irá expor a modelagem do sistema de distribuição utilizado, bem como as características e parametrizações de cada componente envolvido e os modelos de GD empregados na pesquisa.

Mediante a particularização dos elementos do sistema, a implementação destes em modelagem computacional será detalhada, do mesmo modo que as etapas do desenvolvimento do estudo, relatando todos os tipos de falta aplicados.

### **3.1 Sistema Elétrico Analisado**

Os parâmetros e orientações para a modelagem do sistema de distribuição de 28 barras foram extraídos de uma rede de distribuição real, inserida no Sistema Interligado Nacional (SIN), que compreende os níveis de tensão de 69kV e 13,8kV, tipicamente utilizado pelas concessionárias do país.

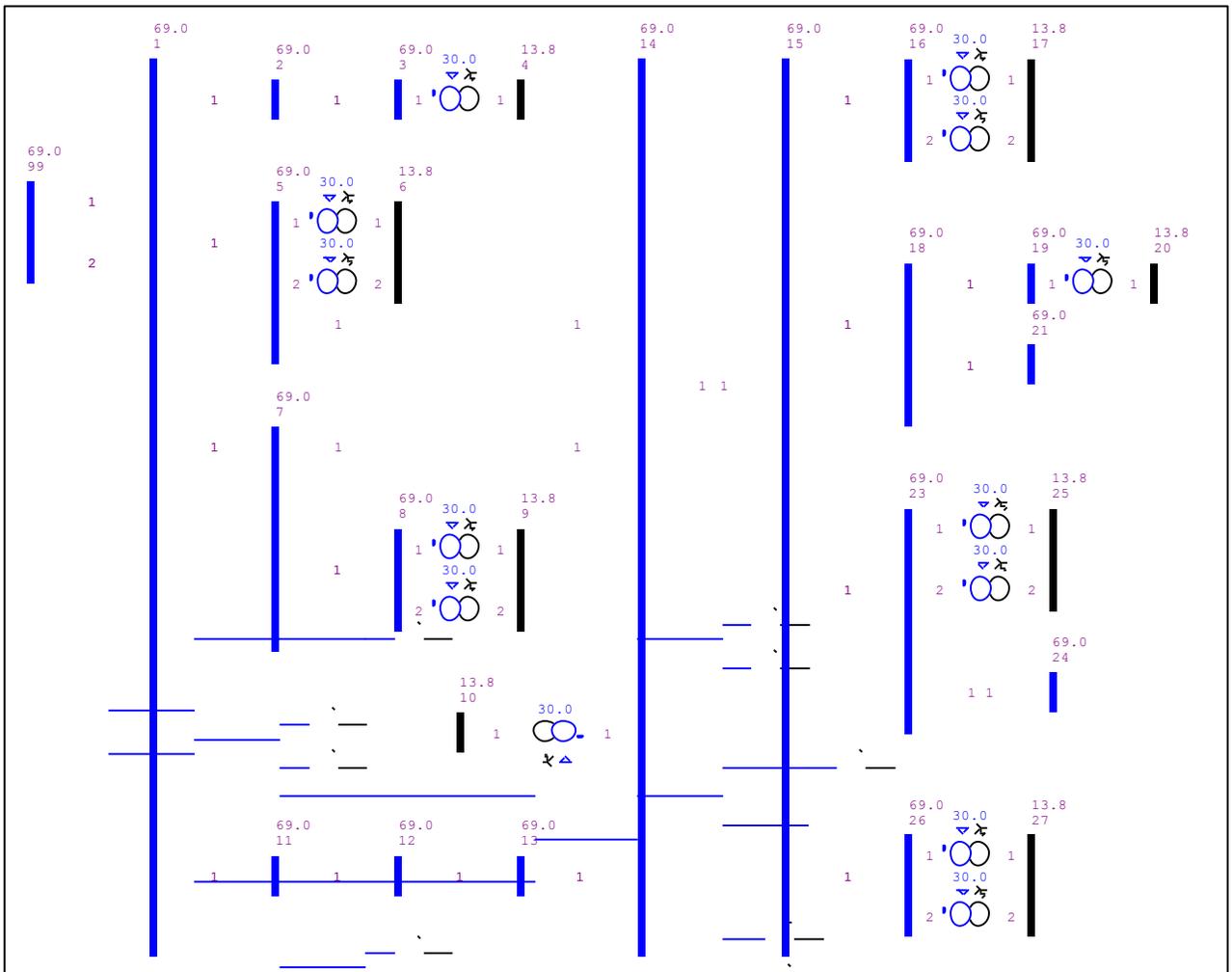
O sistema de distribuição em análise, composto de 28 barras, é conectado em delta no nível de tensão de 69kV e conectado em estrela aterrado no nível de tensão de 13,8kV, sendo todos os cabos aéreos e transpostos.

