

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

TRABALHO DE CONCLUSÃO FINAL DE CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE



SISTEMA NÃO-INTRUSIVO PARA ANÁLISE DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM TEMPO REAL

ALEX WIESE GOMES

CAMPO GRANDE
2019

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E
SUSTENTABILIDADE

**SISTEMA NÃO-INTRUSIVO PARA ANÁLISE DE CONSUMO DE
ENERGIA ELÉTRICA EM TEMPO REAL**

ALEX WIESE GOMES

CAMPO GRANDE
2019

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E
SUSTENTABILIDADE

ALEX WIESE GOMES

**SISTEMA NÃO-INTRUSIVO PARA ANÁLISE DE CONSUMO DE
ENERGIA ELÉTRICA EM TEMPO REAL**

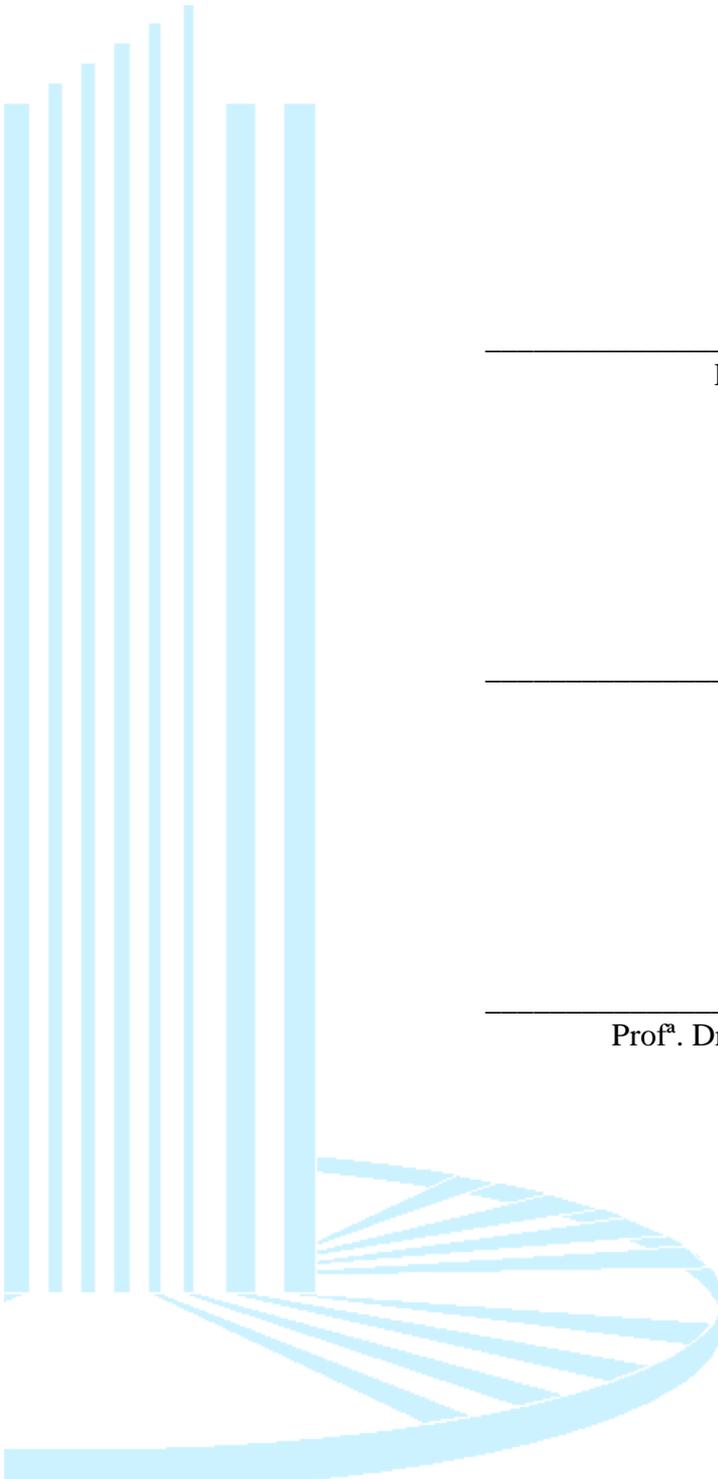
Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Eficiência Energética e Sustentabilidade, pela Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração Eficiência Energética.

Orientador: Frederico Silva Moreira

CAMPO GRANDE
2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

Redação final do Trabalho de Conclusão Final de Curso defendida por **ALEX WIESE GOMES**, aprovada pela Comissão Julgadora em 06 de Setembro de 2019, na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade.



Prof. Dr. Frederico Silva Moreira
Orientador
FAENG/UFMS

Prof. Dr. Mauro Conti Pereira
Membro Titular
IFMS/UCDB

Prof^a. Dr^a. Andréa Teresa Riccio Barbosa
Membro Titular
FAENG/UFMS

Este trabalho é dedicado à minha esposa Fabiana e ao meu filho Arthur, que estiveram ao meu lado durante toda essa caminhada, e com quem compartilhei momentos de alegria, tristeza e ansiedade e, principalmente, por toda paciência, compreensão, carinho e amor.

AGRADECIMENTOS

Esta fase da minha vida é muito especial e não posso deixar de agradecer a todos que me proveram força, ânimo e coragem para alcançar essa meta.

Agradeço especialmente ao meu orientador Frederico por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa, por toda a paciência e compreensão, e pelas valiosas contribuições durante o decorrer do processo. Reconheço o esforço em orientar um aluno com tão pouca disponibilidade. Obrigado por não desistir!

À Universidade quero deixar uma palavra de gratidão por ter me recebido de braços abertos e com todas as condições necessárias para a realização desse projeto.

Aos professores, reconheço o esforço gigante, com muita dedicação e sabedoria, provendo os recursos e ferramentas necessários para evoluir.

Não posso esquecer da minha esposa Fabiana, meu filho Arthur, mesmo que ainda muito pequeno para entender, minha família e amigos, pois eles me incentivaram e inspiraram através de gestos e palavras a superar todas as dificuldades.

A todas as pessoas que de uma alguma forma me ajudaram, eu quero deixar um agradecimento eterno, porque sem elas não teria sido possível.

É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota. (Theodore Roosevelt)

RESUMO

WIESE, Alex. Sistema Não-Intrusivo para Análise de Consumo de Energia Elétrica em Tempo Real. 2019. 94 f. Dissertação – Mestrado Profissional em Eficiência Energética e Sustentabilidade, Fundação Universidade Federal do Mato Grosso do Sul. Campo Grande, 2019.

A energia elétrica representa um dos mais relevantes insumos de produção, é essencial para a vida. Atualmente, não mais considera-se a possibilidade de viver sem as comodidades elétricas e eletrônicas que nos rodeiam. Considerando que trata-se de um recurso escasso, com custos de produção e distribuição cada vez maiores, ações de Eficiência Energética tornam-se indispensáveis. No entanto, encontram grandes barreiras na sua implementação, pois além da falta de conhecimento da maioria dos usuários, não se dispõe de meios simples e eficazes que possibilitem analisar e acompanhar o consumo do dia-a-dia. A instalação de equipamentos de gestão e análise de consumo de energia elétrica está limitada, pela complexidade ou pelo custo, às grandes empresas e indústrias, o que afasta a maioria dos consumidores dessas soluções. Aproximar os usuários de meios de gestão e acompanhamento do consumo em tempo real possibilita não apenas a economia financeira, mas também a redução dos custos de produção e distribuição, e os impactos ambientais geralmente relacionados à produção. Esse trabalho visa contribuir para atingir esse objetivo, uma vez que fornecerá aos usuários, meios de acompanhar, tempo real, o consumo de energia elétrica, fornecendo informações, alertas e detalhes sobre o consumo individualizado dos equipamentos, resultando em maior controle e hábitos mais eficientes. Nesse trabalho é proposto o desenvolvimento de um sistema, composto por *hardware* e *software*, cujo objetivo além de monitorar o consumo de energia elétrica em tempo real será também analisar e comparar as abordagens de desagregação de consumo através do método não-intrusivo (*NILM*). A partir de amostragens de tensão e corrente, obtidas diretamente de um circuito elétrico monitorado, serão calculadas as demais grandezas elétricas, entre elas tensão eficaz, corrente eficaz, potência ativa, potência reativa, fator de potência e também serão efetuados testes de amostragem com as componentes harmônicas dos sinais de tensão e corrente. Com base nos resultados apresentados, espera-se que o usuário possa, além de obter as informações detalhadas acerca de seu consumo em tempo real, ajustar hábitos que possam resultar em economia efetiva de energia elétrica. Entre as contribuições deste trabalho estão o desenvolvimento de um *hardware* que possibilite estudos de hábitos de consumo de energia elétrica e métodos de desagregação de consumo através de *NILM*, instaladas em ambientes não controlados, suportando pesquisas futuras e servindo também o propósito de produzir conjuntos de dados científicos, bem como promover o avanço do estado da arte acerca das métricas de desempenho utilizadas para avaliar algoritmos *NILM*.

Palavras-chave: Eficiência Energética, Monitoramento Não-Intrusivo, Gestão de Energia.

ABSTRACT

WIESE, Alex. Non-Intrusive System for Real Time Electricity Consumption Analysis. 2019. 94 f. Dissertação – Mestrado Profissional em Eficiência Energética e Sustentabilidade, Fundação Universidade Federal do Mato Grosso do Sul. Campo Grande, 2019.

Electricity represents one of the most relevant production source. More than that, it is essential to our current livelihood. Today, we no longer consider living without the electrical and electronic amenities around us. Considering that we are dealing with a scarce resource, with increasing production and distribution costs, Energy Efficiency actions are essential, but, nevertheless, they face great barriers in their implementation, besides the lack of knowledge of most users, they don't have a simple and effective ways to analyze and track our daily consumption. The installation of electricity consumption management and analysis equipment is limited by complexity or cost to large companies and industries, which drives most consumers away from these solutions. Bringing users closer to real-time consumption management and tracking enables not only financial savings, but also the reduction of production and distribution costs, as well as the environmental impacts generally related to production. This project aims to contribute to achieve this goal, as it will provide users with means to track real-time electricity consumption, providing information, alerts and details about individual equipment consumption, resulting in greater control and more efficient habits. Development of a system including hardware and software was proposed, whose objective, besides monitoring the electricity consumption in real time, will also be to analyze and compare the consumption disaggregation approaches through the non-intrusive method (NILM). From voltage and current samples, obtained directly from a monitored electrical circuit, the other electrical values will be calculated, including effective voltage, effective current, active power, reactive power, power factor and will also be performed sampling tests with the harmonic components of voltage and current signals. Based on the results presented, it is expected that the user can, in addition to obtaining detailed information about their energy usage in real time, adjust habits that may result in effective electricity savings. Among the expected bases are the development of a system processing hardware that can be used in electrical energy calculations and load disaggregation methods through NILM, installed in uncontrolled environments, supporting future research and also serving the purpose of producing scientific data sets as well as advancing state of the art performance metrics for NILM algorithm.

Keywords: Energy Efficiency, Non-Intrusive Monitoring, Energy Management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo total de Energia Elétrica por Setor em 2010 e 2040	1
Figura 2 – Diagrama básico de ligação de um medidor de energia	10
Figura 3 – Diagrama de blocos com filtros passa baixa e passa alta	12
Figura 4 – Ilustração da Potência Ativa (kW)	13
Figura 5 – Ilustração da Potência Reativa (kvar)	13
Figura 6 – Triângulo das Potências	14
Figura 7 – Ondas de tensão e corrente em carga resistiva (FP=1)	15
Figura 8 – Ondas de tensão e corrente em carga indutiva (FP>1)	15
Figura 9 – Ondas de tensão e corrente em carga capacitiva (FP<1)	16
Figura 10 – Medidores de energia tipo intrusivo (por equipamento)	19
Figura 11 – Demonstração da desagregação com assinatura de carga	21
Figura 12 – Exemplo de desagregação baseada em eventos (<i>event-based</i>)	22
Figura 13 – Exemplo de desagregação <i>event-less</i>	23
Figura 14 – Diagrama de blocos do medidor	42
Figura 15 – Diagrama do circuito e formas de onda da tensão	46
Figura 16 – Circuito de tensão com amplificador operacional	48
Figura 17 – Modelos de sensor de corrente <i>Shunt</i>	49
Figura 18 – Modelos de sensor de corrente CT	50
Figura 19 – Diagrama de implementação do filtro de entrada analógico	51
Figura 20 – Fluxo de conversão analógico-digital	51
Figura 21 – Visão geral do <i>ADC</i> embutido no microprocessador	52
Figura 22 – Visão geral do comparador analógico	53
Figura 23 – Comparador analógico em modo janela	54
Figura 24 – Protótipo 1: Microcontrolador ATmega328	55
Figura 25 – Protótipo 2: Microcontrolador SAM3X8E	56
Figura 26 – Diagrama de blocos do medidor proposto	57
Figura 27 – Diagrama da fonte de alimentação capacitiva	57
Figura 28 – Diagrama de funcionamento do <i>DMA</i>	58
Figura 29 – Diagrama do sistema de eventos	60
Figura 30 – Diagrama do sistema de <i>clocks</i> do microprocessador	61
Figura 31 – Diagrama do relógio de tempo real (<i>RTC</i>)	62
Figura 32 – Funcionamento da porta de entrada síncrona ou assíncrona	63
Figura 33 – Circuito de alimentação de bateria de <i>backup</i>	64
Figura 34 – Carga de teste utilizando lâmpadas halógenas	64

Figura 35 – Alicates wattímetro <i>Minipa ET-4080</i>	65
Figura 36 – Resultados obtidos nas medições de corrente	66
Figura 37 – Resultados obtidos nas medições de potência	67
Figura 38 – Diagrama de funcionamento do <i>round-robin</i>	70
Figura 39 – Fluxograma básico do <i>firmware</i>	71
Figura 40 – Fluxograma de inicialização do <i>firmware</i>	72
Figura 41 – Fluxograma principal do <i>firmware</i> (<i>loop</i> infinito)	79
Figura 42 – Fluxograma do processamento de tensão e corrente (Etapa 1)	80
Figura 43 – Fluxograma do processamento de tensão e corrente (Etapa 2)	81
Figura 44 – Tela do servidor <i>InfluxDB</i>	82
Figura 45 – Tela do aplicativo <i>Grafana</i>	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos Equipamentos por Tipo	22
Tabela 2 – Resumo dos Bancos de Dados Públicos disponíveis	34
Tabela 3 – Métricas de Performance das abordagens NILM (I)	36
Tabela 4 – Métricas de Performance das abordagens NILM (II)	37
Tabela 5 – Tensões de Fornecimento de Energia no Brasil	44
Tabela 6 – Tensão de Fornecimento por Estado	44
Tabela 7 – Resultados Obtidos nas Medições de Tensão	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico/Digital
ACEE	American Council for an Energy-Efficient Economy
AGND	Analog Ground
AMI	Advanced Metering Interface
AMPds	Almanac of Minutely Power Data Set
AMR	Advance Metering Reading
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	American National Standards Institute
AVCC	Analog Collector Voltage
AVEE	Analog Emitter Voltage
BLUED	Building-Level Fully-Labeled Dataset for Electricity Disaggregation
CA	Corrente Alternada
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CC	Corrente Contínua
CEER	Council of European Energy Regulators
CFHMM	Conditional Factorial Hidden Markov Model
CO	Combinatorial Optimization
CPU	Central Processing Unit
DAQ	Data Acquisition
DC	Direct Current
DCO	Digitally Controlled Oscillator
DEMIC	Departamento de Eletrônica e Microeletrônica

