

**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO  
GRANDE DO SUL – UNIJUI**

**MARCOS VICENTE HART**

**DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO PARA DETECÇÃO E  
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM  
ALIMENTADORES INTELIGENTES DE DISTRIBUIÇÃO**

**Ijuí**

**2018**

**MARCOS VICENTE HART**

**DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO PARA DETECÇÃO E  
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM  
ALIMENTADORES INTELIGENTES DE DISTRIBUIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

**Orientador: Prof. Dr. Maurício de Campos**

**Ijuí**

**2018**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu Pai Geraldo já em memória, que sempre me ensinou a honestidade e simplicidade que devemos viver a vida. Agradeço de coração a minha mãe Norma e minha Irmã Tania, que sempre lutaram e demonstraram que mesmo nas batalhas difíceis devemos sorrir e agradecer a vida.

Agradeço a minha sobrinha Thamara e meus amigos Eduardo, Lucas, Airton, Denise e Mônica que sempre estiveram ao meu lado, tanto nos momentos bons como nos momentos difíceis.

Agradeço a todos os meus amigos que fiz no decorrer da graduação, pela ajuda e as noites de estudo que tivemos.

Ao meu orientador Maurício de Campos pela paciência, dedicação e conhecimentos transmitidos.

Por fim, a todos que de uma forma ou de outra sempre estiveram ao meu lado.

## RESUMO

HART, MARCOS. **Desenvolvimento de um algoritmo para detecção e localização de faltas de alta impedância em alimentadores inteligentes de distribuição.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2018.

A localização das faltas de alta impedância nas redes de distribuição ainda são um desafio para o setor de proteção das concessionárias, visto que são sutis quando comparadas as faltas de baixa impedância. Estudos de instituições de ensino e empresas privadas vêm desenvolvendo soluções no processo de identificação das faltas de alta impedância. No entanto, ainda são de difícil implementação e com um custo elevado. O setor de distribuição de energia se torna ainda mais complexo quando entramos no mundo da *Smart Grid*, muitos conceitos mudam assim como todo o funcionamento da rede de distribuição. A geração distribuída interfere diretamente no fluxo de potência, alterando assim características do setor de proteção. Este trabalho desenvolve o estudo e à análise do comportamento do sistema que possui geração distribuída bem como apresenta uma proposta de algoritmo para detecção e localização das faltas de alta impedância neste sistema.

**Palavras-chave:** Desequilíbrio das tensões. Faltas de alta impedância. Geração distribuída. *Smart Grid*.

## **ABSTRACT**

**HART, MARCOS. Desenvolvimento de um algoritmo para detecção e localização de faltas de alta impedância em alimentadores inteligentes de distribuição.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2018.

The location of high impedance faults in the distribution networks is still a challenge for the concessionaire protection sector since they are subtle when compared to low impedance faults. Studies of educational institutions and private companies are developing solutions in the process of identifying high impedance faults. However, they are still difficult and costly to implement. The power distribution industry becomes even more complex when we enter the world of Smart Grid, many concepts change as well as the entire operation of the distribution network. Distributed generation interferes directly in the power flow, thus altering characteristics of the protection sector. This work develops the study and analysis of the behavior of the system that has distributed generation. As well, a proposed algorithm for detecting and locating high impedance faults in this system.

**Keywords:** Distributed generation. High impedance faults. Smart Grid. Voltage unbalance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ocorrência de faltas permanentes e temporárias.....	20
Figura 2: Causas típicas de faltas .....	23
Figura 3: Interação entre agentes de diferentes domínios da <i>Smart Grid</i> .....	28
Figura 4: Esquemático do alimentador proposto.....	34
Figura 5: Esquemático do alimentador convencional.....	37
Figura 6: Esquemático do alimentador com geração distribuída .....	40
Figura 7: Fluxograma .....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de faltas.....	17
Tabela 2: Tipos e frequências das faltas.....	18
Tabela 3: Ocorrência de faltas permanentes e temporárias.....	19
Tabela 4: Domínios e agentes na infraestrutura <i>Smart Grid</i> .....	27
Tabela 5: Valores das cargas do sistema.....	35
Tabela 6: Tensões RMS carga 01 rede convencional.....	38
Tabela 7: Tensões RMS carga 01 rede convencional com falta.....	38
Tabela 8: Tensões RMS carga 04 rede convencional com falta.....	39
Tabela 9: Potência geração fotovoltaica kWp.....	41
Tabela 10: Tensões RMS carga 01 rede com geração.....	42
Tabela 11: Tensões RMS carga 01 rede com geração e falta.....	43
Tabela 12: Tensões RMS carga 04 rede com geração e falta.....	44
Tabela 13: Tensões RMS carga 01 rede com geração e desconexão do inversor.....	45

## **LISTA DE SIGLAS**

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FIC	Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
NBR	Norma Brasileira
RMS	Valor Eficaz
SEP	Sistema Elétrico de Potência



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	12
1.2 OBJETIVOS .....	13
<b>1.2.1 Objetivo geral.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2.2 Objetivo específico .....</b>	<b>13</b>
<b>1.2.3 Delimitação .....</b>	<b>13</b>
1.3 METODOLOGIA .....	14
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	14
<b>2 ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>16</b>
2.1 CONCEITOS BÁSICOS .....	16
2.2 TIPOS DE FALTAS .....	17
<b>2.2.1 Faltas temporárias e faltas permanentes .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.2 Faltas de baixa impedância.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.3 Faltas de alta impedância.....</b>	<b>20</b>
2.3 ESTUDOS ANTERIORES .....	21
2.4 CONCLUSÕES .....	24
<b>3 REDES SMART GRID.....</b>	<b>25</b>
3.1 CONCEITOS BÁSICOS .....	25
3.2 IMPLEMENTAÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO .....	26
3.3 MEDIDORES INTELIGENTES.....	30
3.4 CONCLUSÕES .....	32
<b>4 SIMULAÇÕES DO SISTEMA .....</b>	<b>33</b>
4.1 CONCEITO BÁSICO DO SOFTWARE UTILIZADO.....	33
4.2 APRESENTAÇÃO DA REDE PROPOSTA .....	33

4.3	MÉTODO PROPOSTO PARA LOCALIZAÇÃO DAS FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA .....	35
4.4	CONDIÇÕES DE TESTE .....	36
4.5	ANÁLISE DO SISTEMA PROPOSTO.....	36
4.6	ALGORITMO PROPOSTO.....	45
4.7	CONCLUSÕES .....	47
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>48</b>
5.1	TRABALHOS FUTUROS .....	49
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>50</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A crescente implementação de tecnologias em redes de distribuição está tornando sistema mais inteligente. Este processo está na fase inicial, mas as redes já estão recebendo o título de Redes Inteligentes (do Inglês *Smart Grids*). Novas tecnologias são essenciais na busca de soluções práticas, que atendam os interesses dos consumidores e das concessionárias de distribuição de energia.

Um dos graves problemas que ocorrem nos alimentadores de distribuição é o rompimento de um condutor, que pode cair sobre uma superfície como o asfalto, provocando uma falta<sup>1</sup> de alta impedância. Devido aos riscos relacionados e consequências deste fenômeno deve-se procurar soluções a partir da evolução da tecnologia digital e do desenvolvimento de simulações computacionais para o total entendimento das características deste fenômeno (NAKAGOMI, 2006).

O termo falta de alta impedância descreve o efeito do contato direto do condutor energizado com uma superfície isolante, ou de elevada resistência. Este contato resulta em uma corrente de baixa intensidade, normalmente abaixo dos níveis de corrente parametrizadas no dispositivo de proteção (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 1996). Sendo assim o sistema convencional de proteção não irá atuar e a falta não será isolada, apresentando um risco para a segurança pública, a vida de seres vivos ou ainda um princípio de incêndio, dependendo do material envolvido.

Por vários anos as faltas de alta impedância foram alvo de estudos e pesquisas, com o intuito de encontrar sinais ou características confiáveis para que a localização seja possível (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 1996). Porém, as topologias desenvolvidas não

---

<sup>1</sup>Segundo (HOUAISS, 2009) palavra falta significa a privação ou ausência de algo. No entanto nos contextos da engenharia elétrica, esta palavra significa defeitos ou falhas em um sistema de distribuição sendo estes defeitos associados a ocorrência de curto-circuito. Então utilizamos a palavra falta para descrever de forma geral os acontecimentos de curto-circuito.

são eficazes, pelo fato das redes apresentarem diversas situações que possam ser cotidianas do sistema, mas em vista da topologia inserida eventos anormais.

Distúrbios corriqueiros no sistema de distribuição, além de apresentarem riscos eminentes, afetam diretamente índices de qualidade da energia entregue pela concessionária. Sendo assim, estes índices são avaliados pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) órgão regulador. Esta, avalia, além dos índices de qualidade também indicadores que representam o número de interrupções que ocorrem durante o fornecimento de energia elétrica aos consumidores. Estes índices estão normatizados no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia no Sistema Elétrico Nacional PRODIST. Neste documento encontra-se os indicadores de frequência equivalente de interrupções por unidade consumidora FEC, duração equivalente de interrupções por unidade consumidora DEC, duração de interrupções individuais por unidade consumidora ou por ponto de conexão DIC e frequência de interrupções individuais por unidade consumidora ou por ponto de conexões FIC. Quando estes indicadores não são cumpridos, a concessionária é penalizada na forma de uma multa a qual é realizada através da retribuição financeira por meio de descontos na fatura do consumidor, ou até mesmo a perda da concessão, de acordo com os novos contratos vigentes (ANEEL, 2017). Então além de perder no faturamento da energia não distribuída, a concessionaria ainda paga uma multa ao cliente em forma de desconto na fatura de consumo.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A localização de faltas de alta impedância vêm sendo um desafio para a engenharia de proteção. Muitas pesquisas e estudos científicos vêm sendo apresentado neste ramo (IURINIC, 2016).

O processo de identificação da falta onde o sistema convencional de proteção não atua atualmente, é um processo lento. Sendo que em alguns casos a concessionária é informada apenas por reclamações de clientes que identificaram o condutor caído através de uma inspeção visual. Dentro deste contexto, percebe-se o perigo em potencial a partir de um evento onde a concessionária não tem controle sobre os acontecimentos e demora em identificar uma situação de faltas na sua rede de distribuição.