Na representação do sistema foi desprezada a contribuição das correntes de carga e dos elementos shunts das linhas e dos transformadores operando com tape fora da nominal, pois usualmente a corrente de curto é muito maior que a corrente que circulam por estes

componentes (SHIPLEY et al, 1962). Assim sendo, verificou-se que esta simplificação não afeta a precisão dos resultados das simulações.

As numerações das barras do sistema foram atribuídas e adaptadas conforme critério prático da inspeção da rede, optando-se pela numeração sequencial dos nós que são eletricamente próximos uns dos outros. O diagrama unifilar do sistema de distribuição de 28 barras pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 – Diagrama Unifilar do Sistema de Distribuição em Análise.

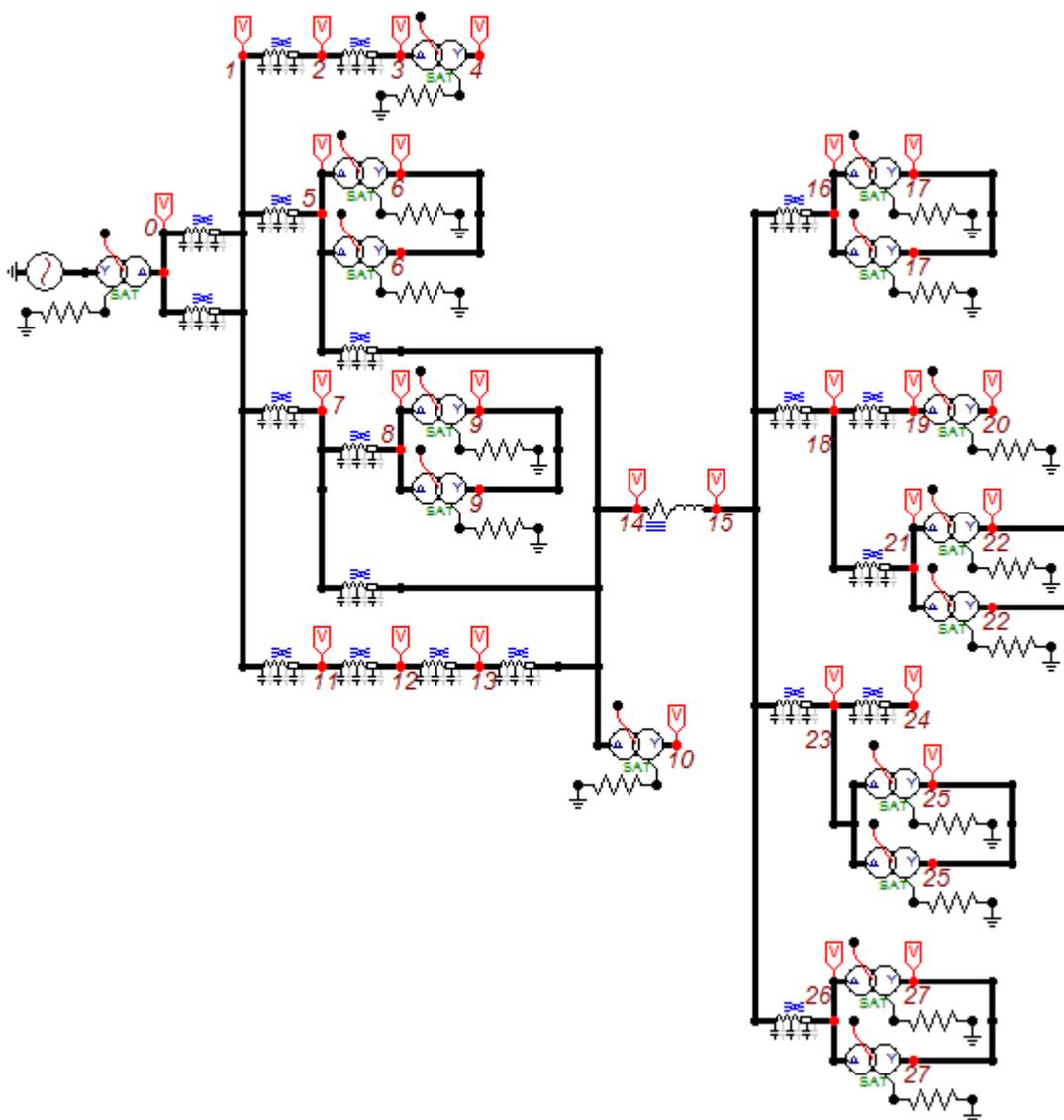


Fonte: próprio autor.

### 3.1.1 Implementação do Sistema Via Software ATP

Como uma das formas de ocorrência de afundamentos de tensão é através de faltas ou contingências no sistema. A maneira utilizada neste trabalho de promover afundamentos de tensão em um sistema de distribuição foi através da simulação de curtos-circuitos por intermédio do software ATP via interface gráfica ATPDraw, versão 5.9. A configuração espacial do sistema de 28 barras no ATPDraw pode ser visualizada na Figura 15.