DFT	Discrete Fourier Transform
DFLL	Digital Frequency Locked Loop
DG	Distribution Grid
DGND	Digital Ground
DHMM	Diference Hidden Markov Model
DSO	Distribution System Operator
DVCC	Digita Collector Voltage
EC	European Commission
ED	Energy Disaggregation
EM	Expectation Maximization
E/S	Entrada/Saída
EUA	Estados Unidos da América
FFT	Fast Fourier Transform
FHMM	Factorial Hidden Markov Model
FHSMM	Factorial Hidden Semi-Markov Model
FN	Falso Negativo
FP	Fator de Potência
FP	Falso Positivo
FTE	Fraction of Total Energy correctly
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HMM	Hidden Markov Model
HSMM	Hidden Semi-Markov Model
I/O	Input/Output

ICT	Information and Communication Technology
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ILM	Intrusive Load Monitoring
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IOHMM	Input-Output Hidden Markov Model
ISSO	International Organization for Standardization
LAN	Local Area Network
LCD	Display de Cristal Líquido
LSB	Least Significant Bit
LTE	Long Term Evolution
MCLK	Master Clock
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NI	National Instruments
NIALM	Non-Intrusive Appliance Load Monitoring
NILM	Non-Intrusive Load Monitoring
PC	Computador Pessoal
PCB	Placa de Circuito Impresso
PCI	Peripheral Component Interconnect
PLC	Power Line Communication
PLL	Phase-Locked Loops
PGA	Programmable-Gain Amplifier
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
RAM	Random Access Memory

R&D	Research and Development
RC	Resistivo Capacitivo
REDD	The Reference Energy Disaggregation Data Set
RES	Renewable Energy Sources
RISC	Reduced Instruction Set Computing
RST	Reset
SCLK	System Clock
SG	Smart Grid
SIMO	Slave Input Master Output
SM	Smart Meter
SOMI	Slave Output Master Input
SPI	Serial Peripheral Interface Bus
SPIEN	SPI Enable
SRAM	Static Random Access Memory
SVD	Singular Value Decomposition
TC	Transformador de Corrente
TLP	Typical Load Profile
TN	Verdadeiro Negativo
TP	Verdadeiro Positivo
TSO	Transmission System Operator
UE	União Européia
UFMS	Universidade Federal do Mato Grosso do Sul
USB	Universal Serial Bus
UPS	Uninterruptible Power Supply

VA	Volt-Ampere
VDC	Direct Current Voltage
WAN	Wide Area Network

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Comprimento de onda
Ω	Ohm (Resistência)
Σ	Somatório
π	Pi
\sphericalangle	Ângulo
μ	Micro
\in	Pertence
f	Frequência de uma harmônica
i, j, n	Números inteiros
\approx	Aproximadamente

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	5
1.1.1 Objetivo Geral	5
1.1.2 Objetivos Específicos	5
1.2 JUSTIFICATIVA	6
1.3 PROBLEMA	6
2 – MONITORAMENTO DE CARGAS ELÉTRICAS	9
2.1 GRANDEZAS ELÉTRICAS	9
2.1.1 Potência Ativa e Potência Reativa	12
2.1.2 Fator de Potência	13
2.1.3 Harmônica	15
2.2 TIPOS DE MONITORAMENTO	17
2.2.1 Monitoramento por Equipamento (Intrusivo)	18
2.2.2 Monitoramento Não-Intrusivo (<i>NILM</i>)	18
2.2.2.1 Abordagens <i>Event-Based</i> e <i>Event-Less</i>	21
2.2.2.2 Identificação das Cargas	23
2.2.2.3 Treinamento e Supervisão	24
2.3 DESAGREGAÇÃO DO CONSUMO	25
2.3.1 Abordagem Baseada em Eventos (<i>Event-Based</i>)	25
2.3.1.1 Detecção de Eventos	26
2.3.1.1.1 Análise Heurística	26
2.3.1.1.2 Método da Probabilidade	26
2.3.1.1.3 Correspondência de Filtros	27
2.3.1.2 Extração de Características	27
2.3.1.3 Classificação de Eventos	28
2.3.1.4 Estimativa de Consumo	29
2.3.2 Abordagem <i>Event-Less</i>	30
2.3.2.1 <i>Motif Mining</i>	30
2.3.2.2 Separação de Fontes Cegas	30
2.3.2.3 Modelos Gráficos Probabilísticos	31
3 – AVALIAÇÃO DE PERFORMANCE	33
3.0.1 Bancos de Dados Públicos de Consumo de Energia	33

3.0.2	<i>Frameworks</i> e Kits de Ferramentas	35
3.0.2.1	Metadados <i>NILM</i>	35
3.0.2.2	<i>NILMTK (NILM Toolkit)</i>	37
3.0.2.3	<i>NILM-Eval</i>	38
3.0.3	Métricas de Performance	39
4	– DESENVOLVIMENTO DO <i>HARDWARE</i>	41
4.1	MEDIÇÃO DE TENSÃO E CORRENTE	43
4.2	CONVERSOR ANALÓGICO-DIGITAL (<i>ADC</i>)	49
4.3	COMPARADOR ANALÓGICO	53
4.4	MICROCONTROLADOR	54
4.4.1	Acesso Direto à Memória (<i>DMA</i>)	58
4.4.2	Sistema de Eventos	59
4.4.3	Relógio do Sistema e Relógio de Tempo Real	59
4.4.4	Portas de Entrada e Saída	62
4.4.5	Bateria de <i>Backup</i>	63
4.5	CALIBRAGEM E AFERIÇÃO	64
4.5.1	Medições de Corrente	65
4.5.2	Medições de Tensão	65
4.5.3	Medições de Potência	67
5	– DESENVOLVIMENTO DO <i>SOFTWARE</i>	69
5.1	ESCALONAMENTO DE PROCESSOS	69
5.1.1	Escalonamento <i>Round-Robin</i>	70
5.2	<i>FIRMWARE</i>	70
5.2.1	Amostragem	73
5.2.2	Comunicação	76
5.3	SERVIDOR	77
5.4	APLICATIVO	77
6	– IMPLANTAÇÃO E TESTES	83
6.1	INSTALAÇÃO E MANUTENÇÃO	83
6.2	CONECTIVIDADE INTERNET	84
6.3	GERENCIAMENTO DO SERVIDOR E BANCO DE DADOS	84
7	– CONCLUSÃO	85
7.1	TRABALHOS FUTUROS	87
7.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87

Referências 89

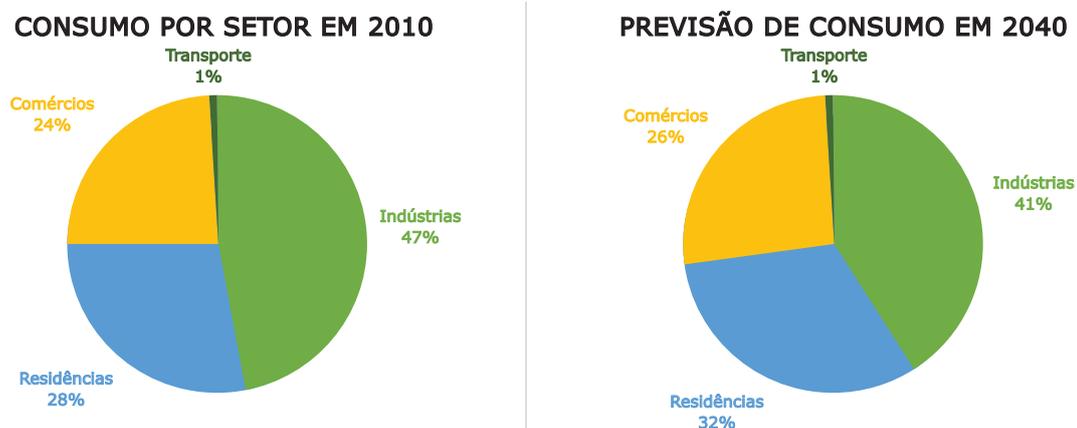
1 INTRODUÇÃO

A sociedade está vivenciando uma dependência crescente de energia elétrica, incluindo as mais diferentes atividades relacionadas à tecnologia, e nos tornando reféns de fontes desse insumo (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2008). O domínio das técnicas de transformação das fontes de energia primária (solar, eólica, hidráulica entre outros) em energia elétrica, e a constante expansão das linhas de transmissão parecem não ser suficientes para atender à demanda, que cresce em ritmo acelerado (VIEIRA; CORREA; CARMO, 2012).

O consumo de energia elétrica tem experimentado um aumento constante desde 1990, grande parte liderada pelos países do *BRICS* que dividem entre si 35% do total mundial do consumo de energia elétrica. Esses números são apenas um reflexo de como o mundo evoluiu nas últimas duas décadas, com a eletricidade emergindo como a segunda fonte mais utilizada de energia correspondendo a 17,7%, atrás apenas do petróleo com 40,8% (International Energy Agency, 2018).

Um dos principais fatores para esse crescimento na demanda de energia elétrica é a mudança nos hábitos de consumo em ambientes domésticos que, atualmente, é responsável por 28% do consumo final de eletricidade entre todos os setores (Figura 1), o que representa um aumento global de quase 40% desde 1990 (U.S. Energy Information Agency, 2017).

Figura 1 – Consumo total de Energia Elétrica por Setor em 2010 e 2040



Fonte: Autor

Um dos fatores que levaram ao crescimento do consumo de eletricidade nos últimos anos é a noção de bem-estar baseada na propriedade pessoal e no consumo em massa. Estima-se que a demanda por energia elétrica em edifícios residenciais e comerciais aumentará em uma média anual de 2,6% e 2,5%, respectivamente, até 2040, chegando a 32% e 26% do total consumo final de energia (U.S. Energy Information Agency, 2017).

Apesar de, hoje em dia, a maioria dos carros ainda serem impulsionados por combustíveis fósseis, e o gás ainda amplamente usado para cozinhar, em um futuro próximo a eletricidade deverá substituir muitos dos combustíveis fósseis (COVERT; GREENSTONE; KNITTEL, 2016).

Novas tecnologias, como a iluminação a *LED*, os condicionadores de ar os refrigeradores com motores variável e os motores mais eficientes buscam manter os hábitos dos usuários com menor consumo de energia elétrica. Entretanto, isso parece não ser suficiente, pois a cada dia tem-se mais equipamentos que necessitam de energia elétrica (FESENKO et al., 2019; KHAN; ABAS, 2011; SAIDUR et al., 2012).

Pesquisas são feitas constantemente, visando aumentar a eficiência nos processos de produção, distribuição e consumo de energia elétrica com o aperfeiçoamento na utilização das matérias-primas, buscando o uso racional e eficiente da energia.

Apesar disso, outras pesquisas sugerem um cenário em que a utilização de equipamentos com menor consumo de energia pode aumentar o problema gerando um incentivo perverso, onde o resultado seria contrário daquele originalmente pretendido, ao sugerir que quanto menor é o consumo de algo, mais ele poderá ser usado (THEIS; TOMKIN, 2015). Essa teoria é apoiada por relatórios que demonstram que a redução no preço da eletricidade em algumas regiões é uma das razões por trás do aumento do consumo de energia. Portanto, apesar das economias potenciais que podem ser alcançadas com algumas soluções tecnológicas, isso não significa necessariamente uma redução no consumo.

A literatura revela que o maior potencial de redução no consumo de energia está nos consumidores, com um uso mais eficiente e não tanto nos equipamentos em si. Muitos estudos sugerem que prover aos usuários informações em tempo real e esclarecimentos sobre o seu consumo podem levar a economias potenciais entre 5% e 10% (FISCHER, 2008; PARKER et al., 2006), especialmente nos casos em que a informação fornecida é aprimorada com dados individualizados de consumo por aparelho (ARMEL et al., 2013).

Recentemente, ações como o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), coordenado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Segurança (INMETRO), com o suporte da Lei de Eficiência Energética (Lei 10.295/2011) estabelecem metas de eficiência mínima e de consumo máximo de energia para diversos equipamentos elétricos e eletrônicos, e os classifica de acordo com o desempenho em relação ao consumo de energia, buscando orientar os usuários na compra.

A Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) é concedida aos modelos testados e aprovados, onde, em destaque, é exibida a classificação do produto quanto ao consumo de energia, além de informações técnicas de operação e desempenho, de seus dados de identificação e de seu fabricante (INMETRO, 2014).

Os equipamentos recebem uma classificação por letras, sendo os que recebem a letra A os que consomem menos energia dentro de sua categoria, e no outro extremo, os classificados com a letra E os que consomem mais energia.

Quase sempre os equipamentos com menor consumo, conseqüentemente melhor classificação, tem maior preço para os usuários, o que seria justificado por uma melhor matéria prima utilizada em sua produção, maiores investimentos em pesquisa pelo fabricante e melhor controle de qualidade em sua produção. No momento da compra, nem sempre ciente dessa situação, o usuário pode optar por adquirir equipamentos com menor preço, mesmo que não tão bem classificados. Essa economia na hora da compra fatalmente será diluída nas faturas de energia elétrica, e poderia justificar a diferença de preços na aquisição.

A Eletrobras, parceira do INMETRO no PBE, através do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), coordena a avaliação dos equipamentos quanto ao consumo de energia elétrica.

De forma a evidenciar ainda mais as avaliações obtidas no PBE, o selo PROCEL identifica aos usuários os equipamentos que tiveram melhor desempenho dentro de cada categoria. Concedido anualmente, o selo tem o objetivo de estimular as indústrias a oferecer equipamentos cada vez mais eficientes.

Pode-se observar esforços crescentes das indústrias para se adequarem à nova realidade, seja fornecendo equipamentos de melhor qualidade e desempenho, seja empregando internamente políticas que visem reduzir o consumo de energia elétrica na produção.

Destaca-se também a relevância da Lei nº 9.999/2000 que direciona 0,75% da receita operacional das concessionárias de serviços públicos de distribuição de energia para programas de pesquisa e desenvolvimento do setor elétrico, e mais 0,25% em programas de eficiência energética na oferta e no uso final (BRASIL, 2000).

