

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

RUBENS LUCIAN DA SILVA CORRÊA

USO DE SMART GRIDS PARA MONITORAR PERDAS TÉCNICAS E MELHORAR
ESTIMAÇÃO DE PERDAS NÃO-TÉCNICAS E LOCALIZAÇÃO DE PONTOS DE
FURTO

NITERÓI, RJ

2019

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

S586u Silva corrêa, Rubens Lucian da
USO DE SMART GRIDS PARA MONITORAR PERDAS TÉCNICAS E MELHORAR
ESTIMAÇÃO DE PERDAS NÃO-TÉCNICAS E LOCALIZAÇÃO DE PONTOS DE
FURTO / Rubens Lucian da Silva corrêa ; Henrique De Oliveira
Henriques, orientador. Niterói, 2019.
93 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Niterói, 2019.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2019.m.10912164794>

1. Redes Elétrica Inteligente. 2. Baixa Tensão. 3.
Produção intelectual. I. De Oliveira Henriques, Henrique,
orientador. II. Universidade Federal Fluminense. Escola de
Engenharia. III. Título.

CDD -

RUBENS LUCIAN DA SILVA CORRÊA

MATRÍCULA: M054.118.015

USO DE SMART GRIDS PARA MONITORAR PERDAS TÉCNICAS E MELHORAR
ESTIMAÇÃO DE PERDAS NÃO-TÉCNICAS E LOCALIZAÇÃO DE PONTOS DE
FURTO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia Elétrica e Telecomunicações da
Universidade Federal Fluminense para obtenção de grau de
Mestre em Engenharia Elétrica, na área de Modelagem e
Análise de Sistemas de Distribuição.

Orientador: Prof. Henrique de Oliveira Henriques

Niterói, RJ

2019

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

RUBENS LUCIAN DA SILVA CORRÊA

USO DE SMART GRIDS PARA MONITORAR PERDAS TÉCNICAS E MELHORAR
ESTIMAÇÃO DE PERDAS NÃO-TÉCNICAS E LOCALIZAÇÃO DE PONTOS DE
FURTO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia Elétrica e Telecomunicações da
Universidade Federal Fluminense para obtenção de grau de
Mestre em Engenharia Elétrica, na área de Modelagem e
Análise de Sistemas de Distribuição.

Aprovado em ___/___/___.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Henrique de Oliveira Henriques (presidente, orientador)

Universidade Federal Fluminense

Prof. Vitor Hugo Ferreira, DSc.

Universidade Federal Fluminense

Prof. Djalma Mosqueira Falcão, DSc

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Niterói, RJ

2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pela dedicação e esforço que fizeram para me dar educação e discernimento, sempre presentes para me apoiarem nos tempo difíceis.

Agradeço à minha irmã que me apoiou em diversos momentos dessa jornada e por sempre me apoiar.

Agradeço à minha família e amigos que mesmo não citados aqui, tanto contribuíram para a conclusão desta etapa, à medida que compreenderam, me deram apoio e aceitaram a minha ausência em muitos momentos.

Agradeço ao meu orientador e professor, Henrique, que trabalhou comigo neste projeto de pesquisa, e por todas orientações e dicas quando eu estava perdido, e pelas diversas oportunidades e por toda ajuda e conhecimentos compartilhados, e por acreditar em minha capacidade.

RESUMO

O processo de redução das perdas não técnicas (PNT) nas concessionárias de distribuição de energia é feito em duas etapas. A primeira determina quais transformadores de distribuição possuem valores altos de PNT. A segunda tenta localizar consumidores fraudulentos, alimentados por esses transformadores. Este artigo propõe uma nova metodologia para melhorar o cálculo de perdas técnicas (PT), levando a uma melhor estimativa de perdas não técnicas, usando sensores de temperatura. Também é apresentado um novo processo para identificar possíveis locais de roubo de energia usando diferenças nas quedas de tensão nodais. A identificação de possíveis pontos de furto de energia é feita com o auxílio da medida de perdas técnicas obtidas nos primeiros trechos da rede de baixa tensão, próximo ao transformador, onde a PT é mais significativa. Um algoritmo Backward / Forward Sweep usando a técnica de soma de potências é usado para calcular as quedas de tensão em duas situações: utilizando dados de potência lidos somente a partir dos medidores inteligentes na primeira e incluindo as leituras PT, na segunda. Uma análise das diferenças na queda de tensão em cada ponto entre as duas situações torna possível localizar o provável local onde o furto de energia está ocorrendo.

Palavras chave – Perda não-técnicas; Redes Inteligentes; Smart Grids; Sensores de Temperatura; Distribuição em baixa tensão; Back/Forward Sweep.

ABSTRACT

The process of mitigating non-technical losses (NTL) in power distribution utilities is done in two stages. The first determines which distribution transformers have high NTL values. The second attempts to locate fraudulent consumers, powered by these transformers. This work proposes a new methodology to improve the calculation of technical losses (TL), leading to a better estimation of Non-Technical losses, using temperature sensors. It is also presented a new process to identify possible energy theft locations using voltage drop differences. The identification of possible energy pilfering spots is done with the aid of the measure of technical losses obtained in the first stretches of the low voltage network, near the transformer, where the TL is more significant. A Backward/Forward Sweep algorithm with the power summation technique is used to calculate the voltage drops in two situations: with power data read only from the smart meters and power data including the TL readings. An analysis of the differences in voltage drop at each point between the two situations makes it possible to locate the probable energy thief.

Keywords—non-technical losses; smart grids; temperature sensors; radio mesh network; low voltage distribution; Back/Forward Sweep.

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1. Considerações Iniciais	1
1.2. Relevância do Tema	3
1.3. Objetivo do Trabalho	5
1.4. Estrutura do Trabalho	6
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica	7
2.1. Introdução	7
2.2. Tipos de Perdas Não-Técnicas	8
2.3. Revisão dos Métodos Existentes de Combate às Perdas	10
Capítulo 3 – Metodologia Proposta	22
3.1. Introdução	22
3.2. Obtenção da Potência Dissipada em Condutores Isolados	23
3.3. Obtenção da Potência Dissipada em Condutores Nus	24
3.4. Obtenção da Potência Dissipada em Conectores Tipo Cunha – Assimétricos	30
3.5. Exemplo prático do Medidor Proposto	31
3.6. Uso do Algoritmo Backward / Forward Sweep com Soma de Potências	33
Capítulo 4 – Proposta de uma Jiga de Testes para Simulação de Medidores Inteligentes	37
4.1. Materiais Utilizados	38
4.2. Medição de Corrente	40
4.3. Condicionamento do Sinal do TC da Entrada	41
4.4. Condicionamento do Sinal dos TC's das Cargas	42
4.5. Medição de Tensão	43
4.6. Aquisição de Dados de Medição de Tensão, Corrente e Temperatura	44
4.8. Rotinas de Programação Implementadas no Arduíno	54
4.9. Rotinas de Programação no Raspberry	61
Capítulo 5 – Estudo de Caso	66
Capítulo 6 – Resultados e Discussão	72
6.1. Introdução	72
6.2. Discussão dos Resultados	72
Capítulo 7 – Conclusão	74
7.1. Conclusões Gerais	74
Capítulo 8 - Bibliografia	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Histórico de perdas no Brasil	4
Figura 2. Princípio do Support Vector Machine, extraído de [28]	11
Figura 3. Clustering (agrupamento) de dados, extraído de [32], tradução livre da imagem realizada pelo autor	13
Figura 4. Algoritmo do estimador proporcional. Extraído de [47]	16
Figura 5. Rede radial com 3 medidores em pontos distintos, representados pelos quadrados pretos.	17
Figura 6. Passos para execução do estimador por mínimos quadrados ponderados.....	19
Figura 7. Circuito térmico equivalente mostrando a direção do fluxo de calor do condutor para o ambiente através do isolamento.	23
Figura 8. O quadrado vermelho representa sensor de temperatura em contato com a parte condutora do cabo.	24
Figura 9. Cilindros concêntricos, onde o cilindro interno representa o condutor e o externo é o próprio ar	25
Figura 10. Radiação solar vs Irradiação solar durante o dia.	29
Figura 11. Condutor nu de raio r	30
Figura 12. Detalhes do conector tipo cunha	30
Figura 13. Imagem térmica de um conector tipo cunha para bitolas iguais.....	31
Figura 14. Circuito de baixa tensão simulado	31
Figura 15. Rede de distribuição radial, prevalente na baixa tensão.	34
Figura 16. Esquemático da jiga de teste proposta	37
Figura 17. Raspberry Pi, unidade mestre ligada ao NRF24L01.....	38
Figura 18; Arduíno UNO conectado ao NRF24L01	39
Figura 19. Ligação de dois sensores de temperatura no arduino, modo OneWire	39
Figura 20. Condicionamento do Sinal de Corrente Os resistores R_1 e R_2 , no esquema, tornam-se um divisor de tensão que fornece esse nível de 2,5 V.	41
Figura 21. Condicionamento do Sinal de Tensão	43
Figura 22. Inclusão das bibliotecas necessárias no código	45
Figura 23. Inicialização das variáveis a serem utilizadas no programa e setup inicial das funções dentro do Void Setup	45
Figura 24. Interface de comunicação do Arduíno com o Excel fornecida pelo PLX DAQ ao abrir o excel modificado da PLX.....	46
Figura 25. Parte do código dentro do Void Loop () {}, onde os sensores recebem os dados lidos.....	47
Figura 26. Envio dos dados para o arquivo de saída captados pelo PLX DAQ	48
Figura 27. Adição da biblioteca para funcionamento do cartão de memória além da criação do arquivo .txt para salvar os dados dentro do mesmo.	49
Figura 28. Configuração do endereço IP e MAC do arduíno e configuração da comunicação UDP.	50
Figura 29. Linhas de código adicionais para abertura e funcionamento do cartão de memória.	50
Figura 30. String data_value recebendo os valores de cada dado separados por um espaço em branco	51
Figura 31. Ao final de cada loop, o arquivo é aberto para salvar os dados lidos e fechado em seguida para iniciar o próximo loop de leituras	51
Figura 32. Topologia adotada para comunicação.	52
Figura 33. Fluxograma do código do Arduíno.	53
Figura 34. Fluxograma das rotinas de programação implementadas no Raspberry Pi	54
Figura 35. Inicialização do Arduíno	55

Figura 36. Configurações do Void setup	57
Figura 37. Void loop	59
Figura 38. Função connectRasp	60
Figura 39. Interface em HTML para escolha de qual arduíno receber os dados	61
Figura 40. Código fonte da página aquisição.html.....	61
Figura 41. Lista de arduínos com IPs e tabelas.....	62
Figura 42. Lógica do alimentador, em PHP	62
Figura 43. Lógica das Cargas 1 e 2.....	63
Figura 44. Tela de solicitação de dados dos Arduínos da Base de Dados.	63
Figura 45. Código fonte da página acessa_dados.php, parte 1	64
Figura 46. Código fonte da página acessa_dados.php, parte 2	64
Figura 47. Consulta de todos os valores.....	65
Figura 48. Consulta de valores que atendam à condição especificada.....	65
Figura 49. Rede de distribuição radial, baixa tensão, utilizada na simulação.....	66
Figura 50. Linha vermelha demonstra o caminho aonde as quedas de tensão foram diferentes levando ao possível ponto de furto	70
Figura 51. Dois pontos de furto, a linha vermelha mostra o caminho até eles partindo do Nó Raiz ...	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Coeficientes do polinômio para densidade total de fluxo de calor (Q_s) como função da altitude solar H_c	27
Tabela 2. Fatores de multiplicação para k_{solar} para altas altitudes.	27
Tabela 3. Coeficientes para correção do Fluxo solar para altitude.....	27
Tabela 4. Fluxo de calor total em uma superfície acima do nível do mar, normal aos raios solares como função da altitude solar.	28
Tabela 5. Dados da curva de carga diária do cliente do exemplo prático	32
Tabela 6. Resultados de $0 \leq h < 17$, $T1 = T2 = T5 = T6 = 31,5$ e $^{\circ}C$ e $T3 = T4 = 30$ $^{\circ}C$	32
Tabela 7. Resultados de $17 \leq h < 20$, $T1 = T2 = T5 = T6 = 60$ $^{\circ}C$ e $T3 = T4 = 30$ $^{\circ}C$	32
Tabela 8. Preço dos components sugeridos. Preços extraídos de [70-77].	39
Tabela 9. Valores das resistências e reatâncias das linhas, e seus respectivos comprimentos.....	66
Tabela 10. Tipo de cabo (nu ou isolado) e suas secções transversais em cada vão.	67
Tabela 11. Dado das cargas em cada barramento	67
Tabela 12. Soma das potências no Backward Sweep para caminho 1 considerado para o método	68
Tabela 13. Soma das potências no Backward Sweep para caminho 2 considerado para o método	68
Tabela 14. Comparação entre os resultados dos dois casos da simulação	70
Tabela 15. Dois pontos de roubo diferentes. Um localizado no barramento 5 e outro localizado no barramento 7.....	71

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LF	Lógica Fuzzy
PT	Perda Técnica
PNT	Perda Não-Técnica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

Capítulo 1 – Introdução

1.1. Considerações Iniciais

A perda de energia elétrica é uma questão de elevada importância no setor de distribuição. Pode-se considerar como sendo perdas de energia o fluxo de carga que é distribuído pela concessionária, porém não chega a ser comercializado, ou seja, não tem retorno financeiro para a distribuidora [1]. No geral essas perdas podem ser caracterizadas como técnicas e comerciais e podem comprometer significativamente o lucro das concessionárias.

As perdas técnicas (PT) são inerentes ao transporte de energia elétrica na rede, relacionadas à transformação da energia elétrica em térmica nos condutores (conhecido como efeito *Joule*), perdas nos núcleos dos transformadores, perdas dielétricas, entre outras.

As perdas não-técnicas (PNT), também conhecidas como perdas comerciais, correspondem a todas as demais perdas associadas à distribuição, tais como: furtos ou fraudes de energia, erros de medição, erros no processo de faturamento, unidades consumidoras sem equipamento de medição, entre outras [1]. Essas perdas estão diretamente associadas à gestão comercial da distribuidora. Segundo a ANEEL [1], este tipo de perda pode ser dividido em duas modalidades principais: o furto e a fraude.

O furto é caracterizado pelo desvio direto da rede de energia elétrica, por um consumidor ilegal, fazendo com que a energia seja utilizada, mas não contabilizada, levando assim às perdas.

No caso da fraude, o consumidor está cadastrado no banco de dados da distribuidora, no entanto, realiza adulterações no sistema de medição de sua instalação de modo que, apesar de consumir uma quantidade de energia, pague efetivamente por uma fração menor desse consumo levando também às perdas [1].

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regula o serviço de distribuição de energia elétrica e estabelece limites de perdas não técnicas, de acordo com oito indicadores socioeconômicos específicos para cada área de concessão. No caso de haver o reconhecimento de um nível superior de perdas, ocorre o aumento da tarifa da concessionária, podendo instaurar um ciclo vicioso no sistema. Se o regulador reconhecer na tarifa um nível maior de perdas, junto de custos de manutenção e/ou investimentos

necessários para o combate, pode-se comprometer a capacidade de pagamento de consumidores de baixa renda e levar muitos a incorrer em práticas irregulares [2].

Os indicadores de perdas de energia tendem a ser piores em áreas com índices de desenvolvimento humano mais baixos, podendo ser, em alguns casos, áreas de risco, as quais, devido a insegurança gerada por conflitos armados nessas áreas, podem proporcionar severas restrições à operação da distribuidora. O problema das perdas é uma preocupação maior das concessionárias, pois os consumidores no geral, são leigos quanto às consequências, tanto na qualidade do fornecimento de energia quanto no valor da fatura e, em alguns casos, acabam por incentivar e dissimular práticas ilegais referentes ao consumo de energia. Por conta disso, diversas ações de combate às perdas geram resistência nas comunidades, podendo acabar em manifestações violentas contra as equipes de campo das empresas [3].

Devido à essas dificuldades existe uma necessidade de melhorar o índice de complexidade socioeconômica adotado pelo regulador quanto à capacidade do mesmo de capturar a violência, em especial a causada por conflitos armados do poder paralelo predominante na realidade do Rio de Janeiro. A ANEEL reconhece a violência como uma das variáveis que influenciam no furto de energia através do indicador de óbitos por agressão, fornecido pelo Datasus [4]. No entanto, a variável em questão não consegue capturar o real impacto da violência latente que ocorre em alguns estados do país, a qual impacta diretamente nas restrições à operação das empresas.

Segundo IBGE [5], as favelas são consideradas aglomerados subnormais, sendo definidas como sendo um conjunto de, no mínimo, 51 unidades habitacionais, caracterizadas pela ausência de título de propriedade e com precariedade de serviços públicos essenciais. Nessa perspectiva, as distribuidoras que fornecem energia para municípios de estados com elevada densidade de favelas possuem características geográficas e socioeconômicas distintas em sua área de concessão. Tais particularidades são responsáveis pela limitação da operação e fiscalização da empresa, inviabilizando o combate adequado às Perdas Não-Técnicas (PNTs).

Como exemplo, a Light possui 22,5% de seus clientes localizados em áreas com baixo índice de desenvolvimento humano [6]. Por conta disso, a empresa apresenta valores exorbitantemente elevados de PNTs, sendo o segundo maior valor de PNTs sobre o mercado de baixa tensão, e o maior valor entre as distribuidoras privadas [7].

Através do exposto acima, o presente tema é de suma importância para a busca de soluções para as distribuidoras brasileiras que convivem com elevados níveis de PNTs, visto que atualmente não há um tratamento regulatório diferenciado para áreas com severas restrições à operação.

1.2. Relevância do Tema

A inclusão de PNTs em estudos de planejamento pode fornecer novas informações relevantes, isto é, em que período do ciclo de operação é a maior incidência de fraudes nas redes de baixa tensão, bem como quais transformadores têm as maiores taxas de PNTs. Além disso, a consideração de PNTs em estudos de planejamento operacional pode revelar condições de operação críticas, o que diz respeito à regulação de tensão, o que não seria evidente nos resultados de estudos sem considerá-los [8].

Estima-se que, a nível nacional, as perdas totais em 2016 foram de 13,9% de toda energia gerada neste ano, sendo 7,79% perda técnicas e 6,08% perdas não-técnicas. De 2013 a 2016 nota-se uma tendência de redução de PT e aumento na PNT, conforme ilustrado na figura 1.

Em termos de ordem de grandeza, a perda total de 2013 foi de 94,2 TWh, relativo a 14% da energia total injetava nas empresas distribuidoras. Este valor representa quase o consumo total da Argentina no mesmo ano, 110 TWh.

A maior incidência das PNTs ocorre no segmento de baixa tensão. A forma mais frequente de se obter as PNTs por posto de transformação é através do balanço de energia descrito em (1).

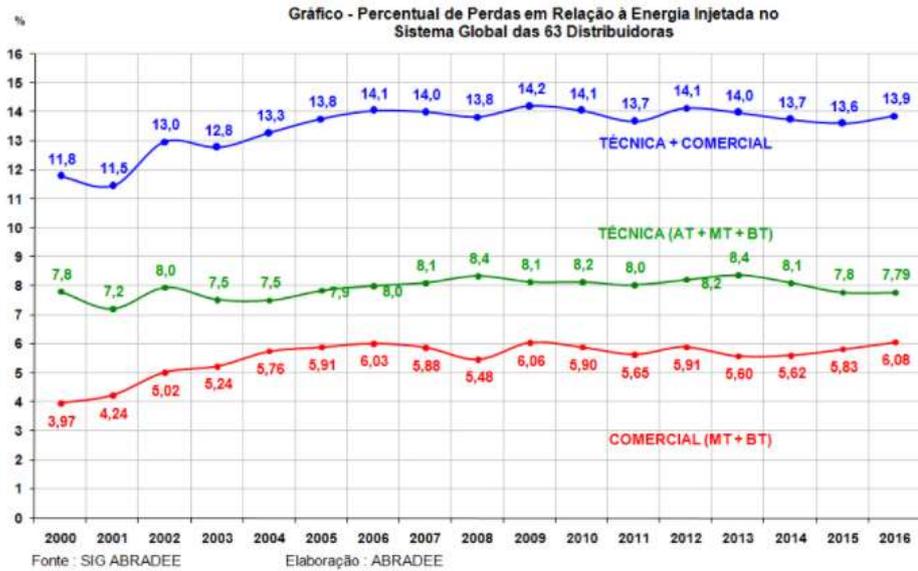


Figura 1. História de perdas no Brasil

$$PNT_k = ET_k - \sum_{j=1}^n EC_{kj} - PT_k \quad (1)$$

Onde:

PNT_k – perdas não técnicas no segmento de baixa tensão suprido pelo transformador k ;

PT_k – perdas técnicas no segmento de baixa tensão suprido pelo transformador k ;

ET_k – energia total medida no transformador k ;

$\sum_{j=1}^n EC_{kj}$ – soma dos consumos dos n consumidores supridos pelo transformador k ; Utilizando o sistema de *smart metering*, que nesse trabalho é simulado numa instalação de baixo custo detalhado nos capítulos 3 e 4, os valores de ET_k e dos EC_{kj} 's são obtidos de medidores inteligentes. Entretanto, as PT 's são ainda estimadas, sendo sujeitas a simplificações que são responsáveis por erros que afetam os resultados dos cálculos das PNT 's. Tais erros, em algumas concessionárias, podem ser da ordem de grandeza da própria PNT .

Globalmente, concessionárias de energia perdem \$96 bilhões ao ano por conta de PNT 's [9]. *UK Power* publicou em setembro, 2018, uma estimativa de 25.000 casos de roubo de energia que custa £ 500 milhões ao ano.

Como pode ser visto, roubo de energia é um problema de não só elevada relevância, mas também bastante presente em nosso cotidiano, aonde os consumidores legais acabam por serem penalizados para compensar as perdas por furtos de consumidores ilegais [10].

1.3. Objetivo do Trabalho

No cenário cada vez mais competitivo e regulado do setor elétrico brasileiro, as concessionárias de serviço de distribuição de energia são forçadas a implementar metodologias para o monitoramento sistemático de suas redes de energia, de forma a minimizar as perdas de receita e manter a qualidade do fornecimento, dentro dos padrões e requisitos estabelecidos pela ANEEL.

Esses requisitos demandam novas tecnologias, modelos e ferramentas computacionais que auxiliem as empresas a adquirir informações sobre seus sistemas, tornando-se possível diagnosticar situações de fraude e não conformidade. Roubo de energia não é uma prática incomum e está se tornando um problema cada vez mais elaborado pois, conforme a tecnologia voltada a smart grids avança, os métodos para furtos de energia avançam junto para burlar novas tecnologias criadas para combater tal prática [11]. O problema afeta não somente países emergentes como Brasil e [12] [13], como também países mais desenvolvidos [14].

Neste sentido, a presente dissertação propõe contribuir com o desenvolvimento de uma ferramenta adequada e de baixo custo, para combater as perdas comerciais, de modo que a concessionária venha a dispor de meios para que, de forma automatizada e pouco invasiva, possa obter informações relevantes sobre o fornecimento de energia elétrica aos seus clientes, além de detectar a perda de energia que possa estar ocorrendo na rede de distribuição.

Visando contribuir com o encaminhamento de soluções para o maior foco de preocupação das concessionárias de energia, a detecção de fraudes no consumo de energia, um medidor inteligente é proposto com a finalidade de estimar melhor as PTs e, conseqüentemente, as PNTs, para finalmente encontrar possíveis pontos de furto de energia contribuindo para as PNTs da rede.

A implantação de mecanismos de fraude para redução da conta de energia é uma prática muito comum de um numero crescente de consumidores, gerando perda de receita para as empresas que acabam penalizando todos os consumidores enfatizando a importância da busca de soluções para o combate ao furto de energia.

1.4. Estrutura do Trabalho

O presente trabalho encontra-se dividido em capítulos, onde sequencialmente são introduzidos conceitos do trabalho.