Figura 15 – Configuração espacial do sistema de 28 barras no ATPDraw.



Fonte: próprio autor.

No arranjo da Figura 15, em todas as barras do sistema verificam-se as magnitudes das tensões remanescentes em todos os nós, devido a um curto-circuito simulado em uma barra do sistema de distribuição.

A seguir serão apresentadas as características de todos os componentes envolvidos no sistema em apreciação.

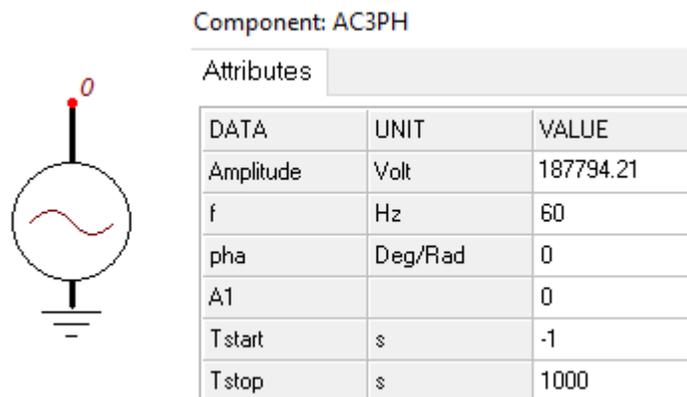
### 3.1.2 Fonte de Tensão e Barra de Referência

A barra de referência, chamada de barra 0, corresponde ao nó do sistema de onde é proveniente a principal fonte de geração de energia elétrica do sistema. A barra de referência tem a função de fornecer referência angular e de magnitude de tensão do sistema.

Dessa maneira, o gerador é considerado como parte externa do sistema, e é modelado através de uma fonte de tensão.

O modelo de fonte utilizado no ATPDraw foi o de fonte de tensão trifásica, aterrada com tensão dada em valor de pico, modelo AC3PH (PRIKLER et al.,2009) conforme Figura 16.

Figura 16 – Modelo da Fonte de Tensão no ATPDraw.



Fonte: adaptado de Prikler, 2009.

Os parâmetros utilizados na modelagem da fonte de tensão também estão declarados na Figura 16. Onde a amplitude de tensão foi calculada em valor de pico de fase e neutro, devido a fonte estar conectada em estrela, com tensão rms de fase-fase de 230 kV.