Com essas ações do poder público e das indústrias, caberia aos usuários uma autoavaliação dos seus hábitos de consumo de energia, verificando a viabilidade de trocar equipamentos ou apenas adequar comportamentos, promovendo melhor utilização dos recursos.

Ocorre que, para os usuários comuns, é quase impossível alcançar uma gestão eficiente do consumo de energia elétrica, pois, a única fonte de informação de que dispõe é a fatura de energia elétrica, recebida uma vez ao mês, que traz o consumo total dos últimos 28 a 31 dias, dependendo dos meses, ciclos e datas de leitura.

A variação do consumo, mês a mês, geralmente é atribuída pelas famílias pela quantidade ou tempo de banhos quentes tomados, tempo com o ferro de passar roupas ligado, uso de micro-ondas e fornos elétricos, ou ainda lâmpadas esquecidas acesas, mas, como nada disso pode ser comprovado ou questionado, inicia-se um novo ciclo.

O hábito e o comportamento dos usuários são ponto chave para esse consumo mais consciente, não fosse essa também a maior dificuldade. Mês a mês, os mesmos hábitos são mantidos, ou, quando ajustados, dificilmente persistem até a chegada da próxima fatura, e por não oferecerem uma resposta mais rápida sobre sua eficácia, são rapidamente abandonados.

Em relação as empresas o cenário pode ser ainda pior, pois o aumento de consumo de energia elétrica pode significar mais trabalho, mais produção, mais vendas, e por isso, diluídos nos custos anulam os efeitos de qualquer economia que possa ser obtida com ajustes comportamentais.

Deve-se considerar ainda os fatores ambientais, já que a necessidade de conforto térmico leva a utilização de condicionadores de ar, que consomem uma quantidade considerável de energia elétrica durante seu funcionamento. Dessa forma, o clima pode influenciar consideravelmente no consumo de energia elétrica, facilmente mascarando ações de economia de energia.

Resolver esses problemas requerem dados e informações sobre o consumo de energia elétrica, não a cada mês, como tem-se na fatura, mas a cada instante, totalizado a cada hora, dia ou semana, para que os usuários possam ter respostas acerca da efetividade de suas ações em curtos períodos de tempo, estimulando a redução no consumo.

Além do monitoramento do consumo em tempo real, precisa-se considerar, que dentro das residências e empresas, tem-se equipamentos com os mais diferentes perfis de consumo. Tem os equipamentos que consomem muita energia, mas são utilizados em pequenos intervalos de tempo, como chuveiro elétrico ou forno de micro-ondas, por exemplo, e no outro extremo tem-se equipamentos que consomem pouca energia, mas ficam ligados o tempo todo, como sistemas de alarme e cerca elétrica. Considera-se ainda os equipamentos que possuem a função *standby*, que ficam ligados constantemente à energia esperando serem requisitados, como aparelhos de TV, por exemplo.

Nesse cenário é praticamente impossível, até para os especialistas, quiçá para os usuários leigos, saber quem são os equipamentos responsáveis pelo maior consumo, e dessa forma, qual seria a melhor estratégia para a redução do uso.

A resposta mais simples à essa dificuldade seria a medição individualizada dos equipamentos. Isso facilitaria a coleta de dados, pois receberíamos dados isolados de cada equipamento, em função das variáveis que os influenciam. Infelizmente, a dificuldade de implantação desse tipo de solução se torna inviável. Entre as dificuldades podem-se citar o local para instalação de medidores individuais, a falta de segurança, custo, e ainda as modificações necessárias na instalação elétrica.

Sob a nossa perspectiva, a identificação do consumo individual de equipamentos é possível de forma não intrusiva, utilizando conceitos da análise dos parâmetros de consumo de energia elétrica no domínio do tempo ou da frequência, estimando qual equipamento está consumindo no momento, por intermédio de modelos previamente configurados. Essa técnica é conhecida por desagregação do consumo.

Na utilização da análise do consumo através da desagregação identifica-se vantagens para os usuários, e alguns que podem ser estendidos à concessionária de energia. Para o usuário, a informação de consumo dos equipamentos individuais tem maior relevância quando comparado ao consumo total, pois isso favoreceria a utilização de forma mais consciente e eficiente. Para a concessionária, a desagregação permitiria a melhoria do gerenciamento dos sistemas de geração e distribuição, possibilitando um planejamento mais eficiente.

A extração dos parâmetros para desagregação do consumo pode ser realizada utilizando métodos intrusivos, em que há a necessidade de instalação de equipamentos adicionais entre a rede elétrica e a carga a ser monitorada, ou não intrusivos, em que medidores especiais são instalados junto ao quadro de distribuição, permitindo adquirir os parâmetros envolvidos no processo de desagregação, que, em geral, são tensão e corrente.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema para monitorar e analisar em tempo real o consumo individualizado de equipamentos elétricos em instalações residenciais, comerciais ou industriais, permitindo que o consumidor acompanhe a qualquer tempo o consumo de energia elétrica de sua unidade consumidora, permitindo ações que visem a economia imediata de energia elétrica.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar as soluções de *hardware* disponíveis, analisando custo/benefício e atendimento às necessidades do equipamento, desenvolvendo o *hardware* proposto.
- Identificar as plataformas de *software* compatíveis com o *hardware* desenvolvido, em função dos requisitos desejáveis, desenvolvendo o *software* proposto.
- Construir o protótipo do equipamento, efetuando os testes e validações necessárias, que comprovem as funcionalidades propostas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Para as empresas, a energia elétrica representa um relevante insumo de produção, para as residências, tem um impacto muitas vezes significativo no orçamento doméstico, porém, inexistente um método acessível que permita o monitoramento (e conseqüentemente o controle) do consumo de energia elétrica em tempo real por pequenos e médios consumidores, que é o caso de pequenas e médias empresas ou mesmo residências.

Os equipamentos e sistemas de monitoramento atualmente disponíveis no mercado são voltados às grandes empresas e indústrias de grande porte, ou edifícios, possuem custo elevado e sua implantação é complexa, tornando-os inacessíveis às empresas de menor porte e residências.

A conseqüência é que a grande maioria, dos consumidores de energia elétrica desses setores só tomam ciência do quanto foi consumido quando recebem a fatura de energia elétrica, e desse montante consumido, expresso pela concessionária, não tem meios para analisar, com nível razoável de confiabilidade, os equipamentos, os circuitos ou os períodos responsáveis por cada consumo.

Essa dificuldade distancia os consumidores desses setores de práticas de redução de consumo de energia, limitando-os a, no extremo, praticarem políticas baseadas em limitação de uso de aparelhos de ar-condicionado, ou até redução do nível de iluminação, medidas que na maioria das vezes se mostram, na prática, pouco eficazes, e conseqüentemente logo abandonadas.

1.3 PROBLEMA

A apesar das recentes evoluções nas pesquisas relacionadas ao tema proposto, ainda existem algumas áreas pouco exploradas. Isto é evidenciado quando se busca por questões práticas para implantação de sistemas ou a realização de avaliações e *benchmarks* dos algoritmos propostos, que são os principais tópicos desse trabalho. O foco está direcionado ao estudo das questões práticas da implantação de sistemas de monitoramento nos ambientes residenciais e de pequenas empresas. Questões práticas incluirão, por exemplo, a facilidade de instalação e uso do equipamento de monitoramento, que em última análise, determinarão como tais sistemas serão recebidos e adotados pelos usuários finais.

Analísaram-se, ainda, os desafios na definição de um conjunto consistente de métricas de desempenho para o problema de desagregação de energia. De forma mais concreta, estudou-se a compatibilidade das métricas de desempenho existentes com a estrutura dos dados gerados pelos diferentes algoritmos, que poderão, ao final, mudar a forma como as diferentes métricas são usadas para tirar conclusões sobre o desempenho desses algoritmos.

Foi desenvolvido um sistema que possibilite o monitoramento do consumo de energia elétrica utilizando técnicas não intrusivas, com ferramentas que permitem a identificação de cargas relevantes de forma individualizada, fornecendo aos usuários subsídios suficientes para a modificação de hábitos e comportamentos que conduzem à redução no consumo de energia elétrica.

O sistema apresentado é baseado na medição dos parâmetros necessários de forma não-intrusiva, através de sensores de tensão e corrente instalados junto ao medidor de energia elétrica ou quadro de distribuição, de forma a obter os valores de tensão e corrente, potência aparente, corrente eficaz, tensão eficaz e fator de potência.

2 MONITORAMENTO DE CARGAS ELÉTRICAS

Para que os usuários sejam capazes de identificar e ajustar seus hábitos e comportamentos de consumo de energia elétrica, é necessário dispor de meios que forneçam informações, com o maior nível de detalhamento possível, a respeito do consumo de energia de sua unidade consumidora.

Quanto mais detalhadas forem as informações disponíveis, e quanto mais rápido elas forem disponibilizadas aos usuários, maior será a eficácia do método, e conseqüentemente maior será a redução no consumo.

Em resumo, necessita-se de um sistema computacional, conectado à medidores inteligentes de energia elétrica, responsáveis por fornecer informações em tempo real.

A maior parte dos medidores inteligentes são, basicamente, medidores de potência e de outras grandezas elétricas, que armazenam essas informações em memória em função do tempo.

Neste capítulo será apresentado como funcionam e como são implementadas as técnicas nos medidores inteligentes de energia elétrica.

2.1 GRANDEZAS ELÉTRICAS

De forma simples, todo medidor inteligente é, na verdade, um medidor de potência e outras grandezas elétricas, capaz de armazenar essas informações em função do tempo.

A Potência é definida pela quantidade de energia produzida, transferida ou transformada em um intervalo de tempo. Matematicamente, pode-se expressar a Potência Aparente (S) como a soma em fase de duas potências: a Potência Ativa (P) e a Potência Reativa (Q), como demonstrado na Equação (1).

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (1)$$

A Potência Ativa, medida em watts (W) é a componente da potência elétrica responsável por realizar trabalho. É esta a componente que é acumulada no tempo pelos medidores de energia para ser tarifada. Conseqüentemente, é a principal grandeza elétrica monitorada pelos medidores inteligentes.

A Potência Reativa, medida em *Volt-ampère* reativo (Var), é componente da potência armazenada (ou devolvida) e não consumida pela carga elétrica.

A potência é geralmente obtida de forma indireta, através da medição da tensão e da corrente do circuito elétrico. Em circuitos de Corrente Alternada (CA), a Potência Aparente Instantânea (S_i) é calculada multiplicando os valores instantâneos de tensão (V_i) e corrente (I_i), como demonstrado na Equação (2).

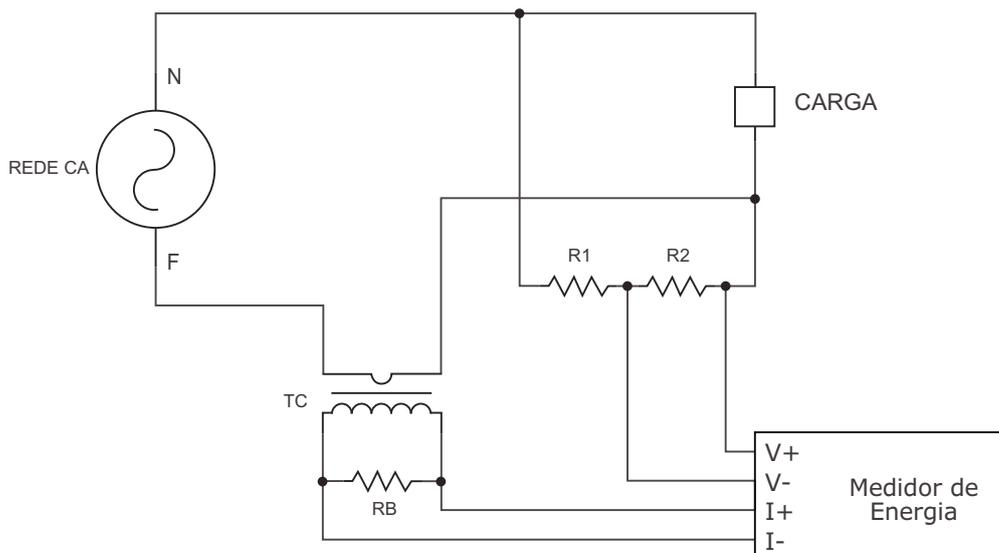
$$S_i = V_i \times I_i \quad (2)$$

Os medidores inteligentes mais comuns usam circuitos integrados medidores de energia, nos quais os sinais de tensão e corrente são lidos em função do tempo por um conversor analógico digital (ADC).

Nesses medidores, a tensão é geralmente obtida utilizando um divisor de tensão resistivo ligado diretamente à rede CA, enquanto a corrente pode ser adquirida através da medição da queda de tensão através de um resistor *shunt* ou através de um Transformador de Corrente (TC).

O diagrama elétrico básico da ligação de um CI medidor de energia à rede elétrica é mostrado na Figura 2. Um transformador de corrente é usado para converter a medida de corrente elétrica em um valor de tensão proporcional a corrente elétrica medida, necessário para fornecer uma grandeza elétrica compatível com a faixa do conversor, enquanto um divisor resistivo é usado para atenuar a tensão da rede para alimentar a leitura de tensão do ADC.

Figura 2 – Diagrama básico de ligação de um medidor de energia



Fonte: Autor

A resolução de um conversor analógico digital resulta diretamente do número de *bits* que o conversor utiliza e permite perceber qual é o valor mínimo que o conversor pode representar (CONNELLY, 2008). Por exemplo um conversor de 10 *bits* permite obter $2^{10} = 1024$ valores de saída distintos o que resulta numa resolução de aproximadamente 0,1%.

Com o objetivo de alcançar uma precisão mais elevada nas leituras obtidas, os medidores de energia elétrica mais avançados realizam Processamento de Sinal Digital (*DSP*), dessa forma obtendo maior estabilidade e precisão ao longo do tempo, mesmo em condições ambientais severas. Seu funcionamento está baseado na alta precisão de conversores analógico digital com resoluções entre 12 - 16 *bits* e Processamento de Sinal Integrado em nível de *hardware*.

Para atingir essa alta resolução e reduzir o ruído, esses *ADCs* convertem os sinais de corrente e tensão usando a técnica de *oversampling*. Através dessa técnica os sinais são lidos a uma frequência muitas vezes maior do que a necessária, e é calculado o valor médio do sinal obtido, reduzindo dessa forma o ruído. Com o ruído espalhado sobre uma largura de banda mais larga, o ruído resultante na faixa da banda de interesse é reduzido.

Para o projeto, empregaremos uma técnica semelhante, no entanto a realização do processamento dos sinais será executada em nível de *software*. Isto pode ser feito usando microcontroladores, normalmente com multiplicador e ADC integrados.

Artigos foram publicados apresentando propostas de sistemas que permitem o monitoramento de várias cargas elétricas em um mesmo circuito (HUANG et al., 2011; PATEL et al., 2007) e outros apresentando algoritmos para reconhecimento de padrões para identificação de cargas (BARANSKI; VOSS, 2004b; BOUHOURLAS et al., 2012; MARCEAU; ZMEUREANU, 2000; RAHIMI; CHAN; GOUBRAN, 2011; SRINIVASAN; NG; LIEW, 2006).