No capítulo 2 encontra-se a Revisão Bibliográfica, onde são abordados trabalhos antigos e atuais, relevantes ao tema abordado na presente dissertação, além de breves revisões dos temas relacionados.

No capítulo 3, a metodologia principal para o Medidor Proposto nesta dissertação é apresentada, introduzindo os conceitos necessários para seu entendimento e aplicação. Este capítulo está dividido em 4 partes, a introdução dos conceitos iniciais, seguida da aplicação à condutores isolados e introdução dos conceitos aplicados a condutores nus e conectores do tipo cunha. A seguir, é apresentado um exemplo de aplicação do medidor utilizando os conceitos abordados anteriormente no capítulo. O capítulo é finalizado com a introdução da metodologia aplicada com o uso do medidor proposto, a qual será detalhada no capítulo 5.

No capítulo 4 é proposta uma jiga de testes para implementação do medidor explicado no capítulo 3 e para o monitoramento de baixo custo da baixa tensão, introduzindo conceitos básicos de arduínos e programação.

No capítulo 5 é então realizado o estudo de caso, baseado no que foi exposto no capítulo 3. Neste capítulo é realizada uma extensão da aplicação do medidor proposto para identificação dos pontos de furto de energia para possivelmente ajudar a reduzir as PNTs na rede.

No capítulo 6 são discutidos qualitativamente os resultados obtidos nos capítulos 5 e 3, analisando pontos intrínsecos dos métodos adotados, enquanto que no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões do trabalho seguido de propostas para melhoras para o atual trabalho. A Bibliografia se encontra no Capítulo 8.

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

2.1. Introdução

O conteúdo apresentado neste capítulo tem por objetivo contextualizar as pesquisas desenvolvidas na área.

No Brasil, costuma-se seguir as orientações do órgão regulador, ANEEL, através do método descrito no módulo 7 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST.

Neste documento, o método de cálculo recomendado para obtenção das PT's é o de fluxo de potência. Uma série de simplificações são adotadas para tornar possível os cálculos. Dentre elas, as que mais impactam os resultados das PT's, na baixa tensão, são:

- Caracterização da carga pela campanha de medição, determinando curvas típicas para dia útil, sábado, domingo e feriados, de acordo com o módulo 2 do PRODIST;
- Fator de potência fixo igual a 0,92;
- Perdas técnicas adicionais de 5% das PT totais para considerar as conexões, fugas de corrente, etc.
- Resistência calculada na temperatura fixa de operação de 55° C, ou seja, temperatura do condutor constante;
- Cargas equilibradas entre fases;

No âmbito internacional, é usual calcular as perdas de potência ativa nas condições de carga máxima, através de modelos computacionais e dados de carga registrados em medidores eletrônicos. Em seguida aplica-se um fator de perda para estimar as perdas médias de energia. Finalmente, multiplica-se as perdas médias pelas horas relativas ao período de tempo estudado, para obter perdas de energia mensais ou anuais. As perdas técnicas são subtraídas das perdas totais, para obter perdas não técnicas [15].

Existe uma tendência de aplicação de estimadores de estado na distribuição e algoritmos de fluxo de potência on-line, que permitirão um cálculo das perdas no alimentador mais preciso do que o realizado usando abordagens convencionais [15].

Outra tendência é a de calcular as PT's por um modelo preditivo dependente da temperatura que usa dados de medidores inteligentes e dados do transformador de distribuição para detectar roubo de eletricidade em uma área ([16] [17]). Neste modelo, há

a correção da resistência pela temperatura e um processo de previsão das perdas utilizando a técnica dos mínimos quadrados.

Revisões mais recentes dos métodos para redução de PNT's encontram-se descritos em [18-21]. O presente trabalho considera a classificação feita em [18] por conta de sua maior abrangência, pois tal referência classifica todas as técnicas em categorias baseadas em como os dados são obtidos. As categorias são: Orientado a dados, Orientado a Rede e Híbrido.

Métodos orientados a dados utilizam somente dados relacionados ao consumidor, por exemplo, consumo de energia, tipo de consumidor, etc.. Os tipos orientados a rede utilizam somente dados disponibilizados pela rede, por exemplo, topologia de rede ou medidas dos smart meters. Híbridas, como próprio nome implica, utiliza dados de ambas as categorias. O método que será apresentado neste trabalho pode ser classificado como Orientado a rede.

Por ultimo, porém não menos importante, na média tensão, já existem propostas de monitoramento do estado operativo de emendas em cabos [22]. O sistema é composto por unidades de monitoramento remotas localizadas nas emendas, na rede de distribuição. Estas unidades coletam dados de temperatura e corrente e os enviam, através de uma rede sem fio de curta distância e banda estreita, à outra unidade de processamento próxima que está conectada à internet através da rede GPRS de empresas móveis. Esta unidade transfere os dados recebidos para o host de um Centro de Monitoramento. Esta infraestrutura pode ser usada, com poucas adaptações, na obtenção das PT's em redes subterrâneas.

A seguir, os tipos de PNT's mais comuns são apresentadas juntamente com um relato sucinto do estado da arte dos principais métodos existentes para detecção e localização destas perdas.

2.2. Tipos de Perdas Não-Técnicas

As perdas inerentes ao próprio funcionamento do sistema de transmissão e distribuição de energia são denominadas perdas técnicas. Todos os outros tipos de perda são consideradas perdas comerciais. Assim sendo, perdas comerciais estão associadas a situações de furto ou fraude e diversas técnicas podem ser empregadas com estas finalidades. Basicamente, quatro tipos de adulteração podem ser considerados perdas comerciais, de acordo com [23]: Adulteração nos medidores; conexões ilegais; irregularidades nas cobranças; contas não pagas.

- **Adulteração nos Medidores:** Existem várias formas de alteração nas medidas feitas por estes equipamentos. As técnicas utilizadas podem ser rebuscadas, mas também podem ser tão rústicas ao ponto de danificar o medidor propositalmente. Além disto, o fácil acesso ao medidor facilita práticas como: a interferência magnética, que consiste em usar um ímã para impedir a rotação do disco magnético do medidor analógico; o chamado *by-pass*, que faz a energia não passar pelo medidor registrando assim um consumo nulo; e a ligação em paralelo com o equipamento, que disfarça melhor o roubo de energia em relação ao *by-pass*.

- **Conexões Ilegais:** Esta classificação abrange basicamente as ligações irregulares feitas por consumidores que não querem ou não podem pagar pela energia consumida. No Brasil, isto ocorre com frequência em comunidades de baixa renda, por exemplo, em que a fiscalização e o combate a este tipo de perda é complexo. Estas conexões são feitas geralmente direto no alimentador de baixa tensão ou no transformador de serviço, por este motivo podem ser visualmente identificadas.

- **Irregularidade nas Cobranças:** Ocorrem basicamente quando a cobrança não é feita corretamente. Podem acontecer devido a erros na leitura do equipamento pelo funcionário responsável ou pela danificação do mesmo.

- **Inadimplência:** Estes casos correspondem a casos de inadimplência no pagamento de contas de energia elétrica.

Além do prejuízo financeiro, as perdas comerciais podem ocasionar a sobrecarga do sistema, diminuindo a vida útil dos equipamentos, a qualidade e a confiabilidade da energia fornecida. Devido a estes problemas, o desenvolvimento de técnicas que permitam identificar os pontos associados a roubo de energia é necessário para que as devidas providências sejam tomadas.

Após uma revisão sucinta sobre os métodos usuais de fraude no sistema elétrico, uma revisão dos principais métodos existentes para localização e/ou detecção de perdas não técnicas será apresentada. Estes métodos estão relacionados ao combate dos três primeiros tipos de PNT's apresentados. Os consumidores associados ao quarto fator discutido, a inadimplência, já são conhecidos pelas concessionárias.

Com o avanço das redes inteligentes e da infraestrutura de medição digital, informações adicionais que podem ser exploradas para o desenvolvimento de técnicas mais eficientes, estarão disponíveis.

2.3. Revisão dos Métodos Existentes de Combate às Perdas

Os métodos existentes podem ser classificados em dois tipos principais: Métodos diretos e indiretos. Tal classificação baseia-se no modo de detecção de PNT's [24]. Na classe dos métodos indiretos, as PNT's são obtidas pela diferença entre a potência total fornecida e o total estimado de PT's. O objetivo nestes métodos é estimar as PT's com maior exatidão possível para melhor detectar as PNT's.

Os métodos diretos procuram detectar, como o nome implica, diretamente as PNT's independente do valor das PT's. As próximas seções discutirão de forma breve sobre cada classe de métodos.

2.3.1 Métodos Diretos

Os métodos diretos são aqueles que estimam as PNTs sem calcular as perdas técnicas. Métodos como *Support Vector Machine* (SVM), *Fuzzy C-means Clustering*, *Lógica Fuzzy*, Perfil de usuário, Algoritmo Genético, etc., são usados para detectar roubo em eletricidade [25].

Existem duas desvantagens associadas ao uso desses sistemas com base nessas metodologias. A primeira é a precisão e a segunda, a necessidade de uma infraestrutura relativamente cara para empregá-las, tais como, por exemplo, medidores de energia inteligentes.

Segundo pesquisa efetuada em [25], as técnicas com maior possibilidade de sucesso e que podem ser usadas para estimar as PNT's são:

- Processamento de Dados e Clustering;
- Análise de distribuição estatística de dados;
- Modelo Fuzzy – ANN – redes neurais artificiais.

Outro método tentado é o de injetar na linha de distribuição um sinal de alta frequência, de banda estreita, juntamente com o sinal de frequência de operação normal na rede (230V, 50Hz para o padrão Europeu, e 220V, 60Hz para o padrão brasileiro). Qualquer utilização ilegal de eletricidade é detectada através da mudança diferencial na amplitude do

sinal da banda estreita que, segundo [26], pode ser detectada com precisão. A seguir uma breve revisão de alguns métodos diretos.

2.3.1.1. Técnica Baseada em Support Vector Machine

Técnicas baseadas em *Support Vector Machine* (SVM) [27] seguem os passos básicos dos métodos de reconhecimento de padrão, primariamente sendo necessário realizar um treinamento a partir de um banco de dados onde casos com furto / fraude e casos sem roubo encontram-se distintamente identificados. Mais especificamente, no SVM, o treinamento consiste em criar uma separação entre os casos normais e os de furto. A figura 2 ilustra este procedimento.

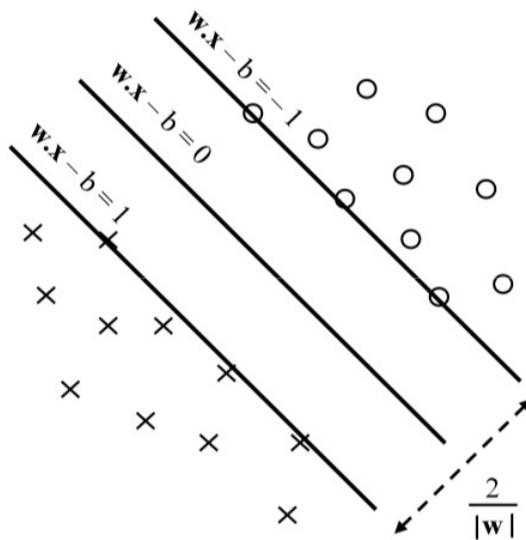


Figura 2. Princípio do Support Vector Machine, extraído de [28]

Na figura 2 é possível observar os limites encontrados pelo SVM. Estes limites são resultado da busca pela maximização da distância entre os casos diferentes apresentados no treinamento. Consequentemente, é possível, por exemplo, classificar os casos que estejam acima do limite como casos de fraude, e abaixo do limite como consumidores normais [29] [30]. Vale ressaltar que embora a figura 2 represente um caso linear, a teoria do SVM se aplica a casos em que o espaçamento dos pontos não seja uma função linear. Esta técnica, porém, depende bastante da qualidade dos dados históricos, pois uma base com dados incoerentes (informações incorretas) pode levar ao SVM a usar uma separação errônea, não atingindo, assim, um desempenho aceitável.

2.3.1.2. Métodos Baseados em Redes Neurais Artificiais

Redes neurais foram criadas a partir da idéia de funcionar como o cérebro humano. Desta forma, é feito um treinamento intensivo para uma tomada de decisão rápida e precisa. A estrutura básica das redes neurais consiste em uma ampla faixa de entrada, seguida por camadas que funcionam como neurônios, os quais aprendem a tomar decisões conforme seus valores se alteram com o treinamento, atingindo uma forma única de agrupamento de valores para a rede de neurônios que possibilita reagir à uma elevada gama de valores de entrada de forma coerente. Ao final do processo, tem-se um conjunto de regras de decisão que são aplicadas sobre os novos dados de entrada.

Diversas causas podem levar a erros na base de dados e assim como os outros métodos de reconhecimento de padrão, estes métodos são fortemente dependentes da qualidade dos dados de entrada. Por este motivo, existem vários métodos que utilizam mais de uma rede para o treinamento, resultando na melhora do desempenho, porém com maior tempo de processamento gasto para esse aprimoramento [31].

Além disso, durante a fase de classificação, onde ocorre a separação entre os casos normais e os com suspeita de roubo, outros métodos podem ser combinados, como em [31] em que se utiliza uma rede neuro-fuzzy hierárquica para melhorar o desempenho geral.

2.3.1.3. Métodos Baseados em Agrupamentos (*Clustering*)

O desempenho destes métodos depende, novamente, da qualidade do treinamento realizado. O treinamento consiste no próprio agrupamento de dados de diversos consumidores, que pode ser realizado de acordo com diferentes critérios tais como diferenças sociais, padrões de consumo, região, etc. A idéia básica destes métodos é apresentada na figura 3.

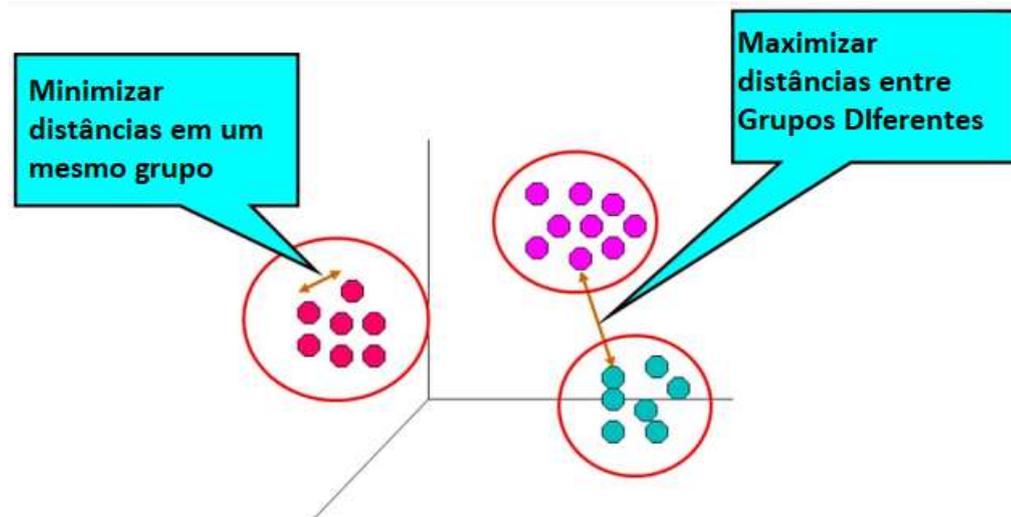


Figura 3. Clustering (agrupamento) de dados, extraído de [32], tradução livre da imagem realizada pelo autor

Após a etapa de agrupamento, a análise dos perfis de consumo é realizada pela comparação com os grupos selecionados [33] [34], caso os dados de consumo sejam associados a um consumidor fraudulento, o consumidor é selecionado para a etapa de verificação.

Um dos problemas da técnica apresentada é a variedade dos critérios de agrupamento, por isto é importante que as características mais importantes de cada grupo de dados sejam identificadas para que a etapa de agrupamento atinja um desempenho adequado. Este método também, assim com os apresentados anteriormente, depende de uma base de dados bem estruturada, que forneça informações adequadas para possibilitar um agrupamento correto.

2.3.1.4. Outros Métodos

Além dos métodos apresentados, existem vários outros, [35-38], por exemplo, os quais utilizam parte dos métodos mostrados ou que utilizam conceitos diferentes como técnicas estatísticas. Porém, no final, são todos semelhantes pois empregam uma base de dados e geram um padrão que é utilizado para identificar os consumidores que possam estar furtando energia. No entanto, a maior dificuldade encontra-se na qualidade dos dados obtidos, os quais servirão como padrões de comparação. Alguns métodos misturam medidas adicionais para que a comparação seja feita também com uma base em tempo real, outros mesclam várias técnicas de reconhecimento de padrão diferentes visando utilizar cada uma em seu melhor campo de atuação.

2.3.2 Métodos Indiretos

Estimar as perdas técnicas é fundamental por permitir avaliar a eficiência do sistema a fim de identificar a necessidade da realização de melhorias e conhecer o total de PNT's pela diferença entre as perdas globais do sistema e as PT's. Portanto, a classe de métodos indiretos é caracterizada pela estimação das PNT's a partir das PT's na rede. A presente dissertação encontra-se dentro dessa classificação.

O cálculo de perdas técnicas depende do nível de informação existente sobre a rede, portanto os métodos empregados com tal finalidade podem ser baseados em:

- Alto grau de conhecimento do sistema [39] – Nos casos em que dados do sistema como parâmetros elétricos e curvas de carga são conhecidos, é possível calcular com precisão as perdas utilizando, por exemplo, um programa de cálculo de fluxo de carga para diferentes níveis de demanda.

- Baixo grau de conhecimento do sistema [40] – Neste caso, devido ao pouco conhecimento da rede, as perdas são estimadas a partir das medidas disponíveis (geralmente na subestação), dos dados dos equipamentos da rede e por comparação com outros sistemas.

Existem ainda outros métodos que são aplicados em situações em que parte da rede é bem conhecida e outra não (caso híbrido) [18]. Dentre os diferentes métodos indiretos, a estimação de estados do sistema de distribuição são os mais prevalentes. Dentre os estimadores de estados, os mais relevantes são: Estimador Proporcional (utilizado em redes radiais), Estimadores Estatísticos (método dos mínimos quadrados, por exemplo) e Estimadores Heurísticos (combinam métodos tradicionais de estimação com técnicas de inteligência computacional como fuzzy, por exemplo).

Os trabalhos pioneiros em estimação de estado de Sistemas Elétricos de Potência (SEP) foram publicados por [41-43] por volta da década de 1960. Métodos implementados utilizando essa ferramenta apresentam a natureza geral do problema estatístico, a modelagem matemática, as técnicas iterativas iniciais e conceitos relacionados à detecção e à identificação de medidas com erros grosseiros.

Em termos gerais, a principal função de um algoritmo de estimação de estado é a obtenção de uma estimativa confiável, \hat{x} , do verdadeiro estado do sistema, x , tornando mais eficientes as ações que devem ser tomadas. Para que esse objetivo seja atingido, o estimador de estado utiliza diversos tipos de informações existentes. Assim sendo, as medições

realizadas e as variáveis de estado de um SEP podem ser relacionadas através do modelo de medição, representado pela equação (2).

$$z = h(x) + e \leftrightarrow \begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ h_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde:

z é o vetor de medidas, no caso do SEP, representando as medidas das potências (injetadas nos barramentos e trânsito de potências e módulos das tensões nos nós);

x é o vetor de variáveis de estado, no caso do SEP, os módulos das tensões em todos os N barramentos do sistema e a fase da tensão em todos os N barramentos menos a referência;

e é vetor de erros nas medidas de distribuição Gaussiana e média nula [44];

$h(x)$ é o vetor de funções não lineares que relaciona as medidas com as variáveis de estado.

O processo de estimação revela-se complexo, uma vez que muitas fontes de erros ou imprecisões podem estar presentes nos dados processados pelo estimador de estado, dentre os quais destacam-se:

- Erro inerente ao processo de medição, causado pela precisão finita dos aparelhos de aquisição de medidas (ruído);
- Avaria do equipamento de medição ou tele-transmissão;
- Má calibração da aparelhagem de medição;
- Parâmetros imprecisos do sistema elétrico;
- Medidas realizadas durante a ocorrência de fenômenos transitórios;
- Diferenças de sincronismo na aquisição das medidas.

O estimador de estado atua como um filtro para suavizar erros estatisticamente pequenos, inerentes à medição, bem como para suprimir erros grosseiros eventuais [45], causados por funcionamento inadequado do sistema de aquisição de dados. A seguir uma breve revisão de alguns métodos indiretos.

2.3.2.1 Estimadores Proporcionais

A figura 4 mostra o algoritmo de um estimador proporcional, onde k é o fator de correção. A metodologia mais simples de estimação de estados pode ser expressa como um ajuste proporcional das demandas das cargas pela razão dos valores medidos e calculados na saída do alimentador ou em ramais. Tal modelo usa o fluxo de carga para determinar esses valores e, assim, ajusta-os linearmente conforme as demandas das cargas. Na técnica mostrada por [46] e [47], utilizam-se medições de fluxo de potência para corrigir as cargas estimadas que estejam à sua jusante, garantindo-se, com isso, que a carga no ramo onde tenha medição seja exatamente o valor medido.

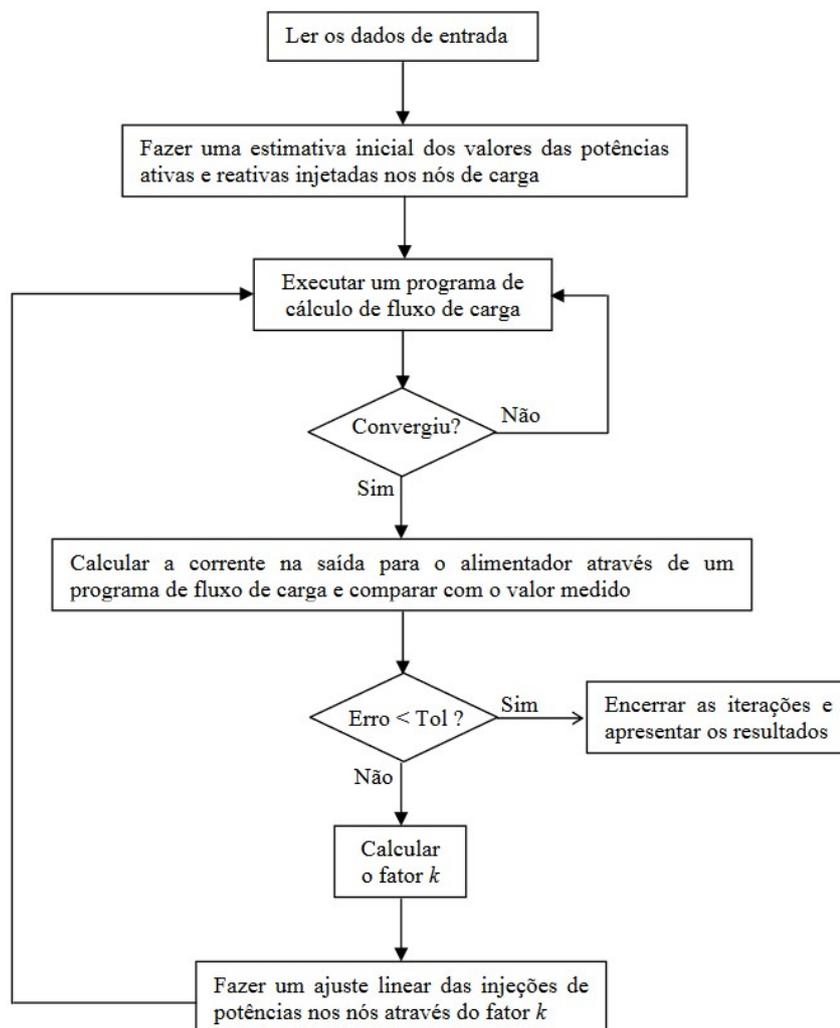


Figura 4. Algoritmo do estimador proporcional. Extraído de [47]

Como exemplo dessa metodologia, considera-se o sistema radial da figura 5, onde serão considerados 3 medidores instalados que fornecem as medidas dos fluxos P_{1_med} , P_{2_med} e P_{3_med} .