Na simulação essa fonte de tensão está acoplada a um transformador abaixador que realizará a conversão do nível de tensão de 230kV para 69kV, esta última uma tensão habitual para sistemas de distribuição.

### **3.1.3 Linhas de Distribuição**

Sendo o principal meio utilizado para a interconexão dos dispositivos que compõem um sistema elétrico, as linhas de distribuição são caminhos naturais para a propagação de afundamentos de tensão. Portanto, são modeladas baseadas em um sistema de distribuição real.

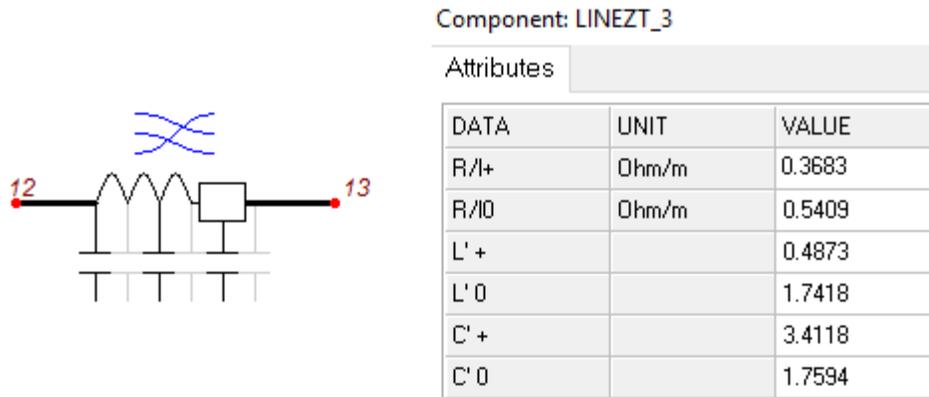
As linhas de distribuição adotadas na simulação estão todas estabelecidas na rede de 69kV de nível de tensão, diferenciando-as por características como, tipo de cabo e comprimento da linha.

O modelo construtivo das linhas de distribuição aéreas empregado na simulação é de circuito simples e possui estrutura de concreto com suspensão (ANEEL, 2010), conforme Figura 17.

Na Figura 17 mostra, em particular, o espaçamento entre os cabos e as respectivas alturas para linha do solo.



Figura 18 – Modelo da Linha de Distribuição no ATPDraw.



Fonte: adaptado de Prikler, 2009.

Na Figura 18, foi apresentado o modelo da linha de distribuição existente entre as barras 12 e 13, expondo à parametrização a ser realizada via ATPDraw, compreendendo as resistências em Ohm/m, as indutâncias em Ohm/m e as capacitâncias em  $\mu\text{Mho/m}$  de sequência positiva e sequência zero.

As configurações de todos os seguimentos de linha, que interliga dois barramentos, com o tipo de cabo, comprimento, resistências, indutâncias e capacitâncias definidas seguem na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados dos Alimentadores.

<i>Início da Linha (De)</i>	<i>Fim da Linha (Para)</i>	<i>Extensão (km)</i>	<i>Bitola (AWG/MCM)</i>
0	1	20,07	636 CAA
1	2	6,8	336,4 CAA
1	5	28,78	336,4 CAA
1	7	6,85	336,4 CAA
1	11	6,85	4/0 CAA
2	3	0,6	336,4 CAA
5	14	8,9	336,4 CAA
7	8	0,65	336,4 CAA
7	14	30,95	336,4 CAA
11	12	4,9	336,4 CAA
12	13	26,11	4/0 CAA
13	14	0,1	336,4 CAA