Apesar do longo histórico de estudos e pesquisas no desenvolvimento de técnicas para identificação de faltas de alta impedância, sua localização segura em todos os casos ainda não foi possível. Sendo assim, a implementação de um sistema eficaz de detecção de faltas de alta impedância resulta no mínimo de dano às linhas de distribuição, tornando o sistema seguro para a sociedade. Assim, contribuindo positivamente para os indicadores técnicos e comerciais bem como na eficiência operacional, baixando desta forma os custos. Podendo estes, então ser investido em mais tecnologia e pesquisas futuras.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Estudar e propor um algoritmo que seja capaz de auxiliar no reconhecimento de uma falha no sistema de distribuição, mais especificamente uma falta de alta impedância em sistemas inteligentes.

### 1.2.2 Objetivo específico

- Revisar o sistema de distribuição de energia;
- Revisar a bibliografia de faltas em sistemas de distribuição;
- Desenvolvimento de um algoritmo para detecção de faltas de alta impedância;
- Analisar o desempenho deste algoritmo proposto em relação a variação das faltas de alta impedância;

### 1.2.3 Delimitação

Desenvolvimento de um algoritmo para identificar e localizar ocorrências de faltas de alta impedância em alimentadores inteligentes de distribuição. Baseado na leitura on line de medidores inteligentes.

### 1.3 METODOLOGIA

A metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho consiste primeiramente na simulação da rede de distribuição para compreender o sistema proposto. Abordagem teórica de pesquisa para compreensão de técnicas já desenvolvidas. Análise dos resultados adquiridos pelas simulações. Desenvolvimento da topologia para solução do problema apresentado.

### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para atingir os objetivos propostos, este trabalho de conclusão de curso está dividido em cinco capítulos.

O primeiro capítulo apresenta a importância do tema proposto, bem como os objetivos a serem alcançados neste estudo.

No segundo capítulo são apresentados os conceitos básicos relacionados as faltas de alta impedância, definindo algumas características e classificações ao rompimento de condutores e naturezas das faltas. Também são apontados estudos que abordam os assuntos referentes a localização e detecção das faltas.

No terceiro capítulo são introduzidos os conceitos das *Smart Grid*, apresentando bibliografias que descrevem sua implementação, funcionamento e características. Ainda são apresentados conceitos básicos dos medidores inteligentes (do Inglês *Smart Meters*). Assim como a necessidade de novas funcionalidades como cálculo do fator de desequilíbrio das tensões.

No quarto capítulo são apresentados os estudos do sistema proposto, bem como o método proposto para a localização das faltas de alta impedância. Também está apresentado o conceito básico do software utilizado. Para a simulação são apresentadas algumas condições de teste, no intuito de verificar a diferença das características de redes convencionais para redes *Smart Grid*. Na análise do sistema são apresentadas as tabelas, resultado das simulações executadas. Por fim o algoritmo proposto para detecção e localização de faltas de alta impedância. Este levando em consideração a análise do desequilíbrio das tensões para seu funcionamento.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões do estudo desenvolvido, destacando a metodologia proposta para detecção e localização das faltas relatando vantagens e desvantagens do algoritmo proposto.

## 2 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo são abordados os conceitos básicos de faltas em sistemas elétricos de distribuição, a fim de esclarecer os tipos, como ocorrem e o impacto que provocam no sistema. Diferenciando também faltas de baixa impedância de faltas de alta impedância e da mesma forma, faltas temporárias de permanentes.

Na sequência, essa seção apresentará alguns estudos publicados, que tiveram o intuito de apontar novas técnicas na detecção de faltas de alta impedância.

### 2.1 CONCEITOS BÁSICOS

O SEP (Sistema Elétrico de Potência) é responsável pela transmissão e distribuição de energia elétrica. Com o aumento dos núcleos populacionais houve também um crescimento na demanda de energia. Em consequência foram criadas normas regulamentadoras que determinam padrões para dispor de confiabilidade, qualidade e segurança. Significa que todos os consumidores devem ser atendidos continuamente com variação mínima de tensão e frequência. Da mesma forma o sistema deve proteger a todos os seres vivos e equipamentos de possíveis falhas.

Conforme NBR 5456:2010 uma falta é identificada pelo contato ou arco elétrico acidental de partes sob potenciais diferentes de um sistema ou equipamentos energizados, ou ainda, quando partes deste sistema entram em contato com o neutro ou a terra.

De acordo com Tleis (2008), em um sistema elétrico de potência, uma falta significa uma condição anormal ocorrida na rede, provocando um aumento considerável na corrente que circula no sistema. Estas faltas ocorrem por inúmeras causas, as mais recorrentes são queda de raios, contato com galhos e arbustos, ventos e chuvas fortes, até mesmo a colisão de um veículo ao poste.

Iurinic (2016) relata que as falhas de curto-circuito podem ser distinguidas em diferentes casos, estes dependendo do número de condutores que entram em contato entre si ou em contato com a terra. Estes eventos resultam na interrupção de energia elétrica e, conseqüentemente,



causando danos ao sistema de transmissão e distribuição. As perdas econômicas causam inconvenientes tanto para a concessionária como para o consumidor.

Desta forma, inúmeros são os estudos desenvolvidos nesta área. O estudo das faltas e formas de proteger o sistema perante o acontecimento das mesmas são assuntos de grande interesse para o meio acadêmico e comunidades científicas. O principal objetivo de todos os estudos é a localização rápida do ponto que a falta se localiza, permitindo a melhor decisão a ser tomada para o evento.

## 2.2 TIPOS DE FALTAS

De acordo com Short (2003), as faltas são apresentadas como contato acidental entre fases, fases e neutro ou fases e terra.

Lopes (2009) apresentou uma tabela das possíveis faltas que ocorrem em um sistema de distribuição.

Tabela:1 - Tipos de faltas.

<b>Identificação</b>	<b>Características</b>
Trifásica	Entre as três fase A, B e C
	Entre as três fase A, B, C e terra
Monofásica	Entre a fase A e terra
	Entre a fase B e terra
	Entre a fase C e terra
Bifásica	Entre a fase A e B
	Entre a fase A e C
	Entre a fase B e C
	Entre as três fase A, B e terra
	Entre as três fase A, C e terra
	Entre as três fase B, C e terra

Fonte: (Lopes, 2009)

A corrente que circula no sistema no instante da falta é limitada apenas pela impedância do próprio sistema somado ao valor da impedância da falta. Caso não existir impedância de falta (curto circuito de contato sólido), a corrente se limitará pela impedância do sistema. Nestes casos, a falta será descrita como falta de baixa impedância, por apenas constituir da impedância da rede

e dos transformadores. Já casos em que houver a impedância do contato, a falta será classificada em alta impedância.

Mason (1956) se assegura que a maioria das faltas ocorridas no sistema elétrico são assimétricas. Sendo estas simétricas, trifásicas e terra, bifásicas, bifásicas e terra e monofásicas a terra.

Kindermann (1997) esclarece que pela própria natureza dos tipos de faltas, os curtos circuitos trifásicos são os mais raros. No entanto o curto-circuito monofásicos a terra são os mais comuns, conforme apresentado na tabela 2.

Tabela 2 - Tipos e frequências de ocorrência de faltas

<b>Tipo de falta</b>	<b>Frequência de ocorrência</b>
Trifásico	6%
Bifásico	15%
Bifásico a terra	15%
Monofásico a terra	64%

Fonte: (Kindermann, 1997)

### 2.2.1 Faltas temporárias e faltas permanentes

Conforme (Kindermann, 1997) curto-circuitos temporários ocorrem sem haver defeito na rede. Após a atuação da proteção o sistema volta a ser restabelecido sem problema. Curto-circuitos temporários tem sua origem por vários fatores como:

- Arco elétrico em isoladores;
- Contaminação do isolador pela poeira e poluição;
- Sobre tensão na rede, com a consequência a ruptura do isolamento do isolador;
- Umidade;
- Salinidade;
- Chuva;

- Vento;
- Galhos de árvores ou arbustos;
- Pássaros;

O principal defeito temporário em redes de distribuição urbana é o contato acidental do galho de uma árvore ou arbusto. Já em curto-circuito permanente o contato é irreversível espontaneamente, não voltando ao seu funcionamento normal. Assim sendo, é necessário a intervenção da equipe de manutenção para o conserto da rede de distribuição. Somente após o conserto o sistema será restabelecido. As causas mais comuns de faltas permanentes são:

- Danificação de isoladores;
- Danificação de para-raios;
- Danos em transformadores;
- Danos em chaves seccionadoras;
- Rompimento de um cabo condutor;
- Contato acidental permanente de qualquer natureza;

Análise feita em redes de distribuição indica que 96% das faltas são temporárias e monofásicas a terra conforme tabela 3.

Tabela 3 – Ocorrência de faltas permanentes e temporárias

<b>Falta monofásica à terra</b>	<b>Frequência de ocorrência</b>
Permanente	4%
Temporária	96%

Fonte: (Kindermann, 1997)

O sistema de proteção prevê a eliminação das faltas temporárias através de religadores instalados ao longo da rede de distribuição. Assim, este dispositivo inicia uma sequência de ciclos de operação programada. Após o término desta sequência, se a falta ainda persistir, será

então definida como falta permanente, e o religador atuará de outra forma. O mesmo então irá atuar como seccionador abrindo definitivamente o circuito.

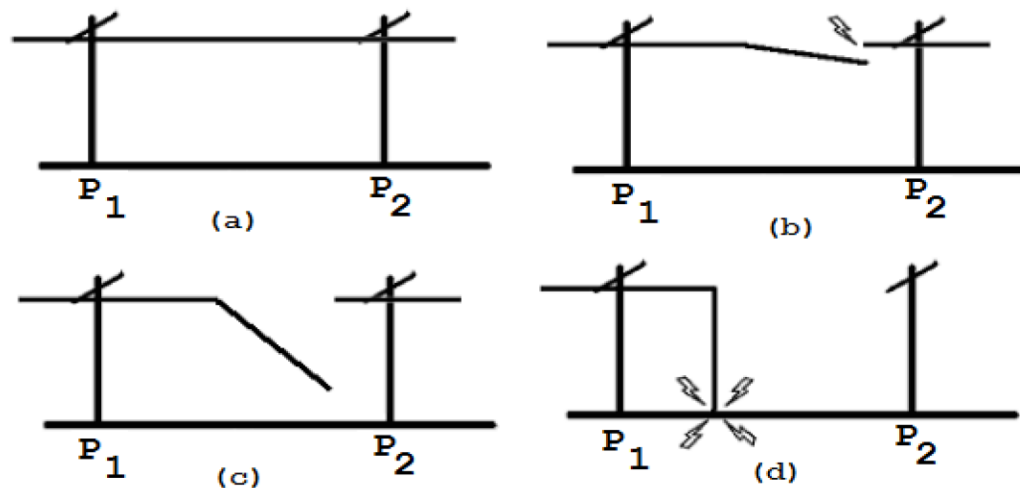
### 2.2.2 Falhas de baixa impedância

Em contatos direto de condutores energizados entre fases, fase neutro ou fase terra tem-se uma falta de baixa impedância, neste caso a resistência de curto-circuito é nula. Nesta falta surge uma corrente elevada de grande magnitude, sendo facilmente detectada pelo relé de sobrecorrente.