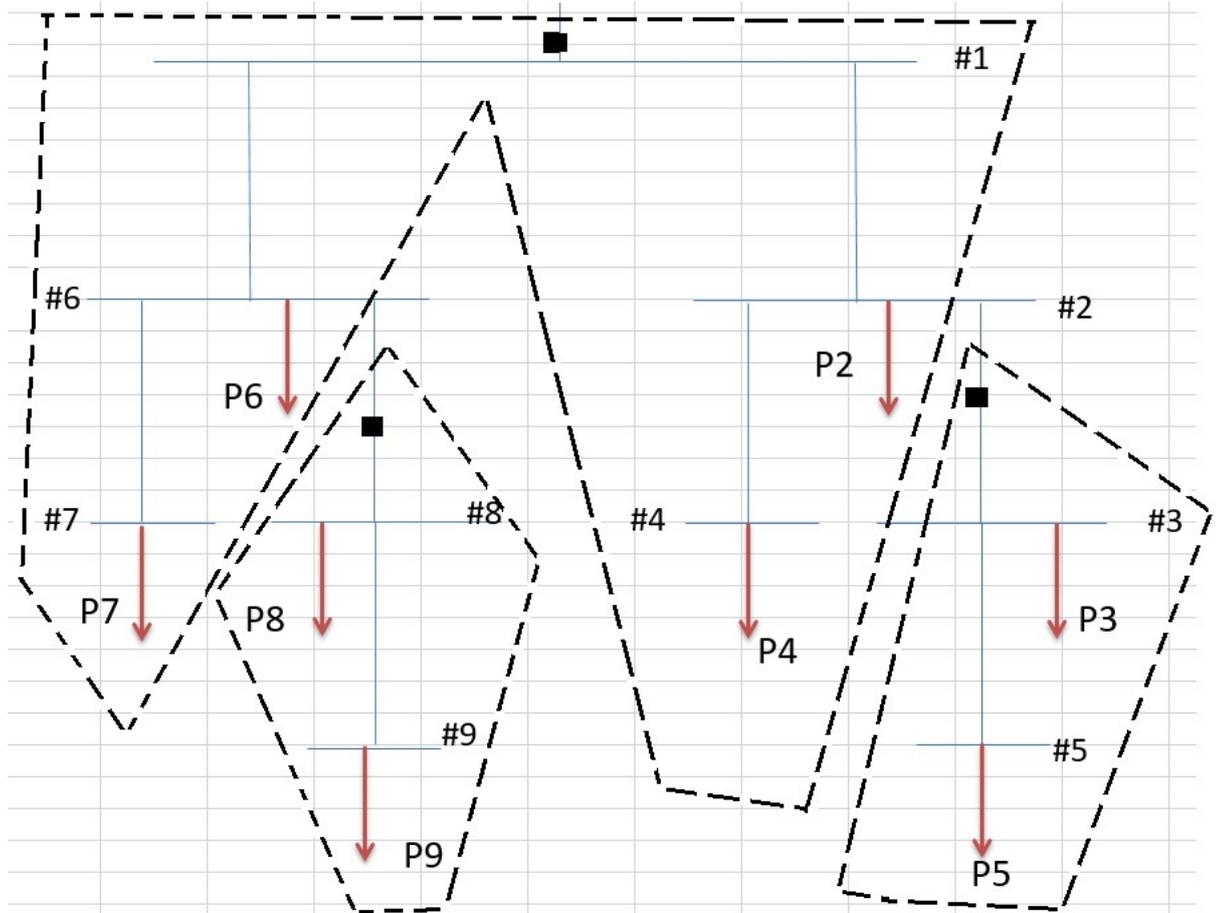


Figura 5. Rede radial com 3 medidores em pontos distintos, representados pelos quadrados pretos.

Pode-se então definir a zona de atuação de cada um dos medidores instalados como sendo a região do alimentador à jusante do medidor até o final do alimentador e entre o ponto de outro medidor quando for o caso. As zonas de atuação de cada medidor encontram-se destacadas na figura. O valor medido de cada zona deve ser modificado de acordo com as outras zonas associadas que estão à jusante, assim como proposto por [46]. Por exemplo, assumindo que P'_{1_med} é o valor modificado da medição 1 (medidor antes do barramento 1 na figura), então $P'_{1_med} = P_{1_med} - P_{2_med} - P_{3_med}$.

Outra técnica de correção da demanda das cargas em função das medições instaladas foi proposta por [48]. O grande diferencial desta última é devido à consideração da variação das perdas na rede em função do aumento ou diminuição da carga estimada dos clientes no momento do cálculo da correção.

2.3.2.2. Estimadores Estatísticos

Dentre os vários métodos estatísticos existentes para o cálculo das variáveis de estado, os mais utilizados na literatura são os dos Mínimos Quadrados Ponderados

(*Weighted Least Squares - WLS*), Mínimo Valor Absoluto Ponderado (*Weighted Least Absolute Value - WLAV*) e Mínima Mediana do Resíduo ao Quadrado (*Weighted Least Median of Squares - WLMS*). Aqui será sucintamente explicado o estimador *WLS*, seguido de um breve comentário para cada um dos outros estimadores mencionados.

A solução do problema de estimação de estado pelo método dos mínimos quadrados ponderados consiste basicamente em estimar o vetor de variáveis de estado, X , de forma a minimizar a função objetivo que se refere ao modelo de medição. De forma simples, trata-se de um problema de otimização, ou seja, procura minimizar a função objetivo representada pela equação a seguir:

$$J(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \frac{(z_i - h_i(x))^2}{\sigma_i^2} = \frac{1}{2} [Z - h(x)]^T * R_Z^{-1} * [Z - h(x)] \quad (3)$$

Onde σ é a variância da medida i ; e R é a matriz de covariâncias das medidas. A estimativa do vetor de variáveis de estado x é obtida de forma recursiva, através do cálculo da matriz Jacobiana, $H(x^k) \approx \frac{\partial h(x)}{\partial x}$, e da solução do seguinte conjunto de equações [41-43] utilizando-se de algum algoritmo iterativo, como Newton-raphson:

$$G(x^k) * (x^{k+1} - x^k) = H^T(x^k).R^{-1}.[z - h(x^k)] \quad (4)$$

Onde x^k é o valor de x na iteração k , e

$$G(x^k) = H^T(x^k).R^{-1}.H(x^k) \quad (5)$$

É a matriz de ganho. Com base nas equações (4) e (5), é possível elaborar o procedimento de estimação representado na figura 6, baseada no apresentado em em [49].

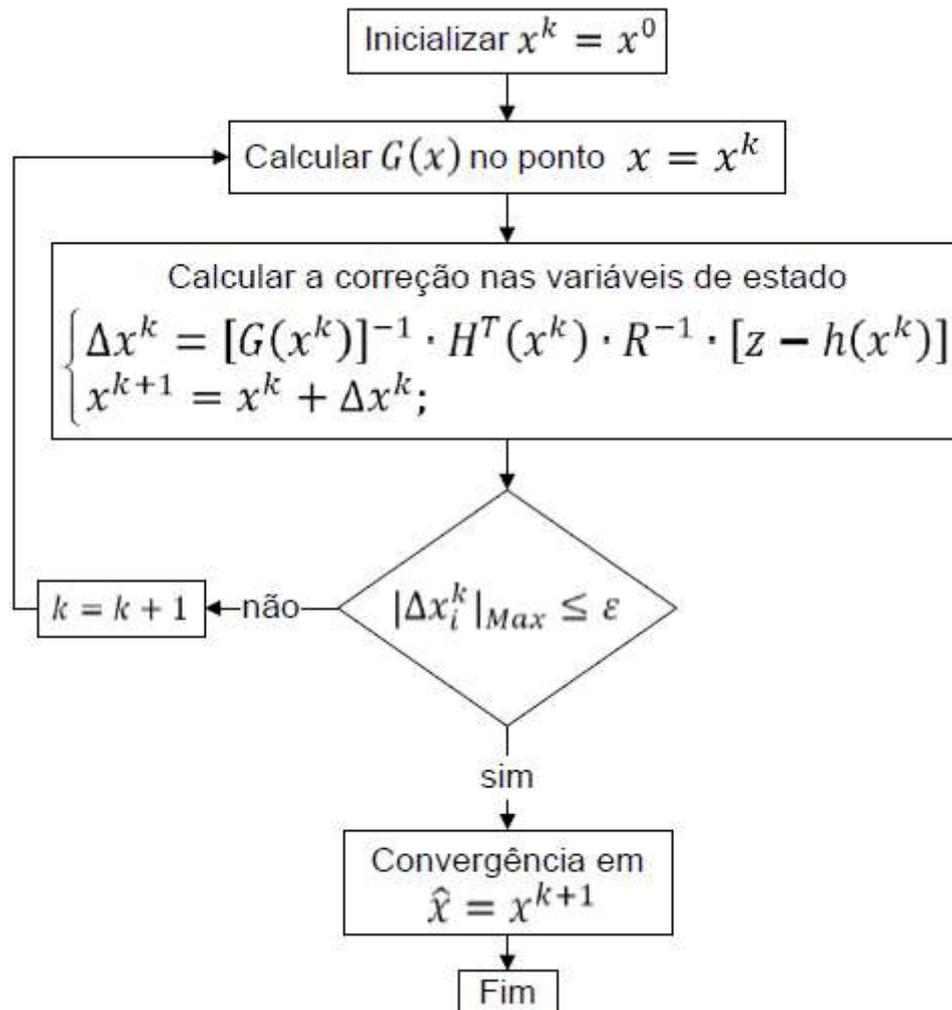


Figura 6. Passos para execução do estimador por mínimos quadrados ponderados.

O estimador de estado de Mínimo valor absoluto Ponderado (*WLAV*), foi originalmente proposto por [50] na tentativa de solução do problema de medições com presença de erros grosseiros (EG) iterativos. Os EGs são erros de medidas com magnitude maior que três desvios padrões. Tal estimador é mais robusto que o *WLS*, sucintamente explanado acima, na presença de EGs. No entanto, tal método possui falhas na ocorrência de EG em uma ou mais medidas redundantes de maior influência, as quais possuem a característica de serem altamente influentes no resultado, alterando a convergência do processo de estimação de estado. Essas medidas são conhecidas como pontos de alavancamento [49].

O estimador de estados baseado no método da Mínima Mediana do Resíduo ao Quadrado (*WLMS*) foi proposto originalmente por [51], sendo este o primeiro estimador estatisticamente robusto podendo filtrar EGs existentes em mais de uma medida. Porém, tal metodologia requer uma enorme quantidade de medições para que seja mantida a

observabilidade do sistema em qualquer subconjunto de medições utilizado no cálculo. De forma geral, um sistema é dito observável se o conjunto de medidas é suficiente para estimação de todas as suas variáveis de estado. Caso contrário, ele não é observável.

2.3.2.3. Estimadores Heurísticos

Na tentativa de suprir as deficiências dos métodos estatísticos para estimação de estados, foram explorados métodos heurísticos, os quais combinam aproximações tradicionais com métodos de inteligência computacional. As metodologias mais relevantes incluem *Fuzzy*, Redes Neurais e *Particle Swarm Optimization (PSO)*.

O emprego da teoria dos conjuntos *Fuzzy* na solução de problemas de estimação de estados permite que as medições com elevado grau de imprecisão (pseudomedidas) sejam definidas a partir do conhecimento qualitativo do comportamento do sistema elétrico. Pseudomedidas, segundo [52], são dados utilizados no estimador de estado que não provém diretamente de um instrumento de medição.

A lógica *fuzzy* (LF) pode ser definida como uma técnica inteligente com objetivo de modelar o modo aproximado de raciocínio [53], reproduzindo a habilidade humana de tomar decisões em um ambiente de incerteza e imprecisão, permitindo que informações imprecisas, descritas em linguagem natural, sejam convertidas para um formato numérico representativo.

A LF aplicada a estimadores de estado integra as aproximações tradicionais de estimação de estado com a representação das informações qualitativas presentes nos sistemas elétricos. Neste tipo de modelagem, os sistemas elétricos com baixo nível de monitoramento, porém com elevado grau de informação qualitativa, podem ser modelados e avaliados nos quesitos de segurança da operação de seu sistema. É proposto em [54], um estimador de estados e fluxo de potência, integrando lógica *Fuzzy* ou Difusa para aplicação em sistemas de distribuição de energia. A influência dos dados históricos e a participação das categorias de consumidores na curva de carga são descritas utilizando álgebra fuzzy, e com solução inicial de um estimador de carga *Fuzzy*, que fornece dados de carregamento para um problema de fluxo de potência difuso para redes de distribuição.

Através do fluxo de potência difuso são calculados os intervalos de confiança para as correntes de carga e fatores de potência, sendo estes, em geral, maiores que os intervalos de confiança obtidos, utilizando medidas reais das correntes nos circuitos.

Para redução da incerteza das correntes de carga, os autores propõem um estimador corretivo difuso para a corrente de carga, sendo que o resultado pode ser *Fuzzy*, representado por um conjunto de pontos discretos para os diferentes intervalos de confiança, através da regra do centróide [55]. O algoritmo utiliza dados históricos disponíveis e medidas em tempo real. Assim a solução *Fuzzy* proposta pode ser utilizada diretamente como dado de entrada para outros sistemas de gerenciamento da distribuição, ou indiretamente nos algoritmos estatísticos.

Para *Particle Swarm Optimization*, [56] e [57] propõem uma metodologia de estimação de estados através da otimização por *Hybrid Particle Swarm Optimization*, a qual leva em consideração as características não lineares dos equipamentos e a baixa redundância de medições do sistema de distribuição. O método considera as atuais medidas realizadas no sistema de distribuição e assume que as magnitudes de tensão e corrente podem ser adquiridas das barras secundárias das subestações. Além disso, pode-se estimar injeção e geração distribuída em cada nó, minimizando a diferença entre as tensões e correntes medidas e calculadas, como os métodos convencionais. Os resultados das simulações indicam que este método pode ser mais preciso do que o método original de PSO, mesmo com possíveis erros de medidas.

Quanto às redes neurais aplicadas à estimadores de estados, os resultados das aplicações baseadas em redes neurais com estimadores apresentam resultados satisfatórios em [58], porém a precisão dos mesmos está fortemente ligada à adequação dos conjuntos de treinos e à arquitetura da rede neural selecionada. Aplicação de Redes neurais Artificiais para determinação do plano de medição, considerando a adição ou eliminação sequencial de medidores, com o objetivo de minimizar o custo total de investimento, sujeito as restrições de precisão nas estimativas das variáveis de estado foi proposto em [58]. Em [59], é desenvolvido um método para posicionamento de medidores em um sistema elétrico de potência, método este baseado em uma aproximação meta-heurística. Uma simples função objetivo é proposta, levando em conta os custos de instalação e distribuição de aparelhos de medição, com processo de minimização solucionado pela técnica *Simulated Annealing*. Aplicações adicionais de algoritmos heurísticos para determinação do plano de medição são propostas em [60] e [61].

Capítulo 3 – Metodologia Proposta

3.1. Introdução

Para melhor entender como se faz a transdução de temperatura em perda de energia serão necessárias a introdução de duas leis da Física. A primeira, a Lei de Fourier, também conhecida como a lei da condução térmica, estabelece que o fluxo de calor através de um material é proporcional ao gradiente negativo de temperatura. O presente trabalho não irá entrar em detalhes nessa lei. Serão utilizados apenas seus conceitos aplicados a circuitos térmicos, os quais terão uma breve introdução aplicada na seção 3.2 seguido do método para encontrar a potência dissipada em cabos isolados de baixa tensão.

A segunda, a Lei de Resfriamento de Newton, afirma que a taxa de mudança de temperatura de um objeto é proporcional à diferença entre sua própria temperatura e a temperatura de seu entorno [62]. Esta será brevemente apresentada na seção 3.3 para explicação da radiação de calor para cabos condutores.

Para cabos nus será verificada, conceitualmente, a possibilidade de se desprezar as trocas de calor por radiação e irradiação, descritas na norma IEEE 738. Para cabos isolados, será testado o uso de medidores de temperatura apenas do condutor e do meio ambiente.

O padrão estabelecido pela IEEE 738 descreve como calcular a relação corrente-temperatura de condutores aéreos nus. A equação de equilíbrio de calor (6) é usada como base para o método descrito nas seções 3.2 e 3.3.

$$I^2R(T_{media}) = PN = q_c + q_r - q_s \quad (6)$$

Onde:

$I^2R(T_{media}) = PT$ são as perdas técnicas (W);

q_c é a taxa de perda de calor por convecção por unidade de comprimento (W / m);

q_r é a perdede de calor por radiação por unidade de comprimento (W / m);

q_s é a taxa de ganho de calor provindo do sol (irradiação solar) por unidade de comprimento (W / m).

Utilizando o padrão do IEEE 738, a Lei de Fourier e a Lei de Resfriamento de Newton, as PNs e PNTs podem ser estimadas dentro de um intervalo de erro aceitável.

Para condutores nus será mostrado que é possível ignorar os efeitos de q_r e q_s , descritos na norma IEEE 738, sobre as PTs calculadas durante o dia, permitindo simplificações sem grande perda de precisão.

As diretrizes estabelecidas pelo IEEE 738 podem ser estendidas para cabos isolados com simplificações possibilitadas pela Lei de Fourier que não afetam o resultado e permitem um cálculo mais fácil.

Por fim, incluiu-se um método para cálculo das perdas em conectores tipo cunha, o qual é o mais utilizado no Brasil. O motivo para a inclusão desse cálculo é que, ao longo do tempo, esses conectores oxidam, afrouxando-se no contato causando pontos de alta resistência e, conseqüentemente, maior dissipação de calor.

3.2. Obtenção da Potência Dissipada em Condutores Isolados

Para cabos isolados, a perda de calor da parte condutora pode ser diretamente determinada pela troca de calor entre o cobre e a isolação (condução térmica), e da isolação com o ambiente (convecção térmica), como demonstrado pelo circuito térmico equivalente na figura 7.

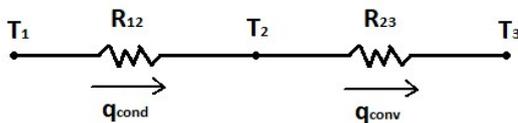


Figura 7. Circuito térmico equivalente mostrando a direção do fluxo de calor do condutor para o ambiente através do isolamento.

Na figura 7, T_1 representa a temperatura do condutor, T_2 representa a temperatura na isolação e T_3 representa a temperatura ambiente; R_{12} e R_{23} são as resistências térmicas representando a perda de calor por condução e a perda de calor por convecção, respectivamente; enquanto que q_{cond} e q_{conv} são os fluxos de de condução de calor e fluxo de convecção de calor, respectivamente. Quando a lei de Fourier é aplicada ao cilindro, o qual representa o condutor, as resistências térmicas de condução e convecção são das pelas equações (7) e (8), respectivamente.

$$R_{12} = \frac{\Delta T_{12}}{q_{cond}} = \frac{\ln(r_{ext}/r_{int})}{2\pi k_{iso} L} \quad (7)$$

$$R_{23} = \frac{\Delta T_{23}}{q_{conv}} = \frac{1}{2\pi r_{iso} L h_{ar}} \quad (8)$$

Onde r_{ext} e r_{int} são os raios externo (isolação) e interno (condutor somente), respectivamente, mostrados na figura 8. As perdas técnicas são então determinadas pelo fluxo total de calor entre T_1 e T_3 , do circuito térmico equivalente da figura 7, dada pela equação (9):

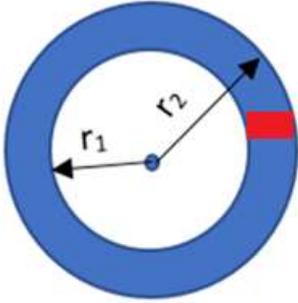


Figura 8. O retângulo vermelho representa sensor de temperatura em contato com a parte condutora do cabo.

$$PT = \frac{T_1 - T_3}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi \cdot K_{iso}} + \frac{1}{2\pi \cdot r_2 \cdot L \cdot h_{ar}}} \quad (9)$$

Onde:

$PT = I^2R$ – potência dissipada, em Watts;

T_1 – temperatura do condutor em °C;

T_3 – temperatura do ambiente em torno do cabo em °C;

r_1 – raio interno do condutor, em metros;

r_2 – raio externo do condutor, em metros;

L – comprimento do vão entre os postes de distribuição, em metros;

K_{iso} – coeficiente de condutividade térmica, em $W \cdot m^{-2} \cdot C^{-1}$;

h_{ar} – coeficiente de convecção do ar, em $W \cdot m^{-2} \cdot C^{-1}$.

3.3. Obtenção da Potência Dissipada em Condutores Nus

Para condutores nus, a radiação de calor pode ser descrita por [62] e [63], como mostrado pela figura 9 e equação (10):

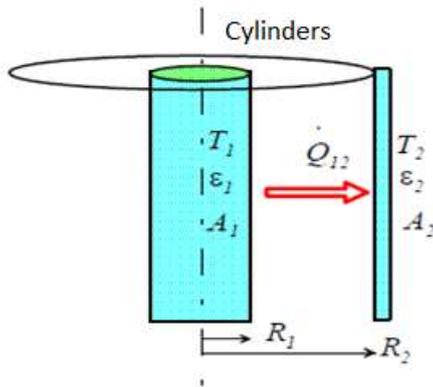


Figura 9. Cilindros concêntricos, onde o cilindro interno representa o condutor e o externo é o próprio ar

$$Q_{12} = \frac{A_1 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \cdot \frac{R_1}{R_2}} \quad (10)$$

Onde:

$Q_{12} = q_r$ é a perda de calor por radiação entre 1 (cilindro interno) e 2 (cilindro externo);

A_1 é a área da seção transversal do condutor nu (cilindro interno, m^2);

σ é a constante de Boltzmann, cujo valor é $5,670 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$;

T_1 é a temperatura absoluta do corpo emissor 1 (cilindro interno, $^{\circ}C$);

T_2 é a temperatura absoluta do corpo emissor 2 (cilindro externo, $^{\circ}C$);

ε_1 é a emissividade do corpo 1;

ε_2 é a emissividade do corpo 2;

R_1 é o raio do cilindro interno;

R_2 é o raio do cilindro externo;

De acordo com o modelo apresentado na figura 9, o ar pode ser considerado um corpo negro. Um corpo com essa propriedade, basicamente, não pode ser visto pois nenhuma luz o atravessa e nem é refletida. Apesar do nome, corpos negros emitem radiação, o que permite determinar sua temperatura. Em outras palavras, um corpo negro ideal irradia energia na mesma taxa que a absorve. Assim sendo, a emissividade $\varepsilon_2 = 1$ e a equação (10) pode ser simplificada em (11):

$$q_r = A_1 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \cdot \varepsilon_1 \quad (11)$$

A equação (11) simplifica bastante o cálculo da perda de calor por radiação em cabos nus. De acordo com a norma IEEE 738, a quantidade de energia térmica fornecida ao condutor depende da posição do sol no céu, a constante solar (quantidade de energia por m² fora da atmosfera da Terra), a quantidade dessa energia que é transmitida através da atmosfera da Terra para o condutor, a orientação do condutor e a condição da superfície do condutor (sua absorvidade).