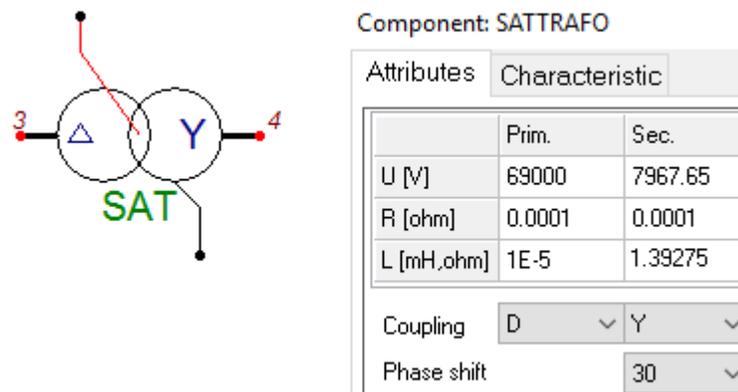
15	16	21,5	336,4 CAA
15	18	21,5	336,4 CAA
15	23	15,5	4/0 CAA
15	26	13,5	4/0 CAA
18	19	19,7	336,4 CAA
23	24	0,9	336,4 CAA

Fonte: Próprio autor.

### 3.1.4 Transformadores

O modelo de fonte utilizado no ATPDraw foi o de transformador trifásico saturável com 2 enrolamentos, de acordo com o modelo SATTRAFO (PRIKLER et al.,2009) conforme Figura 19.

Figura 19 – Modelo de Transformadores no ATPDraw.

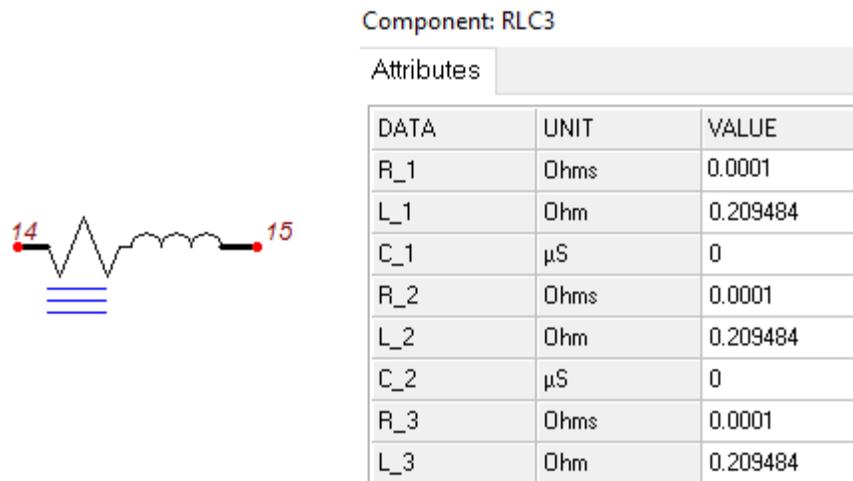


Fonte: adaptado de Prikler, 2009.

### 3.1.5 Regulador de Tensão

No sistema real de distribuição tratado há um regulador de tensão entre as barras 14 e 15, no entanto, sua modelagem foi especificada como um elemento RL trifásico, cujo modelo utilizado no ATPDraw foi RLC3 (PRIKLER et al.,2009), conforme Figura 20.

Figura 20 – Modelo do Regulador de Tensão no ATPDraw.

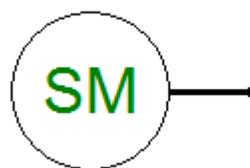


## 3.2 Representação das Gerações Distribuídas

### 3.2.1 PCH

O modelo de geração distribuída de um PCH utilizada no ATPDraw foi o modelo de gerador síncrono não controlado SM59\_NC (PRIKLER et al.,2009), para análise no domínio do tempo dos impactos causados no sistema de distribuição em análise, conforme Figura 21.

Figura 21 – Modelo de Geração Distribuídas para PCH no ATPDraw.



Fonte: adaptado de Prikler, 2009.

### **3.2.1.1 Geração Distribuída PCH – 9,45MW**

A geração distribuída que envolve as pequenas centrais hidrelétricas será tratada em dois blocos de acordo com a sua capacidade instalada, e conforme classificação definida pela ANEEL.

