

CENTRO UNIVERSITÁRIO AUGUSTO MOTTA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

SISTEMA DE MEDIÇÃO DE BAIXO CUSTO PARA LOCALIZAÇÃO DE  
FALTA DE ENERGIA ELÉTRICA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Domingos Antonio Vale Brito

Rio de Janeiro  
DEZEMBRO/2017

CENTRO UNIVERSITÁRIO AUGUSTO MOTTA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

SISTEMA DE MEDIÇÃO DE BAIXO CUSTO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTA DE  
ENERGIA ELÉTRICA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Domingos Antonio Vale Brito

Trabalho acadêmico apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: André Luís da Silva Pinheiro

Rio de Janeiro  
DEZEMBRO/2017

CENTRO UNIVERSITÁRIO AUGUSTO MOTTA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

SISTEMA DE MEDIÇÃO DE BAIXO CUSTO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTA DE  
ENERGIA ELÉTRICA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Domingos Antonio Vale Brito

APROVADO EM: \_\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA:

\_\_\_\_\_  
André Luís da Silva Pinheiro, D.Sc. - Orientador

\_\_\_\_\_  
Geraldo Motta Azevedo Júnior, D.Sc.

\_\_\_\_\_  
Nelson Damieri Gomes, M.Sc.

Rio de Janeiro  
DEZEMBRO/2017

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho ao Senhor e Salvador Jesus Cristo,  
à minha esposa Rita de Cassia,  
a meus pais Antonio e Maria Domingas,  
meus irmãos Marco Antonio e Jarda Regina.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, porque se não fosse por seu intermédio nada disso seria possível.

Agradeço a minha amada esposa por sua compreensão, amor e por está sempre ao meu lado em todos os momentos.

Agradeço aos meus pais e meus irmãos por estarem ao meu lado sempre que precisei e por todo amor e respeito.

Aos meus amigos, colegas de classe e professores da UNISUAM pelo incentivo na conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador, professor Mestre a André Luís da Silva Pinheiro pela compreensão, confiança e apoio.

Em fim agradeço a todos que torceram para que este trabalho fosse concluído com sucesso.

## **EPIGRAFE**

“A gravidade explica os movimentos dos planetas,  
mas não pode explicar quem colocou os planetas em movimento.  
Deus governa todas as coisas e sabe tudo que é ou que pode ser feito”.

Isaac Newton (1643-1727)

Brito, Domingos Antonio Vale. **Sistema de Medição de Baixo Custo para Localização de Falta de Energia Elétrica em Redes de Distribuição**. 2017. 62p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro Universitário Augusto Motta, Rio de Janeiro, 2017.

## **RESUMO**

Este trabalho tem uma proposta descritiva de um sistema de medição de baixo custo voltado para a localização de faltas de energia elétrica em redes de distribuição, que possibilitará identificar e localizar as faltas de energia elétrica, bem como avaliar a qualidade da energia fornecida. Para esse fim, uma rede de sensores sem fio no padrão IEEE 802.15.4 que são utilizados para fornecimento dos dados de tensão e corrente de cada fase, que permitem através dessas informações, a possibilidade da identificação de um ramal sujeito à falta de energia elétrica, bem como o seu tipo.

A instalação de medidores nos pontos de ramificação da rede distribuição possibilitará que o ramal submetido à falta de energia elétrica possa ser localizado, diminuindo de modo considerável o período de desligamento não programado e os custos com a manutenção.

No Brasil o sistema de distribuição de energia elétrica está sujeito a fenômenos que podem trazer transtorno ao funcionamento e ocasionar falhas na distribuição de energia elétrica. Tais falhas podem acarretar prejuízos à concessionária e ao consumidor final. Com o objetivo de atenuá-las a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) estabelece metas a respeito da continuidade de energia elétrica, e em caso de violação, as distribuidoras sofrem sanções penais e a perda de confiança por parte do consumidor final.

Existem trabalhos que propõem técnicas específicas para a identificação e localização das faltas de energia em sistemas elétricos, no entanto, boa parte delas foi desenvolvida com o objetivo de atuar em redes de transmissão com pouco grau de complexidade em ramificação.

Quando se trata de redes bastante ramificadas e extensas, cujas características principais são inerentes as redes de distribuição elétrica, tais métodos não fornecem grande desempenho no que diz respeito à confiabilidade e segurança em termos de detecção, fazendo com que o trabalho de localização das faltas de energia elétrica fique mais difícil.

**Palavras – chaves:** Identificação de Faltas, Localização de Faltas, Monitoração de Alimentadores Aéreos, Redes de sensores sem fio, Padrão IEEE 802.15.4. e ZigBee.

Brito, Domingos Antonio Vale Brito. **Low-Cost Metering System for Locating Power Outages in Distribution Networks**. 2017. 62 p Monograph (Graduation in Electrical Engineering) – Centro Universitário Augusto Motta, Rio de Janeiro, 2017.

## **ABSTRACT**

This work has a descriptive proposal of a low cost measurement system for the location of electric Power faults in distribution networks, which Will make it possible to identify and locate the electric Power shortages, as well as avaluate the quality of the energy supplied. For this purpose, a network of wireless sensors in the IEEE 802.15.4 standard that are used to supply the voltage and current data of each phase, which allows, through this information, the possibility of identifying a branch subject to a lack of electric energy, as well as your kind.

The installation of meters at the branch points of the network may cause the branch under power failure to be located, considerably reducing the period of unplanned shutdown and maintenance costs.

In Brazil, the electricity distribution system is subject to phenomena that can cause disruption to the operation and cause failures in the distribution of electric energy. Such failures can cause losses to the concessionaire and to the final consumer. In order to alleviate them, ANEEL (National Energy Design Agency) establishes goals regarding the continuity of eletric energy, and in case of infringement, the distributors are subject to criminal penalties and the loss of confidence on the part of the final consumer.

There are works that propose specific techniques for the identification and location of Power faults in electrical systems, however, a good part of them was developed with the objective of acting in transmission networks with little degree of complexity in branching.

When it comes to fairly branching and extensive networks whose main characteristics are inherent in electrical distribution networks, such methods do not provide great performance with regard to reliability and safety in terms of detection, making the work of locating Power outages more difficult.

**Keywords:** Fault Identification, Fault Location, Aerial Feeders Monitoring, Wireless Sensor Networks, IEEE 802.15.4 Padron, and Zigbee.



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Método proposto para a instalação dos medidores. ....                            | 5  |
| Figura 2 - Valores das compensações (2011 a 2017) .....                                     | 16 |
| Figura 3 – Identificador de falta instalado em condutores .....                             | 21 |
| Figura 4 – Sensor de Corrente Shunt .....   | 22 |
| Figura 5 – Transformador de tensão .....  | 23 |
| Figura 6 – Transformador de corrente .....  | 24 |
| Figura 7 – Sensor de Efeito Hall.....   | 25 |
| Figura 8 - Diagrama de uma Bobina de Rogowski, com espira de retorno.....                   | 26 |
| Figura 9 – Transformadores de potencial, em epóxi, classe 15KV. ....                        | 27 |
| Figura 10 – Transformador de Potencial Capacitivo .....                                     | 27 |
| Figura 11 – Topologias de trabalho do ZigBee. ....  | 30 |
| Figura 12 – Estrutura superframe sem GTS .....  | 34 |
| Figura 13 – Estrutura superframe com GTS.....   | 34 |
| Figura 14 - Geradores de interferências no sinal das LR-WPAN .....                          | 37 |
| Figura 15 - Topologias em redes primárias trifásicas.....                                   | 40 |
| Figura 16 – Diagrama em bloco do medidor de cada fase da rede de distribuição .....         | 40 |
| Figura 17 - Geração de energia até a distribuição ao consumidor final .....                 | 41 |
| Figura 18 - Medidores instalados .....  | 42 |
| Figura 19 - Circuito de medição e comunicação desenvolvido .....                            | 43 |
| Figura 20 - Arquitetura de Rede de Comunicação em Smart Grid.....                           | 44 |
| Figura 21 – Esboço do Sistema Proposto. ....  | 45 |
| Figura 22 – Placa de alimentação .....  | 46 |
| Figura 23 – Módulo ZigBee. ....   | 47 |
| Figura 24 – Modem WT35 .....  | 48 |
| Figura 25 – Leituras de dados metrológicos do medidor. ....                                 | 49 |
| Figura 26 – Leitura de dados do medidor. ....   | 49 |
| Figura 27 – Oscilografia do medidor.....  | 50 |
| Figura 28 – Calibração do medidor. ....   | 50 |
| Figura 29 – Tela Principal da interface Homem-Máquina. ....                                 | 51 |
| Figura 30 - Diagrama unifilar do Alimentador BLJ 01 V6 com os pontos dos sensores.<br>..... | 52 |
| Figura 31 – Interface do Módulo de Localização do SISLOC .....                              | 52 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Compensação de Continuidade das Concessionárias do Brasil..... | 16 |
| Tabela 2 – Especificações do Módulo XBee PRO S1. ....                     | 29 |
| Tabela 3 - Alocação de bandas e diferentes locais. ....                   | 32 |
| Tabela 4 - Alocação de bandas e distância entre canais. ....              | 32 |
| Tabela 5- Potências Mínimas de recebimento e alcance máximo. ....         | 32 |
| Tabela 6 - Custo do Projeto .....   | 53 |
| Tabela 7 - Índices de Compensação de Continuidade CELESC. ....            | 53 |
| Tabela 8 - Índices de Compensação de Continuidade Cooperaliança. ....     | 54 |

## LISTA DE EQUAÇÕES

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| (1)Cálculo para o DIC .....   | 13 |
| (2)Cálculo para o FIC .....   | 14 |
| (3)Cálculo para o DMIC .....  | 14 |
| (4)Cálculo para o DICRI ..... | 14 |
| (5)Lei de Ohm.....            | 22 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|          |   |
|----------|---|
| ANEEL    | Agencia Nacional de Energia Elétrica                          |
| BPSK     | <i>Binary Phase Shift Keying</i>                              |
| CELPE    | Companhia Energética de Pernambuco                            |
| CELSEC   | Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A.                     |
| CPU      | Unidade Central de Processamento                              |
| CSMA/CA  | <i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i> |
| DEC      | Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora    |
| DIC      | Duração de Interrupção por Unidade Consumidora                |
| DGC      | Indicador Global de Continuidade                              |
| DSSS     | <i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>                        |
| FEC      | Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora             |
| FFD      | <i>Full Function Device</i>                                   |
| F FTSP   | <i>Flooding Time Synchronization Protocol</i>                 |
| FSK      | <i>Frequency Shifting Keying</i>                              |
| FT       | <i>Fast Fourier Transform</i>                                 |
| GSM      | <i>Global System for Mobile Communications</i>                |
| GSM      | <i>Global System for Mobile Communications</i>                |
| GPIO     | <i>General Purpose Input/output</i>                           |
| GPRS     | <i>General Packet Radio Service</i>                           |
| GTS      | <i>Guaranteed Time Slots</i>                                  |
| HAN      | <i>Home Area Network</i>                                      |
| IEEE     | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>      |
| IF       | Indicador de Falta  |
| ISM      | <i>Industrial, Scientific and Medicine</i>                    |
| LOCFALT  | Programa de Localização de faltas                             |
| LR-WPAN  | <i>Low-Rate Wireless Personal Area Networks</i>               |
| MAC      | <i>Medium Access Control</i>                                  |
| NAN      | <i>Neighborhood Area Network</i>                              |
| NPT      | <i>Network Time Protocol</i>                                  |
| O – QSKY | <i>Offset Quadrature Phase Shift Keying</i>                   |

|        |  |
|--------|--|
| PAN    | <i>Personal Area Network</i>                             |
| PLC    | <i>Power Line Communications</i>                         |
| PHY    | Camada Física  |
| QTR    | Quantidade de Ocorrências em Milhões                     |
| RBS    | <i>Reference Broadcast Synchronization</i>               |
| RFD    | <i>Reduce Function Device</i>                            |
| RMS    | <i>Root Mean Square</i>                                  |
| SISLOC | Sistema Localizador de Falhas para Redes de Distribuição |
| VLR    | Valor pago em milhões de reais                           |
| WAN    | <i>Wide Area Network</i>                                 |
| WSN    | <i>Wireless Sensor Networks</i>                          |
| WPAN   | <i>Wireless Personal Area Networks</i>                   |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| AGRADECIMENTOS .....  | 5         |
| EPÍGRAFE.....   | 6         |
| RESUMO .....  | 7         |
| ABSTRACT .....  | 8         |
| 1. INTRODUÇÃO.....  | 1         |
| 1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA.....  | 1         |
| 1.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....   | 3         |
| 1.3. HIPÓTESE.....  | 5         |
| 1.4. OBJETIVOS .....  | 6         |
| 1.5. MOTIVAÇÃO .....  | 6         |
| 1.6. TRABALHOS RELACIONADOS E CONTEXTUALIZAÇÃO .....                      | 8         |
| 1.7. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....                                      | 9         |
| 1.8. METODOLOGIA .....  | 9         |
| 1.9. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....   | 9         |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....  | 11        |
| 2.1. QUALIDADE NA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA .....                  | 11        |
| <b>2.1.1. Indicadores de Continuidade.....</b>                            | <b>12</b> |
| <b>2.1.2. Penalidades.....</b>  | <b>13</b> |
| 2.2. IDENTIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO ..... | 17        |
| 2.3. TIPOS DE FALTAS .....  | 17        |
| <b>2.3.1. Técnicas baseadas em medidas da impedância.....</b>             | <b>18</b> |
| <b>2.3.2. Técnica baseadas em ondas viajantes.....</b>                    | <b>20</b> |
| 3. DISPOSITIVOS INDICADORES DE FALTA DE ENERGIA ELÉTRICA.....             | 21        |
| 3.1. SENSORES DE CORRENTE.....  | 22        |
| <b>3.1.1. Resistor Shunt.....</b>   | <b>22</b> |
| <b>3.1.2. Transformador de Corrente.....</b>                              | <b>22</b> |
| <b>3.1.3. Sensor de Efeito Hall.....</b>                                  | <b>24</b> |
| <b>3.1.4. Bobina de Rogowski.....</b>                                     | <b>25</b> |
| 3.2. SENSORES DE TENSÃO.....  | 26        |
| <b>3.2.1. Transformadores de Potencial.....</b>                           | <b>26</b> |
| <b>3.2.2. Transformadores de Potencial Capacitivo.....</b>                | <b>27</b> |
| 3.3. REDE DE SENSORES.....  | 28        |

|  |    |
|--|----|
| 3.3.1. O padrão IEEE 802.15.4.....   | 28 |
| 3.3.1.1. Dispositivos de Rede. ....  | 29 |
| 3.3.1.2. Topologias de Rede. ....  | 30 |
| 3.3.1.3. Camada Física.....  | 31 |
| 3.3.1.4. Camada de Controle de acesso ao meio. ....                                  | 33 |
| 3.3.1.5. Modo de Operação Beacon-enabled. ....                                       | 33 |
| 3.3.1.6. Modo de Operação <i>Non Beacon-enabled</i> . ....                           | 34 |
| 3.3.1.7. Sincronização.....  | 34 |
| 3.3.1.8. Susceptibilidade a Ruído. ....  | 36 |
| 4. MATERIAS E MÉTODOS.....   | 38 |
| 4.1. SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA EM MÉDIA TENSÃO .....                        | 41 |
| 4.2. MEDIDOR DE ENERGIA EM MÉDIA TENSÃO. ....  | 42 |
| 4.4. SISTEMA ELETRÔNICO DE MEDIÇÃO. ....   | 43 |
| 4.5. SISTEMA DE COMUNICAÇÃO DE MEDIDORES. ....                                       | 44 |
| 4.6. FUNCIONAMENTO DO SISTEMA.....   | 45 |
| 4.7. FONTE DE ALIMENTAÇÃO. ....  | 45 |
| 4.8. MÓDULO ZIGBEE E GSM.....  | 46 |
| 4.9. LEITURA E CALIBRAGEM DO MEDIDOR. ....   | 48 |
| 4.10. INTERFACE DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS. ....                                       | 51 |
| 4.11. VIABILIDADE DE UM SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTA E<br>MEDIÇÃO DE ENERGIA..... | 53 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS.....                                     | 55 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....   | 56 |

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Segundo (DALCASTAGNÊ, 2007), existe uma tendência mundial para desregulamentação dos setores de energia elétrica, fazendo com que aumente a importância da localização rápida das faltas em sistemas de subtransmissão e distribuição.

Em ambientes desregulamentados, segundo (DALCASTAGNÊ, 2007), há uma competição entre as concessionárias de energia elétrica, tanto para manterem seus consumidores, bem como para chamar atenção de novos clientes.

De acordo com (PEREIRA, 2007), a energia elétrica sob a ótica das empresas distribuidoras deve ser tratada - lá como um produto que necessita ser comercialmente de qualidade, competitivo e de confiabilidade de fornecimento. Desde que atenda aos parâmetros de qualidade do produto e qualidade do serviço (ANEEL, 2017).

Segundo (PEREIRA, 2007), nos últimos anos em se tratando da competitividade de energia elétrica para o mercado, ocorreu aumento das exigências das agências reguladoras do setor para as distribuidoras, relacionadas à manutenção da qualidade nos seus índices de fornecimento, permitiu que pesquisas técnicas e equipamentos de controle e medição para melhorar a qualidade dos índices de confiabilidade dos sistemas de energia.

De acordo com (PEREIRA, 2007), esses índices podem ser melhorados através da efetiva e rápida localização de faltas na rede de distribuição de energia elétrica. Problema esse que tem merecido atenção dos pesquisadores das áreas de confiabilidade, planejamento e operação de sistemas de energia elétrica, permitindo ampla investigação por parte de vários centros de pesquisas.

Segundo (MODOLON, 2013), os sistemas de distribuição são constantemente sujeitos a fenômenos transitórios que podem ocorrer devido a vários motivos, que podem gerar faltas permanentes, como por exemplo: interrupções provocadas por ventos e tempestades, vandalismo, árvores e galhos sobre a rede elétrica, descargas atmosféricas e etc. Sendo assim, a determinação exata da falta, permite o rápido restabelecimento do serviço.