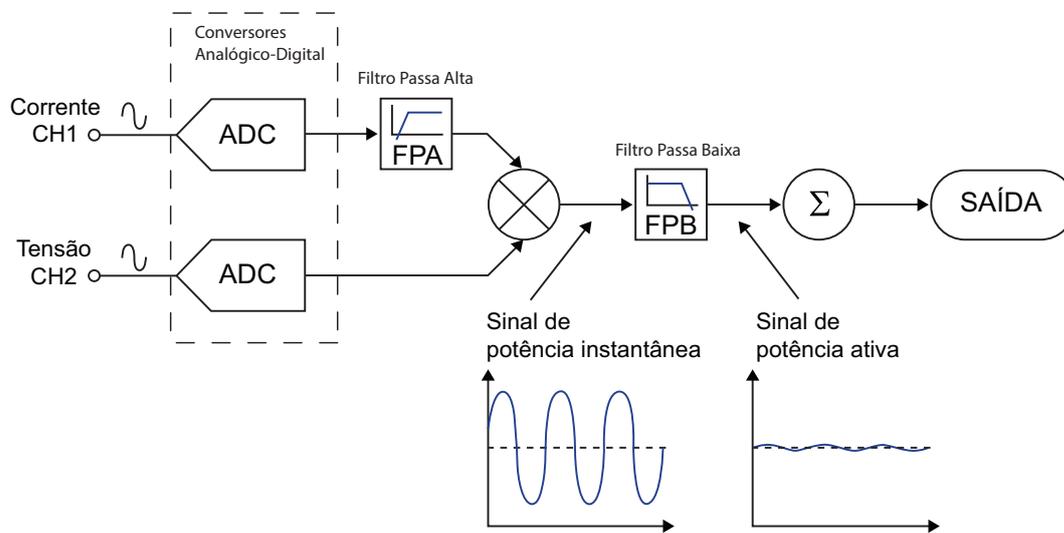
Embora as opiniões destes autores não sejam unânimes quanto à escolha das grandezas elétricas mais adequadas para identificação de cargas elétricas monitoradas em um mesmo circuito, praticamente todos os autores usam a potência ativa e a corrente. Alguns utilizam potência reativa (CHANG et al., 2012; HUANG et al., 2011; LIANG et al., 2009; RAHIMI; CHAN; GOUBRAN, 2011; SRINIVASAN; NG; LIEW, 2006), outros usam as componentes harmônicas da corrente (BOUHOURLAS et al., 2012; CLARKE; STOCKTON, 1982; COLE; ALBICKI, 2002; HUANG et al., 2011; LEE et al., 2005; LIANG et al., 2009; PATEL et al., 2007; SHAW; LAUGHMAN, 2007; SRINIVASAN; NG; LIEW, 2006) e outro usa ainda o fator de potência (MORO et al., 2013).

Alguns circuitos medidores de energia elétrica utilizam um filtro passa-alta, ou seja, um filtro que permite a passagem das frequências altas com facilidade, porém atenua ou reduz a amplitude das frequências abaixo da frequência de corte, após a amostragem do sinal de corrente para remover quaisquer componentes desnecessários deste sinal, reduzindo imprecisões no cálculo da potência ativa, que podem aparecer devido a deslocamentos nos

sinais de tensão ou de corrente. O cálculo da potência ativa é derivado a partir do sinal de potência, gerado através da multiplicação dos sinais de corrente e tensão obtidos. Para extrair a componente de potência ativa, o sinal de potência instantânea é filtrado por um filtro passa-baixa.

Na Figura 3 apresenta-se um diagrama de blocos mostrando como a informação da potência ativa é extraída ao filtrar o sinal de potência instantânea por um filtro passa-baixa. Dessa forma é possível calcular a potência ativa de cargas alimentadas por tensão e corrente senoidais, independentemente do fator de potência.

Figura 3 – Diagrama de blocos com filtros passa baixa e passa alta



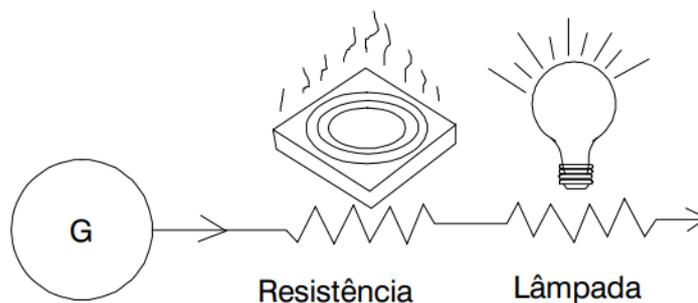
Fonte: Autor (Adaptado de Duarte, 2015)

2.1.1 Potência Ativa e Potência Reativa

A maior parte das cargas presentes nas unidades consumidoras consome energia reativa indutiva, como por exemplo motores, transformadores, reatores para lâmpadas, fornos de indução, entre outros. As cargas indutivas funcionam através do campo eletromagnético, que é requerido para seu funcionamento e, por isso, sua operação requer dois tipos de potência: ativa e reativa.

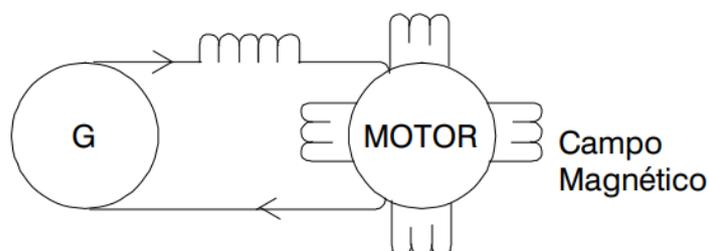
1. Potência Ativa: É a potência que efetivamente realiza trabalho (calor, luz, movimento) e é medida em kW. A Figura 4 ilustra esta definição.
2. Potência Reativa: É a potência usada apenas para criar e manter campos eletromagnéticos que serão utilizados pelas cargas indutivas, e é medida em kvar. A Figura 5 ilustra esta definição.

Figura 4 – Ilustração da Potência Ativa (kW)



Fonte: Autor (Adaptado de Vieira, 1977)

Figura 5 – Ilustração da Potência Reativa (kvar)



Fonte: Autor (Adaptado de Vieira, 1977)

Enquanto a potência ativa é sempre consumida na execução de trabalho, a potência reativa, além de não produzir trabalho, circula entre a carga e a fonte de alimentação, ocupando um espaço no sistema elétrico que poderia ser utilizado para fornecer mais energia ativa.

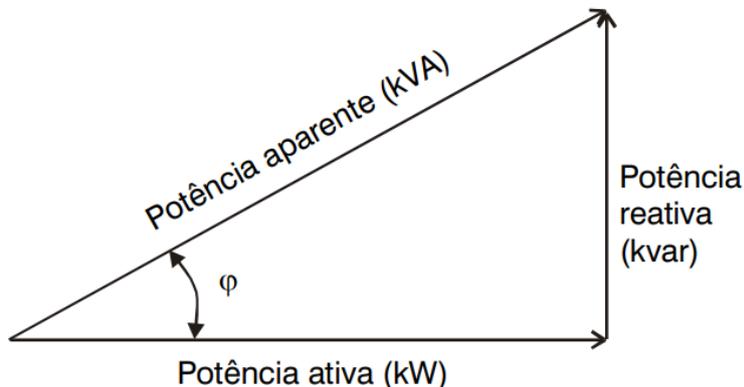
2.1.2 Fator de Potência

Por definição, o fator de potência é a razão entre a potência ativa e a potência aparente. Ele indica a eficiência do uso da energia. Um alto fator de potência indica uma eficiência alta e inversamente, um fator de potência baixo indica baixa eficiência energética. Um triângulo retângulo é frequentemente utilizado para representar as relações entre kW, kvar e kVA, conforme vemos na Figura 6.

O fator de potência é determinado pelo tipo de carga ligada no sistema elétrico, que pode ser:

- Resistiva
- Indutiva

Figura 6 – Triângulo das Potências



Fonte: Autor (Adaptado de Vieira, 1977)

- Capacitiva

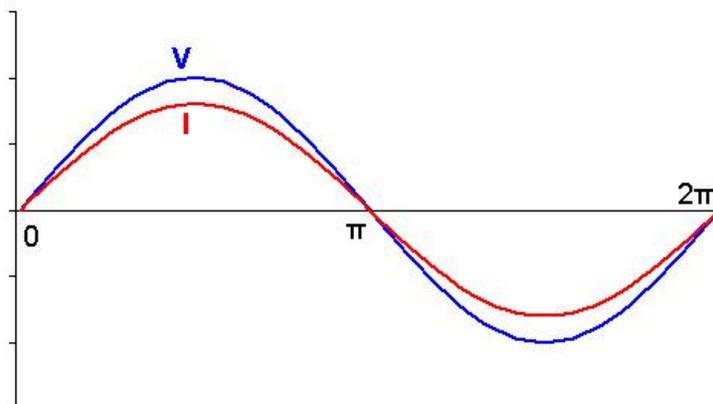
Quando uma carga puramente resistiva é conectada à energia elétrica, a tensão e a corrente mudarão de polaridade em fase, e nesse caso o fator de potência é unitário (1), com a energia elétrica fluindo na mesma direção pelo sistema elétrico em cada ciclo. Cargas indutivas como motores e transformadores (equipamentos com enrolamento) produzem potência reativa com a corrente atrasada em relação à tensão. Cargas capacitivas, como bancos de capacitores ou cabos elétricos enterrados, produzem energia reativa com corrente adiantada em relação à tensão. Já os motores síncronos podem ter sua potência reativa tanto atrasada quanto adiantada simplesmente mudando a corrente de campo. Ambos os tipos de carga absorverão energia por parte do ciclo de corrente alternada, apenas para retornar essa energia à fonte pelo restante do ciclo.

Na Figura 7, verifica-se as ondas de tensão (V) e corrente (I) em fase, ou seja, a carga possui característica resistiva e verifica-se uma onda senoidal perfeita, o fator de potência é unitário (1) e o Ângulo de fase ϕ é igual a 0° .

Na Figura 8, verifica-se a onda corrente (I) atrasada em relação à onda de tensão (V), ou seja, a carga possui característica indutiva, o fator de potência é menor que 1 e o ângulo de fase ϕ é maior que 0° .

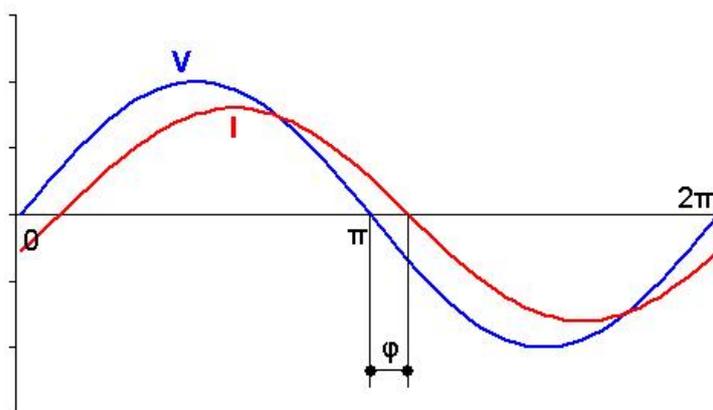
Na Figura 9, verifica-se a onda corrente (I) adiantada em relação à onda de tensão (V), ou seja, a carga possui característica capacitiva, o fator de potência é maior que 1 e o ângulo de fase ϕ é maior que 0° .

Figura 7 – Ondas de tensão e corrente em carga resistiva (FP=1)



Fonte: Autor (Adaptado de Vieira, 1977)

Figura 8 – Ondas de tensão e corrente em carga indutiva (FP>1)



Fonte: Autor (Adaptado de Vieira, 1977)

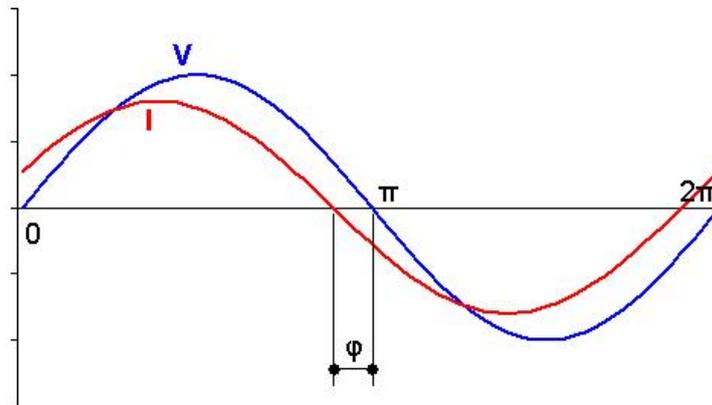
2.1.3 Harmônica

As harmônicas se originam principalmente nas utilização de cargas não-lineares cuja forma de onda da corrente não acompanha a forma de onda senoidal da tensão de alimentação. Nos transformadores, as harmônicas são consequência da relação não linear entre o fluxo de magnetização e a corrente de excitação correspondente.

Atualmente as cargas não lineares são classificadas em três categorias de acordo com a natureza da deformação:

- Categoria 1: Equipamentos com característica operativa de arcos voltaicos, tais como: fornos a arco, máquinas de solda, lâmpada de descarga e outros. A natureza da deformação da corrente é devido à não linearidade do arco voltaico;

Figura 9 – Ondas de tensão e corrente em carga capacitiva ($FP < 1$)



Fonte: Autor (Adaptado de Vieira, 1977)

- Categoria 2: Equipamentos de núcleo magnético saturado, como reatores e transformadores de núcleo saturado. A natureza da deformação da corrente é devido à não linearidade do circuito magnético;
- Categoria 3: Equipamentos eletrônicos, tais como: inversores, retificadores, *nobreaks*, televisores, micro-ondas, computadores entre outros. A natureza da deformação da corrente é devido à não linearidade dos componentes eletrônicos.

As cargas não lineares são aquelas que distorcem a forma de onda da corrente e/ou da tensão, como por exemplo: conversores e inversores de frequência, acionamentos de corrente contínua, retificadores, fornos a arco e indução, transformadores com o núcleo saturado, *nobreaks* (UPS), controladores tiristorizados, fontes chaveadas, máquinas de solda elétrica, lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos, microcomputadores.

Altos níveis de distorção harmônica numa instalação elétrica podem causar problemas para as redes de distribuição das concessionárias e para a própria instalação, assim como para os equipamentos instalados.

O aumento de tensão na rede causado pela distorção harmônica acelera a fadiga dos motores e as isolações de fios e cabos, o que pode ocasionar queimas, falhas e desligamentos. Adicionalmente, as harmônicas aumentam a corrente RMS (devido a ressonância série), causando elevação nas temperaturas de operação de diversos equipamentos e diminuição de sua vida útil.