Condutores mais novos (superfície mais clara) refletem a maior parte da energia solar enquanto que condutores mais velhos (condutores de cobre que ficam mais escuros com o tempo de uso) absorvem maior parte da energia solar. As equações (12-15), as quais representam a Altitude solar (H_c), Azimute do Sol (Z_c), densidade total de fluxo de calor (Q_s) e Fator de Correção da elevação (Q_{se}), respectivamente, são utilizados para calcular os valores das variáveis na equações (12) para determinar o ganho de calor solar no condutor (q_s).

$$H_c = \arcsin(\cos(Lat) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(Lat) \cdot \sin(\delta)) \quad (12)$$

Onde:

Lat é a latitude;

ω é o Angulo da hora;

δ é a declinação solar;

$$Z_c = C + \arctan\left(\frac{\sin(\omega)}{\sin(Lat) \cdot \cos(\omega) - \cos(Lat) \cdot \tan(\delta)}\right) \quad (13)$$

Onde:

C é a constante azimute do sol e é função do angulo da hora, ω e a arctan mostrados na equação (13).

$$Q_s = A + B \cdot H_c + C \cdot H_c^2 + D \cdot H_c^3 + E \cdot H_c^4 + F \cdot H_c^5 + G \cdot H_c^6 \quad (14)$$

Onde A, B, C, D, E, F e G são retirados da seguinte tabela:

Tabela 1. Coeficientes do polinômio para densidade total de fluxo de calor (Q_s) como função da altitude solar H_c .

	SI	
	Atmosfera Limpa	Atmosfera Industrial
A	-42.2391	53.1821
B	63.8044	14.211
C	-1.922	0.6613
D	3.4692E-02	-3.1658E-02
E	-3.6111E-04	5.4654E-04
F	1.9431E-06	-4.3446E-06
G	-4.0760E-09	1.3236E-08

$$Q_{se} = k_{solar} \cdot Q_s \quad (15)$$

Onde:

$$k_{solar} = A + B \cdot H_e + C \cdot H_e^2$$

Onde H_e é a elevação do conductor acima do nível do mar, sendo os coeficientes A, B e C tirados das seguintes tabelas:

Tabela 2. Fatores de multiplicação para k_{solar} para altas altitudes.

Elevação Acima do Nível do Mar H_e (meters)	Multiplicadores para valores da Tabela 4
0	1
1000	1.1
2000	1.19
4000	1.28

Tabela 3. Coeficientes para correção do Fluxo solar para altitude.

	SI
A	1
B	$1.148 \cdot 10^{-4}$
C	$-1.108 \cdot 10^{-8}$

Tabela 4. Fluxo de calor total em uma superfície acima do nível do mar, normal aos raios solares como função da altitude solar.

Ângulo da Altitude Solar (Hc)	Atmosfera Limpa	Atmosfera Industrial
	Qs (W/m ²)	Qs (W/m ²)
5	234	136
10	433	240
15	583	328
20	693	422
25	770	502
30	829	571
35	877	619
40	913	662
45	941	694
50	969	727
60	1000	771
70	1020	809
80	1030	833
90	1040	849

Finalmente, a irradiação solar pode ser determinada pela equação (16):

$$q_s = \alpha \cdot Q_s \cdot \sin(\theta) \cdot A_c \quad (16)$$

Onde:

α é a absortividade solar (varia entre 0.23 e 0.91);

Q_s é o fluxo de calor solar total para ar limpo à nível do mar, em W/m^2 ;

θ é o Angulo de incidência do raio solar com o condutor, em graus;

A_c é a área projetada do conductor, m^2

Como pode ser visto, o cálculo de q_s é bastante trabalhoso. Para a latitude específica do Rio de Janeiro, a figura 10 mostra que, para um dia comum, entre as 10 e 16 horas, os valores da irradiação solar é compensada pelos valores da radiação de calor do condutor. Fora desse intervalo, entretanto, os valores de irradiação solar são pequenos demais para interferir com os resultados enquanto que os de radiação de calor podem ser considerados, especialmente à noite aonde somente seus efeitos sem interferência da irradiação solar podem ser considerados. Para efeitos de estudo, os efeitos da radiação de calor de noite foram desconsiderados e, como será visto no exemplo ao final dessa seção, o desvio dos

resultados ao ignorar completamente os efeitos da radiação de calor de noite não foram significativos.

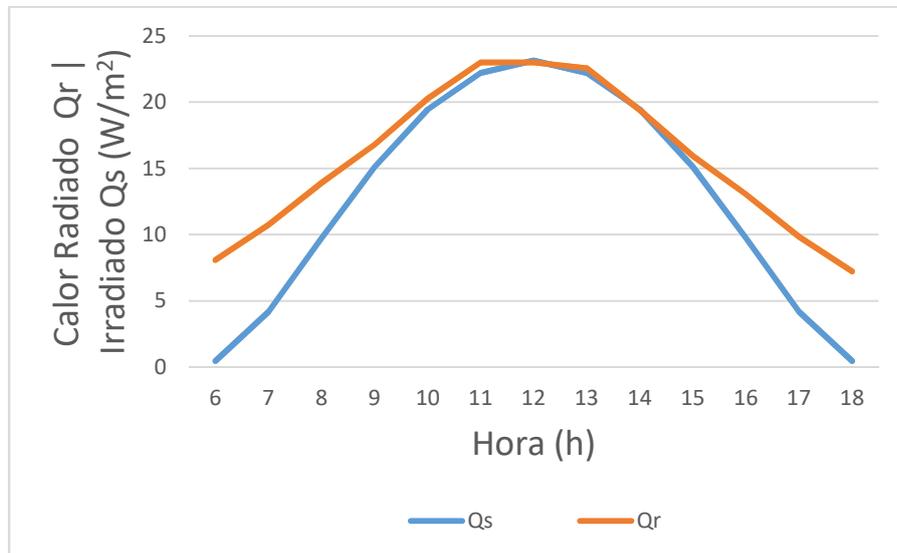


Figura 10. Radiação solar vs Irradiação solar durante o dia.

Para o cálculo das PT's em condutores nus, a equação (2) se reduz à (17). As PT's podem ser calculadas diretamente das perdas de calor por convecção sem grande perda de precisão.

$$I^2R(T_{media}) = PT = q_c \quad (17)$$

Através da Lei de Fourier e circuitos térmicos, analogamente como foi apresentado para cabos isolados na seção 3.2, encontra-se a relação entre a PT e as perdas de calor por convecção, mostrado pela equação (18). A figura 11 mostra uma seção transversal do condutor.

$$PT = \frac{T_c - T_a}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot h_{ar}}} = I^2 \cdot R \quad (18)$$

Onde:

$PT = I^2R$ – potência dissipada, em Watts;

T_c – temperatura do condutor em °C;

T_a – temperatura do ambiente em torno do cabo em °C;

r – raio interno do condutor, em metros;

L – comprimento do vão, em metros, entre dois sensores de temperatura;

h_{ar} – coeficiente de convecção do ar, em $W \cdot m^{-2} \cdot C^{-1}$.

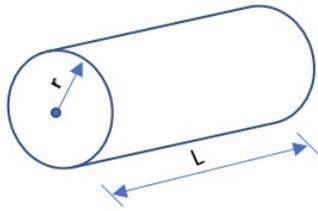


Figura 11. Condutor nu de raio r

3.4. Obtenção da Potência Dissipada em Conectores Tipo Cunha – Assimétricos

Neste caso, conforme ilustrado pela figura 12, é representada a conexão em que os condutores têm seções diferentes, como na ligação de uma ramal de baixa tensão. Nesta situação, $T_{c1} \neq T_{c2}$, temperaturas nos condutores 1 e 2, e existem os dois casos de dissipação de calor, condução e convecção.

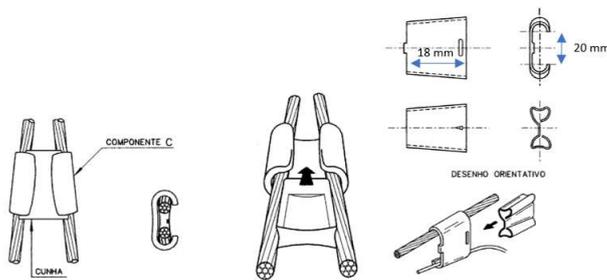


Figura 12. Detalhes do conector tipo cunha

A PT é calculada pela expressão (19).

$$PT = K \cdot A \cdot \frac{T_{c1} - T_{c2}}{L} \quad (19)$$

Onde:

K – condutividade térmica do material;

A – área da seção reta do deslocamento do fluxo de calor;

T_{c1} – temperatura do condutor fonte;

T_{c2} – temperatura do condutor carga;

L – extensão do percurso do calor.

A figura 13 mostra uma imagem térmica de uma conexão tipo cunha, simétrica (entre dois condutores de mesma bitola) bem apertada. Nota-se uma igual distribuição de

temperatura entre os cabos ligados pela conexão. Neste caso, existe apenas trocas de calor com ar por convecção.

Para cálculo da perda por convecção utiliza-se a mesma expressão (18), com T_c sendo a temperatura da cunha.

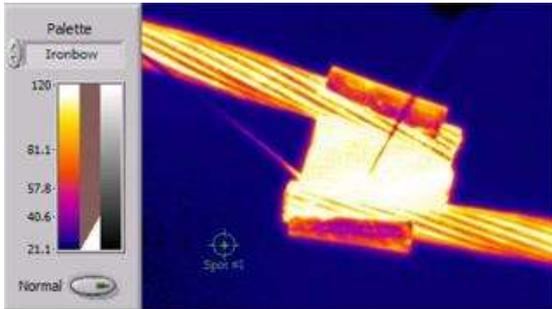


Figura 13. Imagem térmica de um conector tipo cunha para bitolas iguais

3.5. Exemplo prático do Medidor Proposto

Para demonstrar a precisão do modelo, foi simulada a situação de um circuito com cabo isolado de uma fase baseado em leituras reais, representada na figura 14:

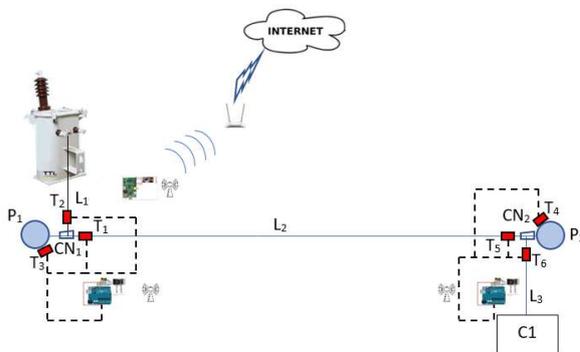


Figura 14. Circuito de baixa tensão simulado

Dados: Cabo 33 mm^2 , isolamento de PVC, com raio interno $r_1 = 2,041 \text{ mm}$ e raio externo $r_2 = 3,241 \text{ mm}$.

Onde:

$P_{1,2}$ – postes 1 e 2;

$CN_{1,2}$ – cunhas 1 e 2;

$L_{1,2,3}$ – extensão dos vãos 1, 2 e 3;

C_1 – consumidor;

$$K_{cobre} = 398 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1};$$

$$K_{pvc} = 0,17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1};$$

$$h_{ar} = 5,13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1};$$

$$L_1 = 1 \text{ m};$$

$$L_2 = 40 \text{ m};$$

$$L_3 = 5 \text{ m};$$

Carga em C_1 para $V_{c1} = 126$ volts, listada na tabela 5:

Tabela 5. Dados da curva de carga diária do cliente do exemplo prático

Hora (h)	Carga C_1 (kW)	Fator de potência	I (A)
$0 \leq h < 17$	2	0.96	16.5344
$17 \leq h < 20$	8	0.90	70.5467
$20 \leq h < 0$	3	0.94	25.3293

Utilizando todas as ferramentas explicadas na seção anterior, é possível encontrar a solução para o presente exemplo. Os resultados do exemplo prático estão listados da tabela 6 a 8.

Tabela 6. Resultados de $0 \leq h < 17$, $T_1 = T_2 = T_5 = T_6 = 31,5$ e $^{\circ}\text{C}$ e $T_3 = T_4 = 30$ $^{\circ}\text{C}$

Trecho	$R_{L,31,5}$ (Ω)	I^2R (Watts)	PT_L (Watts)	PT_{CN} (Watts)	PT_{Total} (Watts)
L_1	$5,4459 \times 10^{-4}$	0.1489	0.1499	-	-
L_2	0.0218	5.9553	5.9968	-	-
L_3	$0,2723 \times 10^{-3}$	0.7444	0.7496	-	-
CN_1	-	-	-	0.0028	-
CN_2	-	-	-	0.0028	-
Total		6.8486	6.8963	0.0056	6.9019

Tabela 7. Resultados de $17 \leq h < 20$, $T_1 = T_2 = T_5 = T_6 = 60$ $^{\circ}\text{C}$ e $T_3 = T_4 = 30$ $^{\circ}\text{C}$

Trecho	$R_{L,60}$ (Ω)	I^2R (Watts)	PT_L (Watts)	PT_{CN} (Watts)	PT_{Total} (Watts)
L_1	$6,0252 * 10^{-4}$	2.9986	2.9984	-	-
L_2	$2,4100 * 10^{-2}$	119.9460	119.9352	-	-
L_3	$3,0126 * 10^{-3}$	14.9932	14.9920	-	-
CN_1	-	-	-	0.0554	-
CN_2	-	-	-	0.0554	-
Total		137,9391	137,9256	0.1108	138.0364

Uma conexão com mau contato nesta hora no condutor do ramal, aumentando T_6 para 90 °C, mantendo-se $T_5 = 60$ °C, faria uma perda em CN2 da ordem de:

$$PT_{CN} = K.A.\frac{T_6-T_5}{L} + \frac{T_{cn}-T_a}{\frac{1}{A.h_{ar}}} \quad (20)$$

Substituindo os valores e considerando a temperatura média da cunha em $T_{cn} = 75$ °C, a $PT_{cn} = 238,88$ Watts \gg 0,0554 Watts da cunha bem instalada.

TABELA I. Resultados de $20 \leq h < 0$, $T_1 = T_2 = T_5 = T_6 = 33,6$ °C e $T_3 = T_4 = 30$ °C

Trecho	$R_{L,37}$ (Ω)	I^2R (Watts)	PT_L (Watts)	PT_{CN} (Watts)	PT_{Total} (Watts)
L ₁	$5,5577 \times 10^{-4}$	0,3566	0,3598	-	-
L ₂	0,0222	14,2627	14,3922	-	-
L ₃	0,0028	1,7828	1,7990	-	-
CN ₁	-	-	-	0,0066	-
CN ₂	-	-	-	0,0066	-
	Total	16,4021	16,5510	0,0132	16,5642

3.6. Uso do Algoritmo Backward / Forward Sweep com Soma de Potências

Aplicando as técnicas descritas nas seções anteriores é possível obter as Perdas Técnicas na rede de distribuição de baixa tensão com um grau aceitável de erro e facilmente obter uma boa estimativa para as perdas não-técnicas utilizando a equação de balanço de energia (1).

O próximo passo é encontrar os possíveis pontos de roubo de energia. Para este fim, o método de soma das potências utilizando o algoritmo Backward / Forward Sweep para resolver o fluxo de potência [64], é implementado para encontrar o estado das tensões do sistema e, por extensão, a queda de tensão entre cada barra. Este método, como explicado por [65], é o mais popular para resolver o fluxo de potência de redes radiais (figura 15) ou redes pouco malhadas, as quais são prevalentes na baixa tensão.

A técnica das somas de potência, inicialmente proposta por [66], elimina o ângulo da tensão do cálculo do fluxo de potência para simplificar a solução. A explicação para tal encontra-se no fato de que para maioria dos estudos de fluxo de potência na baixa tensão, o valor do ângulo de fase não é significativo o bastante para causar redução na precisão dos resultados, considerando apenas os módulos das tensões em cada nó. Porém, caso seja necessário incluir o ângulo de fase, um passo extra de cálculo pode ser facilmente inserido no algoritmo.

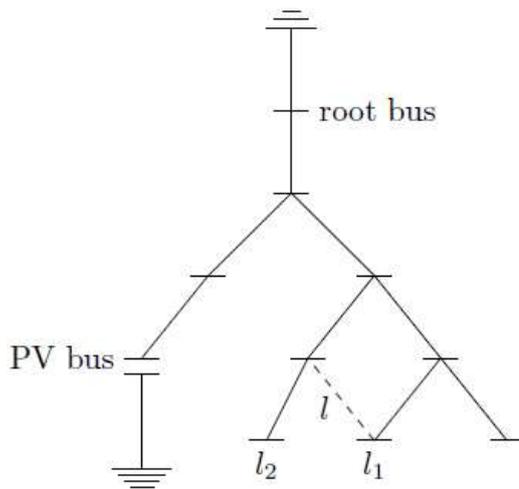


Figura 15. Rede de distribuição radial, prevalente na baixa tensão.

O algoritmo para solução do fluxo de potência pode ser resumido em poucos passos:

a) Flat Start

Um valor inicial (tensão do nó raiz, conhecida e considerada como fixa), é definido como o ponto de partida para todas as tensões nodais. No caso, o nó aonde o transformador encontra-se na baixa tensão seria tido como o nó raiz;

b) Backward Sweep

Este passo calcula o fluxo de potência da rede. O método da soma das potências consiste em somar as potências equivalentes em cada barramento, começando pelos barramentos extremos (mais longe do barramento raiz), seguindo em direção ao barramento inicial (raiz), somando as potências ativa e reativa, obtidos pelos *smart meters* em cada nó, incluindo as perdas técnicas na soma provindas da iteração anterior do Backward Sweep, ou seja, para o passo inicial as PTs são consideradas como 0. As equações (21) e (22) mostram como é realizado o passo em cada barramento.

$$P_k^{eq} = P_k + \sum_{b \in B_k} P_b + \sum_{l \in D_k} P_l^{loss} \quad (21)$$

$$Q_k^{eq} = Q_k + \sum_{b \in B_k} Q_b + \sum_{l \in D_k} Q_l^{loss} \quad (22)$$

Onde:

k é o número de nós no sistema, variando do nó atual (começando pelos extremos) até 1 (nó raiz);

P_k, Q_k potências ativa e reativa do barramento k , respectivamente;

P_b, Q_b Potências ativa e reativa do(s) barramento(s) conectado(s) no barramento k, respectivamente;

P_l^{loss}, Q_l^{loss} Perdas ativa e reativa em cada ramo conectado ao barramento k, respectivamente;

B_k Conjunto de barramentos conectados ao barramento k;

D_k Conjunto de ramos conectados ao barramento k.

c) Forward Sweep

Com o fluxo de potência calculado no passo b, o *forward sweep* prossegue, começando do barramento raiz indo em direção aos barramentos nos extremos da rede. Neste passo, as tensões são calculadas sequencialmente usando (23), sendo atualizadas a cada passo para encontrar a próxima até chegar ao final da rede.

$$V_r^4 \cdot A + V_r^2 \cdot B + C = 0 \quad (23)$$

Onde:

$$\begin{aligned} A &= (g_{sr}^2 + b_{sr}^2) \\ B &= [2 \cdot (P_k^{eq} \cdot g_{sr} - Q_k^{eq} \cdot b_{sr}) - V_s^2 \cdot y_{sr}^2] \\ C &= (P_k^{eq})^2 + (Q_k^{eq})^2 \end{aligned}$$

Os subscritos r e s reference a *Receiving bus* (barramento de origem) e *Sending bus* (barramento de destino), respectivamente, enquanto que g, b e y são a condutância, susceptância e admitância, respectivamente, entre os barramentos de origem e destino.

Embora a equação (23) seja de quarta ordem, por ser uma equação bi-quadrática possui uma solução simples e ainda não depende dos ângulos das tensões das barras, o que simplifica ainda mais a solução.

d) Critério de Convergência:

Diferentes critérios podem ser usados para verificar a convergência do algoritmo de varredura. Referência [67] compara diferenças entre as potências ativa e reativa máximas em cada iteração sucessiva como critério de convergência. Outros trabalhos, como [68], utiliza as diferenças entre as tensões em cada iteração para checar a convergência, o qual foi o critério adotado no presente trabalho, como pode ser visto pela equação (24):

$$|V^{k+1} - V^k| < \varepsilon \quad (24)$$

A cada iteração, os passos descritos acima são executados até os resultados convergirem. Ao final de cada etapa, não convergindo, retorna ao passo b e continua a partir desse passo até o critério de convergência ser atingido.

Após o fluxo de potência ter sido encontrado pelo método descrito acima, avança-se à próxima etapa, para identificação dos pontos de furto de energia na rede. Para tal, as quedas de tensão pela rede em duas situações do cálculo do fluxo de potência são comparadas. Uma é o fluxo de potência realizado utilizando somente dados provindos dos *smart meters* da rede, e as quedas de tensão são calculadas ao final. A outra situação, utiliza as perdas técnicas encontradas pelos medidores propostos neste trabalho (consideradas constantes), o qual obtêm as PTs a partir dos sensores de temperatura estrategicamente posicionados na rede (começo e fim de cada linha, posicionado em cada poste), utilizando esses valores como conhecidos no cálculo da do fluxo de potência usando o *Backward / Forward Sweep* com soma das potências, aonde esses valores de PT conhecidos são adicionados à soma das potências em cada iteração.

A diferença entre as quedas de tensão em ambos os resultados desses fluxos de potência são então comparadas, e havendo diferenças nesses valores, encontra-se o local aproximado do roubo de energia na rede, como será ilustrado no estudo de caso do capítulo 5.

Capítulo 4 – Proposta de uma Jiga de Testes para Simulação de Medidores Inteligentes

Este capítulo sugere uma arquitetura de hardware e software de baixo custo, que pode ser aplicada a rede de baixa tensão, com o objetivo de coletar dados que originalmente são adquiridos diretamente de medidores inteligentes e que permite a simulação destes. A arquitetura descrita, a fim de facilitar o entendimento, se baseia na configuração de rede elétrica da figura 16. Uma fonte, que pode ser um transformador de distribuição, e 2 ramais de carga.

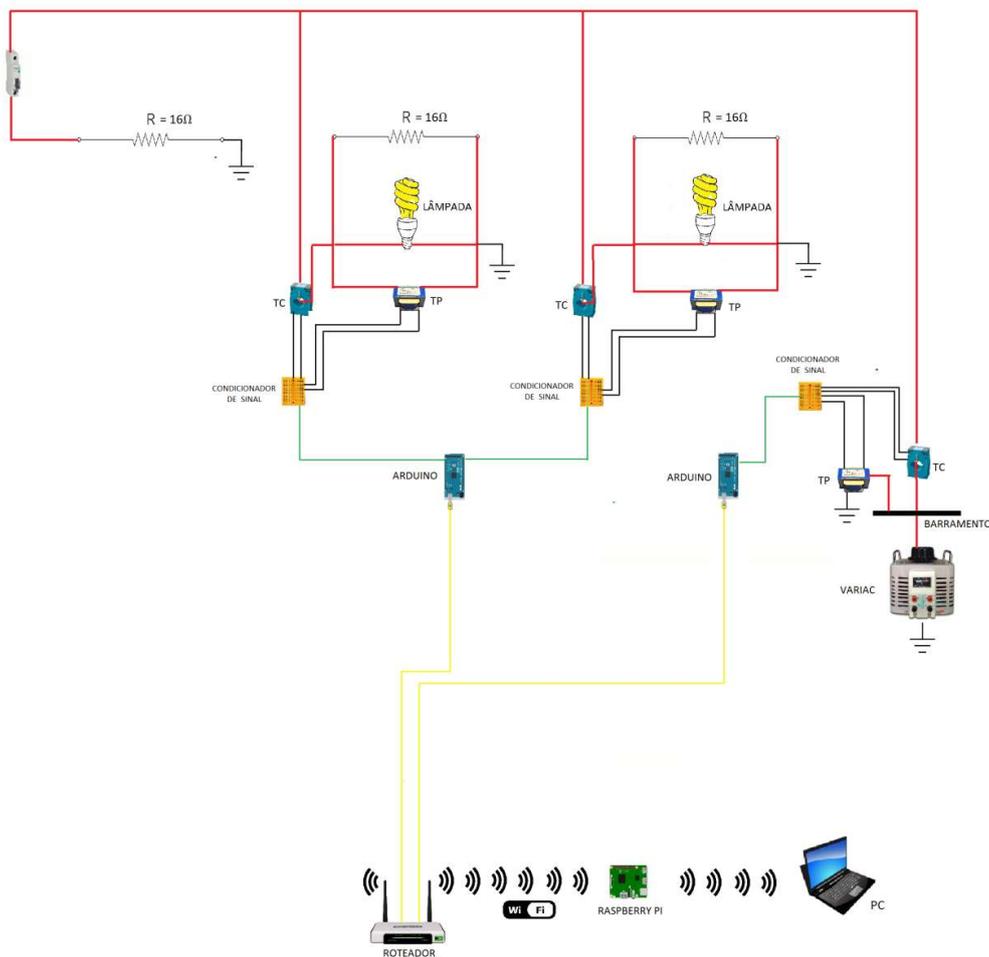


Figura 16. Esquemático da jiga de teste proposta

4.1. Materiais Utilizados

O Sistema proposto é composto de:

Unidades de aquisição de dados, cujos sensores de temperatura ficam instalados em trechos de vãos, conexões e junto ao poste, para coletar temperatura do meio ambiente próximo ao cabo e do cabo. Para a jiga de testes, recomenda-se Arduíno UNO (figuras 18 e 19) que calcula as PT's e enviam os dados ao processador mestre (figura 17), quando solicitadas. Opcional cartão de memória *micro SD* para cada arduíno para armazenamento local de dados em campo e envio para processador quando solicitados;

Unidade mestre de processamento, localizada no campo, próximo às unidades de aquisição de dados. É responsável por: solicitar e receber as PT's e armazená-las em banco de dados local; estabelecer e enviar dados de PT's à empresa concessionária, quando solicitada, via web. Para efeitos de teste, um PC próprio pode ser utilizado para facilitar a visualização dos dados dos testes. Como alternativa, o *Raspberry Pi*. No caso da jiga de testes, poderá servir como *Web Server* local para apresentação dos dados;

Um roteador para envio de informações para a rede externa via web ou comunicação interna na rede local;

Transceivers NRF24L01 (opcional), responsáveis por estabelecer uma rede *radio mesh* para comunicação entre o processador mestre e as unidades de aquisição de dados caso instalação em campo;

Sensores de temperatura conectados às unidades de aquisição de dados (figura 19);

Encapsulamento para o caso de instalação em campo.