De acordo com (MODOLON, 2013), com a finalidade de minimizar o tempo das falhas, existem diversas metodologias usadas para a localização de faltas em sistemas de distribuição. Os métodos clássicos usam relés de proteção e cálculos, baseados em ondas viajantes, sistemas especialistas ou impedância aparente. Contudo, tais metodologias nem sempre são adequadas para todos os tipos de sistemas elétricos e suas condições de operação.



Segundo (MODOLON, 2013), em virtude do sistema de distribuição de energia possuir em um mesmo alimentador segmentado com diferentes condutores, estes podem apresentar valores de impedância por unidade de comprimento diferente. Tendo em vista que varias cargas e ramificações podem ser conectadas ao longo do alimentador, e estas características permitem que alguns dos métodos existentes não sejam capazes de ser utilizados diretamente no sistema.

Segundo (CAVALCANTE, 2011), ao fazer uma análise da receita de uma concessionária, observa-se que seu faturamento é afetado devido à duração e frequência das interrupções no fornecimento de energia elétrica de acordo com o relatório anual de 2010 do Operador Nacional do Setor Elétrico. O relatório de 2010 é confirmado pelo relatório de 2016 (ONS, 2017).

De acordo com (CARDOSO, MARTHA, *et al.*, 2004), os sistemas de transmissão e distribuição são os maiores intermediários entre consumidores e as fontes de energia elétrica. E em virtude do crescimento e expansão desses setores, as companhias de energia elétrica acirraram disputa pelos mercados consumidores. Sendo assim, exigiu uma preparação maior por parte das empresas, em investimentos nas pesquisas de novas tecnologias e aquisição de modernos equipamentos que são aumentados de forma significativa a cada ano.

Segundo (PINHEIRO, 2011), o Brasil apresenta muitos problemas relacionados à distribuição de energia elétrica. Nosso Sistema é composto em grande parte por alimentadores aéreos na classe 15 kV, susceptíveis a defeitos oriundos na maioria das vezes, por árvores que tocam a rede, rompimentos de cabos, isoladores com problema, abalroamento de postes, dentre outros. De modo geral, estes defeitos são responsáveis pela interrupção do fornecimento, temporária ou permanente, bem como os indesejados transitórios, ocasionando defeitos como, faltas à terra que podem não ser detectadas pelos relés de proteção, ou seja, faltas de alta impedância são extremamente perigosas.

De acordo com (PINHEIRO, 2011), em uma ocorrência de defeito na rede de distribuição, é necessário muitas vezes de localizar o ponto de defeito, sendo que, nem sempre é fácil e possível, devido o intervalo de tempo ser muito curto de modo a garantir a continuidade de fornecimento dos indicadores, estipulados pela agência reguladora. Sendo assim, uma das formas para atenuar o impacto da localização de defeito, constitui-se na localização de defeitos e identificação dos setores ou ramais sob falta de energia elétrica.

Segundo (TANG, WANG, *et al.*, 2000), existe uma grande quantidade de trabalhos técnicos sobre localização de faltas de energia, que possui três categorias: (I) aquelas baseadas em tensões e correntes na frequência, principalmente em técnicas de medidas de impedância,

(II) aquelas baseadas em ondas viajantes e componentes de alta frequência e (III) aquelas baseadas em abordagens baseadas no conhecimento, tais métodos têm boa precisão para redes de transmissão e distribuição com pouca ramificação. Contudo, quando se trata de três redes de distribuição bastante ramificadas ou em faltas de alta impedância, essas metodologias não possuem alta precisão na localização das faltas de energia.

## 1.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Segundo (USIDA, 2011), existem diversas formas de imprevistos que podem causar o desligamento de um sistema de distribuição, como por exemplo, as condições climáticas, contatos de árvores na rede, falhas de equipamentos, acidentes e outros. Tais eventos trazem transtornos às concessionárias responsáveis pelo fornecimento de energia, comprometendo a qualidade de distribuição aos consumidores.

De acordo com (USIDA, 2011), quando acontece um desligamento não programado, localizar o ponto com defeitos tornasse uma tarefa muito difícil para as equipes de manutenção subordinadas os centros de operação da distribuição, porque é gasto muito tempo inspecionando a rede para descobrir o problema.

De acordo com (PINHEIRO, 2011), quando ocorre uma falta de energia elétrica a concessionária precisa aperfeiçoar e dinamizar seu tempo no que diz respeito, a localização da falta até o restabelecimento do fornecimento, evitando assim, uma possível ação jurídica por danos ao consumidor ou uma queda em seus lucros devido ao tempo de duração do fornecimento.

Segundo (CARDOSO, 2006), já algum tempo o assunto referente à localização de falta em linhas de transmissão e de distribuição tem sua relevância para várias concessionárias de energia elétrica. Em algumas empresas fazem uso das informações oferecidas pelos relés de proteção digitais ou pelos registradores digitais de perturbação, e outras armazenam as oscilografias transmitidas por esses equipamentos a uma central de análise que tem por finalidade a localização usando algoritmos.

De acordo com (CARDOSO, 2006), os primitivos métodos de localização consistiam em inspeção visual das linhas, que normalmente grandes extensões do sistema eram percorridas, e que muitas vezes sob condições adversas do clima ou até mesmo por difícil acesso, como meio rural. Entretanto, existem diversos métodos propostos na literatura, com objetivo de estimar os locais de falta em linhas de transmissão, baseados em ondas viajantes, em componente fundamental de frequência das tensões e correntes de um ou de ambos os

terminais da linha demonstraram sua eficácia, possibilitando o desenvolvimento de sistemas de localização.

Para (CARDOSO, 2006):

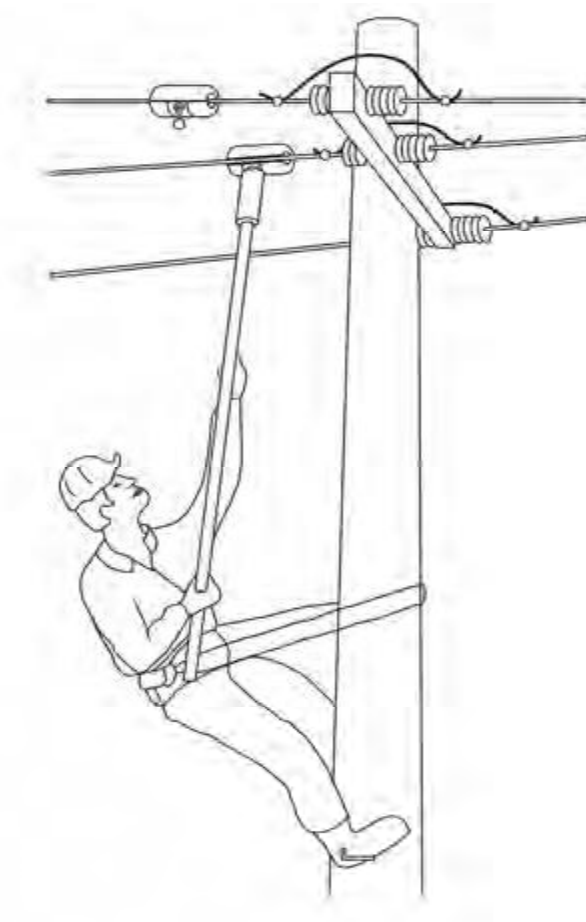
“Entretanto, a aplicação desses métodos é restrita devido às inúmeras hipóteses assumidas para a compensação do efeito da impedância de curto-circuito e da contribuição de corrente da fonte do terminal remoto. Contudo, estes e outros métodos, quando aplicados às redes de distribuição, não obtiveram o mesmo sucesso.” (CARDOSO, 2006, p. 5)

“O desenvolvimento dos localizadores para a distribuição sempre esbarrou numa série de características inerentes a esses sistemas. Dentre os vários complicadores é possível citar: a heterogeneidade das linhas provocada pela numerosa mudança na bitola e no tipo dos cabos; a grande capilaridade do alimentador devido à presença de ramais laterais; sua assimetria caracterizada pela presença de linhas trifásicas, bifásicas e monofásicas num mesmo alimentador, além do comportamento dinâmico das cargas.” (CARDOSO, 2006, p. 6)

Segundo (WOLANIUK, 2011), a solução seria a instalação de medidores que forneça oscilografias da tensão e corrente em cada ponto de ramificação, possibilitando assim a localização do ramal de forma rápida e eficaz. É um medidor de energia atuando em média tensão de 2,3 kV a 34,5 kV, e utiliza rede sem fio de comunicação de baixo custo e baixo consumo, de fácil manuseio e instalação, que forneça oscilografias completas de tensão e corrente, que possibilitaram as identificações dos ramais e/ou setores dos alimentadores submetidos às faltas de energia elétrica.

Segundo (WOLANIUK, 2011), a instalação de um medidor de energia elétrica, conforme a Figura 1, em redes de distribuição de até 34,5 kV permite a medição de energia em médias tensões, com peso reduzido, fácil instalação, não sendo necessário o desligamento do ramal da unidade de consumo. As concessionárias podem efetuar detecções de fraudes através da comparação deste medidor com o medidor convencional.

Figura 1 - Método proposto para a instalação dos medidores.



Fonte: (PINHEIRO, 2011)

### 1.3. HIPÓTESE

Os desligamentos não programados em empresas ou companhias fornecedoras de energia elétrica causam transtornos que afetam a ela mesma; seja por multas previstas em lei devido à interrupção, ou a matérias e equipamentos avariados, como também ao consumidor final. Para minimizar, esses infortúnios, cada vez mais as companhias estão investindo, no aperfeiçoamento de sistemas de localização das faltas de energia elétrica, pois quanto mais rápida e precisa for à identificação, menores serão os prejuízos.

É importante mencionar que o medidor proposto, contribuirá com informações de tensão e corrente de cada fase, e que por sua vez agregará ao sistema, possibilitando o desenvolvimento de novos algoritmos de proteção e de localização de faltas de energia elétrica, com precisão, eficiência e de baixo custo.

O assunto tem sua relevância quanto à solução efetiva para as companhias ou concessionária de energia, na perspectiva do aprimoramento da sua eficiência das soluções, de eventuais faltas de energia elétrica, sob quaisquer distúrbios ou defeitos. Desse modo aumenta-se o nível da prestação de serviço de alta qualidade à rede consumidora, devido aos três fatores imprescindíveis: continuidade, qualidade e eficiência.

#### 1.4. OBJETIVOS

Apresentar de forma descritiva um sistema (MODOLON, 2013) de fácil manejo que seja capaz de proporcionar aumento da confiabilidade de um sistema de distribuição, de modo que possa diminuir o tempo da localização da falta, minimizando o período de interrupção das linhas envolvidas no ocorrido, bem como as compensações pagas pelas concessionárias oriundas do desligamento não programado, e para essa finalidade o sistema proposto consiste de estrutura de hardware, produto conveniente para as concessionárias de energia, diminuição dos prejuízos que tem relação com os indicadores de continuidade. Para a medição de energia é aplicado um medidor (WOLANIUK, 2011) que pode atuar em média tensão de 2,3 kV a 34,5 kV com grau de exatidão suficiente capaz de avaliar fraude existente no sistema de medição, além de possuir vantagens como, a fácil instalação, manutenção e leitura dos dados; a integridade física do sistema elétrico, dos usuários e operadores; integração com as faturas das redes inteligentes, mais conhecidas como *Smart-Grids*, e de possuírem meio de transmissão de dados bastante flexíveis.

#### 1.5. MOTIVAÇÃO

Em virtude da privatização do setor energético, novas filosofias de operação passaram a ser exigidas, bem como planejamentos de sistemas elétricos de potência que abrangem a geração, transmissão e a distribuição de energia elétrica. Deste modo, deixou de ser um sistema centralizado e regulado pelo setor elétrico nacional, passando a ser regulado por um novo sistema com estruturas de planejamento e operações mais flexíveis, visando assim, um mercado mais competitivo, por meio qualitativo no fornecimento de energia elétrica e maior eficiência econômica.

Devido o mercado de energia elétrica está em constante aumento no seu desenvolvimento de novos métodos de análises, planejamentos e operações dos sistemas de energia elétrica, têm como finalidade buscar mecanismos que possam garantir uma melhor utilização dos retornos dos investimentos feitos pelas operadoras, de modo não perder os

padrões de qualidade e confiabilidade, que são exigidos pelo mercado consumidor e as agências reguladoras. Logo, as empresas do setor, consideram a energia elétrica como um produto que possui disputa no mercado, com qualidade e confiabilidade no fornecimento.

Entretanto, para garantir a qualidade e a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica junto ao consumidor, foi necessária a criação de um órgão nacional responsável por isso. A Agência Nacional de Energia Elétrica – (ANEEL), têm a finalidade de: regulamentar e fiscalizar a geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica. A ANEEL estabeleceu a resolução de nº 24 de 27 de janeiro de 2000, indicadores coletivos e individuais para avaliar e supervisionar a continuidade dos serviços públicos de energia elétrica fornecidos pelas empresas concessionárias e, dessa forma, a ANEEL, começou a monitorar e efetuar penalidades as frequências e durações das interrupções de energia elétrica.

Com o aumento constante das exigências das agências reguladoras para a distribuição de energia elétrica, relativa à manutenção da qualidade dos índices de fornecimento, impulsionou para que pesquisas técnicas e equipamentos de controle e medição para aprimorar a confiabilidade dos sistemas de energia. Sendo assim, uma das formas de melhoria nos índices, é a eficiente e rápida localização de faltas na rede de geração, transmissão ou distribuição de energia elétrica. A falta na rede é um problema que merece especial atenção por parte dos pesquisadores das seguintes áreas: planejamento, confiabilidade e operação de sistemas de energia elétrica. Por alguns anos, tem sido amplamente investigado por vários centros de pesquisas, com a proposição de técnicas e resultados que evidenciam a necessidade de novos investimentos e estudos.

Na grande maioria dos casos o sistema de distribuição brasileiro é constituído de alimentadores aéreos na classe 15 kV, que estão sujeitos a defeitos originados, em muitos casos por galhos de árvores que tocam rede, problema com isoladores, rompimentos de cabos, abalroamento de postes, etc. Geralmente estes defeitos causam à interrupção temporária ou permanente do fornecimento de energia elétrica, bem como a causa de transitórios indesejáveis. E podem ocorrer também, faltas à terra que em alguns casos não são detectadas pelos relés de proteção – faltas de alta impedância – extremamente perigosas. (PINHEIRO, 2011)

Quando ocorre um defeito na rede de distribuição, é necessária a localização do ponto defeito, o que nem sempre é fácil e muito menos de ser realizada em um curto espaço de tempo, de modo a garantir aos indicadores de continuidade de fornecimento determinados pela ANEEL. Para tal situação, um modo de diminuir esse transtorno, é a identificação de

setores ou ramais sob falta de energia elétrica. Existe um grande número de publicações cuja proposta é os métodos de localização de faltas em redes de transmissão e distribuição.

Segundo (TANG, WANG, *et al.*, 2000), alguns desses métodos têm boa precisão quando aplicados a redes de transmissão pouco ramificadas. Entretanto, quando se trata de faltas de alta impedância ou redes de distribuição muito ramificadas, tais metodologias não são precisas na localização das faltas. A instalação de medidores que façam registros das oscilografias de tensão e corrente em cada ponto de ramificação da rede de distribuição torna-se possível a identificação e a localização o ramal sob falta de forma eficiente e rápida. Contudo, o uso do equipamento deve ter um baixo custo e ser fácil sua instalação.

## 1.6. TRABALHOS RELACIONADOS E CONTEXTUALIZAÇÃO

Segundo o artigo de (FERREIRA, SIMÕES, *et al.*, 2011), consta o projeto de P&D aprovado pela ANEEL, denominado Desenvolvimento de um Sistema de Localização de Falta na Rede de Distribuição da CELPE. Esse protótipo deste sistema atua na localização de faltas na média tensão e de suma importância para o aprimoramento de alguns indicadores de qualidade do serviço da CELPE. Possibilita: redução da frequência equivalente de interrupção de energia por unidade consumidora e a duração equivalente de interrupção de energia por unidade consumidora. A redução desses parâmetros implica na prática, com o aumento da satisfação dos clientes/consumidores e o faturamento da empresa.

De acordo com o projeto de graduação de (MODOLON, 2013), propõem o desenvolvimento de um aparelho eletrônico para a detecção da falta de energia elétrica cujo objetivo é auxiliar as empresas fornecedoras no restabelecimento rápido da energia aos consumidores minimizando os possíveis prejuízos financeiros e/ou sociais. Este equipamento é capaz de detectar uma falta a terra e curtos-circuitos em linhas aéreas das redes de distribuição, independentemente da fase, e envia através da comunicação wireless à central: hora, data, local do equipamento instalado, a fase (R, S ou T), tipo da falta que ocorreu. E indicação por meio de um LED no local para facilitar a o contato visual do equipamento no período noturno.

A dissertação de mestrado de (CARDOSO, 2006), aborda o desenvolvimento de um sistema de localização de faltas em redes de distribuição, chamado LOCFALT, cujo objetivo é dar maior dinamismo e eficiência no envio de equipes de manutenção quando ocorrem faltas permanentes. Sua localização é feita por meio de integração, compilação e manipulação de dados armazenados no sistema de geoprocessamento, que possui informações minuciosas da

composição: física, elétrica, topológica das linhas de distribuição, curva de tempo versus corrente de relés de proteção e tempos de operação da proteção oriundos do sistema de controle e aquisição de dados.

A tese de doutorado de (PEREIRA, 2007), propõem um algoritmo para localização de faltas em alimentadores radiais aéreos de distribuição de energia elétrica trifásicos com cargas desequilibradas e que podem possuir ramais laterais trifásicos, bifásicos e monofásicos. Essa técnica elimina dos possíveis locais de falta, os pontos que estão em ramais laterais, que ficam relativamente distantes do verdadeiro local da falta de energia elétrica e que poderiam ser normalmente indicados pelos métodos convencionais. Este modelo matemático visa relacionar custo-benefício para empresas de energia elétrica, no que diz respeito a investimentos, custos operacionais e aprimoramento dos índices de confiabilidade.