Essas ondas de frequência superior à fundamental, causam vários danos ao sistema, entre os quais podemos destacar:

- Aumento das perdas nos estatores e rotores de máquinas rotativas, causando superaquecimento danoso às máquinas;

- O fluxo de harmônicas nos elementos de ligação de uma rede leva a perdas adicionais causadas pelo aumento do valor RMS da corrente, além do surgimento de quedas de tensão harmônicas nas várias impedâncias do circuito. No caso dos cabos há um aumento de fadiga dos dielétricos, diminuindo sua vida útil e aumentando os custos de manutenção. O aumento das perdas e o desgaste precoce das isolações também podem afetar os transformadores do sistema elétrico;
- Distorção das características de atuação de relés de proteção;
- Aumento do erro em instrumentos de medição de energia, que estão calibrados para medir ondas senoidais puras;
- Interferência em equipamentos de comunicação, aquecimento em reatores de lâmpadas fluorescentes, interferência na operação de computadores e em equipamentos para variação de velocidade de motores, etc.;
- Aparecimento de ressonâncias entre capacitores para correção de fator de potência e o restante do sistema, causando sobretensões e sobrecorrentes que podem causar sérios danos ao sistema.

Quando há distorção harmônica na instalação elétrica o triângulo de potências sofre uma alteração, recebendo uma terceira dimensão provocada pela potência aparente necessária para sustentar a distorção da frequência fundamental da rede elétrica (60Hz).

O Fator de Potência Real leva em consideração a defasagem entre a corrente e a tensão, os ângulos de defasagem de cada harmônica e a Potência Reativa para produzi-las. Seu valor é sempre menor que o fator de potência de deslocamento sendo que a correção deverá ser feita pelo fator de potência real.

Os instrumentos convencionais são projetados para medir formas de onda senoidal pura, ou seja, sem nenhuma distorção. Porém, devemos admitir que, atualmente, são poucas as instalações que não têm distorção significativa na onda senoidal de 60 Hz. Nestes casos os instrumentos de medidas devem indicar o valor RMS verdadeiro (*TRUE RMS*), geralmente identificado no próprio instrumento.

2.2 TIPOS DE MONITORAMENTO

Os métodos de monitoramento de consumo de energia podem ser divididos em dois grandes grupos principais: monitoramento de cargas por equipamento e monitoramento não invasivo de cargas (*NILM*).

O termo *NILM*, do inglês *Non-Intrusive Load Monitoring*, é abundante na literatura, mas não há um termo comum aos autores para definir o monitoramento de cargas por equipamento. A principal diferença entre eles é a complexidade da instalação e quantidade de medidores inteligentes utilizados.

O monitoramento de cargas por equipamento usa um medidor inteligente para cada equipamento que se deseja monitorar. Esses medidores se conectam uns aos outros através de uma rede de telecomunicações, que pode ser por cabos (*PLC*, *Ethernet*), sem fio (*ZigBee*, *WiFi*) ou mista (*Zigbee* mais *PLC*). Em contrapartida, o monitoramento *NILM* faz uso de apenas um medidor inteligente por circuito, ou por unidade consumidora, de forma que o medidor monitore inúmeras cargas elétricas ligadas no mesmo circuito.

2.2.1 Monitoramento por Equipamento (Intrusivo)

O monitoramento por equipamento, também conhecido como ou monitoramento descentralizado ou monitoramento intrusivo consiste em um sistema de monitoramento de energia onde cada aparelho monitorado é individualmente ligado a um medidor inteligente que o conecta à rede elétrica. O termo monitoramento intrusivo ou invasivo é usado pois necessita a abertura do circuito para ser instalado, o que pode ser um facilitador para equipamentos plugáveis na tomada, mas inadequado para chuveiros elétricos ou condicionadores de ar, por exemplo, que geralmente são ligados diretamente à rede elétrica.

Esse método é o mais simples para reunir as informações necessárias a respeito do consumo de energia, pois cada medidor inteligente faz a leitura do consumo de um único equipamento, armazena estas informações em memória, podendo apresentar estas informações diretamente em um *display* ou disponibilizar estas informações para um sistema computacional concentrador que, reporta as informações aos usuários em formato mais amigável.

Por mais que este sistema seja capaz de fornecer com exatidão o consumo de energia de cada aparelho monitorado, ele é complexo e tem alto custo de implantação, devido à quantidade de medidores necessária.

Diversos modelos de medidores de energia que trabalham nesse formato estão disponíveis no mercado. A maioria destes medidores apenas apresentam o consumo de energia do aparelho monitorado em uma tela de cristal líquido, mas existem aqueles que enviam os dados de forma sem fio para um concentrador que reúne as informações de diversos medidores, e outros que disponibilizam as informações para um computador ou *smartphone* via conexão sem fio. A Figura 10 apresenta quatro modelos de medidores de energia que utilizam essa metodologia.

2.2.2 Monitoramento Não-Intrusivo (*NILM*)

O monitoramento não-intrusivo ou não-invasivo de carga (I) é um termo amplamente usado na literatura para caracterizar os sistemas capazes de levantar o consumo de energia de diversos equipamentos, simultaneamente, através da medição do consumo em um mesmo circuito ou unidade consumidora. Também pode ser encontrado como *NALM* ou *NIALM*,

Figura 10 – Medidores de energia tipo intrusivo (por equipamento)



Fonte: Autor (Imagens dos sites dos fabricantes)

do inglês *Non-Intrusive Appliance Load Monitoring*. Essa terminologia é usada pelo fato de não ser necessário ter um equipamento de medida individual para cada equipamentos que se deseja monitorar. Essa metodologia evita a necessidade de instalar vários medidores na rede elétrica para obter as informações (HART, 1992).

Como a técnica *NILM* utiliza apenas um medidor de consumo na entrada da rede elétrica ou no disjuntor do circuito desejado, também é tratado em algumas literaturas como monitoramento centralizado ou monitoramento de cargas elétricas em nível de circuito.

A metodologia *NILM* se baseia no conceito de assinatura de carga para identificação de quais aparelhos estão em operação em cada instante. Assinatura de carga consiste em um conjunto de características elétricas únicas para cada carga elétrica. Quando uma carga elétrica é ligada, ela apresenta um padrão de consumo elétrico. Um chuveiro elétrico, por exemplo, apresenta os sinais de tensão e corrente praticamente em fase, o que o caracteriza como uma carga resistiva. Um outro chuveiro, embora também possua característica resistiva, possivelmente consome uma quantidade de energia que o difere do modelo anterior. Já motores elétricos possuem a fase do sinal de corrente atrasada em relação à fase do sinal de tensão,

o que os classifica como cargas indutivas. No entanto, como dois motores elétricos podem apresentar diferenças tanto na potência consumida quanto nas defasagens entre tensão e corrente, é possível diferenciar qual dos motores está ligado em um determinado momento apenas medindo a potência e o ângulo de fase entre tensão e corrente.

A assinatura de carga é identificada ao ensaiar o consumo energético de uma carga elétrica agrupando informações de grandezas elétricas derivadas da tensão e da corrente. Elas podem ser representadas tanto no domínio do tempo (HART, 1992; LIANG et al., 2009; MORO et al., 2013; RAHIMI; CHAN; GOUBRAN, 2011), quanto no domínio da frequência (BOUHOURAS et al., 2012; COLE; ALBICKI, 2002; HUANG et al., 2011; LEE et al., 2005; LIANG et al., 2009; PATEL et al., 2007; SHAW; LAUGHMAN, 2007; SRINIVASAN; NG; LIEW, 2006).

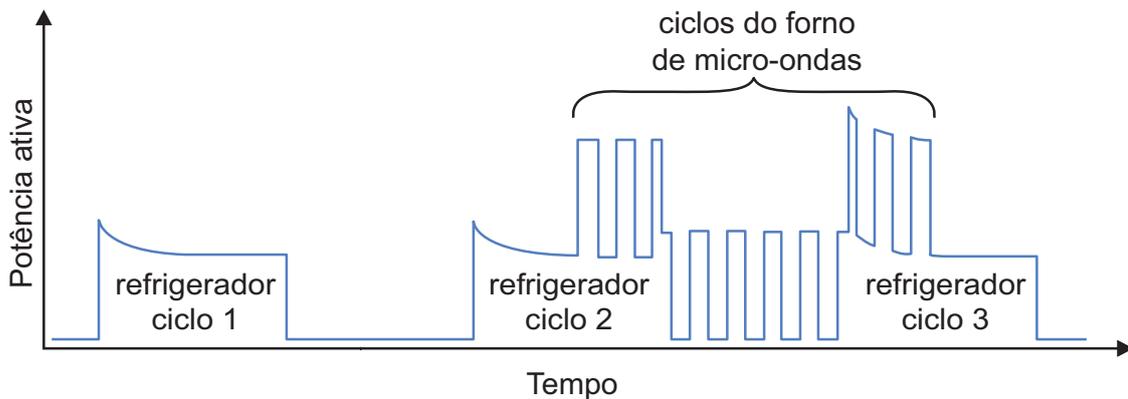
Os primeiros estudos sobre o monitoramento não invasivo de cargas elétricas foram apresentados pelo Instituto Tecnológico de Massachusetts (*MIT*) e teve suas origens no monitoramento de carga elétricas residenciais (HART, 1992). No desenvolvimento dessa técnica, os períodos de operação das cargas individuais foram determinados pela identificação dos instantes em que as medições de potência mudam de um valor de estado para outro. Essas mudanças de estados de operação, conhecidas como eventos, correspondem às ações de liga e desliga da carga, caracterizada pela magnitude nos valores de potência ativa.

Diferentes metodologias utilizam técnicas de processamento de sinal e algoritmos de reconhecimento de cargas baseadas em assinaturas de carga e permitem a utilização de um único ponto de medição instalado na entrada de alimentação do circuito para monitorar todas as cargas relevantes instaladas. Uma vez medido o consumo total do circuito, a desagregação do consumo de energia é então calculada por algoritmos que analisam as assinaturas das cargas, individualizando o consumo por equipamento

Observa-se na Figura 11 como funciona o monitoramento do consumo de energia de um refrigerador e um forno de micro-ondas instalados em um mesmo circuito. Ela apresenta claramente duas mudanças de estado com períodos distintos que se sobrepõem ao longo do tempo. Sabendo que o funcionamento do refrigerador é caracterizado por partidas do compressor que se mantém ligado por períodos consideravelmente longos enquanto o micro-ondas liga e desliga em ciclos de maior frequência, é possível discriminar em que momento cada um dos aparelhos está ligado e determinar o consumo de energia individual do refrigerador e do forno de micro-ondas.

Qualquer grandeza elétrica derivada de tensão e corrente pode ser usada para discriminar cargas elétricas em um mesmo circuito. Atualmente grande parte dos equipamentos possuem vários estados de operação. Mesmo eletrodomésticos simples, como liquidificadores ou secadores de cabelo, podem operar em diferentes níveis de velocidade e/ou temperatura. Embora se trate de uma mesma carga elétrica, cada nível de velocidade distingue um estado de

Figura 11 – Demonstração da desagregação com assinatura de carga



Fonte: Autor (Adaptado de Hart, 1992)

operação e apresenta assinaturas elétricas diferentes. A identificação dos equipamentos parte do princípio de que todos os aparelhos e os estados de operação individuais são previamente conhecidos. A medida é realizada em nível de circuito, utilizando medidores de energia instalados junto ao quadro de distribuição.

Esse método de monitoramento de cargas elétricas traz menos informações que o monitoramento de transientes, no entanto, para se monitorar transientes é necessário trabalhar com alta taxa de amostragem, alta velocidade de comunicação, alta velocidade de processamento e armazenamento de grande quantidade de informação. Geralmente os resultados das pesquisas de monitoramento não-intrusivo de equipamentos apontam melhor resultado quando as cargas monitoradas são de natureza linear, quando as cargas não possuem (ou não são considerados) mais de um modo de operação, ou quando não há uma grande quantidade de cargas monitoradas no mesmo circuito.

A partir da literatura, identifica-se e classifica os equipamentos em tipos, como podemos verificar na Tabela 1.

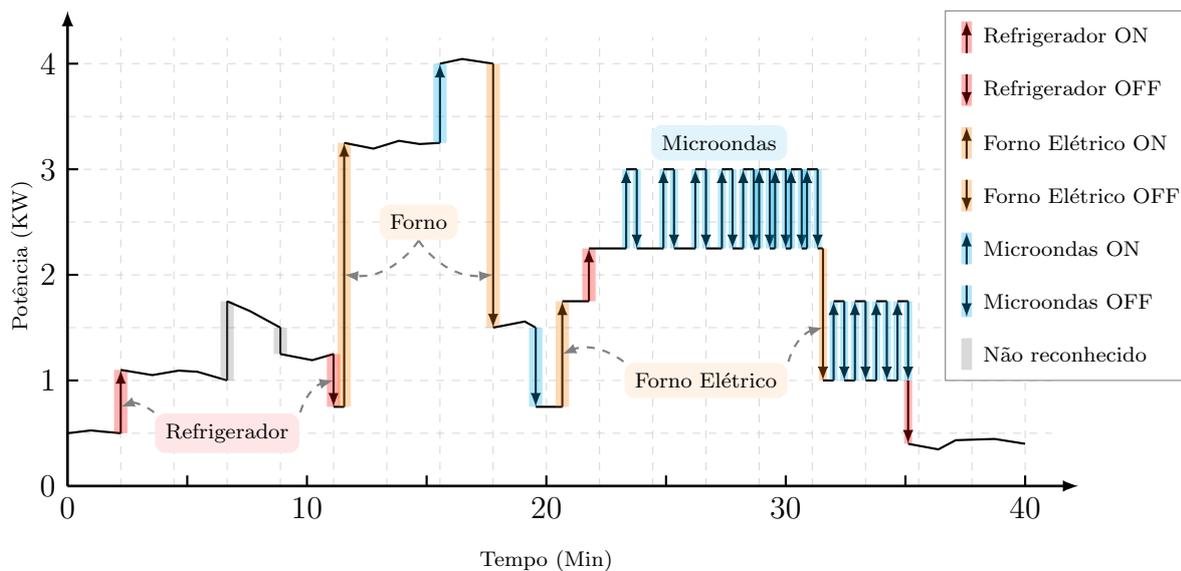
2.2.2.1 Abordagens *Event-Based* e *Event-Less*

A primeira abordagem possível para resolver o problema da desagregação do consumo é baseada em eventos (*event-based*) e está relacionada com os primeiros estudos sobre *NILM*, e procuram desagregar o consumo total por meio da detecção e identificação de cada mudança de estado do equipamento no sinal agregado, conforme demonstrado na Figura 12, usando algoritmos de aprendizagem supervisionados ou semi-supervisionados. Esse tipo de abordagem categorizada necessita de uma etapa complexa de coleta de dados em que várias transições, ou vários eventos, dos equipamentos de interesse são coletados, identificados e armazenados, para serem utilizados como dados de treinamento.