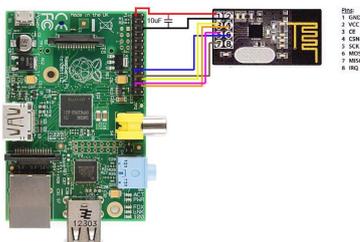


Figura 17. Raspberry Pi, unidade mestre ligada ao NRF24L01

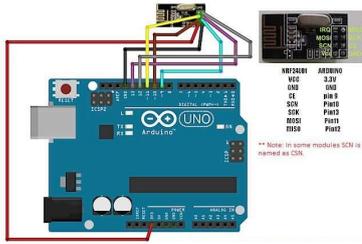


Figura 18; Arduino UNO conectado ao NRF24L01

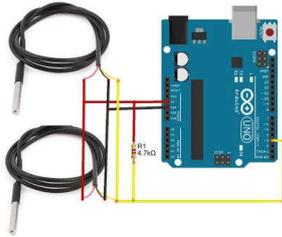


Figura 19. Ligação de dois sensores de temperatura no arduino, modo OneWire

Com o hardware acima é possível realizar simples testes baseando-se no medidor proposto neste trabalho. Para o auxílio de software, recomenda-se o PLX DAQ [69], o qual permite criar arquivos de saída de excel os quais são atualizados em tempo real com os dados que se deseja observar na simulação, no caso, as temperaturas, correntes e potências das cargas para o estudo neste teste.

Como adicional, utiliza-se TCs e TPs para criar medidores de tensão, corrente e potência utilizando o arduino proposto acima. Isto faz-se necessário para se ter uma base de comparação com os resultados do medidor usando os sensores de temperatura. Tabela a seguir mostra uma comparação dos preços dos materiais utilizados na jiga de teste. Preços pesquisados em 06/08/2019.

Tabela 8. Preço dos components sugeridos. Preços exraídos de [70-77].

Material	Custo
Arduino Uno	R\$ 54,90
Arduino Mega (Opcional, mais robusto que o Uno)	R\$ 89,90
Sensor de Temperatura DS18B20	R\$ 16,90
NRF24L01+PA+LNA (opcional)	R\$ 28,99
Transformador de Potência de relação 200/9 V	R\$ 20,00
Transformador de Corrente de relação 200x5 A	R\$ 77,00
Raspberry Pi (opcional)	R\$ 249,90
Cartão Micro SD 16 GB (opcional)	R\$ 16,00

A integração entre os TC's e TP's com os arduinos não pode ser realizada diretamente, uma vez que a tensão de referência do conversor analógico digital da placa

Arduino é limitada a 5V positivo. Desta forma, há a necessidade de realização do condicionamento do sinal enviado pelos TC's e TP's para os Arduinos, que garanta uma forma de onda que tem um pico positivo que é menor do que 5 V e um pico negativo que é maior do que 0V.

O Condicionamento de Sinal é elaborado através da conexão entre resistores e capacitores montados sobre protoboards, de modo que a aquisição e o envio dos dados ocorram corretamente sem danificar o Arduino, como será explicado nas próximas seções.

4.2. Medição de Corrente

O sinal de corrente do TC é convertido para um sinal de tensão com uma resistência de carga (R_{burden}) que deve ser dimensionada. O dimensionamento é explicado passo a passo a seguir.

1ª etapa) Escolher a faixa de corrente que você quer medir, e em seguida converter a corrente máxima RMS para o pico de corrente primária, multiplicando-a por $\sqrt{2}$.

$$I_{\text{Pico de corrente primária}} = \text{RMS} \times \sqrt{2}$$

2ª etapa) Calcular a corrente de pico secundária [$I_{\text{Pico de corrente secundária}}$], dividindo a corrente de pico primária [$I_{\text{Pico de corrente primária}}$] pelo RTC do TC em questão.

$$I_{\text{Pico de corrente secundária}} = \frac{I_{\text{Pico de corrente primária}}}{RTC}$$

3ª etapa) Para maximizar a resolução de medição, a tensão sobre o resistor de carga no pico de corrente deve ser a tensão de referência analógico Arduino (A_{REF}) dividido por 2.

Sendo o Arduino de 5V: $A_{ref} / 2$ será de $5 \text{ V} / 2 = 2,5 \text{ V}$ e a resistência carga ideal será:

$$R_{burden} = \frac{2,5}{I_{\text{Pico de corrente secundária}}}$$

4ª etapa) Adicionando um degrau (offset) DC:

Como a tensão na saída do TC's + resistor de carga para o neutro oscila do positivo para o negativo e o conversor A/D do Arduino requer uma tensão positiva, é necessário adicionar um degrau de tensão DC para que o valor entre a entrada analógica do Arduino e o neutro torne-se sempre positiva.

Se o terminal negativo do TC, que foi ligado à terra, for conectado a um nível de 2,5 V (metade da tensão de alimentação), como resultado o sinal de tensão irá agora oscilar em torno de 2,5 V e permanecer positivo.

O esquemático do circuito de condicionamento para TC e Arduino, está apresentado na figura 19:

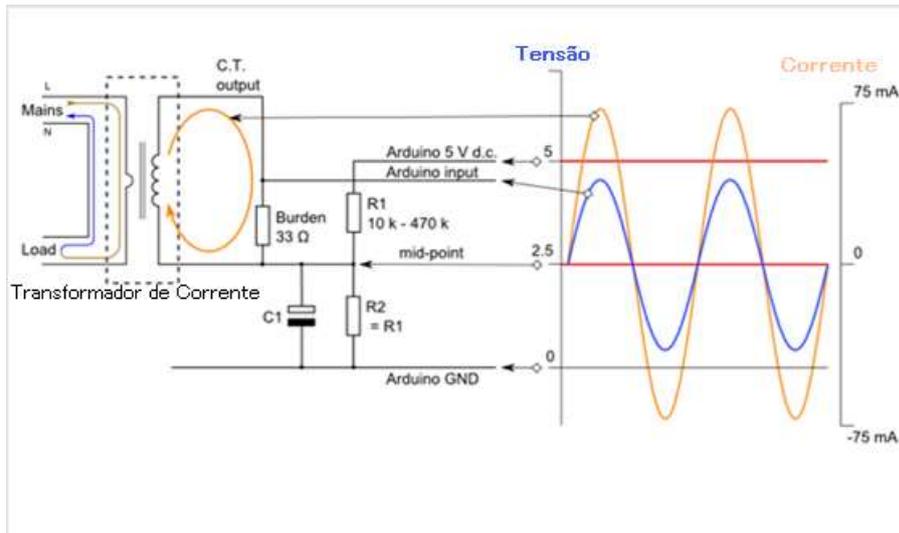


Figura 20. Condicionamento do Sinal de Corrente Os resistores R_1 e R_2 , no esquema, tornam-se um divisor de tensão que fornece esse nível de 2,5 V.

O condensador C_1 de 10 μF tem uma baixa reatância - algumas centenas de ohms - e proporciona uma via alternativa para a corrente alternada ignorar a resistência.

As resistências R_1 e R_2 podem, em tese, assumir qualquer valor adequado, desde que sejam iguais. Entretanto, uma resistência maior reduz o consumo de energia quando o circuito está desligado. Neste caso, R_1 e R_2 adotados foram de 470 $\text{k}\Omega$.

4.3. Condicionamento do Sinal do TC da Entrada

Cálculo do R_{burden} é realizado da seguinte forma:

1ª Etapa) $I_{\text{pico de corrente primária}} = 15 \text{ A}$

2ª Etapa) $I_{\text{pico de corrente secundária}} = \frac{I_{\text{pico de corrente primária}}}{RTC}$

$$I_{\text{pico de corrente secundária}} = \frac{15}{200/5} = 0,375 \text{ A}$$

3ª Etapa)
$$R_{\text{burden}} = \frac{2,5}{0,375} = 6,6 \Omega$$

Devido a disponibilidade comercialmente, neste caso deve ser utilizado o mais próximo disponível no mercado, ou seja, dois resistores de 12Ω em paralelo.

$$R_{\text{burden}} = 12\Omega // 12\Omega = 6,0 \Omega$$

4ª Etapa) $V_{\text{entrada analógica do Arduino}} = 6,0 \Omega \times 0,375 + 2,5(V_{\text{dc offset}})$

$V_{\text{entrada analógica do Arduino}} = 4,75 \text{ V} < 5\text{V}$ Sendo essa condição verificada, pode-se prosseguir para próxima seção.

4.4. Condicionamento do Sinal dos TC's das Cargas

Cálculo do R_{burden} referente às cargas:

1ª Etapa) $I_{\text{Pico de corrente primária}} = 5 \text{ A}$

2ª Etapa) $I_{\text{Pico de corrente secundária}} = \frac{I_{\text{Pico de corrente primária}}}{RTC}$

$$I_{\text{Pico de corrente secundária}} = \frac{5}{200/5} = 0,125 \text{ A}$$

3ª Etapa) $R_{\text{burden}} = \frac{2,5}{0,125} = 20 \Omega$

Devido a disponibilidade comercialmente, deve ser utilizado o mais próximo disponível no mercado, sendo assim dois resistores de 10Ω em série.

$$R_{\text{burden}} = 10\Omega + 10\Omega = 20 \Omega$$

4ª Etapa) $V_{\text{entrada analógica do Arduino}} = 20 \Omega \times 0,125 + 2,5(V_{\text{dc offset}})$

$V_{\text{Entrada analógica do Arduino}} = 5 \text{ V} \leq 5 \text{ V}$ Estando verificada essa condição, pode-se prosseguir para próxima seção.

4.5. Medição de Tensão

Da mesma maneira para os sinais vindos dos TC's faz-se para os sinais oriundos dos TP's. Como a tensão de entrada é, teoricamente, a mesma para as cargas, o dimensionamento do circuito condicionador é o mesmo para os três TP's (de entrada e das cargas).

Os resistores R_2 e R_1 formam o divisor de tensão que reduzem a tensão na saída do secundário do transformador. As resistências R_3 e R_4 fornecem o offset de tensão. O capacitor C_1 fornece um caminho de baixa impedância para a terra para o sinal AC, $C_1 = 10\mu\text{F}$

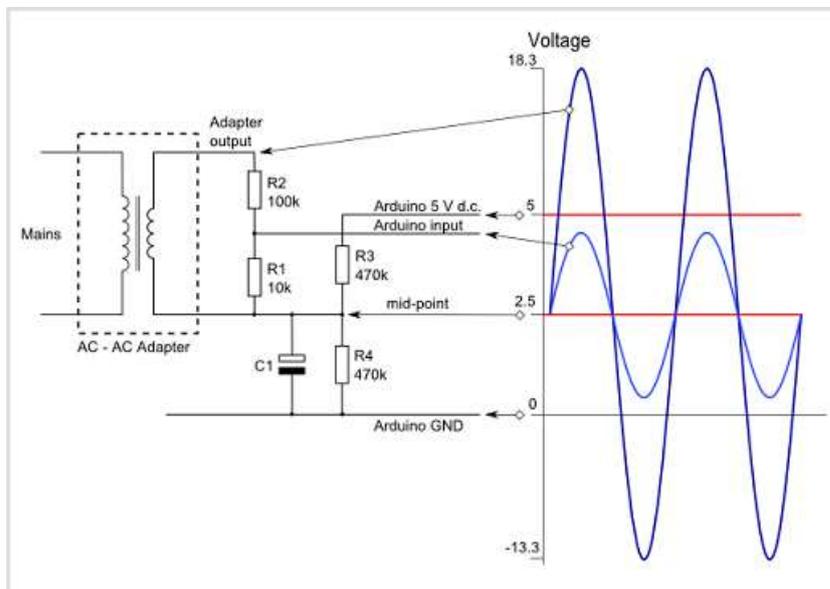


Figura 21. Condicionamento do Sinal de Tensão

Como na aplicação de corrente, a polarização de tensão fornecida por R_3 e R_4 deve ser metade da tensão de alimentação e precisam ser iguais. Quanto maior a resistência menor o consumo de energia. Objetivando o baixo consumo de energia com a bateria foi escolhido o valor de 470K tanto para R_3 quanto para R_4 .

$$R_3 = R_4 = 470 \text{ K}\Omega$$

Dimensionamento do R_1 e R_2 também realizado em etapas:

1ª Etapa) Calcular a tensão de pico secundária do transformador [$V_{\text{Pico de tensão secundária}}$], multiplicando a tensão secundária do transformador por $\sqrt{2}$.

$$V_{\text{Pico de tensão secundária do transformador}} = V_{\text{sec_RMS}} \times \sqrt{2}$$

$$V_{\text{Pico de tensão secundária do transformador}} = 9 \times \sqrt{2} = \mathbf{12,72 \text{ V}}$$

2ª Etapa) Garantir através da divisão de tensão entre R_1 e R_2 , que a tensão de R_2 somada a tensão de off-set não ultrapasse os 5V positivo adequados para a entrada analógica do Arduino e o neutro. Adota-se $R_2 = 10\text{k}\Omega$ e desejado $V_{R_2} = 1,5\text{V}$,

$$\text{Assim, } V_{R_2} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) * V_{\text{Pico de tensão secundária do transformador}}$$

$$R_1 = \mathbf{74\text{k}\Omega}$$

De acordo com a disponibilidade comercial, utiliza-se $R_1 = 80,6\text{k}\Omega$

$$V_{\text{entrada analógica do Arduino}} = V_{R_2} + 2,5(V_{\text{dc offset}})$$

$$V_{\text{entrada analógica do Arduino}} = \left(\frac{10\text{k}}{80,6 + 10\text{k}} \right) \times 12,72 + 2,5(V_{\text{dc offset}})$$

$$V_{\text{entrada analógica do Arduino}} = 1,4 + 2,5 = \mathbf{3,9 \text{ V} < 5 \text{ V}}$$
 Sendo verificada essa condição, pode-se prosseguir

se prosseguir

Sendo assim, o condicionamento dos sinais enviados tanto pelos TC's quanto dos TP's encontra-se realizado, podendo-se prosseguir com a montagem para testes.

4.6. Aquisição de Dados de Medição de Tensão, Corrente e Temperatura

Após o condicionamento do sinal na entrada do Arduino, os dados recebidos precisam ser identificados (a partir dos pinos conectados) e tratados. Tudo isto é feito a partir do programa a ser gravado no arduino. Nesta seção, será detalhado este programa.

A princípio, a linguagem utilizada é baseada em C/C++, feito na IDE do próprio arduino, obtido de [78]. As principais bibliotecas utilizadas são a Energy Monitoring Library (EmonLib), Dallas Temperature e OneWire, cuja sintaxe para inclusão é “`#include <EmonLib.h>`”, “`#include <DallasTemperature.h>`” e “`#include <OneWire.h>`”, como mostrado na figura 22.

```

#include <DallasTemperature.h> // biblioteca do sensor de temperatura
#include <OneWire.h> // permite acessar sensores/equipamentos OneWire desenvolvidos por Maxim/Dallas
#include "EmonLib.h" // Inclui Energy Monitoring Library
EnergyMonitor emon1; // Create an instance

// Define qual pino o sensor de temperatura está conectado (pino digital)
#define ONE_WIRE_BUS 7
// Inicia uma instância do OneWire para comunicar com todos equipamentos OneWire
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);

// Passa a referencia do OneWire feita anteriormente para a função da biblioteca da Dallas Temperature
DallasTemperature sensors(&oneWire);

```

Figura 22. Inclusão das bibliotecas necessárias no código

Logo abaixo da inclusão da biblioteca e antes do *Void Setup* do corpo do código, é preciso criar uma instância global para que seja possível utilizar suas funções para medição dos dados de Corrente e Tensão, e de temperatura. Em seguida, faz-se necessário definir qual pino o sensor ou sensores de temperatura encontram-se conectados.

Dentro do *voidsetup() {}*, é utilizada a função da biblioteca instanciada anteriormente, como pode ser visto na parte *emon1.current* e *emon1.voltage* para corrente e tensão (figura 23), respectivamente, aonde são identificados os pinos que estão fisicamente conectados aos seus respectivos circuitos de condicionamento de sinal. Após a identificação dos pinos, a calibração e o deslocamento de fase são inseridos na função *emon1.voltage*.

```

int LABEL = 1;
int linha = 0;
float Vrms = 0;
float Irms = 0;
float realPower =0;
float apparentPower =0;
float temperatureAmb = 0;
float temperatureCab = 0;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  emon1.voltage(0, 46, 1.3); // Voltage: input pin, calibration, phase_shift
  emon1.current(1, 4.83); // Current: input pin, calibration.
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL,Time_Tag,Vrms,Irms,Real_Power,Apparent_Power,Temperatura_Ambiente,Temperatura_Cabo,linha");
}

```

Figura 23. Inicialização das variáveis a serem utilizadas no programa e setup inicial das funções dentro do Void Setup

Algumas das variáveis criadas e das funções utilizadas no programa ilustrado na figura 23 serão explicados a seguir . A utilização do PLX DAQ é recomendada por sua simplicidade de utilização e facilidade da visualização dos dados no teste, tanto de forma gráfica quanto em tabela, sendo atualizados esses dados adquiridos em tempo real.

Sendo assim, é necessário o download apenas do Excel modificado (com macros e códigos já prontos e facilmente moldados de acordo com sua aplicação sem necessidade

conhecimento de VBA) do PLX DAQ do próprio site da ferramenta [69]. Alguns nomes específicos de variáveis precisam ser utilizadas para serem reconhecidas pelo arquivo Excel modificado da PLX DAQ. Ao abrir este excel, a primeira coisa que aparecerá, após permitir os Macros e o código de VBA de executarem ao abrir o arquivo, é a janela na figura 24 pedindo para identificar qual porta o arduino encontra-se conectado em seu computador.

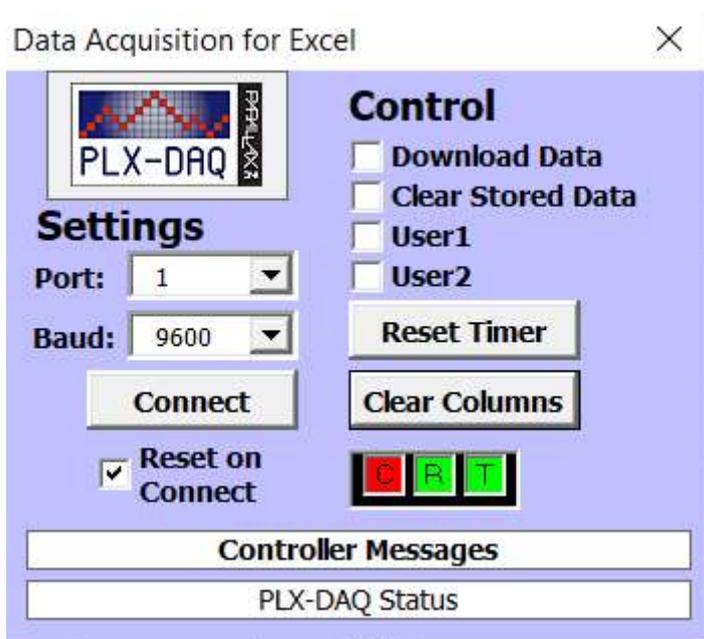


Figura 24. Interface de comunicação do Arduino com o Excel fornecida pelo PLX DAQ ao abrir o excel modificado da PLX

Para saber qual a porta e o baud rate em que o arduino encontra-se conectado em seu computador, pode-se verificar facilmente isto na IDE do arduino, software onde os códigos são feitos e upload desses códigos para o arduino, realizados.

Da figura 23, LABEL e linha são duas das variáveis reconhecidas pelo excel da PLX, aonde LABEL é o que dá nome a cada coluna, e linha indica a quantidade de linhas a serem salvas no excel até o código começar a sobrescrever os dados mais antigos. Os comandos do PLX são então realizados utilizando o “*Serial.println*”, como pode ser visto nesta figura, a indicação dos nomes de cada coluna a ser criada no excel vem logo após LABEL. O comando *ClearData* possui a única função de desocupar a comunicação serial para que a realização do envio dos dados possa ser feito sem problemas.

Antes do sistema começar a coletar as medidas, é necessário calibrar os arduínos que fazem o papel de medidores inteligentes. Este é um processo simples de regra de 3 que precisa de um multímetro à parte (servirá de referência padrão para calibragem dos valores). A regra de 3 simples para calibragem é da seguinte forma:

$$\text{Calibragem} = \frac{\text{Valor}_{\text{Medido}_{\text{Arduino}}}}{\text{Valor}_{\text{Multimetro}}}$$

Essa calibração pode ser feita a partir do próprio Serial Monitor da IDE do arduino bastando apenas, inicialmente, colocar o valor da calibragem igual à 1 e, em seguida, escrevendo `serial.println(Var)`, aonde Var é a variável utilizada para Corrente ou Tensão. Este comando irá, após upload, no arduino, e execução do programa, mostrar na janela do *Serial Monitor* da IDE os valores medidos para corrente e tensão pelo programa, no caso Valor_Medido_Arduino. Para aceder à essa janela, é preciso ir em Tools > Serial Monitor.