## 1.7. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Este trabalho descreve um sistema de medição de baixo custo para localização de faltas de energia elétrica, cuja especificidade é propiciar as companhias ou concessionárias uma forma rápida de identificar e localizar a falta de energia elétrica com maior precisão, em redes de distribuição, além de proporcionar uma gama de informações sobre a qualidade da tensão e corrente, que podem ser usadas para aprimoramento da mesma.

## 1.8. METODOLOGIA

Neste trabalho é abordado um sistema de medição de baixo custo para localização de faltas de energia elétrica em redes de distribuição, usando dispositivos indicadores de faltas de energia como, sensores de correntes, sensores de tensão, redes de sensores sem fios e padrão de rede sem fio de âmbito pessoal IEEE 802. 15.4, que auxiliam na identificação, bem como no monitoramento de tensões e correntes em seus alimentadores, além de dinamizar a eficiência da concessionária ou distribuidora, perante o mercado.

## 1.9. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está dividido em 5 capítulos.

Capítulo 1: Abordam o assunto relacionado à faltas de energia elétrica em redes de distribuição, alguns problemas que ocasionam as faltas e suas conseqüências; que afetam as empresas distribuidoras e o consumidor. É mencionada um das soluções mais usadas pelas



empresas quanto à identificação e localização precisa do ponto de falta, para restabelecimento do sistema o mais rápido possível, cujo objetivo é minimizar os danos. Neste capítulo também é apresentado o embasamento teórico mediante trabalhos contextualizados sobre o assunto por meio de: artigo, monografia, dissertação e tese.

Capítulo 2: É apresentado a qualidade da energia elétrica, indicadores de continuidade que são usados pelas distribuidora para avaliar a confiabilidade do fornecimento, penalidades em virtude das interrupções, métodos usados em identificação e localização de faltas em redes de distribuição.

Capítulo 3: São apresentados os dispositivos indicadores de falta de energia elétrica, dispositivos de medição de tensão e corrente e rede de sensores sem fio.

Capítulo 4: São apresentados materiais e métodos, sistema de distribuição de energia em média tensão, medidor de energia em média tensão, alimentação do medidor, sistema eletrônico de medição, sistema de comunicação de medidores, funcionamento do sistema, fonte e alimentação, módulo Zigbee e GSM, leitura e calibragem do medidor, interface de localização de faltas e viabilidade de um sistema de localização e medição de energia.

Capítulo 5: Apresentação da conclusão da pesquisa sobre o sistema de medição de baixo custo para localização de faltas em redes de distribuição, demonstrando a confirmação ou não da hipótese formulada.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. QUALIDADE NA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

De acordo com (VASCONCELOS, 2017), em virtude de alguns fatores afetarem as redes de distribuição de modo a interromper o fornecimento aos consumidores, critérios como parâmetros da qualidade de energia elétrica fornecida. Sendo assim, a Agência Nacional de Energia Elétrica desenvolveu por meio de procedimentos técnicos, mecanismos que permitem avaliar o fornecimento das concessionárias, com a finalidade de proporcionar aos consumidores confiabilidade e conformidade da energia elétrica.

Segundo (ANEEL, 2017), o termo conformidade de tensão elétrica é a comparação entre o valor de tensão obtido por medição apropriada no ponto de conexão, em relação aos níveis de tensão, estabelecidos como apropriados, precários e críticos. A mesma define os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, levando em consideração a qualidade do produto e a qualidade do serviço, sendo:

- 1) A qualidade do produto define a terminologia e os indicadores, características dos fenômenos, limites ou valores de referência, metodologia de medição, gestão de reclamações relativas à conformidade de tensão em regime permanente, bem como as perturbações na forma de onda de tensão e os respectivos estudos de qualidade de energia cuja finalidade é os sistemas de distribuição
- 2) A qualidade de fornecimento de energia elétrica define a metodologia aplicada na apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento emergenciais de ocorrências, bem como padrões e as responsabilidades.

Segundo (ANEEL, 2017), os fenômenos da qualidade do produto são classificados em dois regimes:

- 1) Permanente: tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e variação de frequência.
- 2) Transitório: variações de tensão de curta duração.

Em se tratando da tensão em regime permanente de acordo com (ANEEL, 2017), são definidos os limites adequados, precários e críticos para níveis de tensão em regime permanente, indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão elétrica, critérios

de medição e de registro, os prazos para reparos de danos ao consumidor, em caso das medições de tensão exceder os limites pré-estabelecidos dos indicadores.

A tensão em regime permanente, segundo (ANEEL, 2017) deve estar presente por todo o sistema de distribuição, sendo de responsabilidade da distribuidora, prover recursos e técnicas modernas para esse acompanhamento, bem como, atuar de modo preventivo, para que a tensão em regime permanente esteja nos padrões adequados.

### **2.1.1. Indicadores de Continuidade.**

Segundo (DIAS, 2002), a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL começa suas atividades, tendo como prerrogativas a fiscalização dos serviços de energia elétrica. Em se tratando da distribuição, avalia a qualidade de energia elétrica fornecida pelas concessionárias, tendo como foco a Qualidade do Produto, que relaciona a forma de onda de tensão, e quanto a Qualidade do Serviço, examina a continuidade do fornecimento.

Em virtude da regulamentação e a fiscalização do fornecimento de energia, segundo (DIAS, 2002), impeliram a criação de indicadores, cuja meta é avaliar o desempenho das concessionárias de forma quantitativa. Em termos da Qualidade do Serviço, é de suma importância:

- 1) Os indicadores coletivos de Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) - relaciona a duração de interrupção em um conjunto de consumidores.
- 2) Os indicadores coletivos de Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) - frequência média de interrupção em um conjunto de consumidores.
- 3) Os indicadores individuais de Duração de Interrupção por Unidade Consumidora (DIC).
- 4) Os indicadores individuais de Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (FIC).
- 5) Os indicadores individuais de Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora (DMIC) – fazem avaliação da duração, frequência e duração máxima contínua de interrupção para cada consumidor de um determinado conjunto.

De acordo com (BEZERRA, 2008), as informações anuais dos indicadores coletivos, originam o Indicador de Desempenho Global de Continuidade – DGC, que tem a finalidade avaliativa o nível de continuidade de cada distribuidora e sua área de respectiva concessão, comparando-a com as outras.

Segundo (BEZERRA, 2008), os indicadores individuais podem originar compensações financeiras, que são diretamente pagas aos usuários pelas distribuidoras, e em caso de violação dos limites mensais, trimestrais e anuais definidos pela ANEEL. Sendo assim, as distribuidoras tendo seus indicadores submetidos a constantes verificações, com possibilidade de penalidades, tem investido na melhoria da Qualidade do Serviço de fornecimento de energia elétrica.

### 2.1.2. Penalidades.

De acordo com (ANEEL, 2004):

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL  
RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 63, DE 12 DE MAIO DE 2004.

“Aprova procedimentos para regular a imposição de penalidades aos concessionários, permissionários, autorizados e demais agentes de instalações e serviços de energia elétrica, bem como às entidades responsáveis pela operação do sistema, pela comercialização de energia elétrica e pela gestão de recursos provenientes de encargos setoriais” (ANEEL, 2004).

Segundo (VASCONCELOS, 2017), se por ventura o limite de continuidade dos indicadores DIC, FIC, DMIC e DICRI em relação ao período de apuração mensal, trimestral e anual forem violados, a distribuidora deve calcular a compensação ao consumidor contratante do sistema de distribuição e adicionar o crédito na fatura, em um período máximo de dois meses após apuração da ANEEL.

De acordo com (VASCONCELOS, 2017), os valores de ressarcimentos são determinados pelas Equações (1), (2),(3) e (4), abaixo:

Cálculo do DIC:

$$Penalidade = \left( \frac{DIC_v}{DIC_p} - 1 \right) DIC_p \frac{CM}{730} \text{ kei} \quad (1)$$

Cálculo do FIC:

$$Penalidade = \left( \frac{FIC_v}{FIC_p} - 1 \right) FIC_p \frac{CM}{730} \text{ kei} \quad (2)$$

Cálculo do DMIC:

$$Penalidade = \left( \frac{DMIC_v}{DMIC_p} - 1 \right) DMIC_p \frac{CM}{730} \text{ kei} \quad (3)$$

Cálculo do DICRI:

$$Penalidade = \left( \frac{DICRI_v}{DICRI_p} - 1 \right) DICRI_p \frac{CM}{730} \text{ kei} \quad (4)$$

$DIC_v$ : Duração de Interrupção por Unidade Consumidora ou por ponto de conexão, segundo cada caso, verificada no período determinado, expressa em horas e centésimos de hora;

$DIC_p$ : limite de continuidade estabelecido no período considerado para o indicador de duração de interrupção por continuidade consumidora ou por ponto de conexão, expresso em horas e centésimos de hora;

$FIC_v$ : frequência de interrupção por unidade consumidora ou por ponto de conexão, de acordo com cada caso, verificado no período estabelecido, expresso em números de interrupções;

$FIC_p$ : limite de continuidade estabelecido no período considerado para o indicador de frequência de interrupção por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expresso em número de interrupções e centésimo do número de interrupções;

$DMIC_v$ : duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou por ponto de conexão, de acordo como cada caso, verificada no período estabelecido, expressa em horas e centésimos de hora;

$DMIC_p$ : limite de continuidade estabelecido no período estabelecido para o indicador de duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expresso em horas e centésimos de hora;

$DICRI_v$ : duração da interrupção individual ocorrida em Dia Crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora;

$DICRI_p$ : limite de continuidade estabelecido para o indicador de duração da interrupção individual ocorrida em Dia Crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão, expresso em horas e centésimos de hora;

$CM$ : média aritmética dos encargos de uso do sistema de distribuição correspondentes aos meses do período de apuração do indicador.

$kei$ : coeficiente de majoração deve está fixado em:

- 1) 15 (quinze), para a unidade consumidora ou ponto de conexão atendida em Baixa Tensão;
- 2) 20 (vinte), para a unidade consumidora ou ponto de conexão atendida em Média Tensão;
- 3) 27 (vinte e sete), para a unidade consumidora ou ponto de conexão atendas em Alta Tensão;

Para melhor compreensão, a Tabela 1 apresenta por meio de dados, a violação dos limites estabelecidos dos indicadores de continuidade pode levar a multas altíssimas.

A Figura 2 demonstra as quantidades de ocorrências e os valores pagos, em nível nacional nos últimos 7 anos.

Tabela 1 - Compensação de Continuidade das Concessionárias do Brasil

| Compensação de Continuidade das Concessionárias do Brasil |            |     | 2011    | 2012    | 2013    | 2014    | 2015    | 2016    | 2017    |
|---|------------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| DIC, FIC e DMIC   | Mensal     | QTR | 68,376  | 66,031  | 67,587  | 69,433  | 78,455  | 73,046  | 39,540  |
|   |            | VLR | 290,941 | 305,792 | 265,046 | 279,041 | 450,177 | 402,907 | 192,877 |
|   | Trimestral | QTR | 21,500  | 19,139  | 20,072  | 20,547  | 23,656  | 20,629  | 9,639   |
|   |            | VLR | 40,514  | 41,991  | 37,144  | 38,214  | 64,541  | 58,997  | 28,209  |
|   | Anual      | QTR | 15,261  | 12,882  | 13,716  | 13,031  | 16,065  | 13,202  | 0,00    |
|   |            | VLR | 68,836  | 69,891  | 61,779  | 54,986  | 102,218 | 82,964  | 0,00    |
| DICRI   |            | QTR | 0       | 9,171   | 3,379   | 7,196   | 7,025   | 4,207   | 0,791   |
|   |            | VLR | 0,00    | 19,797  | 14,584  | 18,513  | 39,958  | 26,260  | 7,498   |
| TOTAL GERAL   |            | QTR | 105,137 | 107,223 | 104,754 | 110,207 | 125,201 | 111,084 | 49,970  |
|   |            | VLR | 400,291 | 437,471 | 378,553 | 390,754 | 656,894 | 571,128 | 228,584 |

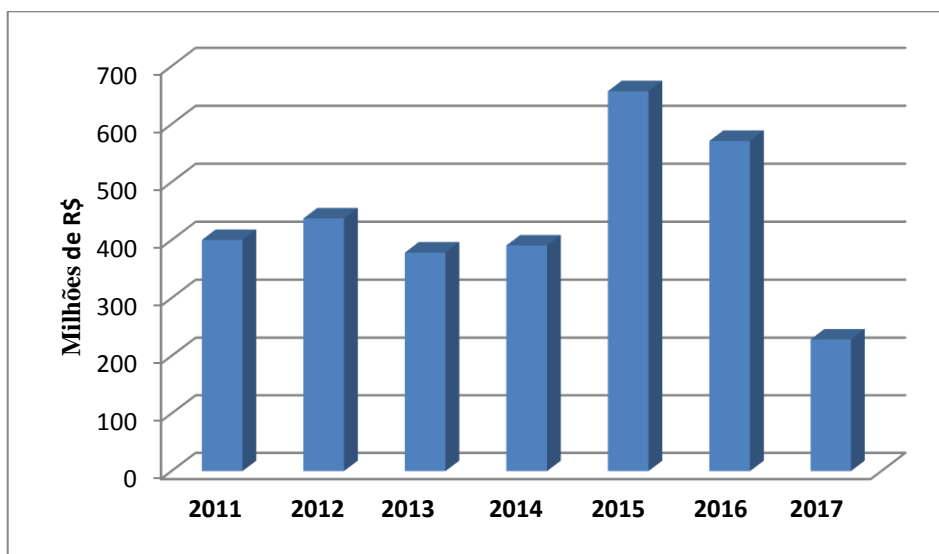
Fonte: Adaptado, (ANEEL, 2017)

QTR – quantidade de ocorrências em milhões.

VLR – valor pago em milhões de reais.

Na Figura 2, mostra o gráfico de valores de compensações pagas, em milhões de reais, para os respectivos períodos mencionados. Em 2015 as compensações tiveram os maiores valores, acima de R\$ 600 milhões de reais. Segundo a (ANEEL, 2017), a concessionária CELG-D pagou em 2015, cerca de R\$ 98.401.384,18, o que significa aproximadamente 15% de todos os valores pagos as concessionárias do país.

Figura 2 - Valores das compensações (2011 a 2017)



Fonte: Adaptado, (ANEEL, 2017)

## 2.2. IDENTIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

De acordo com (MODOLON, 2013), nos sistemas de distribuição, a localização de faltas de energia elétrica é assunto de pesquisa importante para as empresas concessionárias, uma vez que, os algoritmos de localização têm a finalidade de melhorar os tempos de respostas das companhias em situações anormais, nos sistemas de fornecimento de energia elétrica.

O interesse sobre as faltas em redes de distribuição já mencionado no parágrafo anteriormente, de acordo com (MODOLON, 2013), surgiu devido à desregulamentação do mercado de energia elétrica logo no início dos anos 80, tornando os ramos de: geração, transmissão e distribuição quase totalmente autônomas.

Sendo assim, com o mercado regulamentado de acordo com (MODOLON, 2013), e as privatizações, tornou-se possível ao consumidor escolher uma empresa que transmita e outra que gere uma quantia de energia elétrica, passando a ter concorrência que outrora não existia.

Segundo (ZAMBONI, 2013), a identificação, localização e a comunicação das faltas em redes de distribuição são fatores de bastante relevância no processo de restabelecimento do sistema em menor tempo possível. É importante salientar que um sistema que esteja integrado aos operadores do sistema de distribuição pode contribuir em tomada de decisões, que podem ajudar a melhorar os indicadores de qualidade, e como consequência, o nível de satisfação do consumidor aumenta também.

## 2.3. TIPOS DE FALTAS

De acordo com (SOUZA, 2007), quanto à sua duração as faltas de estão classificadas como transitórias e permanentes. Faltas transitórias são aquelas em que na atuação de um determinado equipamento de proteção, desaparece a causa do defeito e o circuito funciona logo quando é ligado novamente. Cerca de 80% das faltas que ocorrem em redes de distribuição, são transitórias e suas causas mais comuns são:

- 1) Por descargas atmosféricas;
- 2) Devido aos contatos momentâneos entre condutores;
- 3) Por meio de abertura de arco elétrico; e
- 4) Oriundos de materiais sem isolamento adequada.



Segundo (SOUZA, 2008), nas faltas permanentes é preciso que o homem faça a intervenção, no intuito de solucionar o defeito causado pela interrupção, evidentemente antes de ligar o equipamento. E à medida que as empresas foram investindo em pesquisas e utilizações da tecnologia digital em subestações foram avançando, possibilitou-se o desenvolvimento de metodologias automatizadas, que por sua vez auxiliavam as equipes de manutenção.

De acordo com (JUNIOR, 2016), menciona duas metodologias:

- Métodos baseados na medida da impedância aparente, que utiliza somente componentes fundamentais do sinal, com conseqüente determinação da distância da falta;
- Métodos baseados em ondas viajantes, que usa a análise das ondas em alta frequência geradas pela ocorrência de um transitório, técnica que possibilita determinar a seção da falta.

As técnicas usadas em localização de faltas (MODOLON, 2013), foram primeiramente desenvolvidas para os sistemas de transmissão, e somente na década de 80, que começaram a estudar as possibilidades de utilização em sistemas de distribuição de energia elétrica.

### **2.3.1. Técnicas baseadas em medidas da impedância.**

De acordo com (JUNIOR, 2016), devido ao grande índice de taxas de indenizações pagas pelas empresas, relacionado ao tempo de falta, um esforço considerável, tem sido feito no que diz respeito às pesquisas e no desenvolvimento de métodos fundamentados em impedância para localização de faltas de energia elétrica, desde métodos de um terminal como para os métodos de dois terminais.

Segundo (JUNIOR, 2016), qualquer outro método de medida que se baseia em frequência fundamental, sofrem limitações como: a resistência do caminho da falta, carregamento da linha, parâmetros de fonte e etc. Como conseqüência, o percentual de precisão é de aproximadamente 2 a 3% do comprimento total da linha, e é quase improvável que esse valor aumente, ainda que ocorra uma melhoria bastante significativa.