### 2.2.3 Falhas de alta impedância

Segundo Iurinic (2016) as faltas de alta impedância são eventos que podem ser geradas de inúmeras maneiras, mas de forma geral suas características são similares. A figura 1 demonstra um modelo de evento de falta de alta impedância, onde ocorre o contato de um condutor energizado da rede de distribuição com uma superfície com um alto valor resistivo.

Figura 1: Ocorrência de faltas permanentes e temporárias



Fonte: (NAKAGOMI, 2006)

### 2.3 ESTUDOS ANTERIORES

Nos estudos apresentados a seguir foram abordados diferentes métodos de localização de faltas de alta impedância. As pesquisas abordam de forma sucinta os métodos de análise dos sinais das faltas de alta Impedância.

Lehtonen et al. (1991) abordam duas formas diferentes de localização de faltas em alimentadores de distribuição. A primeira está baseada em medições simultâneas de tensões e correntes no secundário do transformador na subestação. Para o cálculo da distância da falta da subestação é utilizado a reatância da linha. Segundo os autores a técnica baseada na reatância minimiza os efeitos resistivos da falta na exatidão dos resultados para a localização da falta. Por sua vez a segunda abordagem é baseada na hipótese que estão disponíveis para medição apenas as correntes de falta. Isso faz com que esta abordagem tenha uma precisão menor que a hipótese anterior. Neste segundo caso a resistência de falta deve ser considerada na estimativa da localização da falta. A resistência de falta é estimada pelos valores da corrente no momento da falta e no comprimento do arco elétrico que se forma entre as fases ou entre a fase e um ponto neutro do alimentados de distribuição. Mas, devido à dificuldade de se estimar o comprimento do arco, o erro presente no cálculo do valor da resistência, influencia na precisão deste método.

Zhu et al. (1997) apresentaram uma técnica que se baseia na análise da rede e de seus componentes. Esta técnica se baseia na integração das informações registradas pelas faltas tendo o conhecimento da topologia e características operacionais da rede de distribuição. Em conjunto com todos os dados armazenados de perturbações ocorridas na rede, este algoritmo proposto se baseia na análise da falha em regime permanente.

Em um alimentador do tipo radial e ramificado surgem múltiplas possibilidades de pontos onde a falta possa ter ocorrido. O algoritmo foi adaptado a estimar uma região de falta através de modelos e da análise probabilística. O possível ponto de falta apresentado foi obtido através de um processo interativo com um conjunto de modelos de faltas baseados no casamento de formas de onda.

O trabalho de Lee et al. (2004) foi uma continuação do método proposto por Zhu (1997) onde eles se baseiam nos fasores da frequência fundamental de correntes e tensões medidos no

início do alimentador. No entanto eles não fazem uma análise probabilística da localização da falta. O algoritmo também desconsidera o efeito capacitivo da linha.

Moreto (2005) apresentou uma metodologia de localização de faltas em sistemas de distribuição, capaz de obter a estimativa precisa da localização tanto de faltas sólidas e lineares quanto de faltas de alta impedância. Neste estudo ele propôs solucionar o problema através de redes neurais. Neste esquema são processados dados oscilográficos pré e pós-falta. Estes dados são um conjunto de características extraídas dos sinais de tensão e corrente do sistema. Este conjunto de características é processado pelas redes neurais artificiais tendo como saída o valor relativo da distância da falta.

Oliveira et al. (2008) trazem uma proposta de identificação de faltas através de ondas viajantes. O método estima a região de falta de um sistema utilizando a teoria da autocorrelação e ondas viajantes.

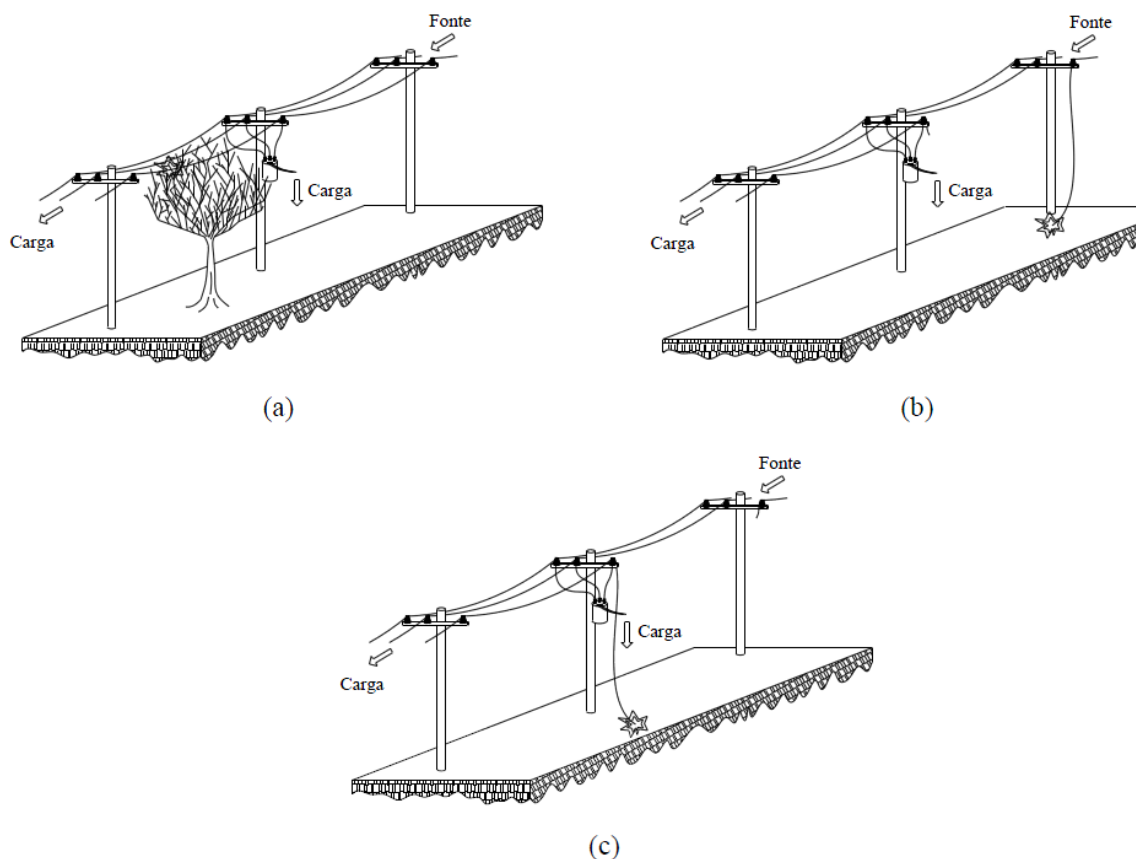
Salim (2008) apresenta uma extensão do método de Lee et al. (2004) que considera todos os tipos de faltas. Outra diferença desta proposta é que ela realiza um fluxo de potência no momento da pré-falta, estimando uma impedância em cada nó utilizando as correntes e tensões de cada terminal. Em outra contribuição de (Salim, 2009) leva em consideração o fato de que carga varia ao longo do dia, e este dado é necessário para o fluxo de potência, a proposta foi definir duas impedâncias equivalentes vistas a partir do secundário do transformador na subestação. Sendo a primeira impedância do sistema padrão, estabelecida através de cargas padrão, vistas pelo transformador da subestação. A segunda impedância é medida instantes antes da falta, apresentando o estado da rede instantes antes da ocorrência desta. A diferença destas duas impedâncias permite calcular a taxa de variação da carga, que é utilizada para estimar o fluxo de potência no momento da falta.

O método apresentado também por Salim (2009) considera o efeito capacitivo da rede de distribuição. Assim a expressão dos fasores de corrente e tensão na subestação com a corrente de falta, impedância de falta e distância, são polinômios de segunda ordem em relação à distância. A equação pode ser separada em duas partes, parte real e parte imaginária, mesmo considerando ou não o efeito capacitivo. Dessa forma poderá ser resolvida de forma simples a resistência da falta bem como a distância dela. Em casos que nesta equação encontramos uma parte indutiva ou

capacitiva além da parte resistiva não é possível solucionar da forma apresentada anteriormente. Em questão, todos os casos que são realizadas medições apenas na subestação, é necessário desenvolver um processo iterativo para encontrar a corrente de falta. Somente em casos em que a carga pode ser considerada uma impedância constante, é possível desprezar o efeito capacitivo da rede de distribuição.

Iurinic (2016) apresentou em sua proposta uma formulação para estimar a distância da falta nas linhas de distribuição empregando o método de estimação por mínimos quadrados. Sendo desenvolvidos dois modelos, um no domínio do tempo e outro de faltas de alta impedância composto por diodos antiparalelos. A pesquisa levou em consideração as seguintes situações que resultam em uma alta probabilidade de serem submetidos a falhas.

Figura 2 – Causas típicas de faltas



Fonte: (Iurinic, 2016)

a) Contato direto de um galho ou arbusto em um condutor energizado. Neste caso existe uma impedância acidental que pode ocorrer entre uma ou mais fases a terra, conforme apresentado na Figura 2a.

b) Rompimento do condutor no lado da fonte e contato direto com o solo. A corrente é limitada pela impedância de falta, conforme apresentado na Figura 2b.

c) Rompimento do condutor no lado da carga e contato direto com o solo. A corrente vai depender da indução entre fase faltosa e a corrente nas outras fases ou do carregamento de um transformador à jusante, conforme apresentado na Figura 2c.