Após o preparo do código em `Void Setup() {}`, tudo que for colocado dentro de `Void Loop () {}` entrará em um loop de execução infinito ou até que alguma condição seja verificada para sair do loop. No caso, não será imposta nenhuma condição de saída do *loop* pois o medidor ficará executando sua função, teoricamente, em regime contínuo.

```
void loop()
{
    // get temperature readings
    sensors.requestTemperatures();
    temperatureAmb = sensors.getTempCByIndex(0);
    temperatureCab = sensors.getTempCByIndex(1);

    emon1.calcVI(20,2000);           // Calculate all. No.of half wavelengths (crossings), time-out
    //emon1.serialprint();           // Print out all variables (realpower, apparent power, Vrms, Irms, power factor)

    float Vrms = emon1.Vrms;         //extract Vrms into Variable

    //float powerFactor = emon1.powerFactor; //extract Power Factor into Variable
    float Irms = emon1.Irms;         //extract Irms into Variable
    float realPower = emon1.realPower; //extract Real Power into variable
    float apparentPower = Vrms*Irms;//emon1.apparentPower; //extract Apparent Power into variable
    linha++;
}
```

Figura 25. Parte do código dentro do Void Loop () {}, onde os sensores recebem os dados lidos

De acordo com a figura 25, pode ser visto que os dados lidos pelos sensores são recebidos pelas variáveis `temperatureAmb` e `temperatureCab`, os quais lêem os dados de temperatura de 2 sensores, um referente à temperatura ambiente, e outro referente à temperatura do cabo, aonde ambos os sensores de temperatura encontram-se conectados no mesmo pino 7 mostrado na figura 22. Os dados lidos pela função `emon1` encontram-se nas variáveis `powerFactor`, `Irms`, `realPower` e `apparentPower` as quais representam o fator de potência, corrente RMS, potência real e potência aparentemente, respectivamente. O comando `linha++` apenas adiciona mais 1 valor à variável `linha` a cada loop, indicando que no arquivo de saída do excel, para cada leitura realizada, pula-se uma linha.

```

Serial.print("DATA, TIME"); // Inicia a impressão de dados no excel
Serial.print(",");
Serial.print(Vrms);
Serial.print(",");
Serial.print(Irms);
Serial.print(",");
Serial.print(realPower);
Serial.print(",");
Serial.print(apparentPower);
Serial.print(",");
Serial.print(temperatureAmb);
Serial.print(",");
Serial.print(temperatureCab);
Serial.print(",");
Serial.println(linha);

if (linha > 50)
{
  linha = 0;
  Serial.println("ROW,SET,2"); // alimentação das linhas com os dados sempre iniciando
}

delay(1000);

```

Figura 26. Envio dos dados para o arquivo de saída captados pelo PLX DAQ

A figura 26 mostra o final do código para leitura de temperaturas, tensões, correntes e potências do sistema para poder realizar testes de medição e verificação. O PLX DAQ facilita a impressão desses dados no excel a cada loop que passa, os quais podem ser observados com facilidade e até mesmo feito estudo gráfico dos dados medidos em um computador. Alternativamente, pode-se utilizar o *Raspberry Pi* para receber os dados via conexão da rede local e utilizá-lo como webserver para exibição dos mesmos via página web local, como será mostrado na próxima seção.

Feito isso, agora pode-se utilizar alguns arduinos posicionados nas cargas e na fonte para obter os dados de corrente, tensão, potência e temperatura. Os dados de corrente, tensão e potência servirão apenas para comparação com os resultados obtidos com o método utilizando somente as temperaturas.

Por fim, pode-se prosseguir para montagem do sistema do medidor proposto com auxílio do excel utilizando os dados lidos de temperatura pelo arduído ou em algum outro arduíno posicionado na rede para realizar tal tarefa, baseando-se nas equações discutidas no capítulo 3, mais especificamente as equações (5) (para cabos isolados) e (14) (para cabos nus) para o cálculo das perdas técnicas a partir dos dados de temperatura lidos. A seção 4.7 a seguir descreve os processos necessários no caso de utilização do *Raspberry* como processador mestre ao invés do PC.

4.7. Armazenamento e Exibição Online de Dados Usando Raspberry pi

Para comunicação com a internet, será preciso adicionar as bibliotecas *Ethernet* ao código utilizando a sintaxe `#include <Ethernet.h>` e `#include <EthernetUdp.h>` adicionadas ao topo, conforme figura 27, junto das outras bibliotecas já adicionadas anteriormente. A primeira biblioteca contém funções referentes à conexão do Arduino à rede por meio do shield Ethernet que já vêm com o Arduino UNO nos materiais recomendados anteriormente, enquanto que a segunda contém funções referentes à transferência de dados via protocolo UDP (*User Datagram Protocol*), o qual é um protocolo utilizado para armazenamento dos dados salvos no cartão SD no banco de dados *MySQL*. A biblioteca *SPI.h* também deverá ser inclusa, pois a mesma é necessária à comunicação com sistemas periféricos, nesse caso, o shield Ethernet.

A configuração para conexão *Ethernet* do arduino necessita da adição de algumas linhas de código antes do `void setup () {}`, para indicar o endereço físico (MAC) e de IP do arduino, conforme imagem 28.

Para o armazenamento dos dados no arduino, algumas pequenas modificações no código precisam ser feitas. Remove-se as partes referentes ao PLX DAQ do código pois não serão utilizados nessa seção. Em seguida adiciona-se a biblioteca que permite o funcionamento do cartão de memória usando comando `#include <SdFat.h>` no topo do código mostrado anteriormente, junto das outras bibliotecas. Logo após, ainda acima do `voidsetup () {}` será preciso criar o arquivo para armazenar os dados a serem salvos. Cria-se uma instância para o cartão de memória e o arquivo para salvar os dados, conforme figura 27. O comando `chipselect` depende do arduino. No UNO, o pino é o 4 como padrão.

```
#include <DallasTemperature.h> // biblioteca do sensor de temperatura
#include <OneWire.h> // permite acessar sensores/equipamentos 1-wire desenvolvidos por Maxim/Dallas
#include "EmonLib.h" // Include Emon Library
#include <Ethernet.h>
#include <EthernetUdp.h>
#include <SPI.h>
#include <SdFat.h>

SdFat sdCard;
SdFile meuArquivo;
EnergyMonitor emon1; // Create an instance

// Pino ligado ao CS do modulo no arduino.
const int chipSelect = 4;
```

Figura 27. Adição da biblioteca para funcionamento do cartão de memória além da criação do arquivo `.txt` para salvar os dados dentro do mesmo.

```

// Enter a MAC address and IP address for your controller below.
// The IP address will be dependent on your local network:
byte mac[] = {
  0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xEF
};
//IPAddress ip(200,156,99,102);
IPAddress ip(192,168,0,116);

// Instantiates an UDP variable for ethernet communication
EthernetUDP Udp;
unsigned int localPort = 8888; // local port to listen for UDP packets

```

Figura 28. Configuração do endereço IP e MAC do arduino e configuração da comunicação UDP.

Em seguida, faz-se necessário adicionar mais um grupo novo de códigos relativo ao cartão de memória . No caso, abrir o arquivo criado anteriormente para possibilitar dados serem salvos no mesmo. Adiciona-se essa nova parte do código dentro do voidsetup () {}, conforme figura 29.

```

// Name of the .txt file recorded on the Arduino's SD card
String filename = "datalog.txt";
// Initiates the SD Card module
if(!sdcard.begin(chipselect,SPI_HALF_SPEED)) sdCard.initErrorHalt();
// Opens datalog.txt
if (!meuArquivo.open("datalog.txt", O_RDWR | O_CREAT | O_AT_END))
{
  sdCard.errorHalt("Erro na abertura do arquivo datalog.txt!")
}

```

Figura 29. Linhas de código adicionais para abertura e funcionamento do cartão de memória.

Ao final, é necessário tratar os dados para poderem ser recebidos pela próxima etapa do processo, a central de processamento, Raspberry. Por questões de facilidade, foi decidido armazenar os dados medidos em uma variável do tipo String, como pode ser visto na figura 30.

```

data_value += String(Vrms);
data_value += " ";
data_value += String(Irms);
data_value += " ";
data_value += String(realPower);
data_value += " ";
data_value += String(apparentPower);
data_value += " ";
data_value += String(temperaturaCab);
data_value += " ";
data_value += String(temperaturaAmb);
data_value += " ";

```

Figura 30. String `data_value` recebendo os valores de cada dado separados por um espaço em branco

Ao final de cada loop, os valores das potências, corrente, tensão e temperaturas são salvos em uma variável intermediária `data_value` para, no final, serem concatenadas terminando a *String* de dados salva com a seguinte ordem de dados espaçados entre si: `Vrms`, `Irms`, `realPower`, `apparentPower`, `temperaturaCab`, `temperaturaAmb`, sendo cada valor separado por um espaço em branco indicado por “ ” no código.

```

// open the file. note that only one file can be open at a time,
// so you have to close this one before opening another.
File meuArquivo = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);

// if the file is available, write to it:
if (meuArquivo) {
  meuArquivo.println(data_value);
  meuArquivo.close();
  // print to the serial port too:
  Serial.println(data_value);
}

```

Figura 31. Ao final de cada loop, o arquivo é aberto para salvar os dados lidos e fechado em seguida para iniciar o próximo loop de leituras

Os dados são então salvos no arquivo `datalog.txt` no cartão de memória de cada arduino ao final de cada loop. O armazenamento desses dados salvos nos cartões de memória de cada Arduino é feito num banco de dados *MySQL*, implementado no servidor *Apache* instalado no *Raspberry Pi*. A figura 32 revela a topologia adotada.

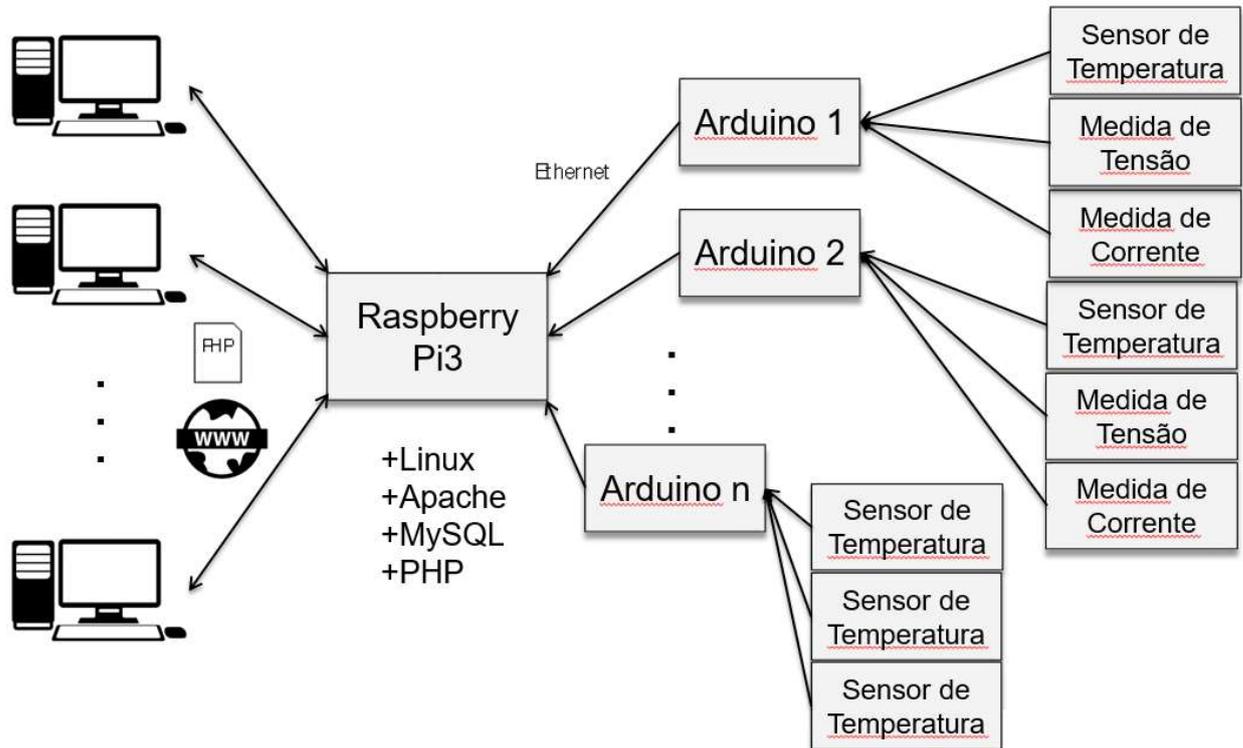


Figura 32. Topologia adotada para comunicação.

Para o *Raspberry*, faz necessária a instalação do seu sistema operacional e de softwares auxiliares para o correto funcionamento das páginas PHP e sua integração com o banco de dados *MySQL*, sendo elas: Programa operacional do *Raspberry* utilizado (por exemplo, *Raspbian+PIXEL*), Servidor *LAMP* (Linux + Apache + *MySQL* + *PHP*) e *DUC* (*Dynamic Update Client*).

O programa *DUC* é utilizado para tornar dinâmico o endereço *IP* do *Raspberry*, de maneira que o acesso ao servidor *LAMP* possa ser efetuado via rede externa. A configuração do *DUC* depende do roteador utilizado, do provedor de internet contratado (*ISP – Internet Service Provider*), do sistema operacional, do navegador e do arranjo da rede *LAN* (*Local Area Network*).

Os fluxogramas específicos das rotinas de programação implementadas no Arduíno e no Raspberry (via páginas HTML/PHP) são exibidos na figura 33 e na figura 34.

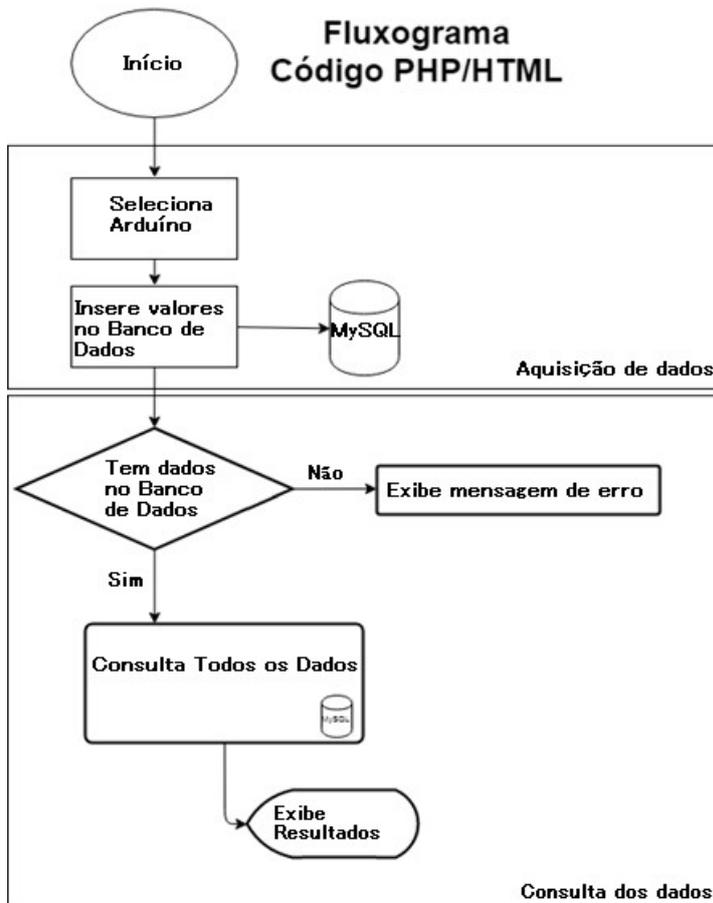


Figura 34. Fluxograma das rotinas de programação implementadas no Raspberry Pi

4.8. Rotinas de Programação Implementadas no Arduino

As rotinas de programação do Arduino foram desenvolvidas em linguagem baseada em C/C++ na IDE do mesmo e estão divididas em 4 partes: Inicialização, void setup, void loop e connectRasp.

4.8.1 Inicialização

A figura 35 exibe o código da inicialização do Arduino. A rotina é dividida nas seguintes instruções:

- Inclusão das bibliotecas instaladas (já discutidas nas seções 5.6 e 5.7);
- Definição das portas do Arduino conectadas ao pino CS (Chip Select) do cartão SD;
- Identificação do pino onde os sensores de temperatura estão conectados;
- Instanciação da função dos sensores de temperatura;
- Instanciação da função da biblioteca *Energy Monitoring*;

- Atribuição de um endereço MAC e IP ao arduino em questão. Observar que o IP deve ser um endereço possível dentro da rede e deve ser único para cada arduino utilizado;
- Definição da variável do topo EthernetUDP para envio e recebimento de dados pelo protocolo UDP;
- Definição da porta local (*Local Port*) para comunicação pelo protocolo UDP;
- Definição de nome do arquivo de extensão .txt que será armazenado no cartão SD;
- Configurações iniciais para a rotina connectRasp, abordada mais adiante na seção 4.8.4.

```

#include <DallasTemperature.h>
#include <OneWire.h>
#include <EmonLib.h>
#include <SD.h>
#include <Ethernet.h>
#include <EthernetUdp.h>
#include <SPI.h>

//SDCard Chip Select. Padrão é o pino 4 para arduino Uno
const int chipSelect = 4;
EnergyMonitor emon1;           // Create an instance

//MAC and IP address para o arduino
byte mac[] = {
  0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xEF
};
IPAddress ip(192,168,0,116);

// Instancia uma variável UDP para comunicação ethernet
EthernetUDP Udp;
unsigned int localPort = 8888; // porta local para esperar pacotes UDP

// Define qual pino o sensor de temperatura está conectado
#define ONE_WIRE_BUS 7;

DallasTemperature sensors(&oneWire);

//Nome do arquivo salvo no Cartão SD do arduino
String filename = "datalog.txt"

// Configuração inicial para função connectRasp
int position = 0;
//Tamanho máximo do pacote para comunicação = UDP_TX_PACKET_MAX_SIZE
String data_value; // string para os dados
char udpPacketBuffer[UDP_TX_PACKET_MAX_SIZE];
int packetSize; // tamanho do pacote

```

Figura 35. Inicialização do Arduino

4.8.2 Void setup

A função *setup* é executada apenas durante a inicialização do Arduino e garante que todas as portas, protocolos de comunicação, funções e definições importantes sejam corretamente atribuídas, inicializadas e estejam disponíveis na função principal (*void loop*). Como pode ser visto pela figura 36, ela se divide nas seguintes instruções:

- Configuração dos pinos do Arduino para desabilitar o cartão SD durante a inicialização da comunicação *Ethernet*;
- Configuração da comunicação serial na taxa de 9600 bps;
- Rotina de espera até que a porta serial esteja conectada;
- Inicialização da comunicação *Ethernet*;
- Inicialização da comunicação *UDP*;
- Rotina de verificação e inicialização do cartão SD;
- Remoção dos dados contidos no arquivo de extensão *.txt*;
- Calibração dos valores lidos pelos sensores de corrente e tensão.

```

void setup()
{
  // Desabilita o cartão SD durante a inicialização da comunicação ethernet
  pinMode(4, OUTPUT);
  digitalWrite(4, HIGH);
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial)
  {
    ; // espera pela conexão da portal serial.
  }
  Serial.println("Iniciando comunicação ethernet");
  Ethernet.begin(mac, ip);
  Serial.print("O IP dinâmico é: ");
  Serial.println(Ethernet.localIP());
  Udp.begin(localPort);
  Serial.println("Esperando por sincronização");
  delay(6000); // Todos usuários devem garantir que seu software nunca tente conexão mais frequen
              // que uma vez a cada 4 segundos no mínimo. Sistemas que excedam esse limite serão
              // negados conexão pelo servidor por ser considerado pelo sistema um ataque de DOS
              // Denial of Service

  // Desabilita a comunicação Ethernet durante inicialização do cartão SD
  pinMode(10, OUTPUT);
  digitalWrite(10, HIGH);
  Serial.print("Inicializando cartão SD...");
  // Configurando cartão SD. Checar se o cartão SD está presente
  if (!SD.begin(chipSelect))
  {
    Serial.println("Cartão de memória falhou ou não está inserido!");
    return; // faz nada, apenas retorna resposta
  }
  Serial.println("Cartão SD inicializado.")
  SD.remove(filename); // Deleta o arquivo salvo sob filename
  emonl.voltage(0, 46, 1.3); // Voltagem: input pin, calibração, phase shift
  emonl.current(1, 4.83); // Corrente: input pin, calibração
}

```

Figura 36. Configurações do Void setup

4.8.3 Void Loop()

A função *loop* é executada após a função *setup* e é caracterizada por estar dentro de um loop infinito, isto é, enquanto o Arduíno estiver ligado, essa função estará ativa. Ela é dividida nas seguintes instruções, de acordo com figura 37:

- Inicialização de uma variável para receber os dados das grandezas e de temperatura (data_value);
- Leitura das temperaturas;
- O formato adotado pela rotina para aquisição de dados das grandezas elétricas e temperatura corresponde a três dados separados por espaços para cada variável data_value. Isso foi necessário devido ao protocolo UDP só permitir 24 bytes serem enviados por cada pacote durante uma requisição de dados. Dessa forma, para cada

instante de tempo, o Arduíno escreve três dados lidos pelos sensores por linha no arquivo de extensão .txt;

- Abrir o arquivo de extensão .txt e habilitá-lo para escrita;
- Executar a função connectRasp dez vezes. Resumidamente, essa rotina verifica se houve alguma solicitação da página HTML/PHP e envia os dados do arquivo .txt (caso haja dados) para o *Raspberry* (via código PHP). Esse loop de dez vezes garante que o Arduíno envie dez linhas de dados do arquivo de extensão .txt para o banco de dados *MySQL*, a cada execução do void loop pois a taxa com que o Arduíno envia os dados para o *Raspberry* é maior do que a taxa com que o *Arduíno* aquisitiona dados e os escreve no cartão SD;
- Uso das variáveis startTime e endTime para promover um atraso (*delay*) tal que a aquisição de dados pelo Arduíno ocorra a cada 1 segundo.

```
void loop()
{
  String data_value = ""; // armazena os dados lidos de temperatura, corrente e tensão
  float temperaturaAmb;
  float temperaturaCab;
  sensors.requestTemperature();
  temperaturaAmb = sensors.getTempCByIndex(0);
  temperaturaCab = sensors.getTempCByIndex(1);
  // calcula corrente pelas temperaturas usando as equações do método proposto para comparar
  corrente = sqrt ((0.072*(pow (0.0590551,0.75)*(pow((temperaturaCab-temperaturaAmb),1.25)))));

  data_value += String(emonl.Irms);
  data_value += String(emonl.Vrms);
  data_value += String(corrente);
  data_value += " ";

  // Abre o arquivo se disponível, e escreve os dados data_value nele
  File dataFile = SD.open(filename, FILE_WRITE);

  // Se arquivo estiver disponível, escreva nele
  if (datafile)
  {
    dataFile.println(data_value);
    dataFile.close();
    // imprimir na porta serial da IDE tb
    Serial.println(data_value);
  }else //se o arquivo não pode ser aberto
  {
    Serial.print("Erro ao abrir");
    Serial.println(filename);
  }
  For (int i = 0; i < 10; i++)
  {
    connectRasp();
  }
  delay(2000);
}
```

Figura 37. Void loop

4.8.4 connectRasp

A função `connectRasp` é responsável pelo envio de dados do Arduíno para o *Raspberry* (via protocolo UDP), caso haja alguma solicitação por meio de uma página HTML/PHP. A figura 38 ilustra o código do `connectRasp`. A rotina é dividida nas seguintes instruções:

- Leitura do tamanho do pacote de dados via UDP;
- Caso o tamanho do pacote seja maior que zero (há informação), o arduíno lê o pacote enviado e o converte em uma variável do tipo *string* (*datReq*);
- Se *datReq* for igual a “solDados”, inicializa o pacote a ser enviado, abre o arquivo de extensão *.txt* para o modo leitura e vai até a última linha do arquivo que foi enviada via *UDP* (*position*);
- Caso o arquivo tenha sido aberto corretamente e tenha novos dados para serem enviados, o Arduíno lê a próxima linha (logo após a posição *position*), atualiza a posição da última linha (*position*), insere os dados no pacote UDP e fecha o arquivo;
- Se não houver dados disponíveis para enviar, envia *EOF* (*end of file*) pelo *buffer*;
- Fechamento do envio do pacote *UDP*;
- Preenche o *buffer* com zeros (*flush*).

```

void connectRasp (void)
{
  //Ler o tamanho do arquivo, if > 0, há requisição. If = 0, não há requisição
  packetSize = Udp.parsePacket();
  if (packetSize > 0)
  {
    Udp.read(udpPacketBuffer, UDP_TX_PACKET_MAX_SIZE);
    //converte packetBuffer em um vetor datReq tipo string
    String datReq(udpPacketBuffer);

    if (datReq == "solDados")
    {
      // remoteIP - IP remoto que está requisitando os dados
      // remotePort - Qual porta será usada para enviar os dados
      Udp.beginPacket(Udp.remoteIP(), Udp.remotePort()); // inicializa o packet pra enviar
      File dataFile = SD.open(filename, FILE_READ);
      dataFile.seek(position);
      char c = '\0';

      if (dataFile && dataFile.available())
      {
        serial.println("Arquivo aberto para leitura");
        // leia linha por linha
        for (int i=0; c!= '\n' && i < UDP_TX_PACKET_MAX_SIZE; i++)
        {
          c = dataFile.read();
          udpPacketBuffer[i] = c;
        }
        position = dataFile.position(); // atualiza posição do ultimo dado enviado
        Udp.println(udpPacketBuffer); // envia os dados
        dataFile.close(); // fecha arquivo
      }
      else if (!dataFile.available()) // se não houve dados pra enviar
      {
        Udp.println("End of File");
        Serial.println("End of File");
        dataFile.close();
      }
      else
      {
        Udp.println("Erro ao abrir arquivo!");
        Serial.print("Erro ao abrir arquivo!");
        Serial.println(filename);
        dataFile.close();
      }
      Udp.endPacket();
    }

    // preenche o buffer com zeros
    memset(udpPacketBuffer, 0, UDP_TX_PACKET_MAX_SIZE);
  }
}

```

Figura 38. Função connectRasp

4.9. Rotinas de Programação no Raspberry

As rotinas de programação do *Raspberry* (desenvolvidas nas linguagens HTML e PHP) são divididas em quatro arquivos: *aquisição.html*, *aquisição.php*, *acessa_dados.php* e *busca.php*.