De acordo com (PINHEIRO, 2011), os principais fatores que afetam a precisão da localização são:

- 1) Somatório dos efeitos da carga atual e resistência de falta (efeito da reatância). O valor da resistência de falta pode ser relativamente alto em faltas para terra que representam a maioria das ocorrências nas linhas de distribuição.
- 2) Imprecisão na identificação do tipo de falta entre as fases.
- 3) Influência do efeito mútuo sobre as componentes de sequência zero.
- 4) Incerteza sobre os parâmetros de linha, em particular a impedância de sequência zero. É normalmente difícil obter uma impedância de sequência zero para a linha. O valor da impedância de sequência zero sofre influência da resistividade do solo, que é difícil avaliação devida ser bem variável. Um erro de 20% na impedância de sequência zero pode gerar um erro de 15% no cálculo da localização da falta.
- 5) Precisão insuficiente do modelo de linha, ou seja, as linhas transpostas são representadas como sendo não transpostas e desconsideram-se as cargas capacitivas.
- 6) Presença de reatores shunts e paralelos de capacitores.
- 7) Desbalanceamento de fluxo de carga.
- 8) Erros: de medidas, nos transformadores de tensão e corrente e resolução dos sistemas de conversão analógica/digital (A/D).

Segundo (ZAMBONI, 2013) existe um método de redes neurais artificiais, consiste na coleta e processamento de um conjunto de dados concernente as correntes de linha do alimentador que funciona da seguinte forma:

- 1) Emprega-se este mesmo conjunto de medidas para treinar a abordagem neural de modo que seja habilitada a identificar as situações de corrente de falta ou condições normais de operação do sistema.
- 2) E por ultimo, é decidido mediante aos procedimentos da abordagem neural, com os dados que não fazem parte do conjunto de treinamento, determinando sua eficiência frente a novas situações.

De acordo com (PEREIRA, 2007), duas abordagens diferentes são apresentadas para a localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica. A primeira tem como base as medições simultâneas de tensões e correntes na subestação (secundário do transformador ou no início do alimentador), e apenas a reatância da linha é usada no cálculo da distancia da falta até a subestação. As cargas são modeladas levando-se em consideração a sua dependência com a variação de tensão, ou seja, o uso dessa técnica tem como base a

reatância da linha que atenua os efeitos da resistência da falta na precisão dos resultados na localização de faltas.

A segunda técnica de acordo com (PEREIRA, 2007), tem como base a hipótese de que apenas as correntes de faltas medidas são disponíveis. Isso faz com que a segunda abordagem seja inferior em relação à primeira no que diz respeito à precisão, e o valor da resistência de falta deve ser relevante nos cálculos.

Segundo (PEREIRA, 2007), ambas as abordagens fazem registros das grandezas elétricas com uma frequência de amostragem de 500 Hz, e os fasores de frequência fundamental, são extraídos das amostras, aplicando a Transformada Discreta de Fourier.

### **2.3.2. Técnica baseadas em ondas viajantes.**

Segundo (PINHEIRO, 2011), os métodos de localização de faltas baseados em ondas viajantes foram investigados por engenheiros na década de 40, quando trabalhavam no desenvolvimento do radar na segunda guerra mundial, observando quais as implicações das técnicas de reflexão de pulsos poderiam ser usadas para localização de faltas em linhas aéreas.

As concessionárias desde então, de acordo com (PINHEIRO, 2011), tem dedicado esforços para o desenvolvimento desse método, como forma de superar as faltas de exatidão e limitações dos métodos tradicionais que estão fundamentados na frequência fundamental para a localização de faltas.

De acordo com (PINHEIRO, 2011), os sistemas de localização de falta por ondas viajantes para linhas aéreas estão divididas em três modos:

- 1) Métodos de Terminação Única – utiliza medições de um único registrador para a localização de faltas, e tem como parâmetros as sucessivas reflexões do sinal da falta.
- 2) Métodos de Terminação Dupla – utilizam-se dois equipamentos registradores, um em cada terminação da linha, e a localização deve estar entre o intervalo entre os registradores.
- 3) Método de Terminação Tripla – consiste na utilização de três registradores, um em cada terminação da linha principal e o terceiro em uma linha ramal. Quando ocorre uma descontinuidade, as ondas se refletem e volta ao ponto de falha, e isso acontecerá até alcançar o seu estado permanente de falta.

### 3. DISPOSITIVOS INDICADORES DE FALTA DE ENERGIA ELÉTRICA.

Segundo (VASCONCELOS, 2017), para redução do tempo médio de interrupção fora necessário o desenvolvimento de dispositivos indicadores e de falta – IF. Esses dispositivos sinalizam a passagem de uma corrente de falta, cuja finalidade é auxiliar a equipe de manutenção na localização com maior agilidade nos defeitos.

De acordo com (VASCONCELOS, 2017), na maioria dos casos a sinalização é feita com lâmpadas de LED de fácil visualização é apresentado na Figura 3, e desde que instalada em locais acessíveis. Esses dispositivos diminuem o tempo médio de busca ou localização dos defeitos, sendo de grande relevância para os alimentadores do Brasil, que possuem grandes extensões.

Figura 3 – Identificador de falta instalado em condutores



Fonte: (SELINC, 2017)

Segundo (USIDA, 2011), os indicadores de falta instalados em postes recebem as informações simultaneas das três fases, contudo está sujeito as interferências provenientes da rede secundária do mesmo poste, com isso, a instalação dos indicadores nos cabos é a opção mais adequada para essa situação.

### 3.1. SENSORES DE CORRENTE.

#### 3.1.1. Resistor Shunt.

Segundo (CHAVES, 2008), os resistores shunts são elementos sensores de baixa resistência que são diretamente inseridos no circuito da corrente, como é apresentado no modelo da Figura 4. Sua operação é estabelecida pela Lei de Ohm como demonstrada na Figura (5) Lei de Ohm, e podendo medir correntes contínuas e alternadas de até dezenas de MHz.

$$i(t) = \frac{v(t)}{R} \quad (5)$$

Figura 4 – Sensor de Corrente Shunt



Fonte: Adaptado de <https://lista.mercadolivre.com.br/shunt-de-corrente>, acessado em 27/10/2017

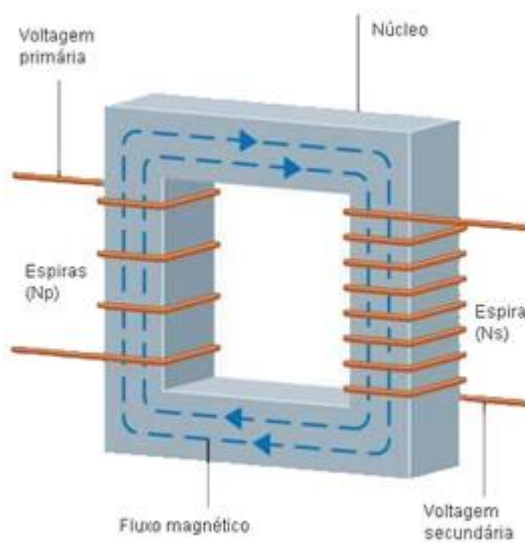
#### 3.1.2. Transformador de Corrente.

Segundo (KOIZUMI, 2012), em transformadores comuns possuem um núcleo de ferro magnético e que é envolvido por um fio, como apresentado na Figura 5, criando assim uma bobina primária e outro fio para a bobina secundária. Quando um condutor é enrolado ao núcleo ferromagnético gera um campo magnético que é somado às espiras que gera o campo

magnético resultante e que por alta permeabilidade resultante concentra-se no interior do núcleo.

De acordo com (SANTOS, 2017), o princípio de funcionamento é bem simples, pois quando uma tensão alternada é aplicada no enrolamento primário faz surgir uma corrente, por sua vez, também alternada, que percorrerá o enrolamento todo. Por meio dessa corrente é estabelecido um campo magnético no interior do núcleo de ferro, que ao sofrer diversas flutuações, cria um fluxo magnético que induzirá a bobina secundária.

Figura 5 – Transformador de tensão



Fonte: Adaptado, (SANTOS, 2017)

Segundo (KOIZUMI, 2012), existe uma diferença entre o transformador convencional e o transformador de corrente, conforme Figura 6, devido à presença de corrente muito maior no primário. Normalmente, o primário é composto por um único condutor passante ou por um fio de poucas espiras e cuja seção reta do condutor é compatível com a corrente a ser medida.

Figura 6 – Transformador de corrente



Fonte: Adaptado de

<http://www.maqgutierrez.com.br/produto/377/0/16/10/377/Transformador+de+corrente+RH-78+TC+100+A>,  
acessado em 27/10/17.

### 3.1.3. Sensor de Efeito Hall.

De acordo com (VIEIRA, 2008) o sensor de efeito hall, como demonstrado na Figura 7, mede somente a intensidade do campo magnético, e dessa forma relacionar a variação da corrente com a variação do campo magnético.

Segundo (KOIZUMI, 2012), quando um campo magnético atua de forma perpendicular em um material semicondutor com corrente constante é criado então uma diferença de potencial. Esse é o princípio usado nos sensores de corrente por efeito Hall, que converte o campo magnético gerado pelo condutor em tensão na saída de forma proporcional.

Figura 7 – Sensor de Efeito Hall



Fonte: Adaptado de <http://www.eletródex.com.br/sensor-de-efeito-hall-linear-a1302.html>, acessado em 27/10/17.

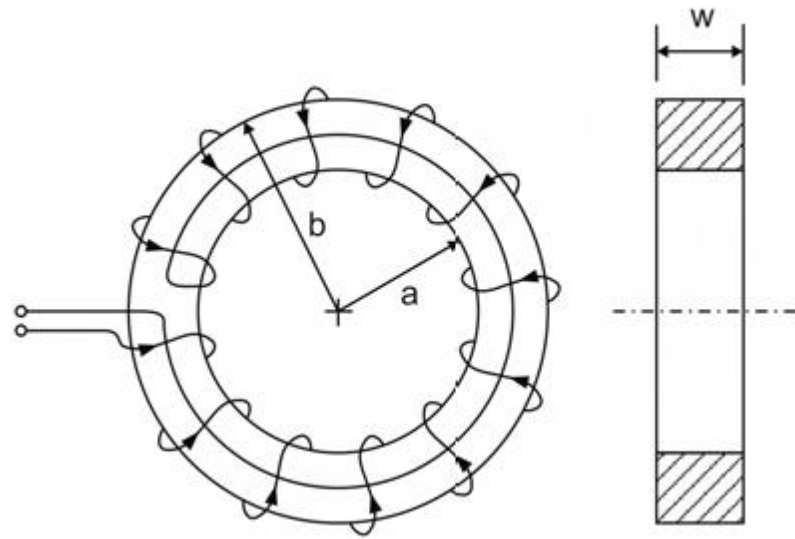
#### **3.1.4. Bobina de Rogowski.**

De acordo com (CHAVES, 2008), a bobina de Rogowski, como apresentada na Figura 8 é um solenóide com forma toroidal com núcleo de ar ou de material não ferromagnético que circunda um condutor onde circula a corrente que se deseja medir.

De acordo com (GOVEIA, 2013), a vantagem mais importante da bobina de Rogowski em relação aos transformadores de corrente convencionais é que não possui um núcleo ferromagnético, ou seja, com ausência de material ferromagnético não existe perdas por correntes de Foucault e histerese, e o custo é mais baixo.



Figura 8 - Diagrama de uma Bobina de Rogowski, com espira de retorno



Fonte: (PINHEIRO, 2011, p. 29)

### 3.2. SENSORES DE TENSÃO.

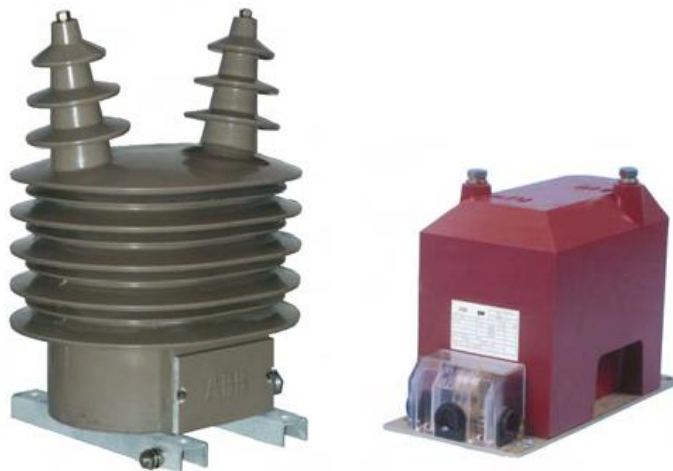
#### 3.2.1. Transformadores de Potencial.

De acordo com (FRONCHETTI, 2015), em diversos circuitos nem sempre é possível colocar um sinal de tensão diretamente, em virtude da incompatibilidade dos níveis de tensão do circuito. Para fazer esta padronização é usada a técnica com transformadores de potencial.

Segundo (FRONCHETTI, 2015), o transformador de potencial, como demonstrado na Figura 9, pode ser usado para redução de grandezas elétricas como corrente ou tensão.

De acordo com (GOVEIA, 2013), é um transformador cujo enrolamento primário está ligado em derivação com um circuito e seu enrolamento secundário alimenta as bobinas de potencial de instrumentos de proteção, controle ou medição.

Figura 9 – Transformadores de potencial, em epóxi, classe 15KV.

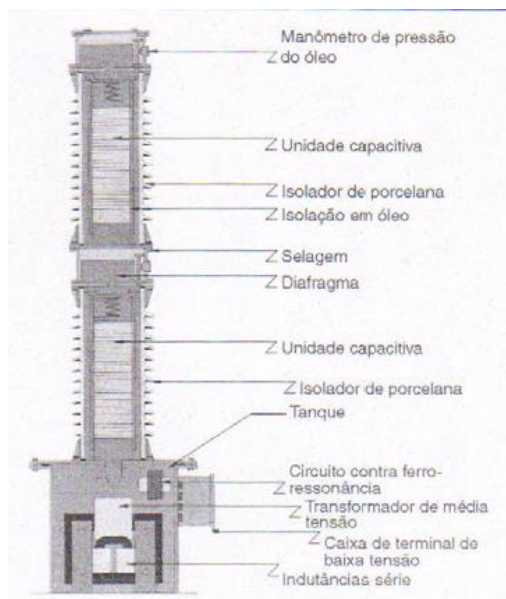


Fonte: (PINHEIRO, 2011, p. 36)

### 3.2.2. Transformadores de Potencial Capacitivo.

Segundo (LIMA, 2012), o transformador de potencial capacitivo, conforme Figura 10, é constituído por uma coluna física de capacitores que tem a finalidade de reduzir a tensão, sendo mais usado em sistemas elétricos em tensões acima de 138 kV, sendo necessário reduzir o valor da tensão a níveis mais baixo que os da linha.

Figura 10 – Transformador de Potencial Capacitivo



Fonte: (PINHEIRO, 2011, p. 37)

### 3.3. REDE DE SENSORES.

Segundo (QUEIROZ, 2016), as redes de sensores sem fio são compostas de nós equipados com sensores ou atuadores com capacidade de se comunicar com radiofrequência. Alguns nós tem capacidade de processamento o que possibilita uma melhor utilização do canal de comunicação.

De acordo com (PINHEIRO, 2011), as redes de sensores sem fio (*Wireless Sensor Networks* - WSN), é um subconjunto das redes sem fio que tem por finalidade conectar-se sem o uso de fios de sensores e atuadores de modo geral. E que possuem três vantagens:

- 1) Necessidade de diminuição do custo da instalação de sensores sob a forma de acabamento, mão de obra, materiais, testes e verificação. Como exemplo disso, uma simples chave de final de curso pode custar de 50 a 100 vezes do seu valor.
- 2) Necessidade de conectores que podem ficar soltos, perdidos, mal conectados, ou quebrados em virtude do manuseio de dispositivos visinhos, também conhecido como problema de conectividade do último metro. Este problema é conhecido devido ser parecido com o que acontece nas redes de âmbito largo (*Wide Area Network* – WAN), chamado de problema de conectividade de última milha.
- 3) Formam a camada inferior dos sistemas inteligentes no que abrange os ambientes ricos em sensores que geram grande quantidade de dados para melhoria do desempenho das operações industriais. Além disso, permite coletar com mais frequências dados sobre um grande número de máquinas e sistemas industriais.

#### 3.3.1. O padrão IEEE 802.15.4

Segundo (SANTOS, 2007), o padrão IEEE 802.15.4 especifica um protocolo e interconexão para dispositivos de comunicação de dados que usam baixa taxa de dados, baixa potência, baixa complexidade e transmissões de uma rede sem fio (WPAN) em radio frequência de pequeno alcance.

De acordo com (SANTOS, 2007), esse padrão define um padrão para a camada física (PHY), camada ao meio (MAC) para redes sem fio para curto alcance com baixas taxas (LR-WPAN).

Segundo (PINTO, 2015), no Brasil a frequência usado pelo padrão IEEE 802.15.4 é de 2,4 GHz com 16 canais de operação e não necessita de licença para funcionamento. As redes ZigBee apresentam algumas vantagens como demonstrado na Tabela 2 do módulo XBee .

Tabela 2 – Especificações do Módulo XBee PRO S1.

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Faixa de Frequência           | 2,4000 à 2,4835 GHz                        |
| Frequência de Operação        | ISM 2,4 GHz                                |
| Alcance em ambientes urbanos  | 30 metros                                  |
| Alcance em linha visível      | 100 metros                                 |
| Taxa de dados em RF           | 250 000 bps.                               |
| Taxa de dados da interface    | 115 200 bps.                               |
| <b>Propriedades Elétricas</b> |  |
| Tensão de alimentação         | 2,8 à 3,4 V                                |
| Corrente de transmissão       | 45 mA (3,3 V)                              |
| Corrente de recepção          | 50 mA (3,3 V)                              |
| <b>Rede</b>                   |  |
| Topologias                    | Ponto-a-ponto, Ponto-a-multiponto e malha. |
| Manipulação de erro           | Retransmite e reconhece                    |
| Endereçamento (cada canal)    | 65 000 endereços disponíveis.              |
| Número de canais              | 16 canais.                                 |
| Criptografia                  | 128- bits AES                              |

Fonte: (PINTO, 2015, p. 29)

#### 3.3.1.1. Dispositivos de Rede.

De acordo com (NENOKI, 2013), a tecnologia IEEE 802.15.4 apresenta dois tipos de dispositivos. O primeiro é o FFD que tem um conjunto completo de serviços MAC e que pode atuar tanto como uma rede, ou como um simples dispositivo da rede; e o segundo é o RFD, que tem uma parte dos serviços MAC e que pode atuar como um dispositivo de rede.