## 2.4 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi demonstrado as faltas e suas naturezas, demonstrando as características dos diversos tipos de faltas e como elas ocorrem nas redes de energia elétrica. Também foi apresentado um estudo das técnicas já elaboradas para a localização de faltas. As técnicas estudadas estão relacionadas diretamente com faltas de alta impedância, que será o foco deste trabalho.

As faltas de alta impedância possuem um destaque importante nos estudos das universidades. Pelo fato de mesmo com alta tecnologia, sua localização de forma simples ainda não é possível. Estudos apresentam redes neurais e inteligência artificial para solução deste problema. Mas estas tecnologias ainda são caras e de difícil implantação nas redes existentes.



### 3 REDES SMART GRID

Neste capítulo está relatado os conceitos das redes *smart grid*, bem como sua configuração e tecnologias empregadas. Esta integração de tecnologias surge a partir das preocupações de aumentar a eficiência de operação e monitoramento das redes elétricas.

#### 3.1 CONCEITOS BÁSICOS

O sistema elétrico opera em constante evolução, tornando-se a cada passo um sistema independente e auto ajustável. Porém, isto resulta em vastas pesquisas no intuito de encontrar caminhos simples para problemas complexos. As tecnologias empregadas no sistema energético possibilitam tornar o sistema significativamente mais eficiente. Agregando as gerações distribuídas através de fontes renováveis como energia solar e eólica. O sistema assim, poderá informar em tempo real através de medidores inteligentes a geração disponível, podendo então desligar temporariamente usinas poluentes.

A inserção de vasta tecnologia para o monitoramento e o gerenciamento dos sistemas elétricos está sendo denominado como *smart grid*. Este conceito se refere às redes que possuem técnicas de telecomunicação e automação que integra os seus equipamentos. Segundo Jonhson (2010) a aplicação das tecnologias de informática, telecomunicações e automação na área de transmissão e distribuição gera menor impacto ambiental.

Conforme a *International Energy Agency* (IEA, 2011), a representação do conceito *smart grid* é dada como sendo o monitoramento e gerenciamento de sistemas elétricos, através de tecnologias digitais, empregadas na observação do transporte e uso desta energia, perante uma variável de usuários (demandas) e gerações.

### 3.2 IMPLEMENTAÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Redes convencionais de transmissão e distribuição trabalham em um único fluxo de potência, este no sentido da geração ao consumidor (carga). Estas redes apresentam vulnerabilidade a falhas, podendo ocorrer interrupções no fornecimento de energia elétrica. Sloomweg e Enexis (2009) descrevem em seu trabalho a necessidade que as redes apresentam de terem que injetar continuamente potência, por desconhecerem a real demanda dos clientes ligados ao alimentador. Por estas demandas, empresas do setor de geração e distribuição estão migrando suas topologias de redes bidirecionais para redes multidirecionais. Assim, em muitos países a migração das tecnologias ocorre a partir de programas governamentais de apoio as indústrias de *smart grid* (JOHNSON, 2010).

LI, F. et al, (2010) relatam que para atender as exigências futuras os sistemas precisam se tornar mais confiáveis. Este, através da implementação de tecnologias no intuito de estabelecer uma comunicação eficiente e constante com os consumidores. Pois, a partir deste *feedback* poderá ocorrer a identificação das falhas bem como o gerenciamento em tempo real dos inúmeros equipamentos localizados no prolongar da rede. Tornando assim, o sistema eficiente, confiável e de qualidade.

As tecnologias empregadas resultam em inúmeras melhorias no sistema, possibilitando novos recursos a serem agregados para a identificação e diminuição da taxa de desperdício de energia. As redes existentes possuem um perfil mais estático e indireto, por começar pelo consumidor, onde este não possui informações do sistema que está conectado. Bem como, não participa de nenhuma forma na geração de energia elétrica. Já com redes *smart gris* este perfil se converte significativamente, onde o consumidor se torna agente ativo no sistema, dispondo de informações da rede e participando da geração.

Hicks (2012) descreve que a qualidade e a confiabilidade das redes existentes é muito limitada, por dispor de equipamentos eletromecânicos restritos para ações mais complexas. Já as redes *smart grid* dispõe de tecnologias que permitem operações mais avançadas, controlando o sistema em tempo real. Assim, sendo capaz de reparar o sistema com o mínimo de perda na geração e com o máximo se segurança. Assim definindo as ações das redes convencionais como não reativas e redes *smart grid* como proativas.

Nist (2012) apresenta uma infraestrutura dividida em 7 domínios, cada domínio e seus subdomínios abrangem os equipamentos e programas da *smart grid*. Nos domínios estão incluídos os dispositivos, sistemas ou softwares que tomam decisões e trocam informações necessárias entre si para executar os programas dos equipamentos eletrônicos como medidores inteligentes, geradores solares e sistemas de proteção e controle do fluxo de potência. Os programas são executados por um ou mais agentes localizados dentro de um domínio. Algumas das aplicações podem ser automação residencial, geração de energia solar e armazenamento de energia e gerenciamento de energia e fluxo de potência. Na Tabela 4 estão descritos de forma sucinta os sete domínios da *smart grid* mais detalhadamente.

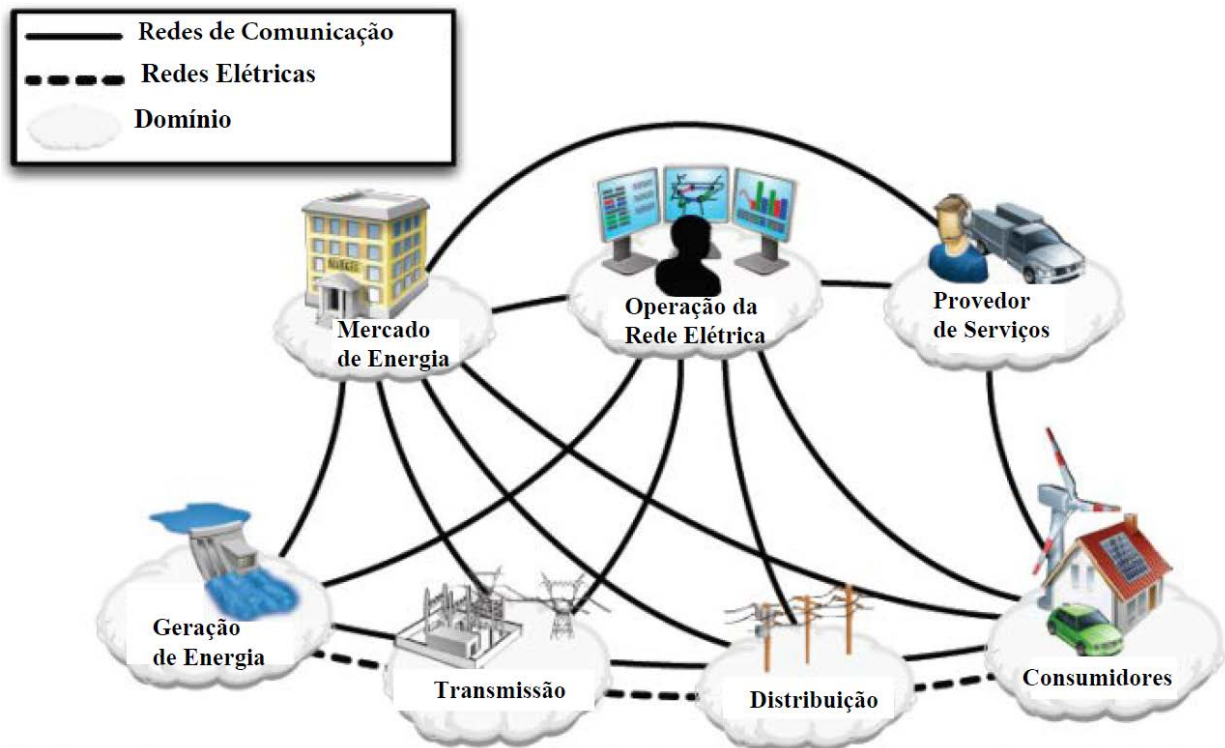
Tabela 4 – Domínios e agentes na infraestrutura *smart grid*

Consumidores	Usuário final da energia elétrica. Também pode gerar, armazenar e gerenciar o uso de energia.  Tradicionalmente, três tipos de clientes são discutidos, cada um com seu próprio domínio, sendo eles residencial, comercial e industrial.
Mercado de energia elétrica	Operadores e participantes no mercado de energia elétrica.
Provedores de serviço	Organizações que fornecem serviços para consumidores de energia elétrica.
Operador do sistema elétrico	Gerenciamento e controle da energia elétrica.
Geração de energia elétrica	Geração de energia elétrica em grande quantidade.  Também podendo armazenar energia para posterior distribuição.
Transmissão	Transporte de energia elétrica em longas distâncias.
Distribuição	Distribuição de energia elétrica para consumidor final.

Fonte: (Adaptado de NIST 2012)

Em geral um agente é um dispositivo, sistema ou programa de software que participa da *smart grid*. Os agentes têm a capacidade de tomar decisões e trocar informações com outros agentes. As organizações podem ter agentes em mais de um domínio. Assim, os agentes no mesmo domínio têm objetivos semelhantes. Para habilitar a funcionalidade da *smart grid*, os agentes de um domínio particular geralmente interagem com os agentes de outros domínios, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Interação entre agentes de diferentes domínios da *smart grid*.



Fonte: (Adaptado de NIST, 2012)

Cada um dos sete domínios da *smart grid* é um agrupamento de alto nível de organizações, indivíduos, sistemas, equipamentos, dispositivos ou outros agentes que têm objetivos semelhantes e que contam ou participam de tipos semelhantes de aplicações. As comunicações entre os agentes no mesmo domínio podem ter características e requisitos semelhantes. Os domínios podem conter subdomínios. Além disso, os domínios têm muita funcionalidade de sobreposição, como no caso dos domínios de transmissão e distribuição. A transmissão e a distribuição geralmente compartilham redes e, portanto, são representadas como

domínios sobrepostos. Além disso, domínios particulares também podem conter componentes de outros domínios (NIST, 2012).

No domínio da geração está concentrada a geração de energia elétrica em larga escala, em conjunto das fontes não renováveis e renováveis. Onde fontes de energia nuclear, gás e carvão são denominadas como não renováveis e eólica, biomassa e solar como energias renováveis. Este domínio em conjunto do domínio da distribuição, possivelmente possuem agentes em comum ao domínio da operações, como sistemas de gerenciamento da distribuição. No domínio da geração é possível também armazenar energia onde está é utilizada em momentos apropriados. No domínio da transmissão, ocorre o transporte da energia elétrica, através de extensas linhas ligando assim as centrais geradoras a distribuição. Esta interconexão ocorre por meio das subestações (RIBEIRO, 2010).