### **3.2.1.2 Minigeração Distribuída PCH – 2,25MW**

### **3.2.2 Térmica à Biomassa**

#### **3.2.2.1 Geração Distribuída Termelétrica – 22 MW**

#### **3.2.2.2 Minigeração Distribuída Termelétrica – 3 MW**

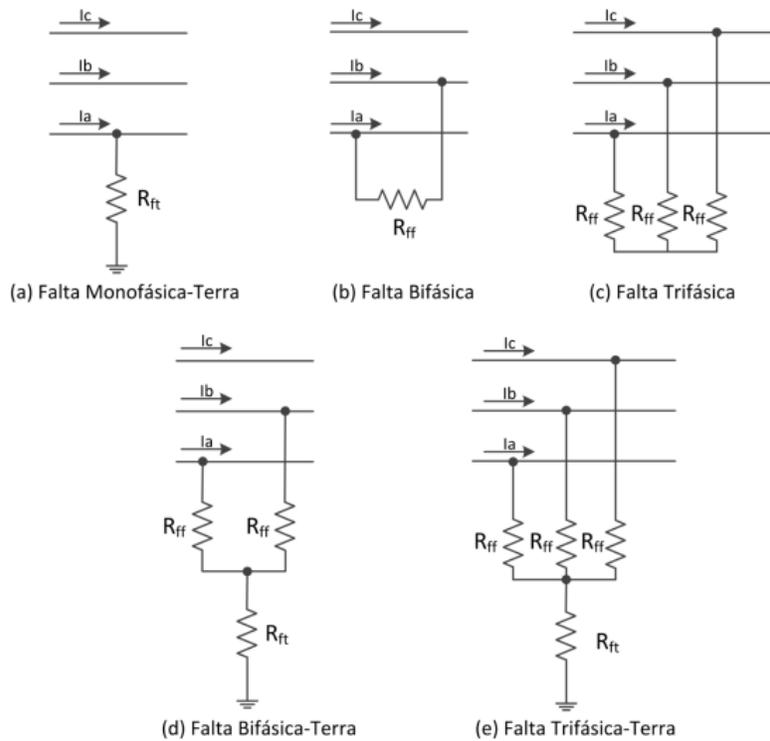
### **3.2.3 Solar Fotovoltaica**

#### **3.2.3.1 Geração Distribuída Fotovoltaica – 6 MW**

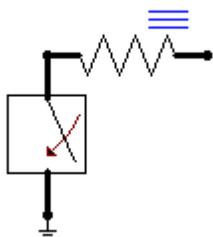
#### **3.2.3.2 Geração Distribuída Fotovoltaica – 1 MW**