Segundo (PINTO, 2015), são dois os tipos de dispositivos que o padrão IEEE 802.15.4 suporta:

- 1) Dispositivo de função completa (FFD – *Full Function Device*)

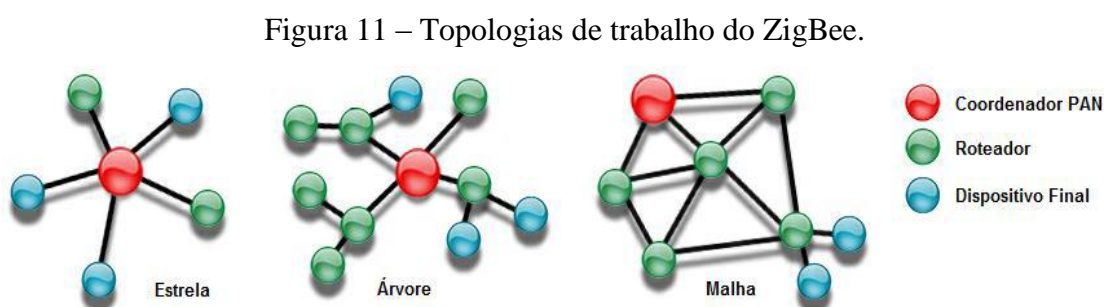
É um dispositivo que suportar três modos de operação, e ainda pode se comportar como:

- a) Coordenador de PAN: É o controlador principal da PAN, e tem a capacidade de criar sua própria rede, na qual outros dispositivos serão associados.
  - b) Coordenador de grupo (*Cluster-Head*): prover os serviços de sincronização para seu grupo por meio da transmissão de sinais. Este dispositivo não cria sua própria rede e precisa estar associado a um coordenador PAN.
  - c) Dispositivo simples: Este dispositivo não executa as mesmas funções já descritas anteriormente.
- 2) Dispositivo de função reduzida (RFD – *Reduced Function Device*)

É um dispositivo que opera com execução mínima do protocolo IEEE 802.15.4, e está destinado a aplicações bastante simples, como por exemplo, um interruptor de luz ou um sensor infravermelho passivo, logo não precisa enviar grandes quantidades de dados e só pode ser associado a um único FFD. Quando se trata de uma LR-WPAN é necessário no mínimo, um FFD funcionando como coordenador da PAN, que fornecerá serviços de sincronização global da rede e gerenciamento dos outros dispositivos da rede.

### 3.3.1.2. Topologias de Rede.

Segundo (COLVERO, 2012), o padrão ZigBee é extremamente robusto e flexível onde seus elementos podem trabalhar em diversas configurações de modo a permitir uma montagem quase que livre. A Figura 11 demonstra a associação de dispositivos que podem ter três topologias:



- 1) Topologia em Estrela: É constituída pela distribuição dos dispositivos finais, interligados por um coordenador PAN central. É a forma mais simples de elaboração, entretanto, só é viável quando há visibilidade de todos os dispositivos finais com o coordenador ou roteador, não sendo necessitando de desvios no decorrer do percurso devido obstrução no sinal.

- 2) Topologia em Árvore: Sua distribuição é análoga à topologia em malha, onde o coordenador tem o papel de roteador mestre em relação aos outros roteadores e os dispositivos finais.
- 3) Topologia em Malha (*Mesh*): É a mais versátil e mais robusta de todas as topologias da rede, pois além de possuir inicialização automática, tem a capacidade de gerenciar as melhores rotas entre os pontos, para transporte de dados, sendo capaz de criar desvios quando ocorre alguma queda de percurso. Mesmo com uma configuração mais complexa, é a melhor devida sua flexibilidade e robustez.

### 3.3.1.3. Camada Física

Segundo (NENOKI, 2013), o padrão IEEE 802.15.4 disponibiliza três faixas de frequências operando na banda ISM (*Industrial, Scientific and Medicine*), na qual não necessita de licença para funcionamento, que são especificadas de acordo com os objetivos técnicos e atribuídos segundo o continente de utilização:

- Banda 868 – 868.6MHz: Essa banda é disponibilizada para a maioria dos países Europeus com uma taxa de transferência de dados de 20 Kb/s. O padrão IEEE 802.15.4 disponibiliza como único canal zero a Banda 868 MHz.
- Banda 902 – 928 MHz: Essa banda é disponibilizada para América do Norte, Austrália, Nova Zelândia e alguns países da América do Sul, cuja taxa de transferência de dados de 40 Kb/s. O padrão IEEE 802.15.4 disponibiliza dez canais (1 a 10) e tem como frequência central a Banda 915 MHz.
- Banda 2400 – 2483,5 MHz: Essa banda é disponibilizada para o mundo todo, com taxa de transferência de dados de 250 Kb/s. O padrão IEEE 802.15.4 disponibiliza dezesseis canais (11 a 26) e é designada como Banda 2,4 GHz.

De acordo com (SILVA, 2011), a camada física exerce sua função em três diferentes faixas de frequência não licenciadas conforme a localização geográfica. O padrão IEEE 801.15.4, especifica vinte e sete canais, como é demonstrada na Tabela 3.

Tabela 3 - Alocação de bandas e diferentes locais.

| <b>Banda</b>  | <b>Frequência (MHz)</b> | <b>Local Disponível.</b> | <b>Largura de Banda</b> | <b>Quantidade de canais</b> |
|---------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 2,4 GHz (ISM) | 2400 – 2483,5           | Todo o mundo             | 250 Kbps                | 16                          |
| 915 MHz (ISM) | 902 – 928               | EUA                      | 40 Kbps                 | 10                          |
| 868 MHz       | 868 – 868,6             | Europa                   | 20 Kbps                 | 1                           |

Fonte: Adaptado (SILVA, 2011, p. 17)

ISM – *Industrial, Scientific and Medical*

Segundo (SILVA, 2011), existe uma variação entre modulação, método de propagação e distância entre os canais de acordo com a banda utilizada, conforme é demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Alocação de bandas e distância entre canais.

| <b>Banda</b>  | <b>Distância entre Canais</b> | <b>Modulação</b> | <b>Método de Propagação</b> |
|---------------|-------------------------------|------------------|-----------------------------|
| 2,4 GHz (ISM) | 5 MHz                         | O – QPSK         | 16 – array orthogonal       |
| 915 MHz (ISM) | 2 MHz                         | BPSK             | DSSS Binário                |
| 868 MHz       | -                             | BPSK             | DSSS Binário                |

Fonte: Adaptado (SILVA, 2011, p. 17)

BPSK – *Binary Phase Shift Keying*DSSS – *Direct Sequence Spread Spectrum*ISM – *Industrial, Scientific and Medical*O – QSKY – *Offset Quadrature Phase Shift Keying*

De acordo com (SILVA, 2011), cada banda apresenta uma potência mínima para recepção e o alcance máximo em condições ideais, ou seja, não levando em conta os efeitos de reflexão, difração e espalhamento, são demonstrados na Tabela 5.

Tabela 5- Potências Mínimas de recebimento e alcance máximo.

| <b>Banda</b>  | <b>Sensibilidade de Recepção</b> | <b>Alcance Máximo</b> |
|---------------|----------------------------------|-----------------------|
| 2,4 GHz (ISM) | - 85 dBm                         | 200 m                 |
| 915 MHz (ISM) | - 92 dBm                         | 1 km                  |
| 868 MHz       | - 92 dBm                         | 1 km                  |

Fonte: Adaptado (SILVA, 2011, p. 17)

#### 3.3.1.4. Camada de Controle de acesso ao meio.

Segundo (SANTOS, 2007), a camada MAC (*Medium Access Control*) utiliza um protocolo baseado no algoritmo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), o qual solicita que se escute o canal antes de fazer a transmissão, para que se diminua a probabilidade de colisões durante a transmissão.

De acordo com (SANTOS, 2007), o padrão IEEE 802.15.4 cria uma arquitetura de comunicação de rede especial chamada *superframe*, usada na multiplexação por divisão de tempo. Para esse caso o protocolo MAC pode operar com dois modos que podem ser escolhido a critério do coordenador:

- Modo *Beacon-enabled*: periodicamente balizas são geradas pelo coordenador, com objetivo de sincronizar os dispositivos que estão conectados e identificar a rede PAN. Um quadro de balizamento dá início a um *superframe*, que agrega todos os quadros de dados que são trocados entre o coordenador da rede PAN e os nós. É permitida a transmissão de dados durante a duração do *superframe*.
- Modo *Non Beacon – enabled*: as balizas não são habilitadas, os dispositivos podem enviar seus dados usando um mecanismo chamado *unslotted CSMA/CA*. Neste modo não se utiliza a estrutura *superframe*.

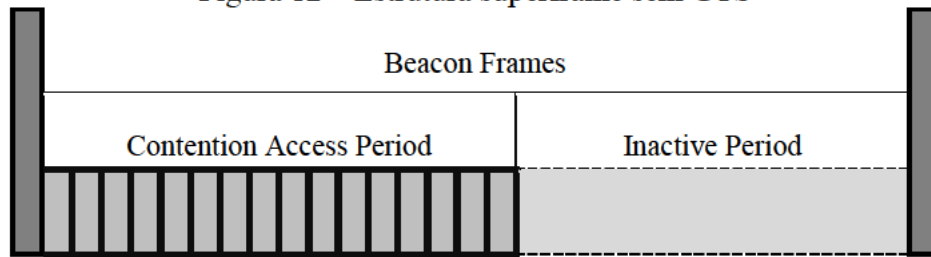
#### 3.3.1.5. Modo de Operação Beacon-enabled.

De acordo com (DEMETRIO, 2009), o *superframe* está dividido em duas partes, sendo uma a porção ativa e a outra, a porção inativa. Durante a porção inativa não deve haver interação do coordenador com sua respectiva PAN, sendo assim, entra em um modo de economia de energia.

De acordo com (DEMETRIO, 2009), na LR-WPAN uso ideal da estrutura o *superframe*, que é definido pelo coordenador, e que por sua vez estabelece um limite por quadros de sinalização, dividido em 16 faixas iguais conforme a Figura 12, que são enviados pelo coordenador da PAN.



Figura 12 – Estrutura superframe sem GTS

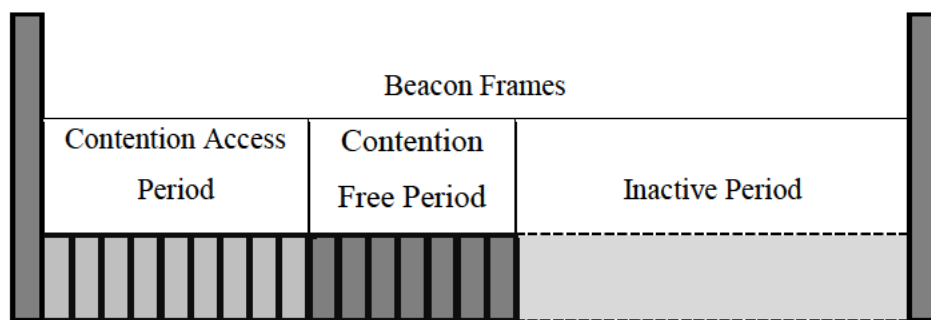


Fonte: Adaptado (PINHEIRO, 2011, p. 55)

GTS - *Guaranteed Time Slots*.

Segundo (QUEIROZ, 2016), o superframe é definido em dois períodos ativo e inativo, como demonstrado na Figura 13, onde a parte ativa é dividida em três partes, o Beacon, o Período de acesso por Contenção (CAP) e o Período livre de Contenção (CFP).

Figura 13 – Estrutura superframe com GTS



Fonte: Adaptado (PINHEIRO, 2011, p. 55)

#### 3.3.1.6. Modo de Operação *Non Beacon-enabled*.

De acordo com (QUEIROZ, 2016), quando o modo *Non Beacon* é selecionado por um coordenador, nessa operação não ocorre *beacon* nem *superframes*; logo o acesso ao meio é coordenado por um mecanismo chamado CSMA/CA sem slot.

#### 3.3.1.7. Sincronização.

De acordo com (DEMETRIO, 2009), as redes as redes LR-WPAN dependem da configuração da rede e usam dois tipos de mecanismos de acesso ao meio. São usados dois métodos de acesso ao meio:

- Com *Beacon Frames* – a transmissão é sincronizada com o processo de sinalização, onde possui recursos reservados para a transmissão. Os quadros de reconhecimento e sinalização são enviados sem o uso do mecanismo CSMA – CA.
- Sem *Beacon Frames* – O dispositivo escuta o meio e só transmite quando o meio estiver desocupado, entretanto, os congestionamentos são tratados com uso de um algoritmo de *backoff*. Os quadros de reconhecimento são enviados sem o mecanismo CSMA-CA.

Segundo (QUEIROZ, 2016), o Coordenador *Zigbee*, o *Gateway* e o Coordenador são dispositivos instalados na um para cada rede podem agir como Coordenador WPAN ou um roteador *ZigBee*. Uma vez que rede estiver funcionando no modo *beacon* são enviados *beacon frames* periodicamente ao coordenador que efetuam o sincronismo com os nós da rede, logo o *beacon* é um frame de sincronismo.

Segundo (PINHEIRO, 2011), existem diversos protocolos e algoritmos usados na sincronização de tempo em redes de computadores, como por exemplo:

- NPT – *Network Time Protocol*: provavelmente o mais conhecido, utiliza a Internet para sincronização de relógios. Entretanto, exigem uma quantidade significativa de recursos da informática e computação, e não tolera falhas, sendo assim, inadequado para uma RSSF.
- FTSP – *Flooding Time Synchronization Protocol*: fornece um método de sincronização de tempo em larga escala para redes de sensores sem fio. Projetado para acomodar mudanças de topologia de rede, onde os sensores são moveis. Este protocolo usa a sincronização periódica do tempo, e sempre que um nó recebe uma mensagem de sincronismo de tempo, ele transmite a mensagem de volta, enchendo a rede com mensagens de sincronização. Isso permite serem comparadas as marcas de tempo de últimas mensagens recebidas, e desse modo o nó faz o calculo da regressão linear que permite que seja feita uma compensação da diferença em seu relógio e o tempo global, assim como a diferença relativa em frequência.
- RBS – *Reference Broadcast Synchronization*: através de uma transmissão em difusão faz a sincronização em um conjunto de receptores com outro, ou seja, os nós enviam balizas de referência para os nós vizinhos, e com isso, é descartado o tempo de envio e o tempo de acesso do caminho crítico. O

caminho crítico é encurtado para que seja incluído apenas o tempo de injeção do pacote para o canal na última leitura do relógio. Desse modo, cada receptor fica sincronizado com um pacote de referência, predefinido, e é injetado no canal físico ao mesmo tempo.

#### 3.3.1.8. Susceptibilidade a Ruído.

Segundo (PINHEIRO, 2011), a susceptibilidade a ruído em linhas de distribuição constituem grande perigo, por serem bastante agressivas em ambientes eletromagnéticos. Sendo de grande importância acompanhar o comportamento das redes sem fio em ambientes submetidos a altas voltagens.

Segundo (PINHEIRO, 2011), o desempenho da tecnologia ZigBee, que usa o padrão IEEE 802.15.4 como camada de enlace e camada física, sobre o impacto de descargas parciais e seu potencial para produzir radiação de alta frequência. Como solução usam-se um emulador de descargas parciais e um sistema de medição na faixa de frequência de 716 MHz a 5 GHz.

De acordo com (WYKRET, 2014), em se tratando do desempenho de sinais de rádio, a interferência é um dos fatores limitadores. Quando a frequência é reutilizada em uma área de cobertura específica, existe a presença de diversos usuários usando o mesmo conjunto de frequência.

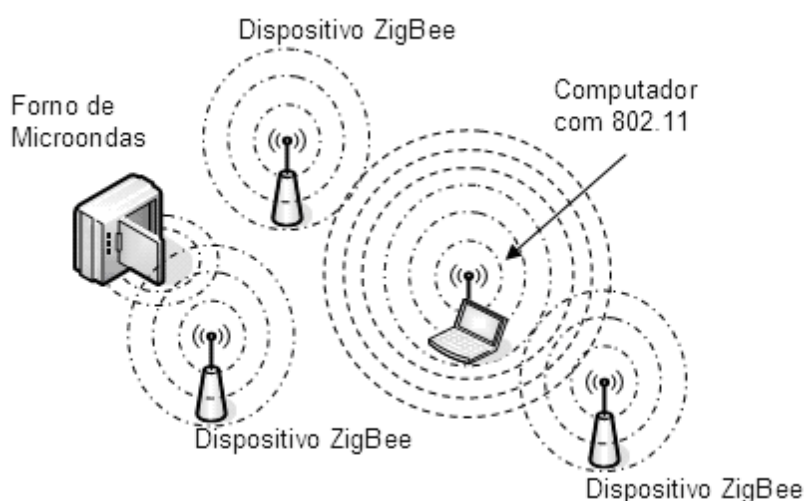
De acordo com (WYKRET, 2014), destaca dois tipos de sinais resultantes das interferências. A primeira é a conhecida como interferência do co-canal, que é gerada da interferência entre os sinais desses usuários e a segunda, é a interferência de canal adjacente que é decorrente de filtros receptores imperfeitos, que permitem frequências vizinhas vazem para a banda de passagem.

Segundo (QUEIROZ, 2016), um estudo experimental correlacionando taxa de perda de pacotes e potência média no canal de rádio IEEE 802.15.4, submetidos à interferência de uma rede IEEE 802.11 e um forno microondas, influenciaram no aumento significativo do nível de energia nos canais, comprometendo o desempenho das comunicações dos rádios.

De acordo com (QUEIROZ, 2016), alguns casos mostraram que a taxa de perda de pacotes dos rádios IEEE 802.15.4, chegou a 90% quando submetidos à interferência de rede IEEE 802.11. No entanto, quando sujeito à interferência do forno microondas, no pior caso, a taxa foi em torno de 50% operando nos canais 21 e 23.