O domínio da distribuição conecta as subestações ao consumidor final. Neste ponto estão conectados os *smart meters* (medidores inteligentes) ao sistema de distribuição para que possam ser gerenciados e controlados. Os *smart meters* registram o consumo do cliente, fornecendo esta informação às concessionárias que então irão ajustar de maneira mais apropriada as operações. Bem como a partir do fluxo de energia o consumidor será capaz de controlar o consumo de energia elétrica, podendo escolher horários onde a tarifa é menor para ligar equipamentos elétricos que mais consomem. Neste domínio do consumo as redes bidirecionais também informam ao domínio da operação o fluxo de energia. Assim o operador da rede elétrica controla o fluxo de potência e supervisiona o status do sistema, tomando decisões nos processos de detecção e auto recuperação do sistema elétrico. No domínio do mercado ocorre a coordenação das empresas de distribuição de energia. Certificando-se que estas empresas estão coordenadas em um ambiente competitivo, bem como controla a troca de energia entre subestação e consumidor final. E por fim, o domínio do provedor de serviços controla e registra os serviços e operações, dispondo estas informações ao consumidor e outros domínios através de um portal web (RIBEIRO, 2010).

Nist (2012), relata que a transição para *smart grid* introduz novas considerações regulatórias, que podem transcender os limites jurisdicionais e exigir maior coordenação entre os legisladores e reguladores federais, estaduais e locais. O modelo conceitual deve ser consistente

com a estrutura regulatória e apoiar sua evolução ao longo do tempo. Os padrões e protocolos identificados na estrutura também devem estar alinhados com os objetivos e responsabilidades regulatórias existentes e emergentes. O modelo conceitual pretende ser uma ferramenta útil para os reguladores em todos os níveis avaliarem a melhor maneira de alcançar objetivos de políticas públicas que, juntamente com os objetivos de negócios, motivem investimentos na modernização da infraestrutura de energia elétrica do país e na construção de uma economia de energia limpa. Tais regulamentações visam assegurar que as tarifas elétricas sejam justas e razoáveis e que a segurança, confiabilidade, segurança, privacidade e outros requisitos de política pública sejam atendidos.

Para inserir plenamente os objetivos e tecnologias da rede *smart grid* é fundamental melhorar amplamente o controle e o gerenciamento da geração, distribuição e consumo da energia elétrica. Assim, o estado da interconectividade da rede de informações deve ser aprimorado para que as informações possam fluir com segurança entre os vários agentes (dispositivos, sistemas ou software). Dado que a *smart grid* não será apenas um sistema de sistemas e subsistemas, mas também uma rede de redes de informação, é necessária uma análise completa dos requisitos de rede e comunicações para cada sub-rede. Essa análise deve diferenciar entre os requisitos pertinentes a diferentes aplicativos nos agentes e domínios da *smart grid*. Um dos componentes dessa análise é identificar as restrições de segurança e os problemas associados a cada interface de rede e o nível de impacto (baixo, moderado ou alto) de um comprometimento de segurança de confidencialidade, integridade e disponibilidade. Ou seja, muitos sistemas possuem limites de propriedade e gerenciamento, sendo todos interconectados entre os interessados, bem como entre os dispositivos inteligentes (NIST, 2012).

### 3.3 MEDIDORES INTELIGENTES

O medidor inteligente é um medidor de energia avançado que mede o consumo de energia elétrica proporcionando um conjunto vasto de informações em comparação com um medidor de energia convencional. A implementação de medidores inteligentes na rede elétrica proporciona uma variedade de aplicações e vantagens dependendo das características que a situação exige.

Soma, Lingfeng e Vijay (2011) apresentam os medidores inteligentes como equipamentos que medem o consumo de energia de um consumidor e fornecem informações para a concessionária. Além de poder monitorar a energia em tempo real, as informações podem incluir os valores de tensão, ângulo de fase e a frequência bem como inúmeros outros parâmetros mensuráveis. A capacidade de medidores inteligentes se comunicarem de forma bidirecional permite coletar informações sobre a energia gerada pelo cliente ( no caso de geração distribuída por exemplo). Assim, um sistema de medidores inteligentes, se comunicando uns com outros ao seu alcance se caracterizam como uma infraestrutura de comunicação. Dessa forma eles podem medir o consumo de eletricidade a partir da rede, apoiar fontes de geração descentralizadas e energia de dispositivos de armazenamento, e faturar do cliente apenas a energia consumida da concessionária, enquanto a energia consumida das fontes de geração ou dispositivos de armazenamento pertencentes a micro rede não são faturados. Medidores inteligentes podem ser utilizados para monitorar e também para controlar todos os eletrodomésticos e dispositivos nas instalações do cliente, limitando o máximo de consumo, assim como coletar informações e diagnósticos da rede de distribuição, participando diretamente do gerenciamento da energia elétrica.

O Nist (2012) identificou a necessidade de um padrão de capacidade de atualização do medidor como alta prioridade. O objetivo era definir requisitos para a capacidade de atualização do firmware do medidor inteligente no contexto de um sistema AMI (infraestrutura avançada de medição) para os interessados do setor, como reguladores, concessionárias e fornecedores. De fato, implantação de medidores inteligentes precisa de uma rede de comunicação que satisfaça os padrões de segurança de comunicação de rede inteligente. Além disso, muitas concessionárias querem a garantia de que o sistema selecionado permita a evolução e o crescimento conforme os padrões e normas definidas. Assim, para gerenciar mudanças em um sistema dinâmico, é essencial poder atualizar o firmware, com os medidores em campo, sem substituir o equipamento ou “transportar uma estação” para atualizar manualmente o firmware do medidor. O recurso de download remoto, prática comum hoje em dia em muitos dispositivos de computação, é uma tecnologia que permitirá que certas características do medidor sejam alteradas conforme a necessidade.

O gerenciamento eficiente da rede pode ser uma solução alternativa em vez de renovar a rede existente. Mas, em vista das vantagens dos aprimoramentos técnicos na capacidade de operação, a integração da rede inteligente permanece como solução valiosa na gestão. No entanto, o projeto, implantação e manutenção do medidor inteligente envolve muitos problemas e desafios. Inicialmente, o processo de substituição dos medidores de energia existentes por um sistema de medidores inteligentes será um desafio para as empresas de serviços públicos. Falta de infraestrutura adequada para sincronizar esta nova tecnologia com o sistema existentes pode interromper a introdução de tecnologias mais avançadas. Embora vários dispositivos estejam integrados com o sistema de medição inteligente, eles podem ser usados em sua extensão máxima apenas quando todos os aparelhos e dispositivos na distribuição estiverem interligados na rede de comunicação. A integração dos dispositivos se torna ainda mais complicada com um número crescente de consumidores. Assim como uma rede de comunicação se torna basicamente ineficiente em locais montanhosos e de difícil acesso terrestre (SOMA, LINGFENG E VIJAY, 2011).

### 3.4 CONCLUSÕES

Sistemas se tornarão a cada dia mais autônomos e desenvolvidos tecnologicamente, resultado da vasta inserção de tecnologia. As redes *Smart Grid* são apresentadas como desafios de implementação. No entanto quando as tecnologias estiverem alinhadas, o sistema se tornara mais seguro e confiável. Os *Smart Meters* terão um papel fundamental nessa evolução, pois para desenvolver soluções é necessário possuir dados reais do sistema em destaque. A proposta de novas funcionalidades nos medidores é essencial para a criação de novas funcionalidades. A inclusão de funcionalidades específicas, como de obter o fator de desequilíbrio das tensões, ajudaria na análise de outros fatores como harmônicos ou até mesmo no caso das faltas de alta impedância.

Pode-se afirmar que o primeiro passo já foi dado em direção as redes *Smart Grid*, programas de pesquisas através de universidades e instituições particulares, vem desenvolvendo soluções mais eficientes, simples e seguras.



## 4 SIMULAÇÕES DO SISTEMA

Neste capítulo estão apresentados os conceitos do software utilizado, para simulação da rede de distribuição. Assim como a metodologia proposta para a identificação e localização das faltas de alta impedância.

### 4.1 CONCEITO BÁSICO DO SOFTWARE UTILIZADO

Para a perfeita compreensão do sistema proposto, foram desenvolvidas simulações na plataforma MATLAB SIMULINK utilizando a biblioteca *SimPowerSystems*.