Tabela 1 – Classificação dos Equipamentos por Tipo

Tipo	Descrição	Exemplos
Ligado/Desligado	Equipamentos que podem estar ligados ou desligados	Lâmpada, Torradeira, Televisor, Geladeira
Múltiplos Estados	Equipamentos que durante o funcionamento passam por um número finito de modos de operação	Lavadora de Roupas, Secadora de Roupas, Secador de Cabelo
Potência Variável	Equipamentos cujo consumo é variável e não tem um conjunto definido de transições	Chuveiros Eletrônicos, Lâmpadas com <i>dimmer</i> , Motores <i>Inverter</i>
Uso Permanente	Equipamentos que estão constantemente ligados, 24 horas por dia	Alarmes, Câmeras de Segurança, Modem, Roteador

Fonte: Autor

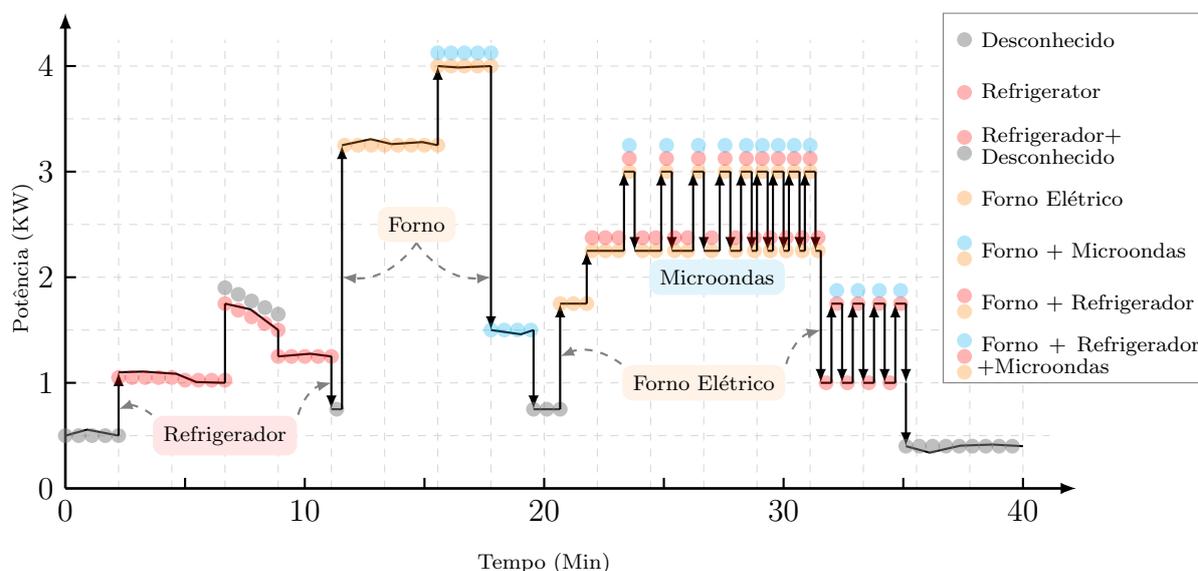
Figura 12 – Exemplo de desagregação baseada em eventos (*event-based*)

Fonte: Autor (Adaptado de Hart, 1992)

Uma segunda abordagem, por outro lado, não depende da detecção e identificação prévia dos eventos (*event-less*). Em vez disso, essa abordagem tenta corresponder cada amostra de dados agregados de potência com o consumo de um equipamento específico ou uma combinação de diferentes equipamentos, conforme a Figura 13, por meio de métodos de aprendizagem de máquina (*machine-learning*) usando métodos estatísticos (Bayesianos) e probabilidade (*Hidden Markov Models*). Nessa abordagem, os dados de treinamento não precisam de identificação prévia, apenas o consumo agregado das cargas de interesse é necessário, tornando o processo de coleta de dados mais simples.

Naturalmente, ambas as abordagens têm vantagens e desvantagens. Por exemplo, apesar do fato de que as abordagens baseadas em eventos exigem a execução contínua dos algoritmos de detecção de eventos, a identificação do dispositivo só é executada quando os eventos são detectados, tornando essas abordagens mais eficientes sob o ponto de vista computacional. No entanto, o sucesso na estimativa de consumo depende fortemente das etapas de detecção e identificação, e, conseqüentemente, qualquer detecção perdida ou mal identificada será propagada, podendo levar a grandes erros de cálculo.

Figura 13 – Exemplo de desagregação *event-less*



Fonte: Autor (Adaptado de Hart, 1992)

Por outro lado, nas abordagens *event-less*, a etapa de inferência é executada para cada amostra obtida, tornando essas abordagens computacionalmente intensivas. No entanto, uma vez que todos os dados são levados em consideração em todos os momentos, os erros não são esperados, ou na pior hipótese terão menos influência no resultado. Em vez disso, eles serão corrigidos conforme os algoritmos de inferência estão sendo executados.

2.2.2.2 Identificação das Cargas

Um dos principais desafios envolve o problema de identificar corretamente as cargas individuais, dada a complexidade da distribuição da rede elétrica e os diferentes tipos de carga (ZEIFMAN; ROTH, 2011; ZOHA et al., 2012) que os sistemas *NILM* devem ser capazes de diferenciar, por exemplo, cargas de potência variável (chuveiros eletrônicos, equipamentos tipo inverter), cargas com múltiplos estados (lavadoras de roupas, secadora de roupas) e cargas de uso permanente (câmeras de segurança e alarmes).

Da mesma forma, os algoritmos *NILM* devem ser capazes também de diferenciar corretamente diferentes cargas com a mesma potência (ZEIFMAN; ROTH, 2011; ZOHA et al., 2012), independentemente de serem aparelhos semelhantes ou apenas diferentes dispositivos que trabalham no mesmo nível de potência. Além disso, e mais especificamente para a abordagem baseados em eventos, precisam ser considerados os eventos de energia simultâneos (quando as cargas são acionadas ao mesmo tempo ou quase ao mesmo tempo), o que pode induzir a erros no processo de detecção propagando para os estágios subsequentes e resultando em grandes erros de cálculo (WONG et al., 2013).

Por fim, e talvez o desafio mais importante, é o fato de que deve ser plenamente considerada a natureza dinâmica da rede elétrica (LAI et al., 2012) clássicos de aprendizado de máquina (reconhecimento de imagens ou reconhecimento de voz), os conjuntos de dados de treinamento e teste são considerados iguais ou muito semelhantes estatisticamente dos dados futuros que serão apresentados aos algoritmos de aprendizagem. No entanto, devido à natureza dinâmica da rede elétrica, isso não acontecerá em aplicações *NILM*. Em vez disso, os algoritmos de aprendizado devem ser robustos, suportando e se adaptando às mudanças nos dados futuros, como por exemplo a presença de uma carga desconhecida ou com mau funcionamento ou ainda diferentes modos de funcionamento e inúmeras combinações desses aparelhos (FIRTH et al., 2008; RICHARDSON et al., 2010).

2.2.2.3 Treinamento e Supervisão

A seleção e a avaliação de desempenho das diferentes soluções de *NILM* apresentadas na literatura é complexa. Por exemplo, algoritmos diferentes exigem dados de treinamento diferentes, por exemplo, abordagens baseadas em eventos precisam de todos os estados previamente conhecidos e identificados, enquanto as abordagens *event-less* exigem histórico de dados individuais de consumo dos equipamentos. Pouco trabalho foi desenvolvido neste sentido e, portanto, não há uma estratégia identificada para coletar esses dados de treinamento (ZOHA et al., 2012; LAI et al., 2012).

Isso é mais importante no caso de abordagens baseadas em eventos, pois uma quantidade considerável de transições de equipamentos deverá ser obtida, identificada e armazenada. Além disso, e apesar dos esforços para criar conjuntos de dados públicos que estão sendo observados nos últimos anos, a falta de conjuntos de dados públicos adequados ainda é considerada uma das principais dificuldades, principalmente no caso de base de dados necessários para treinar e validar abordagens baseadas em eventos. Além disso, os conjuntos de dados que se encontram disponíveis têm grande diferença entre si (BATRA et al., 2014; KELLY; KNOTTENBELT, 2014), principalmente com relação ao formato dos dados, as medições disponíveis, a resolução dos dados e os tipos de equipamentos). Isso torna a tarefa de

avaliação dos algoritmos muito demorada, e acrescenta uma margem de dúvida considerável nos resultados obtidos, comprometendo, portanto, quaisquer *benchmarks* dos conjuntos de dados disponíveis.

Apesar de alguns esforços para realizar avaliações e comparações das diferentes tecnologias e diferentes abordagens, até o momento não existe consenso sobre as métricas que devem ser usadas para medir e testar o desempenho dos algoritmos *NILM* e dos sistemas de monitoramento (MAYHORN et al., 2015). Em vez disso, a maioria das avaliações se concentrou em relatar as precisões do método proposto sem ter estudado previamente a conformidade entre as métricas e o problema *NILM*, como é feito em outras aplicações de aprendizado de máquina (CARUANA; NICULESCU-MIZIL, 2004; FERRI et al., 2009).

2.3 DESAGREGAÇÃO DO CONSUMO

Como visto anteriormente, a maioria das pesquisas atuais sugerem duas abordagens principais para a solução do problema da desagregação do consumo, e a pesquisa apresentada concentra-se nessas duas abordagens. No entanto, deve-se ressaltar que outras abordagens podem ser encontradas na literatura.

2.3.1 Abordagem Baseada em Eventos (*Event-Based*)

Abordagens baseadas em eventos para desagregação de consumo estão relacionadas às primeiras pesquisas de Hart, e procuram calcular o consumo individual de aparelhos através da identificação de cada transição de estado dos equipamentos (chuveiro ligado ou desligado, por exemplo) por meio da detecção e classificação dos eventos, assumindo que o sistema foi previamente treinado e conhece cada um deles.

O fluxo de reconhecimento típico do sistema *NILM* baseado em eventos contém cinco etapas consecutivas:

1. Aquisição de dados: Os sinais que representam a energia elétrica são obtidos, amostrados e calculados (potência ativa, reativa, aparente e fator de potência, por exemplo);
2. Detecção de eventos: Processo de identificação das mudanças de consumo que são esperadas em resposta aos aparelhos mudando seu modo de operação;
3. Extração de características: Diferentes parâmetros são extraídos dos dados e eventos, formando uma assinatura que será usada no processo de identificar as cargas responsáveis por cada evento;
4. Classificação de eventos: Algoritmos de aprendizado de máquina treinados são aplicados às assinaturas de carga para identificar os dispositivos que mudaram de estado;
5. Estimativa de consumo: O consumo das cargas individuais é estimado com base nos eventos já identificados e sua distribuição no tempo é armazenada.

2.3.1.1 Detecção de Eventos

Podemos agrupar as abordagens para detecção de eventos encontradas na literatura em três categorias (ANDERSON et al., 2012), as quais estudaremos com mais detalhes nessa sessão.

2.3.1.1.1 Análise Heurística

Os algoritmos que foram classificados nessa categoria são os menos complexos e seguem princípio básico de leitura dos dados coletados em função do tempo, procurando por mudanças que estão acima de um certo limite pré-definido (HART, 1985).

Em um primeiro passo, o sinal lido é filtrado para minimizar a presença de ruídos e reduzir a chance de falsos positivos. Em seguida, os eventos são detectados através do simples cálculo da diferença absoluta entre duas amostras consecutivas, e caso essa diferença esteja acima de um limite pré-definido, considera-se que um evento foi detectado (WEISS et al., 2012). Outros autores sugerem uma abordagem semelhante, mas em vez de calcular as diferenças absolutas entre duas amostras consecutivas, as diferenças são calculadas entre a amostra atual e uma amostra de alguns segundos antes (MEEHAN; MCARDLE; DANIELS, 2014). Além disso, para tentar reduzir o número de falsos positivos, um cálculo cujo valor absoluto esteja acima do limite pré-definido só é considerado um evento se nenhum outro evento tiver sido detectado nos segundos anteriores.

2.3.1.1.2 Método da Probabilidade

Os algoritmos dentro dessa categoria utilizam probabilidade para a detecção de eventos. Nesse método, a detecção ocorre em duas etapas.

Inicialmente, é calculada a chance de um evento ocorrer em cada amostra do sinal obtida. Isso é calculado através da aplicação de testes estatísticos, como *Likelihood Ratio* (LUO et al., 2002), *Goodness-of-Fit* (JIN et al., 2011), *Cumulative Sum* (TRUNG et al., 2014), ou outras funções matemáticas, como *Kernel Fisher Discriminant Analysis* (WILD; BARSIM; YANG, 2016).

Em seguida, os eventos são extraídos da estatística resultante. Isso normalmente é feito através de um limite, ou seja, sempre que a estatística de detecção estiver acima de um determinado limite, é considerado que um evento foi detectado, na amostra que corresponde à esse limite (LUO et al., 2002; JIN et al., 2011). Na aplicação específica no *NILM*, algumas estratégias mais robustas foram desenvolvidas, como por exemplo através da aplicação de um algoritmo de votação ou máxima/mínima ao sinal detectado (BERGES, 2010; PEREIRA et al., 2014).

2.3.1.1.3 Correspondência de Filtros

Esses algoritmos fazem uma correlação entre um modelo conhecido com um sinal desconhecido para detectar a presença de uma alteração no sinal. Em outras palavras, esses algoritmos procuram encontrar transientes identificados em equipamento já conhecidos dentro do sinal lido, por meio de filtragens.

A aplicação desse método tenta associar segmentos de transientes identificados durante a inicialização de um determinado equipamento, obtidos em fase de treinamento, ao sinal agregado lido, utilizando uma sequência de dois filtros (TRUNG et al., 2014; WILD; BARSIM; YANG, 2016). O primeiro deles é usado para encontrar as formas transitórias no sinal agregado, e o segundo é usado para verificar se os transientes detectados não foram causados por interferência ou ruído (LEEB; NORFORD, 1996).

Atualmente, conforme a literatura, essa categoria de correspondência de filtros também inclui os métodos de detecção que usam filtros para transformar as medidas de potência, potencializando os sinais que enfatizam eventos em potencial, enquanto depreciam o restante, de uma forma semelhante à utilizada no método da probabilidade. Um dos métodos usados envolve a aplicação de uma transformada de *Hilbert* à corrente instantânea com amostragem em 20kHz (ALCALÁ; UREÑA; HERNÁNDEZ, 2014). Em seguida uma combinação de filtros calcula a média e a derivação no sinal transformado, dessa forma identificando apenas as transições em que potenciais eventos sejam representados.

Outra forma de aplicação desse método envolve a aplicação da análise de *Cepstrum* ao sinal de potência obtido em 60Hz, frequência da rede elétrica (BAETS et al., 2016). O sinal resultante dessa aplicação é então limitado para que apenas os pontos que estejam acima de um valor pré-determinado sejam considerados como eventos.