De acordo com (DEMETRIO, 2009), na Figura 14 é apresentado de forma contextualizada um ambiente de comunicação de redes de sensores sem fio operando em meio a outros dispositivos que não fazem parte da rede. Embora o forno microondas gere interferências, ou mesmo um computador com interface wireless 802.11, alguns dispositivos como, telefones sem fio, controles remotos e computadores, são um dos principais problemas para o protocolo IEEE 802.15.4, devido utilizar as bandas ISM, quando utilizam a mesma banda de operação das redes LR-WPAN, ou mesmo um computador com interface wireless 802.11.

Figura 14 - Geradores de interferências no sinal das LR-WPAN



Fonte: (DEMETRIO, 2009, p. 54)

Segundo (NENOKI, 2013), a modulação do rádio no padrão ZigBee é feita por Espalhamento Espectral por Sequência Direta (*Direct Sequence Spread Spectrum – DSSS*), que permite uma simples transmissão aos equipamentos e efetivações com menor custo. A técnica consiste em espalhar dados transmitidos por uma banda ampla, multiplicando os dados através de um código de espalhamento, modo a fornecer imunidade ao ruído, assim com aos sinais de interferência usando dois tipos de modulações:

- 1) *Binary Phase Shift Keying* (BPSK) – usadas nas duas bandas menores de frequências de 868 MHz e 915 MHz.
- 2) *Offset Quadrature Phase Shift Keying* (O - QPSK) – ortogonal na banda de 2,4 GHz.

#### 4. MATERIAS E MÉTODOS

De acordo com (PEREIRA, 2007), cita algumas técnicas e métodos de localização de faltas em alimentadores de distribuição que utilizam fasores de frequência fundamental e análise de circuitos:

- 1) Técnica para localização de faltas baseada em componente de frequência fundamental de tensões e correntes medidas no início do alimentador – é usada para obtenção dos fasores de frequência fundamental das tensões e correntes medidos no início do alimentador durante a falta. Essa técnica é muito utilizada em redes não-homogêneas que possuem: bancos capacitivos, derivações com cargas variáveis e ramais laterais.
- 2) Técnica de localização de faltas baseada na análise trifásica de redes e de seus componentes – é baseada na integração de informações que são disponibilizadas pelos registradores de faltas com o conhecimento das características topológicas e operacionais do alimentador, assim como os dados armazenados na base de dados.
- 3) Técnica de localização de faltas baseada nas informações de três fontes diferentes – As fontes de informações são os indicadores de faltas instalados nos pontos de ramais da rede, distância calculada da falta à subestação e dados estatísticos de frequência de faltas para diferentes seções da rede.
- 4) Técnica de localização de faltas que usam os fasores de tensão e corrente, medidas no início do alimentador e os valores RMS das tensões para alguns nos alimentadores – é feita uma simulação de falta em todos os pontos de interesse do alimentador, e em cada simulação de falta, os valores das tensões são calculados para os nós onde disponíveis as medições de tensão. Assim que os valores são comparados, é indicado o provável local da falta.
- 5) Sistema automático de localização de faltas – está baseado em medições de dispositivos eletrônicos inteligentes (IED) equipados com função de oscilografia instalados no início dos alimentadores, bancos de dados contendo informações a respeito da topologia e parâmetros do alimentador.

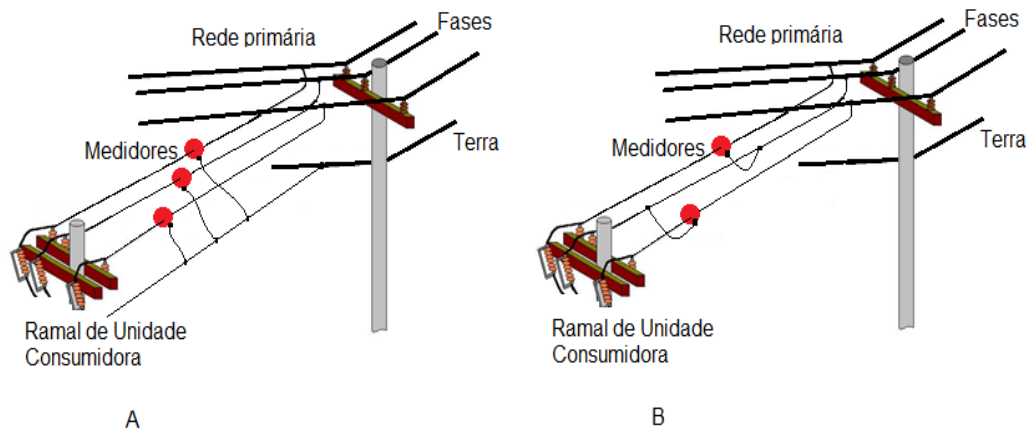
De acordo com (FERREIRA, SIMÕES, *et al.*, 2011), para a localização de faltas em redes primária de distribuição é necessário atentar para os componentes: sensores que monitoram as grandezas elétricas da rede, a transmissão da informação dos sensores com o centro de operações e uma interface homem- máquina, conforme a Figura 15.

De acordo com (FERREIRA, SIMÕES, *et al.*, 2011), destacam as potencialidades de três tecnologias de telecomunicações entre sensores e a interface homem máquina:

- 1) ZegBee – É o nome dado a uma suíte específica de protocolos de comunicação dos rádios digitais pequenos e de baixa potência, baseados no padrão IEEE 802.15.4 para *Wireless Personal Area Networks* (WPANs). A faixa de frequência usada no Brasil é de 2,4 GHz, com taxa de dados variando de 20 kbit/s a 250 kbit/s. É importante mencionar, que para a faixa de 2,4 GHz o órgão regulador não exige licença para operação. E sua característica principal é a capacidade de configurar redes automaticamente, permitindo alta confiabilidade em um número grande de transceptores em uma mesma área de operação. Logo, a tecnologia ZigBee é atraente quando existem diversos sensores instalados em uma área pequena, com alguns quilômetros quadrados.
- 2) Rede Celular GPRS – Tecnologia presente em todos os lugares com cobertura GSM. A transmissão de dados é cobrada por minutos e em pacotes que não ultrapassam 1000 bytes, ou seja, diferente a da tarifação de voz. Deste modo, permite aos dispositivos fiquem sempre conectados com um custo bem baixo. Suas vantagens são: Toda a estrutura já está instalada, cobertura de sinal é bem grande e ganho no custo, tendo em vista que a escala de produção é elevada
- 3) *Power Line Communications* (PLC) – Essa tecnologia consiste em utilizar os próprios fios da rede elétrica para conduzir os sinais de comunicação. O sinal de comunicação é injetado por um par de transceptores em um condutor de rede primária de distribuição por meio de acopladores sincronizados na banda da portadora. A frequência central da portadora é de 80 kHz e modulada com um sinal digital que usa a técnica *frequency shifting keying* (FSK), com taxa de transmissão de 2400 bps. Tem como característica principal a possibilidade de fazer uma comunicação ponto-a-ponto em longas distâncias, o que permite a instalação de um sensor em uma extremidade da rede onde não possui cobertura de sinal GSM.

Segundo (SCHROEDER, 2012), rede de sensores sem fio são dispositivos independentes, organizados geograficamente próximos com sensores que fazem o monitoramento das condições físicas ou ambientais, em comunicação com computadores por meio de roteadores para apresentar e ou processar os dados coletados.

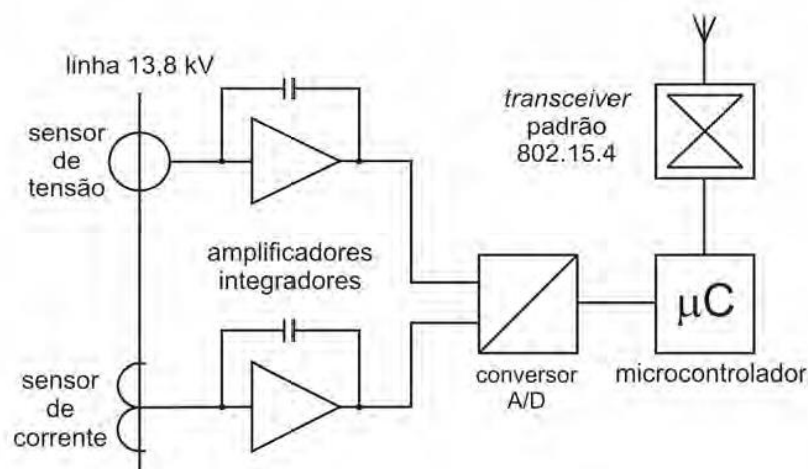
Figura 15 - Topologias em redes primárias trifásicas



Fonte: (WOLANIUK, 2011, p. 21)

Segundo (PINHEIRO, 2011), digitalizados os dados são processados para obtenção de sua FFT (*Fast Fourier Transform*) e enviados ao *transceiver* padrão 802.15.4 encarregado de protocolar a comunicação entre coordenador e concentrador de dados da rede sem fio, conforme Figura 16.

Figura 16 – Diagrama em bloco do medidor de cada fase da rede de distribuição



Fonte: (PINHEIRO, 2011, p. 61)

#### 4.1. SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA EM MÉDIA TENSÃO

De acordo com (ZIMMER e JUNIOR, 2014), o sistema elétrico brasileiro é composto em sua maioria de usinas hidroelétricas geradoras de energia, onde a transmissão para longas distâncias necessita ser elevada para que se tenha um melhor aproveitamento. Ao se aproximar dos grandes centros consumidores, é preciso que a tensão seja diminuída, e então chegar ao consumidor final, como demonstrado na Figura 17.

Segundo (VASCONCELOS, 2017), os centros de consumo são compostos por uma diversidade de consumidores com necessidade do suprimento de suas demandas de potências de ordem de grandezas diferentes, tornando impraticável o uso de uma única faixa de tensão.

De acordo com (VASCONCELOS, 2017), no suprimento de grandes usuários de energia elétrica é realizada da seguinte forma:

- 1) Redução no nível de tensão – tensão de subtransmissão ou alta tensão, que é feita nas subestações de subtransmissão alimentadas pelas linhas de transmissão.
- 2) O sistema de subtransmissão alimenta as subestações de distribuição que são responsáveis pela redução de tensão, chamada tensão de distribuição primária ou média tensão.
- 3) A rede elétrica em tensão média supre os transformadores de distribuição, que por sua vez alimentam os circuitos de distribuição em tensão secundária, chamada de rede de baixa tensão.

Segundo (ZIMMER e JUNIOR, 2014), os sistemas de distribuição aéreos está dividido em dois tipos de redes, um em média tensão (rede primária) e o outro em baixa tensão (rede secundária). As redes primárias no Brasil estão padronizadas em 13,8 kV e 34,5 kV, contudo, tensões diferentes das padronizadas são aceitas também.

Figura 17 - Geração de energia até a distribuição ao consumidor final



Fonte: (ZIMMER e JUNIOR, 2014, p. 12)



## 4.2. MEDIDOR DE ENERGIA EM MÉDIA TENSÃO.

Segundo (PEREIRA, 2007), durante a falta de energia, a magnitude das tensões são realizadas em alguns dos alimentadores através de dispositivos dedicados a localização de faltas ou medidores de qualidade instalados no alimentador, desde que os dados estejam disponíveis a esses medidores. As magnitudes podem ser calculadas por meio da Transformada Discreta de Fourier ou através do valor RMS da tensão a uma janela de dados de um ciclo.

De acordo com (PINHEIRO, 2011), as unidades de medição de corrente e de tensão aplicadas de modo individual a cada fase na rede de distribuição, conforme Figura 18 e de um elemento coordenador/concentrador que possui as funções de coordenar as aquisições pelas unidades e processar informações de modo a identificar e localizar os ramais que estão com falta de energia elétrica.

Figura 18 - Medidores instalados



Fonte: (WOLANIUK, 2011, p. 51)

Segundo (JARSKE, WOLANIUK, *et al.*, 2012), os medidores de energia monofásicos foram projetados para aplicação em médias tensões como 15 kV ou 34,5 kV, equipados com rádio transmissor e dispositivo de leitura de dados podendo ser computados em *notebook* ou *handhelp*.

De acordo com (WOLANIUK, 2011), os medidores monofásicos tem como características possuir apenas um elemento de medição, enquanto os medidores trifásicos têm dois ou três elementos. Existem também outros tipos de medidores monofásicos e trifásicos que possuem a capacidade de medir a corrente de neutro, ou seja, uma forma de verificar fraudes, no entanto ainda não disponível no mercado brasileiro.

#### 4.3. ALIMENTAÇÃO DO MEDIDOR.

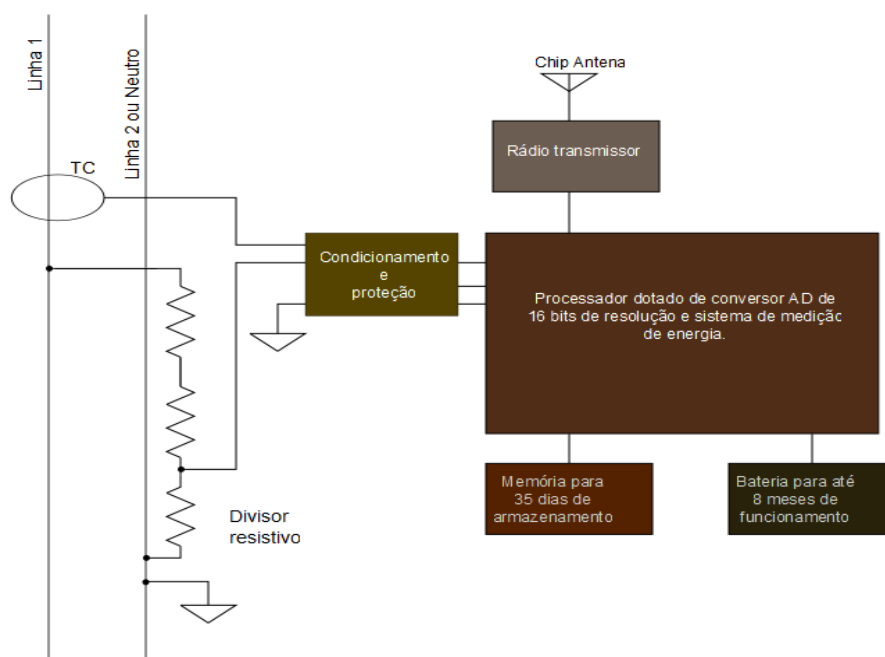
Segundo (WOLANIUK, 2011), a alimentação do medidor é utilizada baterias do modelo ER34615 não recarregáveis, o que permite um uso de até 8 meses sem necessidade de troca. A bateria fornece 19000 mAh em tensão aproximada de 3,6 v.

#### 4.4. SISTEMA ELETRÔNICO DE MEDIÇÃO.

Segundo (JARSKE, WOLANIUK, *et al.*, 2012), o microcontrolador MSP430FE427 da *Texas Instruments*, é projetado para uso em medidores de energia de baixa tensão e em seu interior, existem dispositivos auxiliares para cálculos de tensão e corrente efetivos e a potencia integral em energia. Ligado ao microcontrolador existe um transceptor de rádio para comunicação com o leitor, uma memória ferroelétrica que armazena dados de consumo e circuitos de condicionamento analógico do sensor de corrente e tensão, conforme Figura 19.

De acordo com (JARSKE, WOLANIUK, *et al.*, 2012), a memória armazena dados por um período de 65 dias, sendo quase o dobro quando comparado com medidores convencionais, onde o dimensionamento de sua memória é de um período de faturamento, ou seja, 35 dias.

Figura 19 - Circuito de medição e comunicação desenvolvido



Fonte: (WOLANIUK, 2011, p. 33)

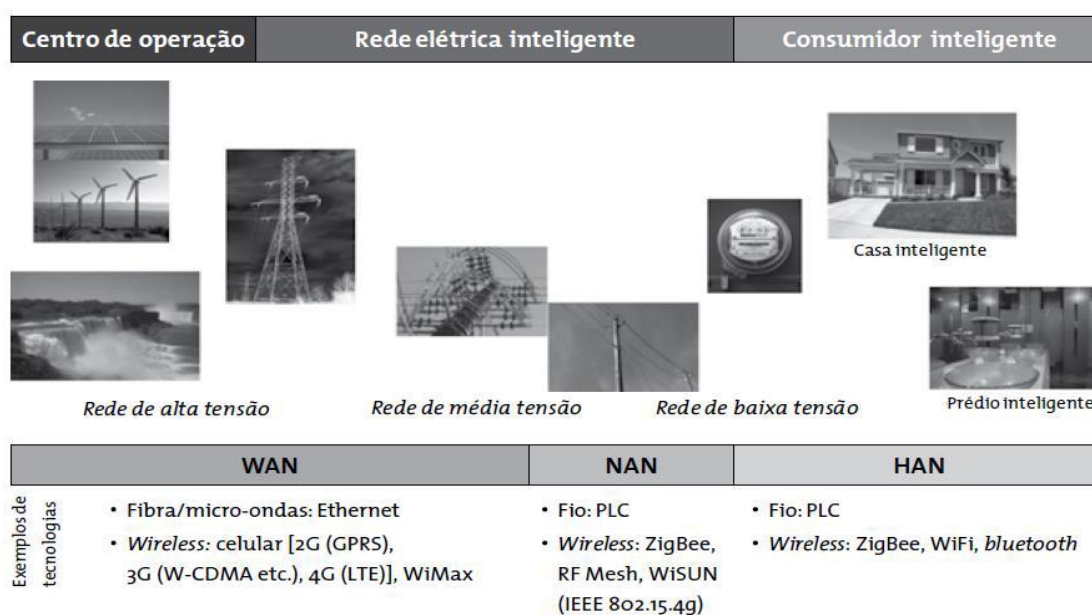
#### 4.5. SISTEMA DE COMUNICAÇÃO DE MEDIDORES.

Segundo (COSTA, SERMANIU e SILVA, 2016), a comunicação na rede *smart grid* está subdividida em 3 segmentos:

- 1) *Wide Area Network* (WAN) – faz cobertura desde o centro de operação e parte da rede elétrica inteligente sendo responsável pela rede de alta tensão e parte da média tensão;
- 2) *Neighborhood Area Network* (NAN) – tem abrangência da WAN até a *Home Area Network* (HAN) e cobre a rede de média tensão e baixa tensão;
- 3) *Home Area Network* (HAN) – responsável pela comunicação residencial, ou seja, o consumidor inteligente. A rede (HAN) é um tipo de rede LAN (*Local Area Network*), cuja finalidade é facilitar a comunicação entre os medidores inteligentes e os dispositivos eletrodomésticos.