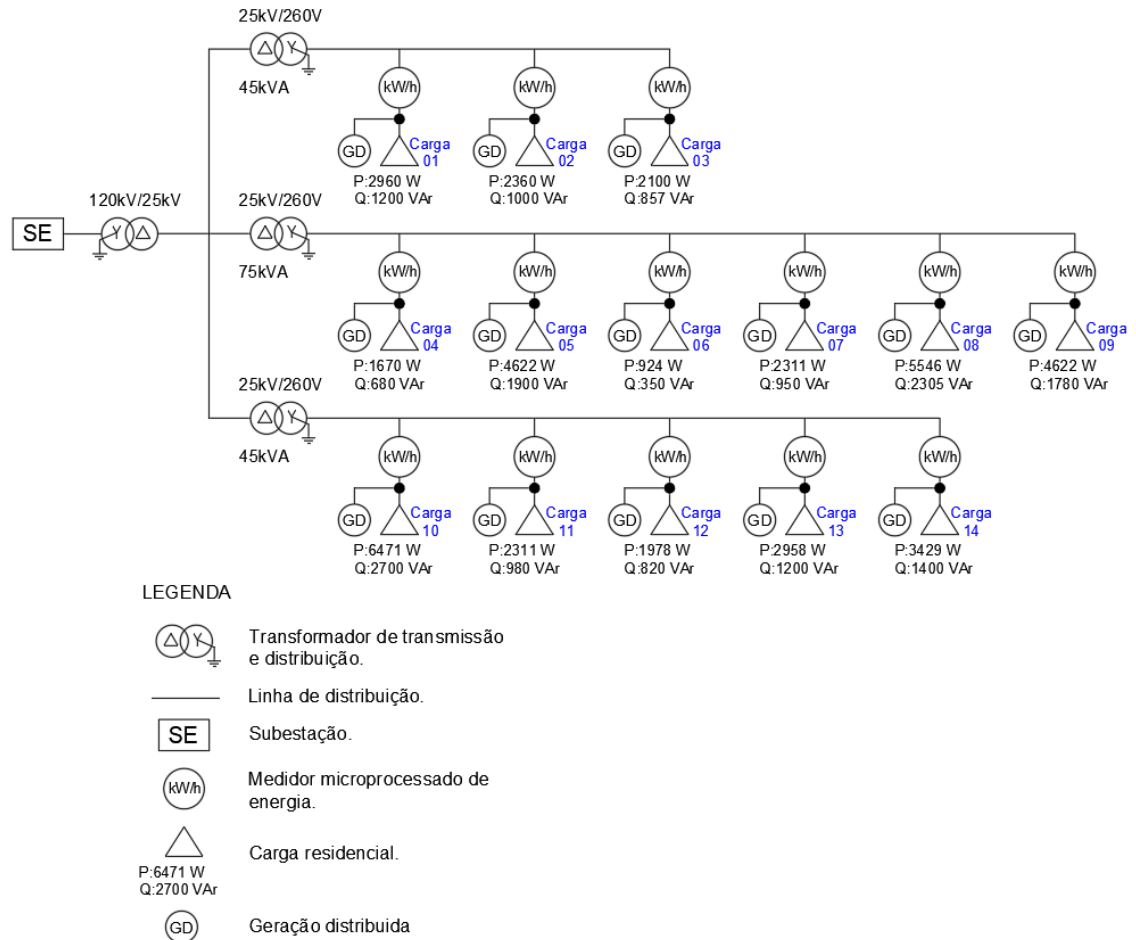
O *Simulink* é um pacote de software gráfico para modelagem, simulação e análise dinâmica de sistemas. Suportando sistemas lineares e não lineares, modelados em tempo contínuo, tempo discreto ou híbrido de ambos. Para modelagem de diagramas de blocos o *Simulink* oferece uma interface gráfica demonstrando os modelos personalizáveis que podem ser facilmente construídos e editados.

O *Simulink* inclui uma abrangente biblioteca de blocos, fontes lineares e não-lineares. Também é possível encontrar exemplos completos de sistema para simulação e análise.

### 4.2 APRESENTAÇÃO DA REDE PROPOSTA

Para o desenvolvimento deste estudo proposto, será apresentada uma rede fictícia simples, desenvolvida a partir de um exemplo de geração fotovoltaica do *Simulink*, por este possuir blocos e exemplos já modelados e de fácil entendimento. As tensões trifásicas do primário e secundário são respectivamente 25kV/260V. A rede é constituída de condutores protegidos 120mm<sup>2</sup> no primário e cabo multiplexado 50mm<sup>2</sup> e 70mm<sup>2</sup> no lado secundário. Os transformadores possuem potência de 45kVA e 75kVA, com conexão delta no primário e estrela solidamente aterrado no secundário. O esquemático está apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Esquemático do alimentador proposto



Fonte: (Autor, 2018)

Na análise está sendo proposta que cada consumidor possui uma geração distribuída padrão de 22kWp. Este sistema é um sistema fotovoltaico pronto do próprio *Simulink*. Assim em casos da carga não consumir a potência gerada pelo sistema, o remanescente será injetado na rede.

As cargas foram dimensionadas para residências de pequeno porte em momentos ociosos do dia. Assim a potência instantânea consumida é relativamente baixa. O sistema foi dimensionado desta forma para verificar o comportamento em momentos que a geração distribuída gera uma potência igual a consumida pela carga. Os valores das cargas dos consumidores está apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores das cargas do sistema

Carga	Potência Ativa W	Potência Reativa Var
Carga 01	2960	1200
Carga 02	2360	1000
Carga 03	2100	857
Carga 04	1670	680
Carga 05	4622	1900
Carga 06	924	350
Carga 07	2311	950
Carga 08	5546	2305
Carga 09	4622	1780
Carga 10	6471	2700
Carga 11	2311	980
Carga 12	1978	820
Carga 13	2958	1200
Carga 14	3429	1400

Fonte: (Autor, 2018)

Todas as cargas são trifásicas ligadas em estrela aterrado, tensão de linha 260V. O sistema está dimensionado desta forma para ser compatível com a rede proposta pelo SIMULINK.

#### 4.3 MÉTODO PROPOSTO PARA LOCALIZAÇÃO DAS FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

Para a localização das faltas de alta impedância será utilizado o método CIGRÉ (*Congress Internationale des Grand Réseaux Électriques a Haute Tension*). Este método relaciona grandezas dos módulos das tensões de linha para obter o fator de desequilíbrio do sistema (Teodoro, 2005).

$$K(\%) = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6 * \beta}}{1 + \sqrt{3 - 6 * \beta}}} \quad 4.1$$

Sendo

---

Desenvolvimento de um algoritmo para a detecção e localização de faltas de alta impedância em alimentadores inteligentes de distribuição.

$$\beta = \frac{V_{AB}^4 + V_{BC}^4 + V_{CA}^4}{(V_{AB}^2 + V_{BC}^2 + V_{CA}^2)^2} \quad 4.2$$

Assim:

$K(\%)$  – Valor percentual do fator de desequilíbrio.

$V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  e  $V_{CA}$  representam respectivamente os módulos das tensões de linhas.

O fator desequilíbrio é característico da rede e das cargas conectadas. É necessário levar em consideração o tempo de fechamento de elos fusíveis, religadores e outros equipamentos que possam interferir na identificação da falta.

A identificação de uma falta de alta impedância se fundamenta no fator de desequilíbrio das tensões calculado no medidor inteligente.

#### 4.4 CONDIÇÕES DE TESTE

No primeiro caso o sistema se comportará como uma rede convencional, tendo apenas um sentido de fluxo de potência, sendo no sentido da geração para a carga.

Na primeira situação de teste pretende-se determinar o fator desequilíbrio para uma rede convencional. Neste caso, todas as cargas interligadas estão equilibradas. A seguir é introduzido uma falta de alta impedância na fase A do primário do alimentador.

Já no segundo cenário está inserida a micro geração das residências. Da mesma forma esta proposta faz a análise do sistema sem faltas de alta impedância, determinando o fator desequilíbrio. E, posteriormente, a análise é efetuada com o rompimento do condutor da rede primária.

#### 4.5 ANÁLISE DO SISTEMA PROPOSTO

Conforme mencionado, primeiramente será analisado a falta de alta impedância para uma rede convencional, que possui único sentido de fluxo de potência conforme Figura 5.



Tabela 6 – Tensões RMS carga 01 rede convencional

Tempo	Vab	Vbc	Vca	beta	k (%)
0,1	258,64	258,64	258,64	0,33	0,00
0,2	258,64	258,64	258,64	0,33	0,00
0,3	258,64	258,64	258,64	0,33	0,00
0,4	258,64	258,64	258,64	0,33	0,00
0,5	258,64	258,64	258,64	0,33	0,00
0,6	258,64	258,64	258,64	0,33	0,00
0,7	258,64	258,64	258,64	0,33	0,00
0,8	258,64	258,64	258,64	0,33	0,00
0,9	258,64	258,64	258,64	0,33	0,00
1	258,64	258,64	258,64	0,33	0,00

Fonte: (Autor, 2018)

Conforme apresentado o sistema é totalmente equilibrado, assim o fator de desequilíbrio fica em zero, este valor é igual para todas as cargas do sistema.

A próxima situação de análise aborda o rompimento do cabo energizado, ocorrendo uma falta de fase a jusante do ponto. O rompimento do condutor ocorre quando a rede está totalmente equilibrada no tempo de 0,6 segundos. Desta maneira, os valores apresentados pelo desequilíbrio são de integral consequência da falta. Os valores estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Tensões RMS carga 01 rede convencional com falta

Tempo	Vab	Vbc	Vca	beta	k (%)
0,1	258,52	258,53	258,53	0,33	0,00
0,2	258,52	258,53	258,53	0,33	0,00
0,3	258,52	258,53	258,53	0,33	0,00
0,4	258,52	258,53	258,53	0,33	0,00
0,5	258,52	258,53	258,53	0,33	0,00
0,6	258,52	258,53	258,53	0,33	0,00
0,7	229,09	219,40	27,13	0,49	82,17
0,8	229,09	219,40	27,08	0,49	82,20
0,9	229,08	219,40	27,06	0,49	82,22
1	229,08	219,40	27,04	0,49	82,23

Fonte: (Autor, 2018)

O sistema é totalmente equilibrado até o instante do rompimento do condutor. Sendo assim, o desequilíbrio apresentado é de total consequência da falta. Este desequilíbrio de tensão é

muito mais elevado que desequilíbrios provenientes de cargas desequilibradas que estariam conectadas ao sistema.

A falta de fase afeta apenas cargas a jusante do ponto de rompimento do condutor. Para outras cargas o fator desequilíbrio continua em zero conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Tensões RMS carga 4 rede convencional com falta

Tempo	Vab	Vbc	Vca	beta	k (%)
0,1	257,82	257,82	257,82	0,33	0,00
0,2	257,82	257,82	257,82	0,33	0,00
0,3	257,82	257,82	257,82	0,33	0,00
0,4	257,82	257,82	257,82	0,33	0,00
0,5	257,82	257,82	257,82	0,33	0,00
0,6	257,82	257,82	257,82	0,33	0,00
0,7	257,83	257,82	257,84	0,33	0,00
0,8	257,83	257,82	257,84	0,33	0,00
0,9	257,83	257,82	257,84	0,33	0,00
1	257,83	257,82	257,84	0,33	0,00

Fonte: (Autor, 2018)

Para uma rede convencional o fator de desequilíbrio no momento da falta é elevado, e de fácil identificação. Isso se dá pelo fato de existir apenas um fluxo de potência na rede, no momento que este fluxo de geração para carga é interrompido os níveis de tensão se alteram.

No próximo caso foi inserida a geração distribuída, onde cada consumidor possui uma geração fotovoltaica ligada em paralelo à carga conforme Figura 4. A geração está interligada a jusante do medidor eletrônico, onde ocorre a leitura das tensões de linha. No momento que a carga do consumidor não consumir a potência gerada pela micro usina, esta potência deverá ser injetada na rede.