2.3.1.2 Extração de Características

A extração de características é o processo de selecionar as informações mais relevantes, identificando e garantindo que as assinaturas dos eventos sejam robustas e contenham características suficientes para permitir identificar diferentes equipamentos.

De um modo geral, essas características podem ser categorizadas como características de projeto, que são aquelas obtidas à partir das características elétricas dos próprios equipamentos, ou características orientadas à dados, que se referem às características aprendidas diretamente, por meio de técnicas como o treinamento não supervisionado (QV; MONGA, 2012).

As características de projeto geralmente são obtidas a partir das amostras que envolvem o evento de interesse. Os exemplos mais comuns dessas características são a variação de potência, formas de transientes, componentes harmônicos (BERGES, 2010) e

trajetórias de tensão e corrente (HASSAN; JAVED; ARSHAD, 2013; LAM; FUNG; LEE, 2007). Adicionalmente, várias características podem ser extraídas do domínio da frequência como a Interferência Eletromagnética que é emitida por alguns equipamentos (GUPTA; REYNOLDS; PATEL, 2010), ruído elétrico usando Transformadas Rápidas de *Fourier* (PATEL et al., 2007) ou em alguns casos a Transformada *Wavelet* para extrair características do domínio de tempo e frequência simultaneamente (CHAN; SO; LAI, 2002).

As características orientadas à dados também podem ser extraídas das medições obtidas, no entanto, ao contrário das características de projeto, eles são aprendidos diretamente dos dados obtidos em treinamento. Entre os métodos, podemos destacar aqueles realizados através da aplicação de técnicas de decomposição de valor único (LAM; FUNG; LEE, 2007), para extrair características das formas de onda em função do tempo, aqueles realizados através do uso de imagens binárias, que são trajetórias de tensão/corrente normalizadas em amplitude e convertidas em imagens binárias (GAO et al., 2016).

2.3.1.3 Classificação de Eventos

Em termos de algoritmos de aprendizado supervisionado para classificação de eventos temos muitos estudos e aplicações na literatura. Iniciando com algoritmos de aprendizagem mais tradicionais, como o *K-Nearest Neighbor* (TRUNG et al., 2014), árvores de decisão (GAO et al., 2016; LIN et al., 2010), *Bayes* (FARINACCIO; ZMEUREANU, 1999; MARCHIORI et al., 2011) e redes neurais artificiais (RUZZELLI et al., 2010; SRINIVASAN; NG; LIEW, 2006; Jürgen Voss; Michael Baranski, 2012), até abordagens mais complexas, como máquinas de vetores (LIN et al., 2010; MITTELSDORF et al., 2013; KOAY et al., 2003) e algoritmos genéticos (LIN et al., 2010; RUZZELLI et al., 2010; BARANSKI; VOSS, 2004b).

Alguns autores também exploraram a viabilidade de abordagens baseadas em conjuntos, onde diferentes algoritmos são combinados para melhorar o desempenho geral da classificação (KRAMER et al., 2012; BARSIM; MAUCH; YANG, 2018). Da mesma forma, a possibilidade de combinar sequencialmente diferentes algoritmos de classificação também foi explorada. Dessa forma é possível, por exemplo, a aplicação de uma abordagem em duas etapas. No primeiro passo, um algoritmo tenta classificar o aparelho por tipo (resistivo, indutivo ou capacitivo), em seguida um segundo algoritmo é treinado apenas com as características que são consideradas relevantes para identificar equipamentos desse tipo (MEEHAN; MCARDLE; DANIELS, 2014).

Outros autores também testaram abordagens semi-supervisionadas que tentam fazer uso de dados rotulados e não rotulados para algoritmos de classificação de treinamento (BARSIM; YANG, 2016). A lógica por trás dessas abordagens é o fato de que, na maioria dos problemas de aprendizado de máquina, os dados rotulados são escassos ou de difícil obtenção.

Com isso, os métodos de aprendizado semi-supervisionados tentam aproveitar o potencial dos dados não rotulados usando pequenos conjuntos de exemplos rotulados para inferir os rótulos de exemplos não rotulados e usá-los como dados de treinamento (ZHU; GOLDBERG, 2009).

2.3.1.4 Estimativa de Consumo

Na última etapa, estimativa de consumo, os eventos classificados e os registros de data e hora associados são utilizados para inferir o consumo dos equipamentos individuais. Este tópico foi explorado no trabalho original de Hart, onde o autor propõe modelar o consumo individual de cada equipamento por meio de heurísticas especializadas como a *ZLSC* (*Zero Loop Sum Constraint*), que afirma que a soma das mudanças de energia em qualquer ciclo de transições de estado é zero (HART, 1992). Esse método, no entanto, não é o mais adequado, pois pressupõe que as transições de potência de um determinado dispositivo são simétricas e que não há eventos simultâneos.

Outros autores apresentam um método completamente não supervisionado de estimar o comportamento do equipamento baseado em diferenciais de potência observados usando algoritmos genéticos (BARANSKI; VOSS, 2004b; BARANSKI; VOSS, 2004a; STREUBEL; YANG, 2012). Há ainda aqueles que propõe a modelagem do comportamento do equipamento usando Máquinas de Estado Finito, separando os traços de energia de um único dispositivo em modos de estado estacionário e transientes (STREUBEL; YANG, 2012). Essas abordagens, até então, precisam ser validadas, pois algumas suposições feitas pelos autores mostraram algumas desvantagens consideráveis (ZEIFMAN; ROTH, 2011; GIRI; BERGÉS, 2015).

Os autores Giri e Bergés propuseram uma abordagem alternativa à estimativa de consumo, onde o método aplicado visa reduzir os efeitos de rótulos incorretos e transições de estado perdidas, e é composto de cinco etapas sequenciais, também utilizando Máquinas de Estado Finito (GIRI; BERGÉS, 2015).

Em resumo, a natureza sequencial das abordagens baseadas em eventos implica que cada etapa do processo irá afetar as etapas seguintes. Consequentemente, é seguro afirmar que o objetivo final dessas soluções é encontrar a melhor combinação de algoritmos e recursos nas diferentes etapas, de modo que o consumo adequadamente desagregado seja maximizado. Além disso, é evidente que essas abordagens requerem grandes volumes de dados rotulados para o treinamento dos algoritmos.

Dentro da abrangência considerada, apenas alguns autores tentaram resolver essa questão. Berges, em sua abordagem com foco no usuário, fornece um método que solicita que os mesmos forneçam informações sobre o equipamento sempre que o sistema não puder encontrar uma correspondência (BERGES, 2010). Weiss propõe a utilização de aplicativos

móveis para que os usuários colem assinaturas de aparelhos em tempo real (WEISS, 2012). Comercialmente, a *Bidgely* propõe a aplicação de técnicas de *crowdsourcing* aos rótulos de equipamentos recolhidos dos seus usuários (SHYR et al., 2016).

2.3.2 Abordagem *Event-Less*

Ao contrário das abordagens baseadas em eventos, as alternativas *event-less* não exigem que os algoritmos de treinamento sejam previamente treinados para identificar cada mudança individual no sinal obtido. Essas abordagens baseiam-se principalmente no conhecimento existente sobre a operação individual do dispositivo, por meio de diferentes técnicas, como *motif mining* (SHAO; TECH; MARWAH, 2012), separação de fontes cegas (GONÇALVES et al., 2011) e modelos gráficos probabilísticos (KOLTER; JAAKKOLA, 2012).

2.3.2.1 *Motif Mining*

A aplicação do método de *Motif Mining* para a solução do problema de desagregação de consumo trabalha com a mineração do sinal agregado de consumo para episódios recorrentes (ciclos de trabalho de um determinado equipamento, por exemplo), que são compostos por sequências de eventos de variação de potência para equipamentos que são conhecidos por exibir tal comportamento. Cada episódio deve preencher certas condições para ser atribuído a um equipamento específico (SHAO; TECH; MARWAH, 2012).

2.3.2.2 Separação de Fontes Cegas

Separação de fontes cegas é o processo de separar fontes individuais de um sinal que é sabidamente composto de um conjunto de sinais mistos, mas pouca ou nenhuma informação é fornecida em relação aos sinais de origem ou ao processo de mistura.

A técnica de separação de fonte cega pode ser aplicada ao problema de desagregação de consumo usando as variações de potência ativa e reativa para criar grupos de equipamentos, cada um deles correspondendo a transição de estado de um dispositivo (GONÇALVES et al., 2011). Um algoritmo de busca é aplicado para reconstruir a fonte original (ou seja, o consumo agregado) de cada grupo de equipamentos. Outro exemplo de separação de fontes cegas é a aplicação de um algoritmo para encontrar os conjuntos de funções que melhor representam cada equipamento. Uma fatoração de matriz não negativa é então aplicada para encontrar o conjunto ideal de funções que melhor identifique os sinal agregado obtido (KOLTER; BATRA, 2002).

2.3.2.3 Modelos Gráficos Probabilísticos

Ao contrário dos métodos anteriores, que necessitam de um processo de detecção de eventos separado, uma nova abordagem na qual a desagregação de consumo é proposta usando abordagens probabilísticas baseadas em Modelos Gráficos Probabilísticos, que levam em conta apenas o consumo de energia e, eventualmente, características não relacionadas com o consumo, como a duração e o tempo de uso do equipamento.

A proposição por trás deste método é que o consumo agregado de energia elétrica em um determinado instante é caracterizado pelo consumo de vários aparelhos que estão operando em um modo particular. Portanto, o problema de desagregação pode ser expresso como a tarefa de encontrar as melhores sequências de modo possíveis que explicam o consumo agregado obtido. Diante disso, foram desenvolvidos modelos de comportamento de aparelhos usando diversas variações de *Hidden Markov Models (HMM)*, em que o objetivo final é encontrar a sequência de estados ocultos que melhor representem as saídas do modelo (ou seja, a potência total em um determinado instante).

Um exemplo do uso de *HMM* para desagregação de energia é o trabalho de Parson et al. em que, para cada equipamento, um algoritmo semi-supervisionado é usado para determinar sua sequência de estados mais provável, ou seja, modelar cada aparelho como um *HMM* (PARSON et al., 2012). Para essa finalidade, os autores alimentam seu algoritmo de modelagem com modelos de equipamentos genéricos contendo informações sobre as características operacionais do tipo de equipamento que estão modelando (por exemplo, consumo agregado, probabilidades de transição de estado e o consumo estimado em cada estado). Por fim, usando a sequência de estado de cada equipamento, o algoritmo de desagregação tenta estimar seu consumo e o subtrai do consumo agregado antes de repetir o processo para a próxima sequência de estado disponível, até que todas tenham sido calculadas.

Outros autores também propõem a modelagem como *HMMs*, usando um algoritmo não supervisionado para estimar o número de equipamentos e seus padrões de consumo, tomando apenas os dados agregados de consumo como entrada (KOLTER; JAAKKOLA, 2012). Para esse fim, o algoritmo funciona extraindo trechos dos dados de consumo agregados que provavelmente correspondem ao ciclo de trabalho de um equipamento (período entre o início e o fim do uso do equipamento). Cada *snippet* extraído é modelado como um *HMM* e aqueles que provavelmente pertencem ao mesmo dispositivo são identificados e rotulados. O resultado é um fatorial *HMM (FHMM)*, ou seja, uma composição de vários *HMMs* independentes, que os autores usam para estimar o consumo dos equipamentos individuais (KOLTER; JOHNSON, 2011).

Alguns pesquisadores também exploraram a possibilidade de modelar diferentes aspectos dos dados de consumo de energia por meio da combinação de diferentes *HMMs*, permitindo que as durações de uso do aparelho sejam modeladas explicitamente (duração do ciclo de uma lavadora de roupas, por exemplo) e ainda permite observações que podem influenciar o uso do aparelho a ser incorporado ao modelo (o uso do chuveiro em determinados horários, por exemplo) (KIM et al., 2011).

3 AVALIAÇÃO DE PERFORMANCE

Constata-se que um dos principais desafios da pesquisa *NILM* é a inexistência de um método formal para avaliar o desempenho das muitas soluções propostas pela comunidade. Ao contrário do problema de identificação de equipamentos, já amplamente estudado, apenas alguns pesquisadores estão dedicando seus esforços na criação desses métodos.

Nesse capítulo pode-se verificar alguns dos conjuntos de dados sobre consumo de energia disponíveis, os *frameworks* e kits de ferramentas desenvolvidos para validar esses conjuntos de dados, analisando as métricas de desempenho que foram usadas para relatar a precisão dos algoritmos e sistemas propostos.

3.0.1 Bancos de Dados Públicos de Consumo de Energia

Um banco de dados de desagregação de consumo de energia é uma coleção de medições de energia elétrica obtidas de unidades consumidoras em cenários reais, sem interromper as rotinas diárias dos usuários, ou seja, tentando manter os dados o mais próximos possível da realidade.

A maior parte desses bancos de dados contém medições do consumo total (obtidas na entrada de alimentação das unidades consumidoras) e das cargas individuais (obtidos diretamente nos equipamentos), e foram obtidos medindo cada carga à nível de equipamento (direto no plugue ou através de circuito individual para o qual a carga está conectada). Em um cenário real, no entanto, normalmente várias cargas estarão conectadas ao mesmo circuito e, portanto, este último método nem sempre garante que o consumo individual de todas as diferentes cargas seja confiável.

Da mesma forma que acontece com as diferentes abordagens vistas anteriormente, os bancos de dados atualmente disponíveis também podem ser categorizados como baseados em eventos ou *event-less*. A principal diferença entre as duas categorias está no fato de que este último não requer a identificação de todas as mudanças de estado. Conseqüentemente, a coleta de bancos de dados para abordagens *event-less* é mais simples e consome menos tempo, o que justifica a maior disponibilidade de bancos de dados públicos nessa categoria.

No momento em que este trabalho está sendo escrito foi possível localizar um total de 20 bancos de dados de consumo de energia para uso doméstico. Desse total, 15 são adequados para avaliar abordagens *event-less* e 4 para avaliar abordagens baseadas em eventos. O banco de dados restante contém apenas o consumo agregado de uma unidade consumidora inteira

e, portanto, não pode ser aplicado ao problema de desagregação de consumo. A Tabela 2 mostra um resumo dos bancos de dados disponíveis, facilitando a comparação dos métodos e características utilizados em cada um deles.