De acordo com (COSTA, SERMANIU e SILVA, 2016), é possível observar a topologia de rede telecomunicações na Figura 20, mostrando a classificação dos consumidores inteligentes, classificação na utilização de redes HAN que permitem utilização da rede de comunicações via wireless (*Wi-Fi*, *ZigBee* e *Bluetooth*).

Figura 20 - Arquitetura de Rede de Comunicação em Smart Grid.



Fonte: (COSTA, SERMANIU e SILVA, 2016, p. 25)

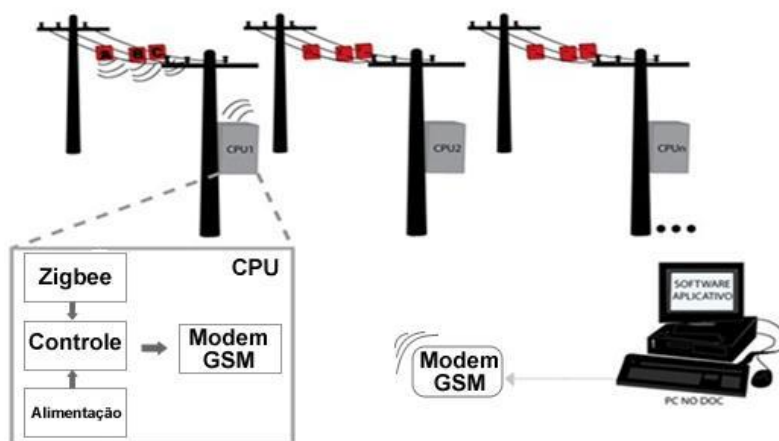
#### 4.6. FUNCIONAMENTO DO SISTEMA.

Segundo (SILVA, 2016), medidores inteligentes são capazes de realizar sofisticadas medições, cálculos, calibração e comunicação por meio de hardware e software. Esses medidores são projetados para efetuar funções programáveis, armazenar e efetuar transmissões de dados de acordo com os padrões determinados.

Segundo (WOLANIUK, 2011), as informações dos medidores monofásicos são enviadas para um dispositivo requisitante, de tal modo que a energia total do circuito possa ser computada.

Segundo (MODOLON, 2013), um sinal de rádio frequência é enviado através do Zigbee até a CPU que está fixada ao poste, e envia os dados à central da concessionária de energia, que faz a transmissão por meio da tecnologia GSM, ou seja, transmissão dos pacotes de dados via rede celular. Dentro da CPU, constam os equipamentos como: fonte de tensão para alimentação dos circuitos eletrônicos, módulo ZigBee e GSM, microcontrolador e uma bateria reserva para alimentação dos circuitos em caso da ocorrência de falta e também uma ventilação forçada para circulação de ar, conforme a Figura 21.

Figura 21 – Esboço do Sistema Proposto.



Fonte: (MODOLON, 2013, p. 45)

#### 4.7. FONTE DE ALIMENTAÇÃO.

Segundo (MODOLON, 2013), uma placa de alimentação fornece as tensões de 12V, 5V e 3,3V, e dessa foram atender as correntes dos módulos: GSM com 250mA, Zigbee com 50mA, a bateria e demais componentes com 100mA, conforme a Figura 22.

Figura 22 – Placa de alimentação



Fonte: (MODOLON, 2013, p. 50)

#### 4.8. MÓDULO ZIGBEE E GSM.

De acordo com (SCHROEDER, 2012), o ZigBee é um protocolo de rede sem fio, desenvolvido pela ZigBee Alliance com aplicações na automação e controle remoto, permitindo um custo e consumo baixo para conectar equipamentos que precisam de fonte de energia independente de longa duração, sem necessitar de altas taxas de transferências de dados.

Segundo (SILVA, 2011), o módulo ZigBee é um hardware que tem certificação das agências reguladoras do Brasil, no caso a Anatel. Estes módulos podem ser alimentados por baterias e podem incluir pinos de entrada/saída GPIOs (*General Purpose Input/Output*) ou ADC.

De acordo com (MODOLON, 2013), operando na rádio frequência de 40 bandas no padrão IEEE 802.15.4, não necessita de licença para o funcionamento em qualquer parte do mundo. Segue abaixo algumas características do módulo ZigBee, conforme a Figura 23:

##### 1. Desempenho:

- a. Rendimento da Potência de saída: 1 mW (0 dBm);
- b. Alcance em ambientes internos/zonas urbanas;
- c. Alcance em ambientes internos/ zonas urbanas: 30m;

- d. Alcance de RF em linha visível para ambientes externos: 100m;
  - e. Sensibilidade do receptor: - 92 dBm;
  - f. Frequência de operação: ISM 2,4 GHz;
  - g. Taxa de dados de RF: 250 000 bps;
  - h. Taxa de dados da Interface (Data Rate): 115 200 bps.
2. Alimentação:
- a. Tensão de alimentação: 2,8 à 3.4 V
  - b. Corrente de transmissão (típico): 45 mA à 3,3 V.
  - c. Corrente de Recepção (típico): 50 mA à 3,3 A.
  - d. Corrente de *Power down Sleep*: < 10  $\mu$ A.
3. Propriedades físicas:
- a. Dimensões: (2,438cm x 2,761cm);
  - b. Peso: 3 g;
  - c. Temperatura de operação: -40° C a 85° C (industrial);
  - d. Opções de antena: Conector U.FL RF, Chip ou Chicote (whip).

Figura 23 – Módulo ZigBee.



Fonte: (MODOLON, 2013, p. 40)

Segundo (LIBERALQUINO, 2010), os dispositivos de modems GSM, como demonstrado na, Figura 24 podem acessar a rede de telefonia celular GSM, e conecta-se tanto a modems de mesmo tipo como a computadores plugados a internet, e pode atuar em aplicações como gerenciamento, automação, rastreamento, telemetria entre outras.

Figura 24 – Modem WT35



Fonte: (MODOLON, 2013, p. 42)

#### 4.9. LEITURA E CALIBRAGEM DO MEDIDOR.

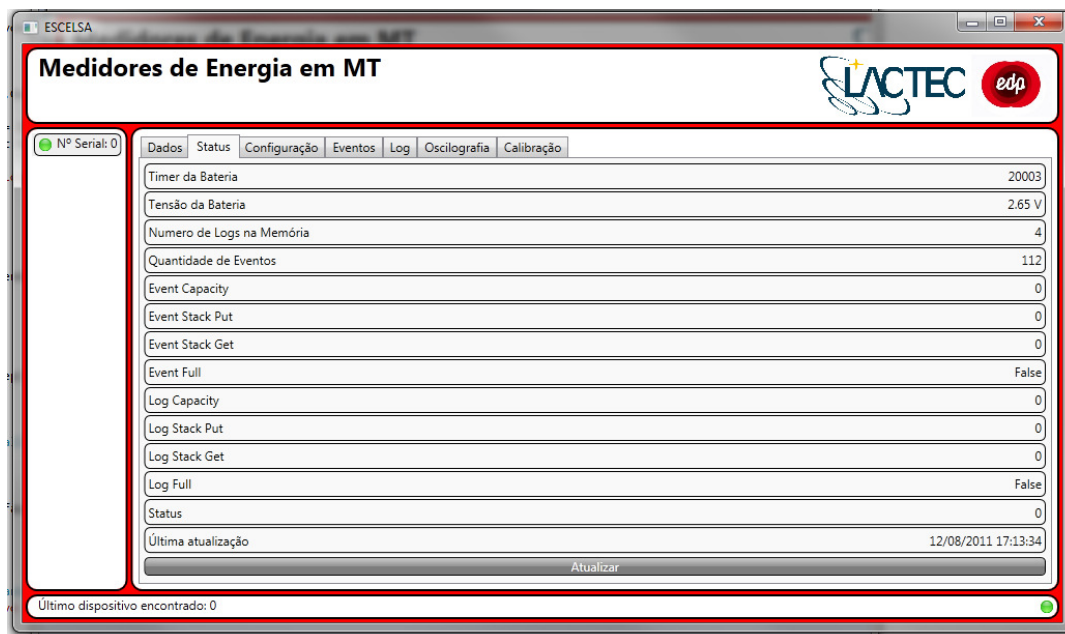
Segundo (WOLANIUK, 2011), para leitura de dados do medidor um *software* para microcomputador portátil e um dispositivo de comunicação, ligado a uma porta USB do computador, que envia e recebe dados dos medidores de energia em um raio de 50 metros, podendo chegar a 200 metros dependendo do ambiente e do computador usado. O *software* permite algumas informações de leituras de dados metrológicos do medidor na Figura 25, leituras de dados do medidor na Figura 26, oscilografia do medidor na Figura 27e calibração do medidor na Figura 28.

Figura 25 – Leituras de dados metrológicos do medidor.



Fonte: (WOLANIUK, 2011, p. 37)

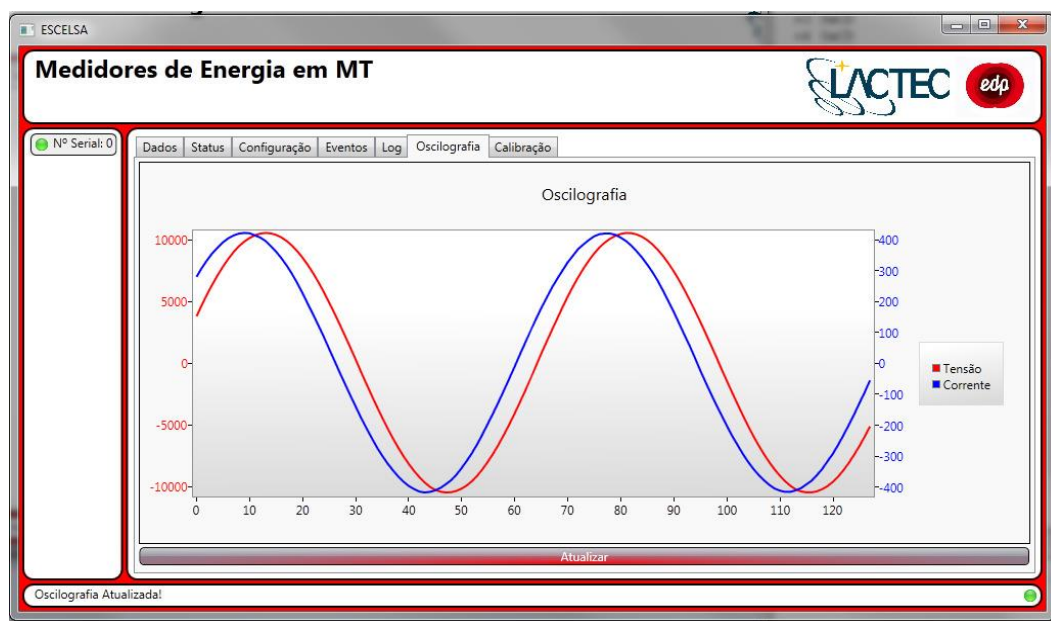
Figura 26 – Leitura de dados do medidor.



Fonte: (WOLANIUK, 2011, p. 37)



Figura 27 – Oscilografia do medidor.



Fonte: (WOLANIUK, 2011, p. 38)

Figura 28 – Calibração do medidor.

|            |           |        |
|------------|-----------|--------|
| Offset     | 0,00      | Enviar |
| Cos PHI    | 0,50      | Enviar |
| Tensão 1   | 6000,00   | Enviar |
| Corrente 1 | 30,00     | Enviar |
| Potência 1 | 180000,00 | Enviar |
| Tensão 2   | 0,00      | Enviar |
| Corrente 2 | 0,00      | Enviar |
| Potência 2 | 0,00      | Enviar |
| Tensão 3   | 0,00      | Enviar |
| Corrente 3 | 0,00      | Enviar |
| Potência 3 | 0,00      | Enviar |

Fonte: (WOLANIUK, 2011, p. 38)

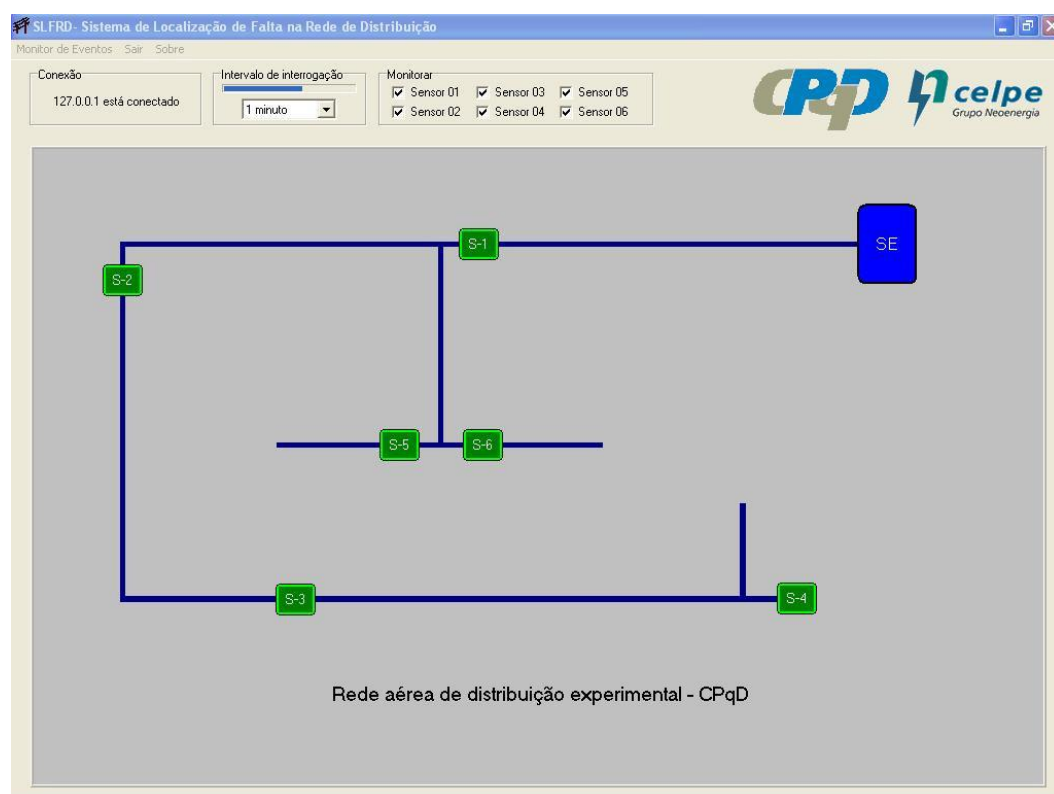
#### 4.10. INTERFACE DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS.

Segundo (FERREIRA, SIMÕES, *et al.*, 2011), quando ocorre uma detecção de falta, uma interface homem máquina conforme Figura 29, recebe as informações dos sensores que detectaram o problema e passa a emitir uma mensagem visual de modo a chamar atenção do operador, bem como também pode ser habilitado um alarme sonoro.

De acordo com (FERREIRA, SIMÕES, *et al.*, 2011), os pontos selecionados que estão cerca de 30 quilômetros de Caruaru-PE representados na Figura 30, foram selecionados mediante informações dos sensores, cuja finalidade é auxiliar as equipes de manutenção da CEPEL na localização dos defeitos. Este alimentador parte da Subestação Belo Jardim, cerca de 50 quilômetros da cidade de Caruaru, em direção a São Caetano- PE.

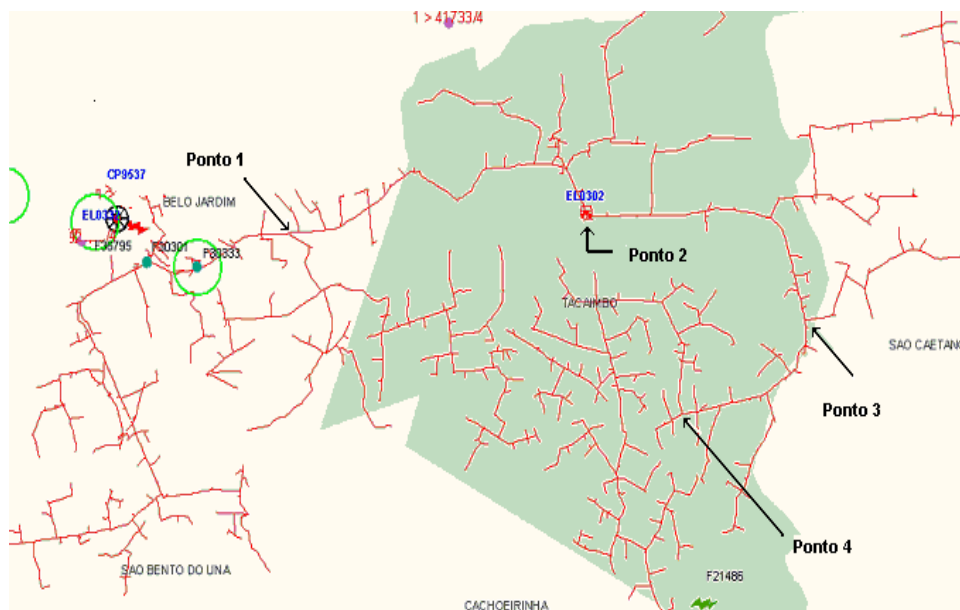
Segundo (CARDOSO, MARTHA, *et al.*, 2004), a Figura 31, apresenta a interface do modulo de localização do SISLOC, com gráfico de um alimentador com pontos notáveis. O sistema gera pontos de teste para cada ponto notável do alimentador, iniciando da saída barra da subestação.

Figura 29 – Tela Principal da interface Homem-Máquina.