Todas as gerações possuem a mesma capacidade de potência, alterando apenas o consumo da carga. Neste caso os consumidores que possuem uma carga mais baixa injetarão mais potência na rede. Da mesma forma que consumidores que possuem uma carga mais alta, irão injetar menos potência na rede. O rompimento do condutor está apresentado na Figura 6.





Tabela 9 – Potência geração fotovoltaica kWp

Tempo	Carga 01	Carga 02	Carga 03
0,1	0,00	0,00	0,00
0,2	0,00	0,00	0,00
0,3	0,65	0,66	0,65
0,4	3,09	3,09	3,09
0,5	3,09	3,08	3,08
0,6	3,09	3,09	3,09
0,7	3,35	3,35	3,35
0,8	3,63	3,63	3,63
0,9	3,92	3,92	3,92
1	4,21	4,21	4,21
1,1	5,75	5,75	5,75
1,2	7,48	7,48	7,48
1,3	9,21	9,20	9,21
1,4	10,90	10,98	10,99
1,5	12,71	12,69	12,70
1,6	14,52	14,52	14,49
1,7	16,30	16,30	16,30
1,8	18,07	18,08	18,08
1,9	19,86	19,86	19,87
2	21,64	21,65	21,66

Fonte: (Autor, 2018)

O dimensionamento da geração possui o intuito de apresentar o comportamento do sistema para casos como nos momentos que a geração se equivale a potência consumida pela carga. Assim como para o instante que a potência gerada é superior, e o remanescente injetado na rede.

Conforme desenvolvido na primeira simulação, será verificado o comportamento normal do sistema. Assim apresentando o fator de equilíbrio para a rede em regime permanente, os valores são iguais para todas as cargas conectadas na rede do sistema simulado. Os valores estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Tensões RMS carga 01 com geração

Tempo	Vab	Vbc	Vca	beta	k (%)
0,1	258,56	258,53	258,54	0,33	0,00
0,2	252,01	252,18	252,67	0,33	0,00
0,3	258,54	258,55	258,53	0,33	0,00
0,4	258,58	258,57	258,58	0,33	0,00
0,5	258,56	258,53	258,54	0,33	0,00
0,6	258,56	258,56	258,55	0,33	0,00
0,7	258,57	258,56	258,57	0,33	0,00
0,8	258,58	258,59	258,59	0,33	0,00
0,9	258,59	258,60	258,60	0,33	0,00
1	258,60	258,62	258,61	0,33	0,00

Fonte: (Autor, 2018)

O sistema é totalmente equilibrado pelo fato da geração distribuída também ser trifásica. Assim, injetando a mesma potência nas fases.

Mesmo o sistema de geração aumentando a potência injetada na rede, o sistema permanece totalmente equilibrado.

Para a situação a seguir, está sendo considerado o rompimento do condutor da fase A, tendo a geração distribuída ligada na carga da rede de distribuição. O sistema de geração começa a injetar potência antes da falta ocorrer.

Os valores das tensões de linha RMS e fator de desequilíbrio podem ser visualizadas na Tabela 11 na qual após a falta de alta impedância apresenta baixo fator de desequilíbrio das tensões. Isto ocorre pelo fato do sistema de geração fotovoltaico ter capacidade de suprir a demanda da carga. Conforme o sistema de geração aumenta sua potência, o fator de desequilíbrio também aumenta. No entanto, mesmo após a geração ultrapassar o dobro da demanda exigida pela carga o desequilíbrio não aumenta eficientemente para ser distinto de outros desequilíbrios.

Tabela 11 – Tensões RMS carga 01 rede com geração e falta

Tempo	Vab	Vbc	Vca	beta	k (%)
0,1	258,56	258,53	258,54	0,33	0,00
0,2	252,01	252,18	252,67	0,33	0,00
0,3	258,54	258,55	258,53	0,33	0,00
0,4	258,58	258,57	258,58	0,33	0,00
0,5	258,56	258,53	258,54	0,33	0,00
0,6	258,56	258,56	258,55	0,33	0,00
0,7	265,63	259,58	278,65	0,33	4,23
0,8	264,35	261,91	280,48	0,33	4,38
0,9	263,14	264,25	282,58	0,33	4,73
1	261,90	266,62	284,69	0,34	5,19
1,1	255,15	279,93	296,87	0,34	8,71
1,2	254,95	285,48	306,03	0,34	10,49
1,3	250,47	290,73	307,13	0,34	11,76
1,4	254,31	292,03	315,95	0,34	12,44
1,5	254,85	293,15	317,82	0,34	12,65
1,6	271,39	284,35	330,67	0,34	12,58
1,7	278,52	278,18	333,62	0,34	12,92
1,8	281,61	275,28	335,04	0,34	13,26
1,9	283,37	273,48	336,12	0,35	13,58
2	284,35	272,32	337,06	0,35	13,87

Fonte: (Autor, 2018)

No instante que ocorre o rompimento do condutor da rede primária, o sistema de geração alimenta a carga, apresentando um baixo valor de fator de desequilíbrio. No momento que a potência de geração aumenta, o fator de desequilíbrio também aumenta. No entanto este aumento no fator de desequilíbrio não é evidente de uma falta de alta impedância. Neste caso, esta característica se põe como grande desvantagem na identificação da falta no sistema.

Para as cargas que não estão a jusante da falta, o sistema possui comportamento normal, com o fator de desequilíbrio em zero. Este valor é igual para as cargas do 4 ao 14. Os valores da carga 4 são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Tensões RMS carga 04 rede com geração e falta

Tempo	Vab	Vbc	Vca	beta	k (%)
0,1	257,81	257,81	257,81	0,33	0,00
0,2	257,71	257,71	257,72	0,33	0,00
0,3	257,77	257,78	257,78	0,33	0,00
0,4	257,81	257,81	257,81	0,33	0,00
0,5	257,81	257,81	257,81	0,33	0,00
0,6	257,81	257,81	257,81	0,33	0,00
0,7	257,80	257,81	257,83	0,33	0,00
0,8	257,80	257,82	257,83	0,33	0,00
0,9	257,81	257,82	257,83	0,33	0,00
1	257,81	257,83	257,84	0,33	0,00
1,1	257,82	257,88	257,86	0,33	0,00
1,2	257,84	257,92	257,88	0,33	0,00
1,3	257,84	257,95	257,89	0,33	0,00
1,4	257,82	257,95	257,89	0,33	0,00
1,5	257,81	257,97	257,89	0,33	0,00
1,6	257,79	257,98	257,89	0,33	0,00
1,7	257,77	258,00	257,89	0,33	0,00
1,8	257,75	258,01	257,89	0,33	0,00
1,9	257,73	258,02	257,89	0,33	0,00
2	257,71	258,03	257,89	0,33	0,00

Fonte: (Autor, 2018)

A próxima análise aborda a desconexão do sistema fotovoltaico, observado que os inversores identifiquem e atuem quando ocorre uma anomalia na rede. No instante que ocorre a queda de energia de um condutor, todos os inversores a jusante do ponto de ruptura, imediatamente interrompem a injeção de potência.

Os valores das tensões de linha da carga 01 podem ser visualizadas na Tabela 13. O sistema após a falta apresenta um fator de desequilíbrio semelhante ao sistema convencional simulado. Este fator de desequilíbrio é de fácil identificação por ser mais elevado que desequilíbrios causados por cargas monofásicas ou desequilíbrio do alimentador.

Tabela 13 – Tensões RMS carga 01 rede com geração e desconexão do inversor

Tempo	Vab	Vbc	Vca	beta	k (%)
0,1	258,56	258,53	258,54	0,33	0,00
0,2	254,09	254,24	254,63	0,33	0,00
0,3	258,50	258,51	258,50	0,33	0,00
0,4	258,57	258,58	258,58	0,33	0,00
0,5	258,56	258,53	258,54	0,33	0,00
0,6	258,56	258,54	258,54	0,33	0,00
0,7	229,21	219,53	27,06	0,49	82,23
0,8	229,21	219,53	27,04	0,49	82,24
0,9	229,21	219,53	27,04	0,49	82,24
1	229,21	219,53	27,04	0,49	82,24
1,1	229,21	219,53	27,04	0,49	82,24
1,2	229,21	219,54	27,04	0,49	82,24
1,3	229,21	219,53	27,04	0,49	82,24
1,4	229,21	219,54	27,04	0,49	82,24
1,5	229,21	219,54	27,04	0,49	82,24
1,6	229,21	219,54	27,04	0,49	82,24
1,7	229,21	219,54	27,04	0,49	82,24
1,8	229,21	219,53	27,04	0,49	82,24
1,9	229,21	219,54	27,04	0,49	82,24
2	229,21	219,54	27,04	0,49	82,24

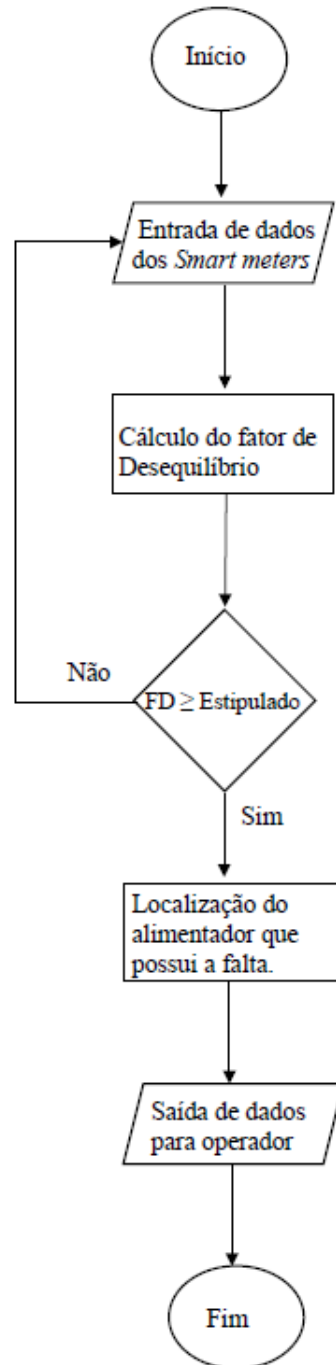
Fonte: (Autor, 2018)

#### 4.6 ALGORITMO PROPOSTO

Após análise do sistema, e compreensão do funcionamento está sendo proposto um algoritmo simples para localização das faltas de alta impedância.