### 3.3 Simulação de Curtos-Circuitos

#### 3.3.1 Curtos-Circuitos Simulados



### 3.3.2 Obtenção dos Afundamentos de Tensão Via *Software ATP*



### 3.3.3 Obtenção dos Afundamentos de Tensão Via *Software MATLAB*

### **3.4 Etapas de Desenvolvimento do Estudo**

### **3.5 Considerações Finais**

# CAPÍTULO 4

## **4 RESULTADOS**

---

### **4.1 Caso Base**

## **4.1.1 Curto-Circuito Monofásico**

### **4.1.1.1 Propagação dos Afundamentos de Tensão**

## **4.1.2 Curto-Circuito Bifásico com Terra**

### **4.1.2.1 Propagação dos Afundamentos de Tensão**

### **4.1.3 Curto-Circuito Trifásico com Terra**

#### **4.1.3.1 Propagação dos Afundamentos de Tensão**

## **4.2 Caso Base com Geração Distribuída - PCH**

### **4.2.1 Geração Distribuída PCH – 9,45MW**

#### **4.2.1.1 Curto-Circuito 1F - Geração Distribuída PCH**

#### **4.2.1.2 Curto-Circuito 2F - Geração Distribuída PCH**

### **4.2.1.3 Curto-Circuito 3F - Geração Distribuída PCH**

## **4.2.2 Minigeração Distribuída PCH – 2,25 MW**

### **4.2.2.1 Curto-Circuito 1F - Minigeração Distribuída PCH**

#### **4.2.2.2 Curto-Circuito 2F - Minigeração Distribuída PCH**

### **4.2.2.3 Curto-Circuito 3F - Minigeração Distribuída PCH**

## **4.3 Caso Base com Geração Térmica- UTE**

### **4.3.1 Geração Distribuída Térmica– 22MW**

#### **4.3.1.1 Curto-Circuito 1F - Geração Distribuída UTE**

#### **4.3.1.2 Curto-Circuito 2F - Geração Distribuída UTE**

### **4.3.1.3 Curto-Circuito 3F - Geração Distribuída UTE**

### **4.3.2 Minigeração Distribuída UTE – 3 MW**

#### **4.3.2.1 Curto-Circuito 1F - Minigeração Distribuída UTE**

#### **4.3.2.2 Curto-Circuito 2F - Minigeração Distribuída UTE**

### **4.3.2.3 Curto-Circuito 3F - Minigeração Distribuída UTE**

## **4.4 Caso Base com Geração Solar Fotovoltaica- SOL**

### **4.4.1 Geração Distribuída Solar– 6MW**

#### **4.4.1.1 Curto-Circuito 1F - Geração Distribuída SOLAR**

#### **4.4.1.2 Curto-Circuito 2F - Geração Distribuída SOLAR**

#### **4.4.1.3 Curto-Circuito 3F - Geração Distribuída SOLAR**

## **4.4.2 Minigeração Distribuída SOLAR – 1 MW**

### **4.4.2.1 Curto-Circuito 1F - Minigeração Distribuída SOLAR**

#### **4.4.2.2 Curto-Circuito 2F - Minigeração Distribuída SOLAR**

#### **4.4.2.3 Curto-Circuito 3F - Minigeração Distribuída SOLAR**

## **4.5 Comparações Realizadas**

### **4.5.1 Quanto a Geração Distribuída**

#### **4.5.1.1 Quanto ao Tipo de Curto-Circuito Aplicado**

### **4.5.2 Quanto a Minigeração Distribuída**

#### **4.5.2.1 Quanto ao Tipo de Curto-Circuito Aplicado**

## **4.6 Considerações Finais**

# CAPÍTULO 5

## **5 ROBUSTEZ E CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO**

---

### **5.1 Robustez do Sistema de Distribuição**

#### **5.1.1 A Influência da Potência de Curto-Circuito**

#### **5.1.2 Índice da Robustez**

## **5.2 Confiabilidade do Sistema de Distribuição**

### **5.2.1 Índices de Confiabilidade**

### **5.3 Considerações Finais**

# CAPÍTULO 6

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

---

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões e os trabalhos futuros na linha de pesquisa mostrada no trabalho.

### **6.1 Conclusões**

## 6.2 Trabalhos futuros

Para realização de trabalhos futuros na área de análise dos impactos da geração distribuída do ponto de vista dos afundamentos de tensão é proposto o que se segue:

- Avaliar o desempenho do modelo com outros softwares, que realizem simulação computacional, no domínio da frequência como no ANAFAS;
- Estender as aplicações das gerações distribuídas para gerações eólicas de energia.
- Utilizar elementos de inteligência artificial, para verificar a localização das faltas, perante as variações de tensão de curta-duração;
- Implementar e desenvolver estudos de caso com mais opções de curtos-circuitos estudados, bem como faltas nas linhas de distribuição, com várias proporções de comprimento da linha, como 30, 50 e 80% da linha, pois são tipos de contingências mais registradas no sistema.

## REFERÊNCIAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica; 2005. *Cadernos Temáticos – Compensação Financeira pela Utilização de Recursos Hídricos para Geração de Energia Elétrica*. Brasil. Disponível em: <[www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br)>. Acesso em 14 mar. 2016.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica; 2016. *BIG – Banco de Informações de Geração*. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 14 mar. 2016.

MME – Ministério de Minas e Energia; EPE – Empresa de Pesquisa Energética; 2013. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2022*. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/PDEE/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%202022.pdf>>. Acesso em 15 fev. 2016.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico; 2016. *O que é o SIN – Sistema Interligado Nacional*. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/conheca\\_sistema/o\\_que\\_e\\_sin.aspx](http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx)>. Acesso em 17 mar. 2016.