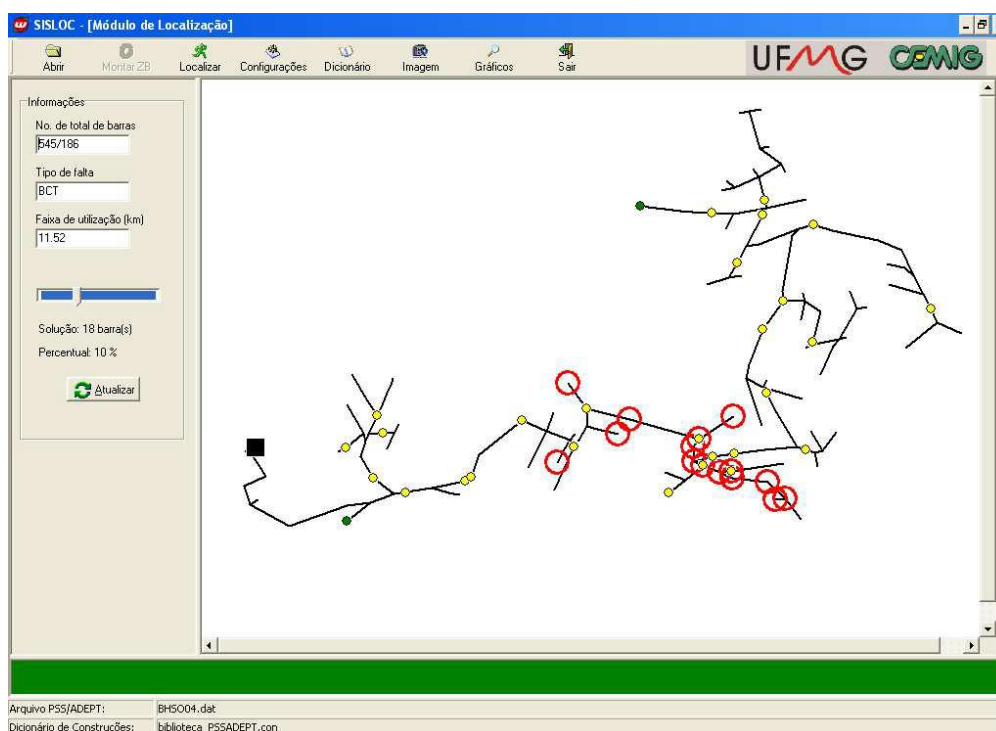
Fonte: (FERREIRA, SIMÕES, *et al.*, 2011, p. 5)

Figura 30 - Diagrama unifilar do Alimentador BLJ 01 V6 com os pontos dos sensores.



Fonte: (FERREIRA, SIMÕES, *et al.*, 2011, p. 6)

Figura 31 – Interface do Módulo de Localização do SISLOC



Fonte: (CARDOSO, MARTHA, *et al.*, 2004, p. 9)

#### 4.11. VIABILIDADE DE UM SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTA E MEDIÇÃO DE ENERGIA.

Segundo (MODOLON, 2013), com o desenvolvimento do projeto para localização de faltas, alguns itens foram adquiridos como: o modem GSM, detectores de falta da *Linetroll* e os módulos *ZigBee* conforme é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Custo do Projeto

| <b>Componentes</b>     | <b>Quantidade</b> | <b>Valor total (R\$)</b> |
|------------------------|-------------------|--------------------------|
| Sensor Linetroll 110Eu | 3                 | 4.350,00                 |
| Módulo ZigBee          | 4                 | 679,60                   |
| Módulo GSM             | 2                 | 894,00                   |
| Componentes Diversos   |                   | 200,00                   |
|                        | <b>Total</b>      | <b>6.123,60</b>          |

Fonte: Adaptado, (MODOLON, 2013, p. 64)

De acordo com (MODOLON, 2013), as empresas CELSEC, com 2,5 milhões de usuários e Cooperaliança, com aproximadamente 33 mil consumidores, efetuaram compensações em 2012, provenientes de faltas na rede de distribuição, foram creditadas ao consumidor afetado na suas faturas no período de até dois meses após a apuração, conforme Tabela 7 e Tabela 8. Logo, esse valor pode ser amenizado com o uso do projeto.

Tabela 7 - Índices de Compensação de Continuidade CELESC.

| Índices de Compensação de continuidade. |                 |             |              |
|---|-----------------|-------------|--------------|
| Região SUL                              |                 |             |              |
| CELESC – DIS -2012                      |                 |             |              |
| Compensações                            | DIC, FIC e DMIC |             |              |
| Quantidade de compensação               | Mensais         | Trimestrais | Anuais       |
| Valor das                               | 1.765.768,00    | 582.788,00  | 473.696,00   |
| Compensações (R\$)                      | 4.969.949,75    | 607.919,12  | 1.249.181,12 |

Fonte: (MODOLON, 2013, p. 65)

Tabela 8 - Índices de Compensação de Continuidade Cooperaliança.

| Índices de Compensação de Continuidade |                 |             |           |
|--|-----------------|-------------|-----------|
| Região Sul                             |                 |             |           |
| COOPERALIANÇA - 2012                   |                 |             |           |
| Compensações                           | DIC, FIC e DMIC |             |           |
| Quantidade de Compensação              | Mensais         | Trimestrais | Anuais    |
| Valor de                               | 11.504,00       | 1.770,00    | 1.253,00  |
| Compensações (R\$)                     | 16.666,09       | 4.373,17    | 18.708,74 |

Fonte: (MODOLON, 2013, p. 65)

Segundo (WOLANIUK, 2011), o sistema de medição de energia possui alguns requisitos:

- 1) A medição de energia é precisa e adequada ao faturamento de tensões de 2kV a 34,5kV e correntes das redes aéreas de até 400 A;
- 2) Tem capacidade de medição de energias e demandas: ativa, reativa e fator de potência;
- 3) Memória capaz de armazenar dados por um período de 35 dias, ou seja, prática comum prevista em norma para alimentadores de média tensão;
- 4) Fácil instalação do medidor, não sendo necessário uso de equipamentos especiais ou desligamento da rede;
- 5) Adequado a grande maioria de conexões entre concessionária e unidade consumidora;
- 6) Viabilidade de custo adequado ao cenário nacional;
- 7) Fabricação nacional.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS.**

Este trabalho fez uma abordagem sobre um dos problemas que as concessionárias responsáveis pela distribuição sofrem, em virtude das multas decorrentes dos desligamentos não programados, cuja origem é a falta permanente em redes elétricas, bem como a proposta de um sistema que não só possa fornecer a localização da falta, auxiliando assim, as equipes de manutenção, mas também de fornecer informações precisas de tensão e corrente, que serão essenciais para o aprimoramento da qualidade e eficiência de seus serviços.

À medida que as pesquisas foram sendo realizadas foi possível perceber que o sistema de comunicação de redes sem fio de protocolo 802.15.4 é imune aos harmônicos, sendo também compatível para com o medidor de média tensão que fornece as oscilografias obtendo assim um resultado satisfatório, contudo, em se tratando dos custos do medidor, não foi possível descobrir o seu valor, tendo em vista que o mesmo não fora declarado, apenas menciona que o custo está enquadrado no cenário nacional.

A utilização desse sistema de medição desde que sejam feitas algumas adaptações da tensão e corrente, podem ter aplicação em áreas como: indústrias – acompanhamento do nível de tensões e correntes, bem como a falta em um determinado ponto de um conjunto de motores, geradores ou transformadores, que atendem a uma linha de produção; faculdades/universidades – a quantidade de luzes e aparelhos de ar condicionados pode ser monitorada, por exemplo, aquele aparelho de ar condicionado que deixou de ser desligado, por esquecimento. Desse modo evita-se o desperdício no consumo de energia, cujo valor é refletido na conta de energia elétrica.

Conclui-se que o sistema de medição é viável não somente para a localização de faltas em redes de distribuição, como pode ser utilizado em trabalhos futuros mencionados nesta página.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. Resolução Normativa nº 63, de 12 de maio de 2004, 12 Maio 2004. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2004063.pdf>>. Acesso em: 18 outubro 2017.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica**, 2017. 90.

ANEEL. indicadores de compensação de continuidade. **aneel**, 2017. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/indicadores-de-compensacao-de-continuidade>> acesso em: 20/10/17>. Acesso em: 20 outubro 2017.

BEZERRA, A. A. D. Monografia. **Indicadores de Desempenho da Concessionária de Energia Elétrica SAELPA: Fatores que influenciam os indicadores DEC e FEC - Universidade Federal da Paraíba**, João Pessoa - PA, Abril 2008.

CARDOSO, E. P. Dissertação de Mestrado. **Sistema de Localização de faltas em redes de distribuição de energia elétrica baseado em sequência de eventos. Universidade Federal de Minas Gerais**, Belo Horizonte, Agosto 2006.

CARDOSO, E. P. et al. **LOCFALT - Nova Metodologia para localização de Faltas em redes e linhas de sistemas de distribuição**. XVI Seminário Nacional de distribuição de Energia Elétrica. Minas Gerais: [s.n.]. 2004. p. 13.

CAVALCANTE, P. A. H. Dissertação de Mestrado. **Localização de Faltas em Linhas de Transmissão usando Morfologia Matemática. Universidade Federal do Rio Grande do Norte**, Natal, Abril 2011.

CHAVES, C. F. Dissertação de Mestrado. **Transformador de Corrente Eletrônico utilizando Bobina de Rogowski e Interface Óptica com Pof para aplicação em Sistemas de Potência. COPPE/UFRJ**, Rio de Janeiro, Setembro 2008.

COLVERO, A. P. Trabalho de Conclusão de Curso. **Implantação de Rede Industrial Wireless para o monitoramento e controle automático de movimentação de aeronaves em aeroportos.** Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2012.

COSTA, A. P. D.; SERMANIU, F. C.; SILVA, G. G. D. Trabalho de Conclusão de Curso. **Desenvolvimento de um protótipo para medição de energia elétrica.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 19 Setembro 2016.

DALCASTAGNÊ, A. L. Tese de Doutorado. **Método interativo para localização de faltas em linhas de transmissão em linhas de transmissão a partir de fasores não sincronizados.** Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, outubro 2007.

DEMETRIO, S. N. Trabalho de Conclusão do Curso de Pós - Graduação. **Redes de sensores sem fio.** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. 84.

DIAS, E. B. Dissertação de Mestrado. **Avaliação de Indicadores de Continuidade e seu impacto no planejamento de Sistemas de Distribuição.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

ELETRODEX. sensor de efeito hall linear a1302. **Eletrodex Eletrônica**, 2017. Disponível em: <<http://www.eletrodex.com.br/sensor-de-efeito-hall-linear-a1302.html>>. Acesso em: 27 outubro 2017.

FERREIRA, A. N. et al. Artigo. **Sistema de Localização de Falta na Rede de Distribuição da CELPE**, Fortaleza, 2011. 8.

FRONCHETTI, J. Trabalho de Conclusão de Curso. **Avaliação e Análise de Consumo de Energia Multinível em Hardware Modular.** Centro Universitário Univates, Lajeado - RS, 24 Julho 2015.



GOVEIA, S. C. M. Trabalho de Conclusão de Curso. **Transdutor de Corrente do tipo Bobina de Rogowski.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, dezembro 2013.

JARSKE, A. et al. Artigo. **Dispositivo de Combate a Fraudesd em Sistemas de Medição de Energia de Unidades Consumidoras Alimentadas por Médias Tensões.** XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica -SENDI, Rio de Janeiro, 22 a 26 outubro 2012. 11.

JUNIOR, J. A. P. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação. **Localizador de Falhas por Ondas Viajantes em Linhas de Transmissão.** Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá- SP, 2016.

KOIZUMI, M. T. Dissertação de Mestrado. **Desenvolvimento de sensores e instrumentação aplicados no projeto de equipamentos analisadores de qualidade de energia elétrica.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Curitiba, Curitiba, 2012.

LIBERALQUINO, D. Monografia. **Desenvolvimento de Plataforma de Comunicação GSM/GPRS para Sistemas Embarcados.** Universidade de Pernambuco - Escola Politécnica de Pernambuco., Recife, 29 nov. 2010.

LIMA, T. D. M. Monografia. **Desnvolvimento de um anteprojeto de um Sistema de Digitalização da Proteção e Controle aplicada a uma subestação elétrica industrial de alta tensão-** Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Guaratinguetá, 2012.

LISTA.MERCADOLIVRE.COM.BR. **lista.mercadolivre**, 2017. Disponível em: <[https://lista.mercadolivre.com.br/shunt-de-corrente#D\[A:shunt-de-corrente,L:2\]](https://lista.mercadolivre.com.br/shunt-de-corrente#D[A:shunt-de-corrente,L:2])>. Acesso em: 27 outubro 2017.

MAQGUTIERREZ. Transformador de corrente RH-78 TC 100 A.. **Maqgutierrez Máquinas e Acessórios**, 2017. Disponível em: <<http://www.maqgutierrez.com.br/produto/377/0/16/10/377/Transformador+de+corrent+e+RH-78+TC+100+A>>. Acesso em: 27 outubro 2017.

MERCADOLIVRE. shunt de corrente. **lista.mercadolivre**, 2017. Disponível em: <[https://lista.mercadolivre.com.br/shunt-de-corrente#D\[A:shunt-de-corrente,L:2\]](https://lista.mercadolivre.com.br/shunt-de-corrente#D[A:shunt-de-corrente,L:2])>. Acesso em: 27 outubro 2017.

MODOLON, A. B. Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação. **Sistema de Detecção e Localização de Faltas em Sistemas de Distribuição**. Faculdade SATC, Criciúma, 4 julho 2013.

NENOKI, E. Trabalho de Conclusão de Curso. **ZIGBEE - Estudo da Tecnologia e aplicação no Sistema Elétrico de Potência**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná., Curitiba - PR, 2013.

ONS. ONS - Relatório Anual 2016. **Operador Nacional do Setor Elétrico**, 2017. Disponível em: <<http://ons.org.br/Paginas/busca.aspx?k=ONS%20-%20Relat%C3%B3rio%20anual%202016>>. Acesso em: 10 dezembro 2017.

PEREIRA, R. A. F. Tese de Doutorado. **Localização de Faltas em alimentadores de distribuição de Energia Elétrica usando Medições Esparsas de Tensões**. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, março 2007. 131.

PINHEIRO, J. R. G. Dissertação de Mestrado. **Desenvolvimento de um Sistema de baixo custo para a monitoração de alimentadores aéreos de Distribuição de Energia Elétrica da classe 15 KV**. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Campus de Bauru. Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, Fevereiro 2011.

PINTO, M. F. Dissertação de Mestrado. **Sistema Inteligente para Monitoração, Gerenciamento e Controle de Iluminação Pública e Análise de parâmetros da Rede Elétrica.** Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2015.

QUEIROZ, D. V. D. Dissertação de Mestrado. **Simulação Realista de Redes de Sensores sem Fio Industriais.** Universidade Federal da Paraíba., João Pessoa, Paraíba, 29 Fevereiro 2016.

SANTOS, M. A. D. S. O Transformador de Tensão. **munodoeducacao.bol.uol**, 2017. Disponível em: <<http://munodoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/o-transformador-tensao-1.htm>>. Acesso em: 27 outubro 2017.

SANTOS, S. T. D. Dissertação. **Redes de Sensores sem Fio em monitoramento e Controle.** COPPE/URFJ, Rio de Janeiro, 2007.

SANTOS, S. T. D. Dissertação de Mestrado. **Redes de Sensores sem Fio em Monitoramento e Controle.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Junho 2007.

SCHROEDER, R. A. Trabalho de Conclusão de Curso. **Sensores em Rede Sem Fio.** Faculdade de Tecnologia SENAI/Jaraguá do Sul, Jaraguá do Sul, 2012.

SELINC. Sensores e Indicadores de Falta. **selinc**, 2017. Disponível em: <<https://selinc.com/pt/products-section/fault-indicators-sensors/>>. Acesso em: 27 outubro 2017.

SEMICONDUCTOR, F. reference manual MC1321xEVKRM Rev 1.2 04/2008. **nxp.com**, 2008. Disponível em: <<https://www.nxp.com/docs/en/reference-manual/MC1321xEVKRM.pdf>>. Acesso em: 05 Novembro 2017.

SILVA, C. M. Monografia. **Medidor Inteligente para o Monitoramento de Detecção de Falhas em Redes de Baixa Tensão.** Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2016.

SILVA, L. H. D. S. Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia da Computação. **Desenvolvimento de uma Rede de Sensores Sem Fio Utilizando ZigBee para Aplicações Diversas.** Escola Politécnica de Pernambuco – Universidade de Pernambuco, Recife, junho 2011. 96.

SOUZA, F. A. D. Dissertação de Mestrado. **Detecção de Falhas em Sistema de Distribuição de Energia Elétrica usando Dispositivos Programáveis.** Universidade Estadual Paulista.Faculdade de Engenharia., Ilha Solteira-SP, Setembro 2008.

SOUZA, T. B. P. D. Dissertação de Mestrado. **Análise de Ondas Viajantes em Linhas de Transmissão para Localização de Faltas: Abordagem via Transformada Wavelet -** Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2007.

TANG, Y. et al. Fault indicators in transmission and distribution systems. **In: Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Proceedings.DRPT 2000.**, London, Uk: DRPT, 2000. 238 - 243.

USIDA, W. F. Tese de Doutorado. **Sistema Inteligente para Alocação Eficiente de Dispositivos Indicadores de Falta em Alimentadores de Distribuição.** Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

VASCONCELOS, J. D. A. Dissertação de Mestrado. **Alocação Otimizada de Dispositivos Indicadores de Falta em Linhas Aéreas de Distribuição utilizando Busca em Vizinhança Variável.** Universidade Federal de Goiás., Goiânia, 2017.

VIEIRA, F. P. Trabalho de Conclusão de Curso. **Instrumento Microprocessado para Medição de Potência Ativa, Reativa e Fator de Potência.**Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos - SP, 2008.

WOLANIUK, G. B. Dissertação de Mestrado. **Medidor de Energia em Média Tensão.** Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento (LACTEC) e Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), Curitiba, 2011.

WYKRET, T. F. Dissertação de Mestrado. **Coexistência em Redes de Sensores sem Fio:Técnicas de Seleção Dinâmica de Canais.** Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

ZAMBONI, L. Tese de Doutorado. **Detecção e Localização de Falhas em Sistema Elétricos de Distribuição usando abordagem Inteligente baseada em Análise Espectral de Sinais.**Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2013. 183.

ZIMMER, C.; JUNIOR, M. A. F. Trabalho de Conclusão de Curso. **Automação da Distribuição de Energia: Recomposição Automática de Redes de Distribuição.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.