Este algoritmo leva em consideração o fator de equilíbrio do sistema, as leituras são feitas nos medidores inteligentes, que registram os valores de tensão eficaz da linha. Após o registro das tensões, o algoritmo calcula o fator de equilíbrio no ponto, verifica se esta informação é maior ou menor que o fator de equilíbrio estipulado. Caso, este valor seja menor ele volta a registrar as tensões e refazer o cálculo. Se o algoritmo verifica medidores que apresentaram um fator de equilíbrio em comum ou maior que o estimado, ele localiza o possível ponto de ruptura do cabo. O fluxograma do algoritmo proposta está representado pela Figura 7.

Figura 7 – Fluxograma



Fonte: (Autor, 2018)

Todo o circuito é continuamente monitorado na relação de desequilíbrio de tensão, assim também é possível interagir diretamente no sistema se for preciso, caso identifique uma falta. Também é necessário identificar momentos que são efetuadas manobras de abertura de chaves

fusíveis ou chave faca no alimentador, para que não ocorram falsos positivos na identificação da falta.

Nos momentos que ocorrem faltas e a geração está injetando uma potência próxima da carga instalada é verificado um baixo fator de desequilíbrio estando entre apenas 4 e 8 %. Nestes casos o algoritmo não permite a correta identificação da condição de falta. Isto se deve ao fato que os circuitos com cargas monofásicas característicos também apresentam percentuais de desequilíbrio nesta faixa.

#### 4.7 CONCLUSÕES

O software utilizado teve um excelente desempenho na simulação da proposta apresentada. Foram utilizadas simulações já existentes nas bibliotecas do *Simulink* para a montagem da geração distribuída. O bloco da geração fotovoltaica apresentou características similares aos sistemas reais. E dessa forma o sistema como um todo obteve um comportamento similar aos sistemas existentes.

A metodologia de identificação de faltas apresentado, é de fácil aplicação no sistema proposta. As características do fator de desequilíbrio em redes convencionais, possui grande distinção de desequilíbrios causados por cargas monofásicas. Assim a aplicação do algoritmo poderia identificar corretamente as faltas.

Após ser inserido a geração distribuída o comportamento e características da rede proposta mudaram. O fluxo de potência interfere diretamente na análise da proteção. O sistema de geração possui a capacidade de controlar o fator desequilíbrio, mesmo no momento de rompimento de um condutor. O sistema apenas apresenta um fator de desequilíbrio considerável quando a geração ultrapassa o dobro da capacidade de consumo da carga. Isso se apresentou como uma grande desvantagem na detecção das faltas.

Observando que os inversores identifiquem a anomalia da rede e se desconectem dela, o fator de desequilíbrio tornou-se semelhante a rede convencional sendo assim de fácil identificação.

## 5 CONCLUSÃO

Conforme apresentado as faltas de alta impedância são de natureza bem específica, e suas características a tornam de difícil detecção, isto está relacionado ao fato das mesmas possuírem comportamento semelhante aos chamados eventos normais da rede. Mas a ruptura de condutores energizados possui grande potencial de perigo, podendo resultar até mesmo em vítimas fatais, e por isto este é um assunto preocupante.

A inclusão da geração distribuída nos consumidores, resulta em grandes desafios para as concessionárias, características dos circuitos se altera drasticamente, como sentido de fluxo de potência, correntes de curto circuito nos relés de proteção entre outros.

O intuito deste trabalho de conclusão de curso foi o de estudar e propor uma técnica de fácil aplicação nas concessionárias para localização de faltas de alta impedância em cenários de redes inteligentes. Como demonstrado, a técnica proposta permite uma boa precisão durante o funcionamento do sistema quando a rede inteligente não possuir um volume significativo de fluxo reverso em função de uma grande carga instalada de geração distribuída. No entanto, foi verificado uma limitação da técnica proposta. Se em algum momento a geração distribuída aproximar sua capacidade de potência próxima a carga total instalada, não é possível distinguir o evento de falta nem sua localização, pelo fato de apresentar um baixo percentual de desequilíbrio de tensão. Porém analisando a possibilidade dos inversores identificarem a anomalia na rede e se desconectar dela, o fator desequilíbrio se torna próximo a rede convencional sendo este de fácil identificação.

Levando em consideração que consumidores instalem uma geração para apenas suprir sua carga e este não se desconectar da rede de distribuição, os instantes em que o sistema esteja injetando uma potência baixa ou próxima de zero o fator desequilíbrio é significativo e de simples distinção. Porém, quando o sistema tender a um aumento na sua geração, se aproximando da demanda da carga, o fator desequilíbrio se torna menos perceptível, sendo difícil de distinguir de cargas desequilibradas.

A metodologia desenvolvida neste trabalho apresentou uma alternativa no processo de identificação das faltas de alta impedância. No entanto, a metodologia proposta apresenta



limitações claras que também forma apresentadas. Entre as possibilidades de trabalhos futuros o desenvolvimento de um sistema que possa identificar a potência injetada pela geração distribuída, diferenciando esta da potência consumida pela rede de distribuição, pode permitir a obtenção de um fator de desequilíbrio mais significativo da rede de distribuição. E assim, identificando corretamente as faltas de alta impedância em sistemas *Smart Grid*. Ainda o tema de faltas de alta impedância precisa ser estudado uma vez que os desafios para superar estes problemas são presentes e estão longe de terem uma solução definitiva.

Finalizando, todos os resultados obtidos ajudaram desenvolver a compreensão dos desafios que ainda estão por vir. Concessionárias terão que armazenar todas as informações para a tomada de decisão. Ter um perfil real da rede para identificação de anomalias, sistemas que executem operações em tempo real para melhor eficiência e segurança.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Muitos são os desafios a percorrer para automação das redes. Alguns assuntos para trabalhos futuros podem se destacar.

- Estudo dos harmônicos na geração distribuída.
- Desenvolver uma simulação de geração distribuída para uma rede 13,8/0,38 kV.
- Desenvolver um sistema que diferencie a potência injetada pela geração distribuída da potência da rede de distribuição encontrando o fator de desequilíbrio apenas da rede.

## REFERÊNCIAS

HICKS, C. **The Smart Grid: Where we are today and what the future holds**. ERB Institute – For Global Sustainable Enterprise, University of Michigan. 2012.

HOUAISS, A. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. Rio de Janeiro: Editora Objetiva Ltda., 2009.

IEA – International Energy Agency. HEFFNER, G. “**Smart Grid - Smart Customer Policy Needs**”. Workshop Report: Energy Efficiency Working Party: April, 2011.

IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. **High Impedance Fault Detection Technology**, WGD15 Report, 1996. Disponível em: <<http://www.pes-psrc.org>>. Acesso em: 09 maio 2018.

IURINIC, L. U. **Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: uma abordagem baseada na estimação de parâmetros associados a modelos no domínio do tempo**. 2016. 174 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Rio Grande do Sul, 2016.

JOHNSON, A. “**The History of the Smart Grid Evolution at Southern California Edison**” In: INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES (ISGT), 1. 2010. Gaithersburg.

KINDERMAN, G. **Curto – Circuito**. 2 ed. Ed. Sagra Luzzato, 1997.

LEE, S. J. et al. An intelligent and efficient fault location and diagnosis scheme for radial distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.19, n.2, p. 524–532, 2004. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=1278404&tag=1](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1278404&tag=1)>. Acesso em: 09 Abr. de 2018.

LEHTONEN, M., PETTISSALO, S. e ETULA, J. H. Calculational fault location for electrical distribution networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM MONITORING AND CONTROL, 3., 1991. **Processos IEEE IEEE**, 1991.p. 38–43. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=151748](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=151748)>. Acesso em: 09 Abr. de 2018.

- LI, F. et al. **“Smart Transmission Grid”** Vision and Framework. Smart Grid, IEEE Transactions on, vol. 1, n°. 2, 01 Ago. 2010, ISBN: 1949-3053.
- LOPES, H. C. **Análise da Propagação de Curtos-Circuitos no Alimentador AI-122 da Cidade de Porto Alegre**. Ijuí: Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2009.
- MASON, C. R. The Art and Science of Protective Relaying. New York: John Wiley & Sons Inc., 1956
- MORETO, M. **Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: uma metodologia baseada em redes neurais artificiais**. 2005. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Rio Grande do Sul, 2005.
- N. D. Tleis. **Power Systems Modelling and Fault Analysis – Theory and Practice**, Oxford : Elsevier Ltd., 2008.
- NAKAGOMI, R. M. **Proposição de um Sistema para Simulação de Faltas de Alta Impedância em Redes de Distribuição**. 2006. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- NIST. **“NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards”** National Institute of Standards and Technology (NIST). Release 2.0, 2012.
- OLIVEIRA, A. V. da C., et.al. **Simulação de faltas em relés de proteção utilizando o ATP**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 17., 2008, Olinda, Pernambuco. **Anais...** Olinda, 2008.
- RIBEIRO, L. (2010), **“Smart Grid”** , Universidade Federal do Rio de Janeiro, Grupo de Teleinformática e Automação. Disponível em: [http://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos\\_vf\\_2010\\_2/livia/index.html](http://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2010_2/livia/index.html). Acesso em: 2 Set. 2018.
- S. S. S. R. Depuru, L. Wang, V. Devabhaktuni, and N. Gudi, BSmart meters for power gridVChallenges, issues, advantages and status, [ in Proc. IEEE/PES Power Syst. Conf. Expo., 2011, DOI: 10.1109/PSCE.2011. 5772451.

SALIM, R. H. . **Novos Desenvolvimentos na Localização de Falhas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Fundamentada na Impedância**. 2008. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Automação e Instrumentação Eletro-eletrônica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SALIM, R. H. et al. Extended Fault-Location Formulation for Power Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [Piscataway], v.24, n.2, p.508-516, Apr. 2009.

SHORT, T. A. **Electric Power Distribution Handbook**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2003.

SLOOTWEG, H; ENEXIS, B. V. **“Smart Grid: The Future or Fantasy?”**. IET Seminar on Smart Metering 2009: Making it Happen (2009/12688) London, UK, 19 Fev. 2009, ISBN: 9781849190893.

Teodoro. R. G., 2005 **Metodologia para compensação de desequilíbrio em redes elétricas**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica de Ilha Solteira, SP.

ZHU, J., LUBKEMAN, D. L., GIRGIS. A. A. Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 12, n. 2, abr. 1997. p. 801–809. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=584379>>. Acesso em: 09 Abr. de 2018.