O arquivo *aquisição.html* é responsável pela aquisição de dados do cartão SD dos Arduínos. A figura 39 exibe a interface desenvolvida em HTML. O botão enviar realiza a conexão com o banco de dados *MySQL*, inserindo os valores recebidos na tabela correspondente ao Arduino selecionado. A figura 40 mostra o código dessa página com destaque para as principais informações e funcionalidades.

Selecione o arduino:

Arduino 1	▼	Enviar
Arduino 1		
Arduino 2		
Arduino 3		

Figura 39. Interface em HTML para escolha de qual arduino receber os dados

```

<head>
  <title>
    SmartGrid
  </title>
</head>
<body>
  Seleccione o arduino:
  <form method="post" action="aquisicao.php">
    <select name="Arduino">
      <option value="1">Arduino 1</option>
      <option value="2">Arduino 2</option>
      <option value="3">Arduino 3</option>
    </select>
    <input type="submit" name="comando" value="Enviar" />
  </form>
</body>
<body>
  Escanear a rede:
  <form method="post" action="php_arduino.php">
    <input type="submit" name="scan_net" value = "Scan">
  </form>
</body>
</html>

```

Página na qual será passado o parâmetro informado

Lista de arduinos registrados

Botão de ação para enviar para página *aquisicao.php*

Botão de ação para aquisição dos dados de todos os Arduinos simultaneamente (trabalhos futuros)

Figura 40. Código fonte da página *aquisição.html*

O código de *aquisição.php* faz a leitura do Arduino selecionado na página de interface *aquisição.html* (armazenando a opção escolhida na variável do PHP `$_POST["comando"]`, conforme a figura 40) e insere os dados aquisitados no banco de

dados *MySQL*. A configuração de rede atual consiste em um Arduino dedicado a obter dados do alimentador, enquanto o outro Arduino recebe dados de duas cargas.

```
<?php
if($_POST["comando"])
{
    // Lista de IPs dos arduinos
    //      Alimentador      Carga 1 e 2      Não utilizado
    $ip = ["192.168.0.116", "192.168.0.119", "192.168.0.118"];
    $tables = ["arduino1", "arduino2", "arduino3"];
    $port = 8888;
}
```

Figura 41. Lista de arduínos com IPs e tabelas

Cada um dos Arduínos têm seu IP declarado na lista *\$ip*. Foi considerado IP 192.168.0.116 para os dados do alimentador (arduino 1) e os IPs 192.168.0.119 e 192.168.0.118 para duas cargas (Arduínos 2 e 3).

Quanto à estrutura da base de dados, cada tabela é listada na variável *\$tables*. Para facilidade de implementação, e também para caso seja necessário adicionar mais arduínos, foi considerado uma tabela distinta para cada Arduino, possibilitando expansão do código caso mais placas sejam utilizadas.

A figura 42 apresenta a lógica estabelecida quanto ao tratamento dos dados a serem inseridos no banco de dados *MySQL*. A figura 43 mostra a lógica das Cargas 1 e 2.

```
//ARDUINO DO ALIMENTADOR
if($_POST["Arduino"]==1) Dados referentes ao Alimentador
{
    Estabele conexão com o soquete
    socket_connect($sock, $ip[$_POST["Arduino"]-1], $port);
    Estabele conexão com o banco de dados MySQL
    $conecta = mysqli_connect("localhost", "root", "raspberry", "smartgrid") or die("Erro ao conectar!");

    echo "Conexão estabelecida<br>";
    ob_flush();
    flush();

    $comando = "solDados";
    $length = strlen($comando);

    for($i=0; $i < 60; $i++)
    {
        socket_write($sock, $comando, $length);
    }
    Requisita 60 conjuntos de informações por vez

    echo "Resposta do arduino:<br>";
    ob_flush();
    flush();

    $resposta1 = "";
    $resposta2 = "";
    $resposta3 = "";
    Variáveis auxiliares
}
```

Figura 42. Lógica do alimentador, em PHP

```

//CARGA1 E CARGA2
else if($_POST["Arduino"]==2) Dados referentes às Cargas
{
Estabele conexão com o soquete
socket_connect($sock, $ip[$_POST["Arduino"]-1], $port);

Estabele conexão com o banco de dados MySQL
$conecta = mysqli_connect("localhost", "root", "raspberr", "smartgrid") or die("Erro ao conectar!");

echo "Conexão estabelecida<br>";
ob_flush();
flush();

$comando = "solDados";
$length = strlen($comando);

Requisita 60 conjuntos de informações por vez
for($i=0; $i < 60; $i++)
{
    socket_write($sock, $comando, $length);
}

echo "Resposta do arduino:<br>";
ob_flush();
flush();

Variáveis auxiliares
$resposta1 = "";
$resposta2_1 = "";
$resposta3_1 = "";
$resposta2_2 = "";
$resposta3_2 = "";

```

Figura 43. Lógica das Cargas 1 e 2

O código do arquivo *acessa_dados.php* é responsável pela chamada de dados da base de dados de duas formas distintas. Primeira seleciona todos os dados adquiridos de um determinado Arduino, funcionalidade útil para o acompanhamento da evolução dos dados lidos de um Arduino. Segunda seleciona os dados que atendem à determinada condição, como detecção de anomalias, *outliers*, furtos, entre outros.

As figuras 44 e 45 apresentam a interface da página *acessa_dados.php* e a parte do código fonte responsável por esta interface respectivamente. Figura 45 mostra a parte do código responsável pelos filtros condicionais.

The image shows a web interface titled "SmartGrid". It features a dropdown menu with "Arduino 1" selected, a "Seleciona" button, a search filter input containing "Maior que...", and a "Buscar" button.

Figura 44. Tela de solicitação de dados dos Arduínos da Base de Dados.

```

<html>
<head>
<title>SmartGrid</title>
<meta charset="UTF-8">
<meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
<script src="https://ajax.googleapis.com/ajax/libs/jquery/2.1.3/jquery.min.js"></script>
<!-- Latest compiled and minified CSS -->
<link rel="stylesheet" href="https://maxcdn.bootstrapcdn.com/bootstrap/3.3.5/css/bootstrap.min.css" />
</head>

<body>
<div class="container">
<h1>SmartGrid</h1>
<div class="row">
<div class="col-lg-3">
<div class="input-group">
<form method="post">
<select id="arduino" name="arduino">
<option value="1">Arduino 1</option>
<option value="2">Arduino 2</option>
<option value="3">Arduino 3</option>
</select>
<button name="comando" value="comando" id="comando" type="button" onclick="exibe()">Seleciona</button>
<div class="input-group">
<input type="text" class="form-control" id="palavra" placeholder="Maior que...">
<span class="input-group-btn">
<button name="busca" class="btn btn-default" id="buscar" type="button">Buscar</button>
</span>
</div>
</form>
</div>
</div>
</div>

```

Figura 45. Código fonte da página *acessa_dados.php*, parte 1

```

<table>
<tr>
<td id="busca"></td>
</tr>
<tr>
<td id="dados"></td>
</tr>
</table>

```

Figura 46. Código fonte da página *acessa_dados.php*, parte 2

O botão seleciona, da figura 44 realiza a conexão com o banco de dados selecionando todos os valores adquiridos do Arduino selecionado. Buscar realiza a conexão com o banco de dados selecionando os valores que atendam à alguma condição particular.

A figura 45 contém dois scripts desenvolvidos em *JavaScript* referentes às funcionalidades descritas acima (botão Seleciona e botão Buscar). Por fim, o arquivo *busca.php* implementa as pesquisas realizadas no banco de dados e exibe o resultado na interface. De forma sintetizada, consiste em duas instruções *SELECT* do *MySQL*, conforme figuras 47 e 48.

```

<?php
    $stables = ["arduino1", "arduino2", "arduino3"];

    //conecta ao banco de dados
    $conecta = mysqli_connect("localhost", "root", "raspberrry", "smartgrid") or die("Erro ao conectar!");
    Consulta TODOS os dados referentes ao arduino selecionado em ordem DECRESCENTE de DATA e HORA
    $sql = "SELECT * FROM ".$stables[$_POST["arduino]]." ORDER BY Data DESC, Hora DESC";

    $resultado = mysqli_query($conecta,$sql);
    $qtd = mysqli_num_rows($resultado);
?>

```

Figura 47. Consulta de todos os valores

```

<?php

    $palavra = $_POST['palavra'];

    $stables = ["arduino1", "arduino2", "arduino3"];

    //conecta ao banco de dados
    $conecta = mysqli_connect("localhost", "root", "raspberrry", "smartgrid") or die ("Erro ao conectar!");
    Consulta TODOS os dados referentes ao arduino selecionado AONDE o VALOR DE CORRENTE é MAIOR DO QUE O INFC
    $sql = "SELECT * FROM ".$stables[$_POST["arduino]]." WHERE I > ".$palavra." ORDER BY Data DESC, Hora DESC";

    $resultado = mysqli_query($conecta,$sql);
    $qtd = mysqli_num_rows($resultado);

?>

```

Figura 48. Consulta de valores que atendam à condição especificada

Capítulo 5 – Estudo de Caso

A simulação apresentada neste capítulo consiste na aplicação da tecnologia desenvolvida neste trabalho em um sistema mais completo, conforme mostrado na figura 49, considerando a localização de dois medidores propostos deste trabalho, discutidos no capítulo anterior, nas linhas 1-6 e 1-2, respectivamente. A premissa dessa metodologia baseia-se na análise das quedas de tensão ([79]) no sistema para revelar um possível consumidor fraudulento.

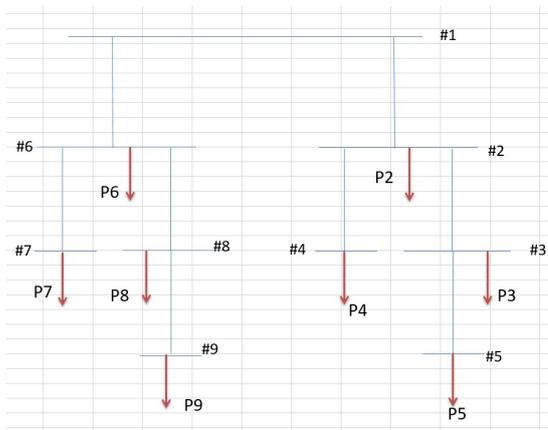


Figura 49. Rede de distribuição radial, baixa tensão, utilizada na simulação

A figura 49 mostra a rede radial utilizada na simulação para identificação do ponto de furto de energia. Estão presentes 9 barramentos, o qual barramento 1 é considerado o raiz para o método, e 8 barramentos de carga, cujos valores de fator de potência e potência aparente são obtidos a partir dos *smart meters* da própria rede.

Tabelas 9 e 10 mostram o tipo de cabo, sua impedância e comprimento, para cada linha do sistema, enquanto que tabela 11 mostra os valores das cargas (consumidores).

Tabela 9. Valores das resistências e reatâncias das linhas, e seus respectivos comprimentos.

Linha	R	X	Comprimento (m)
1-2	0,0057	0,003	30
2-3	0,0188	0,0044	40
3-5	0,0315	0,0055	50
2-4	0,0141	0,0033	30
1-6	0,0057	0,003	30
6-8	0,0188	0,0044	40
8-9	0,0315	0,0055	50
6-7	0,0188	0,0044	40

Tabela 10. Tipo de cabo (nu ou isolado) e suas seções transversais em cada vão.

Linha	Secção Transversal (mm ²)	Cabo
1-2	120	Isolado
2-3	50	Isolado
3-5	35	Nu
2-4	50	Isolado
1-6	120	Isolado
6-8	50	Isolado
8-9	35	Nu
6-7	50	Nu

Tabela 11. Dado das cargas em cada barramento

P	VA	Fp
P2	20000	0,92
P3	10000	0,85
P4	12000	0,95
P5	15000	0,80
P6	20000	0,98
P7	15000	0,92
P8	10000	0,89
P9	10000	0,94

Como mencionado ao final da seção 3.6, realiza-se o fluxo de potência em duas situações representativas do sistema de pontos de referência diferentes, uma utilizando-se dos valores obtidos dos *smart meters* da rede, resolvendo o fluxo de potência e encontrando as quedas de tensão, e o outro utilizando os dados das PTs medidas pelo medidor proposto nesta dissertação, posicionado nas linhas 1-6 e 1-2, respectivamente, para a resolução do fluxo de potência da rede radial representativa da rede de distribuição na baixa tensão.

O ponto de furto de energia, no caso da simulação, encontra-se no barramento 4. A potência conhecida da carga no barramento 4 é de 12 kVA, enquanto que a potência roubada, não vista pelo sistema, é considerada de 8 kVA, totalizando 20 kVA no barramento 4, porém somente 12 kVA são “vistos” pelos *smart meters* do sistema, então para o fluxo de potência do primeiro caso sem consideração das PTs nos cálculos, utiliza-se 12 kVA para barramento 4.

Sabendo-se que a tensão V_1 no barramento 1 é igual a 220 V, realiza-se então a inicialização pelo método *Flat Start* descrito na seção 3.6, aonde considera-se que o módulo

das tensões em todos os barramentos sejam iguais a do barramento de referência, no caso, o nó raiz (*root bus*).

Em seguida, realiza-se o *Backward Sweep*, somando as potência, partindo dos barramentos mais externos (nos extremos na rede considerada), somando as potências em direção ao barramento fonte (nó raiz), como ilustrado pelas tabela 12 e 13, utilizando as equações (21) e (22), para potências ativa e reativa, respectivamente, seguindo dois caminhos da rede radial, partindo dos barramentos extremos 9 e 5, respectivamente.

Tabela 12. Soma das potências no Backward Sweep para caminho 1 considerado para o método

Trecho	Caminho 1: Soma das Potências
8-9	$P_9^{eq} = P_9$
6-8	$P_8^{eq} = P_8 + P_9$
6-7	$P_7^{eq} = P_7$
1-6	$P_6^{eq} = P_6 + P_7 + P_8 + P_9$
8-9	$Q_9^{eq} = Q_9$
6-8	$Q_8^{eq} = Q_8 + Q_9$
6-7	$Q_7^{eq} = Q_7$
1-6	$Q_6^{eq} = Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9$

Tabela 13. Soma das potências no Backward Sweep para caminho 2 considerado para o método

Trecho	Caminho 2: Soma das Potências
3-5	$P_5^{eq} = P_5$
2-3	$P_3^{eq} = P_3 + P_5$
2-4	$P_4^{eq} = P_4$
1-2	$P_2^{eq} = P_2 + P_4 + P_3 + P_5$
3-5	$Q_5^{eq} = Q_5$
2-3	$Q_3^{eq} = Q_3 + Q_5$
2-4	$Q_4^{eq} = Q_4$
1-2	$Q_2^{eq} = Q_2 + Q_4 + Q_3 + Q_5$

Com o fluxo de potência inicial calculado no passo do *Backward Sweep*, prossegue-se para o *Forward Sweep* para determinar o valor do módulo das tensões nos barramentos usando a equação (23) mostrada na seção 3.6, aonde a ordem do cálculo das tensões segue, em ordem, do nó raiz até os nós mais extremos, atualizando as tensões em cada nó sequencialmente conforme o calculo avança, como será demonstrado a seguir, indo em sequência, utilizando o valor da tensão mais atual, o qual encontra-se no termo B da equação.

Para cada trecho, foi resolvida a equação bi-quadrática mostrada em (23), podendo começar tanto pelo trecho 1-6 ou pelo 1-2, os quais são o início de cada um dos caminhos existentes na rede da simulação. Começando pelo trecho 1-6, os termos da equação são:

Para Trecho 1-6, calculando V_6 :

$$\begin{aligned} A &= (g_{16}^2 + b_{16}^2) \\ B &= [2 \cdot (P_6^{eq} \cdot g_{16} - Q_6^{eq} \cdot b_{16}) - V_1^2 \cdot y_{16}^2] \\ C &= (P_6^{eq})^2 + (Q_6^{eq})^2 \end{aligned}$$

Para Trecho 6-7, calculando V_7 :

$$\begin{aligned} A &= (g_{67}^2 + b_{67}^2) \\ B &= [2 \cdot (P_7^{eq} \cdot g_{67} - Q_7^{eq} \cdot b_{67}) - V_6^2 \cdot y_{67}^2] \\ C &= (P_7^{eq})^2 + (Q_7^{eq})^2 \end{aligned}$$

Para Trecho 6-8, calculando V_8 :

$$\begin{aligned} A &= (g_{68}^2 + b_{68}^2) \\ B &= [2 \cdot (P_8^{eq} \cdot g_{68} - Q_8^{eq} \cdot b_{68}) - V_6^2 \cdot y_{68}^2] \\ C &= (P_8^{eq})^2 + (Q_8^{eq})^2 \end{aligned}$$

Para Trecho 8-9, calculando V_9 :

$$\begin{aligned} A &= (g_{89}^2 + b_{89}^2) \\ B &= [2 \cdot (P_9^{eq} \cdot g_{89} - Q_9^{eq} \cdot b_{89}) - V_8^2 \cdot y_{89}^2] \\ C &= (P_9^{eq})^2 + (Q_9^{eq})^2 \end{aligned}$$

Analogamente, realiza-se os mesmos passos para o cálculo das tensões V_2 , V_4 , V_3 e V_5 nos trechos 1-2, 2-4, 2-3 e 3-5, nessa ordem.

Em seguida, é verificada a convergência dos resultados utilizando a diferença entre as tensões calculadas com o valor inicial (primeira iteração) ou valor da iteração anterior até que a diferença esteja dentro do grau de convergência estipulado, utilizando a equação (24).

Por fim, calculam-se as perdas em cada trecho na rede a partir das tensões calculadas, independente se convergiu ou não o resultado. Na não convergência das tensões, retorna-se ao passo do *Backward Sweep* e o processo é repetido porém com as perdas adicionadas na soma de potências, até que ocorra a convergência dos valores.

Os passos explicados acima utilizaram os dados da rede provenientes dos *smart meters*, tendo um resultado para as tensões. Com a adição dos medidores propostos neste trabalho nas linhas 1-6 e 1-2, no passo das somas de potências, as perdas nos trechos 1-2 e 1-6 já seriam conhecidas não necessitando serem calculadas no algoritmo, e, ao final, tendo os resultados das tensões em cada barramento na rede.

Em uma situação normal, aonde não existe roubo de energia, a diferença entre as quedas de tensão de cada uma das soluções explicadas acima deve ser aproximadamente zero. Na presença de furto, haverá uma diferença nas quedas de tensão entre ambas as soluções, como pode ser visto na tabela 14:

Tabela 14. Comparação entre os resultados dos dois casos da simulação

Linha	$\Delta V_{\text{sem_medidor}}$ (volts)	$\Delta V_{\text{com_medidor}}$ (volts)	Diff
1=>6	1,12	1,12	0
6=>7	1,08	1,08	0
6=>8	1,44	1,44	0
8=>9	1,29	1,29	0
1=>2	0,97	1,14	- 0,169
2=>4	0,68	1,15	-0,462
2=>3	1,51	1,51	0
3=>5	1,55	1,55	0

O roubo de energia havia sido inserido no barramento 4 e, por consequência, apresentou-se uma diferença nas quedas de tensão no caminho que leva à este barramento, como demonstrado pela figura 50.

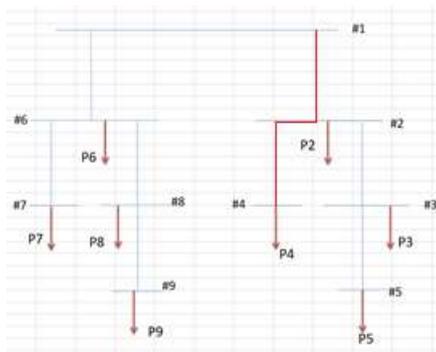


Figura 50. Linha vermelha demonstra o caminho aonde as quedas de tensão foram diferentes levando ao possível ponto de furto

Uma segunda simulação foi realizada, dessa vez com dois pontos de furto inseridos, nos barramentos 7 e 5, cujos resultados do método descrito acima encontram-se na tabela 15.

Tabela 15. Dois pontos de roubo diferentes. Um localizado no barramento 5 e outro localizado no barramento 7.

Linha	$\Delta V_{\text{sem_medidor}}$ (volts)	$\Delta V_{\text{com_medidor}}$ (volts)	Diff
1=>6	1,12	1,21	-0,10
6=>7	1,08	1,45	-0,37
6=>8	1,44	1,44	0,00
8=>9	1,29	1,29	0,00
1=>2	0,97	1,01	-0,04
2=>4	0,68	0,68	0,00
2=>3	1,51	1,69	-0,18
3=>5	1,55	1,87	-0,32

Nesse caso, foram considerados como energia roubada 3kVA para o barramento 7 (15 kVA conhecidos pela rede, 3 kVA desconhecidos), e 5 kVA para o barramento 5 (15 kVA conhecidos, 5 kVA desconhecidos). Essa ultima simulação serviu para mostrar que a técnica descrita é capaz de detectar múltiplos pontos de furto ocorrendo na rede. Como pode ser observado na tabela 15, os caminhos que levam ao furto nos barramentos 5 e 7 ficam claros, tendo como referência o nó raiz (barramento 1). Para maior clareza, a figura 51 mostra os caminhos até os furtos em vermelho.

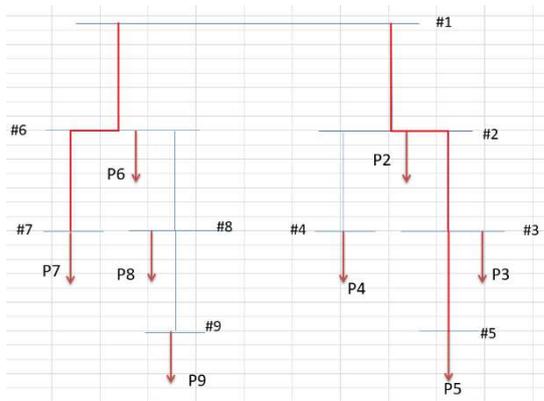


Figura 51. Dois pontos de furto, a linha vermelha mostra o caminho até eles partindo do Nó Raiz

Capítulo 6 – Resultados e Discussão

6.1. Introdução

O presente trabalho teve como objetivo propor um medidor inteligente pouco invasivo para calcular as perdas técnicas a partir de dados de temperatura dos condutores da rede de distribuição de baixa tensão. A partir desses dados estima-se as perdas não-técnicas com boa precisão apesar das simplificações realizadas.

A funcionalidade deste medidor foi estendida para localização de pontos de furto de energia utilizando-se dos dados obtidos inicialmente das perdas técnicas como dados de entrada para o cálculo do fluxo de potência realizado em seguida. Realiza-se o cálculo desse fluxo, também, utilizando somente os dados disponíveis dos medidores inteligentes pré-existentes da rede. Por fim, é feita a comparação das quedas de tensão desses dois casos onde o ponto de furto pode ser identificado a partir das diferenças dessas quedas de tensão. Neste capítulo é feita uma análise qualitativa dos resultados obtidos ao longo dessa dissertação.

6.2. Discussão dos Resultados

O medidor proposto na presente dissertação mostrou-se promissor. A simulação do capítulo 3 não só serviu para demonstrar de forma simples o funcionamento do medidor, como também serviu para dar uma idéia de como o produto final seria instalado em campo. Os resultados obtidos, apesar das simplificações realizadas quanto aos efeitos da radiação de calor e da irradiação de calor no sistema não afetaram os resultados fortemente, embora este tenha sido o resultado esperado tendo em mente as considerações realizadas anterior à simulação para demonstrar o impacto reduzido da radiação e irradiação em um dia normal.

Para segunda simulação, presente no Estudo de Caso do capítulo 5, foi considerada uma rede radial, a qual reflete melhor a situação das redes de distribuição na baixa tensão. O método utilizado foi escolhido não somente por sua simplicidade de aplicação e baixo custo de processamento devido a não possuir inversão de matrizes em seu desenvolvimento, diferente dos métodos clássicos, mas por também ser uma técnica mais compatível com o tipo de rede utilizada.

Os resultados obtidos revelam um grande potencial nessa metodologia, ao combinar as perdas técnicas obtidas pelo medidor proposto com a técnica de varredura *Backward* /

Forward Sweep utilizando a Soma de Potências para determinação do fluxo de potência do sistema de forma simples e eficiente.

Inicialmente foi realizada uma primeira simulação para verificar o comportamento do método na presença de um ponto de apenas 1 furto de energia. Uma rede normal não identifica esses consumidores possivelmente fraudulentos, então eles estão “invisíveis” do ponto de vista do próprio sistema. Ao comparar então o fluxo de potência desse sistema com o fluxo de potência utilizando dados de perdas técnicas calculadas pelos medidores inteligentes propostos nesta dissertação percebe-se que é possível revelar o local aproximado onde está ocorrendo a fraude de energia. No caso, o caminho que leva ao ponto de furto, tendo como referência o nó raiz considerado na rede, possui uma diferença distinta nas quedas de tensões resultantes quando comparadas nas situações com e sem dados fornecidos pelo medidor proposto. Os caminhos não relevantes (sem suspeita de fraude) possuem uma diferença de aproximadamente zero entre as duas situações, mostrando o potencial da metodologia apresentada.

Para testar o potencial dessa característica de revelar o local da fraude com esse método, realiza-se uma segunda simulação na mesma rede, mudando o local dos pontos de roubo de energia. Pôde ser observado que para mais de 1 ponto de furto, o caminho até cada um desses pontos (2 pontos de fraude, no caso) foi revelado, tendo ainda como referência o barramento 1 como raiz, mostrando que essa técnica possui grande potencial de aplicação para identificação e localização aproximada de múltiplos pontos de roubo na rede.

Os resultados dessas simulações mostraram-se satisfatórios, pois depende somente de sensores de temperatura, os quais são relativamente baratos quando comparados à sensores alternativos, e da estrutura existente da própria rede.

Capítulo 7 – Conclusão

7.1. Conclusões Gerais

Os resultados das simulações dos modelos baseados nas leis de Fourier e de resfriamento de Newton, para condução e a convecção de calor, respectivamente, mostraram-se precisos para transdução da temperatura em perda técnica de ambos cabos isolados e nus. Em alguns casos e horários será necessário incluir os efeitos da radiação do condutor nu sem custo adicional de hardware. Quanto a irradiação solar neste condutor, numa consulta à IEEE 738, constatou-se que seu efeito pode ser menosprezado em função do valor da radiação do condutor durante o dia.

O modelo pode ser aplicado para variações de temperatura ambiente, existentes durante o dia, para diferentes materiais tais como alumínio e ligas de cobre, nas ligas alumínio-alumínio e nas transições cobre-alumínio, para cunhas simétricas e assimétricas, de mesma bitola ou transição de bitolas diferentes, como é comum em ramais de consumidores.

Conforme mostrado na figura 14, para atender ao modelo proposto, as coletas de temperatura demandam instalação de sensores no condutor de entrada e de saída de cada cunha, para cada fase e neutro. Outro sensor é instalado na parte superior do poste, próximo ao condutor de neutro, para medições de temperatura ambiente. Pode-se acrescentar mais um sensor na superfície das cunhas, para aumentar a precisão, mas em geral, não é necessário.

O sensoriamento por temperatura é bem mais barato do que o de corrente e dos métodos de estimação de estado, pois propicia hardware mais barato, menos memória flash, e dispensa TP's e TC's que oneram bastante o custo.

Na Jiga de Teste do capítulo 4, para economia de microcontroladores, foi proposto utilizar o processo OneWire, onde a cada pino analógico podem ser ligados até 4 sensores de temperatura. O processador mestre escolhido foi o *Raspberry Pi*, embora possa ser substituído pelo *Raspberry Pi zero*, cujo preço chega a ser menos que a metade do *Raspberry Pi*, sendo melhor para aplicações embarcadas porém menos didático no caso da jiga de testes.

O medidor proposto possui grande potencial de aplicação e talvez até mesmo uma mudança de paradigma em como são feitos o cálculo das perdas técnicas na baixa tensão.

O método introduzido para encontrar o ponto de furto de energia mostrou-se preciso e de fácil aplicação, exigindo reduzido custo de processamento se comparado à métodos tradicionais por não possuir inversão de matrizes e nem equações diferenciais, o qual é utilizado na determinação do fluxo de potência dos métodos mais usuais.

Em vista desses resultados, o potencial uso desse medidor pode ajudar a possivelmente otimizar retornos financeiros para concessionárias de energia, como também possibilitar reduzir as perdas não técnicas na baixa tensão ao ser possível identificar pontos de roubo de energia sobrecarregando a rede e onerando consumidores legítimos.

7.2. Proposta para Trabalhos Futuros

Com o objetivo de estender os conceitos abordados neste trabalho, são listadas a seguir algumas propostas para trabalhos futuros:

- Realização de estudos noturnos da rede para melhor verificação do efeito da radiação de calor nos resultados durante a noite;
- Por ser uma metodologia sem igual na literatura, propõe-se realização de mais testes em campo com um protótipo do medidor proposto;
- Possível adição de identificação de consumidor por posto de transformação, isto é, o medidor poder dizer qual consumidor está conectado em qual transformador;

Capítulo 8 - Bibliografia

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, Brasil). Disponível em: http://www.aneel.gov.br/metodologia-distribuicao/-/asset_publisher/e2INtBH4EC4e/content/perdas/654800?inheritRedirect=false. Acesso em: 27/07/2019.
- [2] TASDOVEN, H; FIEDLER, B; GARAYEV, V. Improving electricity efficiency in Turkey by addressing illegal electricity consumption: A governance approach. *Energy Policy*, v. 43, p.226-234, 2012.
- [3] Notícia G1 Globo. Disponível em: <https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2019/05/20/funcionarios-de-concessionarias-de-luz-e-gas-do-rio-enfrentam-rotina-de-medo-assaltos-e-agressoes-durante-trabalho.ghtml>. Acesso em 03/08/2019.
- [4] ANEEL. Metodologia de Tratamento Regulatório para Perdas Não Técnicas de Energia Elétrica. Brasília: 2015a.
- [5] IBGE. Censo Demográfico – Aglomerados Subnormais, 2010. Rio de Janeiro, 2011.
- [6] GESEL. Proposições Regulatórias para o Tratamento de Perdas Não Técnicas: Relatório sobre Alternativas para Validação das Áreas com Severas Restrições à Operação Declaradas pela Distribuidora Light. Rio de Janeiro: 2018. 68 p.
- [7] ANEEL. Relatório – Perdas de Energia Elétrica na Distribuição. Edição 01/2019. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/654800/18766993/Relat%C3%B3rio+Perdas+de+Energia +Edi%C3%A7%C3%A3o+1-2019.pdf/b43e024e-5017-1921-0e66-024fa1bed575>. Acesso em 03/08/2019.
- [8] BEZERRA, U. H.; SOARES T. M.; NUNES, M. V. A.; TOSTES, M. E. L.; VIEIRA, J. P. A.; VIANA JR, P. R. A.; MANITO, A. R. A.; OLIVEIRA, R. C.; "Metodologia para Cálculo de Perdas Comerciais em Redes de Distribuição via Estudos de Fluxo de Carga". Publicado em Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI). Curitiba – PR, Brasil. 2016.
- [9] "Electricity Theft and Non-Technical Losses: Global Markets, Solutions and Vendors". NORTHEAST GROUP LLC, Maio de 2017. <http://www.northeast-group.com/reports/Brochure-Electricity%20Theft%20&%20Non-Technical%20Losses%20-%20Northeast%20Group.pdf>
- [10] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, Brasil). Disponível em: http://www.aneel.gov.br/metodologia-distribuicao/-/asset_publisher/e2INtBH4EC4e/content/perdas/654800?inheritRedirect=false. Acesso em 01/08/2019
- [11] Bihl, Trevor & Hajjar, Salam. (2017). "Electricity Theft Concerns within Advanced Energy Technologies", DOI: 10.1109/NAECON.2017.8268784.
- [12] Venkatachary, Sampath & Prasad, Jagdish & Ravi, Samikannu. (2017). Overview, issues and prevention of energy theft in smart grids and virtual power plants in Indian context. *Energy Policy*. 110. 365-374. 10.1016/j.enpol.2017.08.032.
- [13] Jamil, Faisal. (2018). Electricity theft among residential consumers in Rawalpindi and Islamabad. *Energy Policy*. 123. 147-154. 10.1016/j.enpol.2018.04.023.
- [14] Yurtseven, Çağlar. (2015). The causes of electricity theft: An econometric analysis of the case of Turkey. *Utilities Policy*. 37. 10.1016/j.jup.2015.06.008.

- [15] J.R. Agüero, “Improving the efficiency of power distribution systems through technical and non-technical losses reduction”, Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES, Orlando, FL, USA.
- [16] Huaizhi Liu, Yang Bai, Ming Liang, Huibin Chen, Xuwei Ren, “Research of State Monitoring and Pre-warning System of Cable Joint in Distribution power grids”, Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on Power System Technology, Chongqing, China.
- [17] D. Nikovski, Z. Wang, A. Esenther, H. Sun, K. Sugiura, T. Muso, and K. Tsuru, “Smart Meter Data Analysis for Power Theft Detection”, Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition, Lecture Notes in Computer Science Volume 7988, 2013, pp 379-389.
- [18] Messinis, Georgios & Hatziargyriou, Nikos. (2018). Review of non-technical loss detection methods. *Electric Power Systems Research*. 158. 250–266. 10.1016/j.epsr.2018.01.005.
- [19] Ahmad, Tanveer & Chen, Huanxin & Wang, Jiangyu & Guo, Yabin. (2018). Review of various modeling techniques for the detection of electricity theft in smart grid environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 82. 10.1016/j.rser.2017.10.040.
- [20] Venkatachary, Sampath & Prasad, Jagdish & Ravi, Samikannu. (2017). Overview, issues and prevention of energy theft in smart grids and virtual power plants in Indian context. *Energy Policy*. 110. 365-374. 10.1016/j.enpol.2017.08.032.
- [21] Viegas, Joaquim & R. Esteves, Paulo & Melicio, Rui & Mendes, V.M.F. & Vieira, Susana. (2017). Solutions for detection of non-technical losses in the electricity grid: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 80. 1256-1268. 10.1016/j.rser.2017.05.193.
- [22] Sahoo, S.; Censio, Boston, MA, USA; Nivoski, D.; Muso, T.; Tsuru, K., “Electricity theft detection using smart meter data”, 2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT).
- [23] T. B. Smith, “Electricity theft: A comparative analysis”. *Energy Policy*, vol.32, pp. 2067-2076, 2004.
- [24] M. I. C. Curado. “Localização de Perdas Não-Técnicas de Energia em Sistemas de Distribuição Utilizando o Método PQ”. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. 2015.
- [25] Pratap Jumale, Avinash Khaire, Harshada Jadhawar, Sneha Awathare, Manisha Mali, “Survey: Electricity Theft Detection Technique”, *International Journal of Computer Engineering and Information Technology*, VOL. 8, NO. 2, February 2016, 30-35.
- [26] Christopher, A.V., Pravin Thangaraj, “Distribution Line Monitoring System for the Detection of Power Theft using Power Line Communication”, *Energy Conversion (CENCON)*, 2014 IEEE Conference on 13-14 Oct. 2014.
- [27] Dornela Silva, Vinícius & Scarpel, Rodrigo. (2007). Detecção de fraudes na distribuição de energia elétrica utilizando support vector machine. *Investigação Operacional*. 27.
- [28] Wikimedia. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SVM_margins.png. Acesso em 01/08/2019.
- [29] A. R. Ahmad, A. M. Mohamad, “Intelligent System for Detection of Abnormalities and Probable Fraud by Metered Customers”. em 2007 CIREN 19th International Conference on Electricity Distribution, Viena, Itália, paper 0181, 2007.

- [30] J. Nagi, K. S. Yap, S. K. Tiong, S. K. Ahmed, M. Mohamad, "Nontechnical Loss Detection for Metered Customers in Power Utility Using Support Vector Machines". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 2, pp 1162-1171, abr., 2010.
- [31] C. Muniz, M. Vellasco, R. Tanscheit, K. Figueiredo, "A Neuro-fuzzy System for Fraud Detection in Electricity Distribution". IFSA-EUSFLAT 2009, pp. 1096-1101.
- [32] Apandre, wordpress. Disponível em: <https://apandre.wordpress.com/visible-data/cluster-analysis/>. Acesso em 01/08/2019.
- [33] A. H. Nizar, Z. Y. Dong, and P. Zhang, "Detection Rules for Non-Technical Losses Analysis in Power Utilities". em IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008.
- [34] E. W. S. Angelos, O. R. Saavedra, O. A. C. Cortés, A. N. Souza, "Detection and Identification of Abnormalities in Customer Consumptions in Power Distribution Systems". IEEE Transactions on Power Delivery vol.26, no.4, pp.2436-2442, Out. 2011.
- [35] J. E. Cabral, J. O. P. Pinto, E.M. Gontijo, and J. R. Filho, "Fraud Detection in Electrical Energy Consumers using Rough Sets". em Proc. 2004 IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics, Haia, Holanda, pp. 3625-3629, 2004.
- [36] J. W. Fourie and J. E. Calmeyer, "A Statistical Method to Minimize Electrical Energy Losses in a Local Electricity Distribution Network". em Proc. 2004 IEEE AFRICON Conference Africa: Technology Innovation, Gaborona, Botswana 2004.
- [37] J. R. Filho, E. M. Gontijo, A. C. Delaiba, E. Mazina, J. E. Cabral, and J. O. P. Pinto, "Fraud Identification in Electricity Company Customers using Decision Trees". em Proc. 2004 IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics, Haia, Holanda,, Vol. 4, pp. 3730-3734 2004.
- [38] A. H. Nizar, Z. Y. Dong, J. H. Zhao, and P. Zhang, "A Data Mining Based PNT Analysis Method". IEEE Power Engineering Society (PES) General Meeting, pp. 1-8, 2007.
- [39] R. Deksnys, R. Staniulis and A. Sablinskas, "Generalized Calculation Methodology of Technical Electric Power Losses in Distribution Network". em Proc. 2005 15th Power Systems Computations Conference, Liege, Bélgica, pp. 1-6, 2005.
- [40] C. A. Dortolina and R. Nadira, "The Loss That is Unknown is No Loss At All: A Top-Down/Bottom-Up Approach for Estimating Distribution Losses". IEEE Transactions Power Systems, vol. 20, no.2, pp. 1119-1125, 2005.
- [41] SCHWEPPE, F. C.; WILDES, J. "Power System Static-State Estimation Part I: Exact Model." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v.PAS-89, n.1, p120-125, 1970. ISSN: 0018-9510.
- [42] SCHWEPPE, F. C.; ROM, D. B. "Power System Static-State Estimation Part II: Approximate Model." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v.PAS-89, n.1, p125-130, 1970. ISSN: 0018-9510.
- [43] SCHWEPPE, F. C. "Power System Static-State Estimation Part III: Implementation." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v.PAS-89, n.1, p130-135, 1970. ISSN: 0018-9510.
- [44] ABUR, A.; EXPÓSITO, A. G. "Bad Data Identificatio when using Ampere Measurements". IEEE Transactionson Power Systems, v. 12, n.2, p. 831-836. Maio, 1997.

- [45] MONTICELLI, A., 1999, *State Estimation in Electric Power System. A Generalized Approach*, Kluwer Academic Publishers.
- [46] DENG Y.; HE Y.; ZHANG B. "A Branch-estimation-based State Estimation Method for Radial Distribution Systems". *Transactions on Power Systems Delivery*, Vol. 17, n. 4, Oct. 2002. ISSN: 0272-1724.
- [47] ALMEIDA, M. A. D. "Um Algoritmo para Estimação de Estado em Alimentadores de Distribuição de Energia Elétrica com Base no Método da Soma de Potências". Natal, RN, Tese de Doutorado, UFRN, 2003.
- [48] MÉFFE, A. "Cálculo de Perdas Técnicas em Sistemas de Distribuição – Modelos Adequáveis às Características do Sistema e à Disponibilidade de Informações". São Paulo, Tese de Doutorado, EPUSP, 2007.
- [49] MONTICELLI, A. "State Estimation in Electric Power Systems: A Generalized Approach". Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [50] IRVING, M. R.; OWEN, R. C.; STERLING, M. J. H. "power System State Estimation Using Linear Program". *Proc. Inst. Electr.*, v.125, p. 879-885, 1978. ISSN: 0020-3270.
- [51] MILI, L.; PHANIRAJ, V.; ROUSSEW, P. J. "Least Median of Squares Estimation in Power Systems". *IEEE Transactions on Power Systems* v.6, n.2, p.511-523, 1991. ISSN: 0885-8950.
- [52] CLEMENTS, K. A. The Impact of Pseudo-Measurements on State Estimator Accuracy. In: *IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 2011, Detroit. Proceedings...* Piscataway: IEEE, 2011. p.1-4.
- [53] SILVA, Juliano Andrade. Método para a detecção de perdas não técnicas usando lógica nebulosa como principal agente preditivo. 2013. 83 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/262042>>. Acesso em: 05/08/2019.
- [54] SARIC, A. T.; CIRIC, R.M. Integrated Fuzzy State Estimation and Load Flow Analysis in Distribution Networks. *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 18, n. 2, apr. 2003. ISSN: 0885-8977.
- [55] ZIMMERMAN, H. J. "Fuzzy Set Theory and its Application". Boston: Kluwer-Nijhoff Publishing, 3rd Edition, p. 281, 1984.
- [56] NAKA, S.; GENJI, T.; FUKUYAMA, Y. "A Hybrid Particle Swarm Optimization for Distribution State Estimation". *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 18, n. 1, 2003. INSPEC Accession Number: 7992583.
- [57] NAKA, S. et al. "Practical Distribution State Estimation Using Hybrid Particle Swarm Optimization". Columbus, Ohio: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001.
- [58] ABBASY, N. H.; EL-HASSAWY, W. "Power System State Estimation: ANN Application to bad data detection and identification". Stellenbosch: IEEE, 1996.
- [59] ANTONIO, A. B., TORREÃO, J. R. A., DO COUTTO FILHO, M. B. "Meter Placement for Power System State Estimation Using Simulated Annealing". Portugal: IEEE Proceedings of Porto Power Tech. Conference, vol. 3, 2001.

- [60] SHAFIU, A.; JENKINS, N.; STRBAC, G. "Measurement Location for State Estimation of Distribution Networks with Generation". IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, vol. 152, n. 2, 2005. ISSN: 1350-2360.
- [61] RAKPENTHAI, C.; PREMRUDEEPREECHACHARN, S.; UATRONGJIT, S.; WATSON, N. R. "Measurement Placement for Power System State Estimation using Decomposition Technique". Electric Power Systems Research, Elsevier, vol. 75, n. 1, p. 41-49, julho, 2005. INSPEC Access Number: 8332124.
- [62] R. H. S. Winterton (1999). "Newton's law of cooling", Contemporary Physics, 40:3, 205-212, DOI: 10.1080/001075199181549
- [63] P. J. Oliveira (2014) "Transmissão de Calor – Radiação", Departamento de Engenharia Eletromecânica, UBI.
- [64] Feifei Teng (2014). "Implementation of a Voltage Sweep Power Flow Method and Comparison with Other Power Flow Techniques", Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich.
- [65] J.A. Michline Rupa, S. Ganesh. "Power Flow Analysis for Radial Distribution System Using Backward/Forward Sweep Method". World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Electrical and Computer Engineering. Vol:8, No:10, 2014.
- [66] CESPEDES, R.. "New Method for the analysis of distribution networks. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 5, January 1990."
- [67] Dariush Shirmohammadi, HW Hong, A. Semlyen, G.X. Luo. "A Compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks". *Power Systems, IEEE Transactions on*, 3(2):753-762, 1988.
- [68] Kultar Deep Singh, Smarajit Ghosh. "A new efficient method for load-flow solution for radial distribution networks". *Przegląd Elektrotechniczny*, 87:66-73, 2011.
- [69] Parallax. Disponível em: <https://www.parallax.com/downloads/plx-daq>. Acesso em 01/08/2019.
- [70] Sensor de Temperatura. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/produto/sensor-de-temperatura-ds18b20-a-prova-dagua/>. Acesso 06/08/2019.
- [71] NRF24L01+PA+LNA. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-765542631-modulo-nrf24l01palna-rf-antena-transceptor-24ghz-ate-1km- JM?quantity=1>. Acesso em 06/08/2019.
- [72] Arduíno UNO. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/produto/placa-uno-r3-cabo-usb-para-arduino/>. Acesso em 06/08/2019.
- [73] Arduíno MEGA. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/produto/placa-mega-2560-r3-cabo-usb-para-arduino/>. 06/08/2019.
- [74] Transformador de Potência. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-961738319-transformador-99-200ma-9v-ac-02a-trafo-18vac- JM>. Acesso em 06/08/2019.
- [75] Transformador de Corrente. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1261078846-transformadores-de-corrente-mes40-2005- JM?quantity=1>. Acesso em 06/08/2019.
- [76] Raspberry Pi. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/produto/raspberry-pi-3-model-b/>. Acesso em 06/08/2019.

- [77] Cartão Micro SD. Disponível em: https://www.amazon.com.br/Cart%C3%A3o-Mem%C3%B3ria-SanDisk-Smartphone-SDSQUNS-016G-GN3MA/dp/B0749WVNYG?tag=goog0ef-20&smid=A20B511EFAD37R&ascsubtag=go_1676964938_67796570520_325220716474_pla-799933844116_c . Acesso em 06/08/2019.
- [78] Arduíno. Disponível em: <https://www.arduino.cc/>. Acesso em 01/08/2019.
- [79] Bula, Ines & Hoxha, Valmir & Shala, Muzafer & Hajrizi, Edmond. (2016). Minimizing non-technical losses with point-to-point measurement of voltage drop between “SMART” meters. IFAC-PapersOnLine. 49. 206-211. 10.1016/j.ifacol.2016.11.103.