Tabela 2 – Resumo dos Bancos de Dados Públicos disponíveis

Banco de Dados (Ano)	País (Unidades)	Duração	Método		Medições				Características					Resolução	
			BE	EL	UC	CI	EI	LR	I	V	P	Q	S		Outros
REDD (2011)	EUA (6)	2-4 semanas (NC)	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✗	---	I & V: 15 kHz; P: 1 Hz IC & IA: 3-4 segundos
AMPds (2013)	Canadá (1)	2 anos (C)	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	Frequência Fator de Potência	1 minuto
TEALD (2016)	Canadá (1)	N/A (C)	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	Fator de Potência Frequência	1 Hz
Dataport (2013)	EUA (1400)	4 anos (C)	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✓	---	1 minuto
UK-DALE (2014)	Inglaterra (4)	499 dias (NC)	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	---	I & V: 16 kHz; P, Q & VRMS: 1 Hz (2 unidades) WH & IA: 6 segundos
iAWE (2013)	Índia (1)	74 dias (C)	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	Frequência Ângulo de Fase	1 Hz
Smart (2011)	EUA (3)	3-4 meses (NC)	✗	✓	✓	✓ ^b	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✓	---	1 Hz
BLUED (2012)	EUA (1)	1 semana (C)	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	---	I & V: 12 kHz P & Q: 60 Hz
ECO (2014)	Suíça (6)	8 meses (NC)	✗	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✗	Ângulo de Fase	1 Hz
OCTES (2012/13)	Fin., Ice., Esc. (33)	4-13 meses (NC)	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	Preço da Energia	6-7 segundos
IHEPCDS (2013)	França (1)	4 anos (C)	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	---	1 minuto
HES (2010/11)	EUA (251)	1-12 meses (C)	✗	✓ ^c	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	---	2 minutos
REFIT (2014)	Reino Unido (20)	2 anos (C)	✗	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	Status On/Off	8 segundos
ACS-Fx (2013)	Suíça (N/A)	N/A (NC)	✗	✓ ^c	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✗	Ângulo de Fase	10 segundos
DERED (2015)	Holanda (1)	6 meses	✗	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	---	1 Hz 1 minuto
Tracebase (2012)	Alemanha (N/A)	183 dias (NC)	✗	✓ ^c	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	---	1-10 segundos
GREENED (2014)	Áustria, Italia (9)	3-6 meses (C)	✗	✓ ^c	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	---	1 Hz
PLAID (2014)	EUA (55)	(N/A)	✓ ^t	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✗	✗	---	30 kHz
WHITED (2016)	Ale., Aus., Índ. (N/A)	(N/A)	✓ ^t	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✗	✗	---	44 kHz
HFED (2015)	Índia (N/A)	(N/A)	✓ ^t	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	EMI	10 kHz - 5 MHz

Fonte: Autor (Adaptado de Pereira, 2016)

As seguintes características são fornecidas pelos bancos de dados: Ano de lançamento, país, número de unidades consumidoras monitoradas, se os dados são contínuos ou não, ou seja, se os dados foram coletados em períodos consecutivos. As abordagens permitidas pelo conjunto de dados: baseada em eventos (BE) ou *event-less* (EL), tipos de medidores inteligentes usados na coleta: unidade consumidora inteira (UC), circuito individual (CI) ou equipamento individual (EI) e se uma lista de rótulos de eventos está disponível (LR). A grandezas disponíveis: corrente (I), tensão (V), potência ativa (P), potência reativa (Q), potência aparente (S), outras grandezas obtidas, e por último informações sobre a precisão e resolução em que as amostras foram obtidas.

3.0.2 *Frameworks* e Kits de Ferramentas

Existe um consenso na comunidade de pesquisa do *NILM* sobre a importância dos bancos de dados para a produção da pesquisa de desagregação de consumo. No entanto, apesar dos esforços na divulgação de dados públicos, pouco foi feito para padronizar a maneira como estes são disponibilizados para a comunidade ou como acessar rapidamente esses dados. Na verdade, a maneira mais comum de liberar dados acessíveis ao público continua a ser, depois de tantos anos, usando arquivos de texto que seguem uma certa estrutura que é então passada para os usuários em alguns formatos, que incluem arquivos de texto simples. Consequentemente, antes de qualquer avaliação, os pesquisadores precisam investir tempo para compreender a estrutura dos conjuntos de dados e produzir algoritmos para interagir com eles, bem como adaptar as diferentes métricas de avaliação.

Na Tabela 3 e na Tabela 4 tem-se a descrição das principais métricas utilizadas nas avaliações dos algoritmos utilizadas pela comunidade nos trabalhos avaliados.

Neste contexto, verificam-se esforços recentes para padronizar os bancos de dados e fornecer uma interface única para acesso. Nesta seção, podem ser verificados alguns projetos: a proposta de Metadados *NILM*, a abordagem não intrusiva *Load Monitoring Toolkit* (NILMTK) e o *framework NILM-Eval*.

3.0.2.1 Metadados *NILM*

Os autores do projeto Metadados *NILM* propuseram um esquema de metadados com o objetivo de padronizar a representação dos elementos que podem ser encontrados em um banco de dados de desagregação de consumo. Por exemplo: equipamentos monitorados, medidores inteligentes utilizados e os locais reais onde a coleta ocorreu.

O esquema proposto é dividido em dois sub-esquemas principais:

1. Esquema que descreve o conjunto de dados real;

Tabela 3 – Métricas de Performance das abordagens NILM (I)

Métrica	Descrição	BE	EL	Referências
Verdadeiro Positivo (VP)	Sempre que o algoritmo detecta algo como Verdadeiro e a saída real é Verdadeiro, por exemplo, um evento é rotulado corretamente como sendo disparado pelo equipamento X (<i>event-based</i>) ou um consumo em um intervalo de tempo é corretamente atribuído ao equipamento X (<i>event-less</i>).	✓	✓	Batra, 2014 Berges, 2010 Beckel, 2014
Verdadeiro Negativo (VN)	Sempre que o algoritmo detectar algo como Falso e a saída real também for Falsa, por exemplo, nenhum evento de energia é detectado em um determinado instante e realmente nenhum dispositivo alterou seu estado (<i>event-based</i>) ou por um determinado intervalo de tempo nenhum consumo foi atribuído a um equipamento quando esse aparelho realmente não estiver ligado (<i>event-less</i>).	✓	✓	Zeifman, 2011 Nguyen, 2014 Suzuki, 2008
Falso Positivo (FP)	Sempre que o algoritmo detecta algo como Verdadeiro e a saída real é Falso, por exemplo, um evento de energia é identificado como sendo disparado pelo equipamento X e na verdade não foi (<i>event-based</i>) ou um consumo em um intervalo de tempo foi atribuído ao equipamento X que na verdade não está ligado (<i>event-less</i>).	✓	✓	Batra, 2014 Berges, 2010 Beckel, 2014
Falso Negativo (FN)	Sempre que o algoritmo detectar algo como Falso e a saída real for Verdadeiro, por exemplo, nenhum evento de energia é detectado em um determinado instante, mas um equipamento alterou seu estado (<i>event-based</i>) ou por um determinado intervalo de tempo nenhum consumo foi atribuído a um equipamento quando o mesmo estava ligado (<i>event-less</i>).	✓	✓	Batra, 2014 Berges, 2010 Beckel, 2014
Exatidão	Proporção de resultados verdadeiros (VP + VN) entre todos os resultados (VP + VN + FP + FN)	✓	✓	Hart, 1992
Precisão	Proporção de verdadeiros positivos contra resultados positivos (VP + FP)	✓	✓	Batra, 2014
Sensibilidade	Proporção de verdadeiros positivos em relação aos resultados positivos reais (VP + FN). Também é conhecido por Taxa de Verdadeiro Positivo.	✓	✓	Batra, 2014 Anderson, 2012
Taxa de Falso Positivos	Proporção de falsos positivos contra resultados negativos reais (FP + VN).	✓	✓	Berges, 2012 Baranski, 2004
F1 Score	Média ponderada entre precisão e sensibilidade.	✓	✓	Batra, 2014 Beckel, 2014
Consumo Total Identificado	Razão entre o consumo total estimado e o consumo real medido.	✓	✓	Hart, 1992
Taxa de Identificação de Consumo	Razão entre o consumo de energia estimado e o real.	✓	✓	Berges, 2010
Diferença entre potência estimada e real	Diferença entre a potência estimada e a potência real de cada equipamento individualmente.	✓	✓	Berges, 2010 Norford, 1996

Fonte: Autor (Adaptado de Pereira, 2016)

2. Centralizador de metadados que contém informações gerais sobre os equipamentos representados.

O primeiro sub-esquema tem o objetivo de modelar cada componente individual do banco de dados, que sempre produzirá dados que variam de componente para componente. O segundo sub-esquema, conhecido como centralização de metadados, é comum a todos os bancos de dados e contém informações detalhadas sobre cada equipamento que pode ser modelado.

Tabela 4 – Métricas de Performance das abordagens NILM (II)

Métrica	Descrição	BE	EL	Referências
Exatidão de Detecção	Precisão de detecção de eventos, incluindo os efeitos dos falsos positivos.	✓	✗	Liang, 2010
Precisão de Desagregação	Precisão de desagregação excluindo os efeitos dos falsos positivos.	✓	✗	Liang, 2010
Precisão geral	Precisão de desagregação, incluindo os efeitos de falsos positivos e falsos negativos.	✓	✗	Liang, 2010
Porcentagem Verdadeiro Positivo	Porcentagem da razão entre verdadeiros positivos e verdadeiros reais.	✓	✗	Anderson, 2012
Porcentagem Falso Positivo	Porcentagem da razão entre falsos positivos e verdadeiros reais.	✓	✗	Anderson, 2012
Mudança total de energia	Soma dos deltas para todos os falsos positivos ou falsos negativos.	✓	✗	Anderson, 2012
Média de Mudança de Energia	Média dos deltas para todos os falsos positivos ou falsos negativos.	✓	✗	Anderson, 2012
Erro Total de Atribuição I	Erro total no consumo atribuído normalizado pelo consumo real em cada fração de tempo calculada em todos os equipamentos.	✓	✓	Kolter, 2011
Erro de Atribuição Individual	Erro no consumo atribuído normalizado pelo consumo real em cada fração de tempo calculada em um equipamento específico.	✓	✓	Kolter, 2012
Erro Total de Atribuição II	Erro total no consumo atribuído durante toda a duração do banco de dados	✓	✓	Parson, 2012
Erro no consumo total atribuído	Diferença entre o consumo total atribuído e o consumo real de um determinado equipamento no banco de dados.	✓	✓	Batra, 2014
Fração de consumo total atribuído corretamente	Sobreposição entre a fração de consumo atribuído a cada equipamento e a fração real de energia consumida por cada equipamento no banco de dados.	✓	✓	Batra, 2014
Erro normalizado na potência atribuída	Soma da diferença entre a potência atribuída e a potência real de um determinado equipamento em cada intervalo de tempo, normalizado pelo consumo total de energia do equipamento.	✓	✓	Batra, 2014
Erro RMS na energia atribuída	É o erro quadrático médio entre a potência atribuída e a potência real de um determinado equipamento em cada intervalo de tempo.	✓	✓	Batra, 2014 Beckel, 2014
Hamming Loss	Perda total de informações quando os equipamentos são classificados incorretamente em todo o banco de dados.	✓	✓	Batra, 2014
Desvio	Desvio entre o consumo inferido e o consumo real de um determinado equipamento durante um período de tempo.	✓	✓	Beckel, 2014

Fonte: Autor (Adaptado de Pereira, 2016)

3.0.2.2 NILMTK (NILM Toolkit)

O *NILMTK* foi lançado em abril de 2014, e é um kit de ferramentas *opensource* que foi criado com o propósito de permitir a análise de bancos de dados e fornecer uma estrutura padronizada para realizar a avaliação de desempenho de diferentes conjuntos de dados. Para esse fim, os autores criaram um formato de dados comum, o *NILMTK-DF*, que pode utilizar os conjuntos de dados existentes enquanto permite a rápida implementação de algoritmos e métricas.

No geral, o kit de ferramentas é composto por vários componentes escritos em *Python*, incluindo analisadores para uma série de bancos de dados existentes, funções de diagnóstico de conjunto de dados (detecção de taxa de falhas, por exemplo), estatísticas dos bancos de dados e funções de pré-processamento (*down sampling* e normalização de voltagem, por exemplo). Além disso, o *NILMTK* contém implementações para dois algoritmos de desagregação de consumo amplamente estudados (otimização combinatória e *Hidden Markov Model*), bem como por várias métricas de desempenho.

Para avaliar a viabilidade de seu kit de ferramentas, os autores realizaram algumas avaliações, incluindo várias análises estatísticas de conjuntos de dados e testes de desagregação de consumo. Em relação a este último, os dois algoritmos de *benchmark* padrão foram testados contra seis conjuntos de dados (*REDD*, *Smart*, *PSRI*, *AMPds*, *iAWE* e *UK-Dale*) em resoluções de 1 minuto com os resultados sendo expressos em termos da fração do consumo total atribuída corretamente, o erro normalizado na potência atribuída e o F-score.

Os resultados obtidos indicaram que o desempenho do *Hidden Markov Model* foi superior ao da otimização combinatória nas três métricas para *REDD*, *Smart* e *AMPds*, enquanto que para os três conjuntos de dados restantes ambos tiveram desempenho semelhante. Além disso, os autores também enfatizaram a importância de considerar o tempo necessário para as etapas de treinamento e desagregação, pois isso pode servir como critério de desempate.

3.0.2.3 *NILM-Eval*

O *NILM-Eval* é uma estrutura *opensource* baseada em *Matlab* para executar avaliações de desempenho em algoritmos *NILM* em diferentes bases de dados. A princípio, é muito semelhante no escopo do *NILMTK*, no sentido de permitir avaliações em vários conjuntos de dados com métricas comuns de desempenho. No entanto, ele foi projetado para facilitar o projeto e a execução de grandes experimentos que consideram várias configurações de parâmetros diferentes para os diferentes algoritmos em experimentos repetidos, permitindo, assim, a avaliação rápida e o *benchmark* de tais algoritmos em diferentes configurações.

Os autores do *NILM-Eval* também testaram exaustivamente a capacidade de seus sistemas para avaliar os algoritmos de desagregação de consumo. Para este fim, eles usaram seu próprio banco de dados (ECO) para avaliar quatro algoritmos diferentes, dois deles baseados em eventos (BARANSKI; VOSS, 2004b; WEISS et al., 2012) e dois *event-less* (PARSON et al., 2012; KOLTER; JAAKKOLA, 2012). Esses algoritmos foram testados em diferentes configurações de parâmetros e os resultados foram relatados usando as métricas de desempenho padrão do sistema. Os resultados mostraram, por exemplo, que as abordagens baseadas em eventos tiveram melhor desempenho do que as *event-less*. Além disso, também foi possível identificar que uma resolução de pelo menos 1 Hz é necessária para detectar com segurança eventos de comutação de equipamentos.

3.0.3 Métricas de Performance

O termo precisão de desagregação tem sido amplamente utilizado pelos pesquisadores do *NILM* ao se referir ao desempenho dos algoritmos propostos. No entanto, a precisão da desagregação tem uma definição muito vaga, no sentido de que se refere apenas ao grau de proximidade entre o resultado de um determinado algoritmo *NILM* e o resultado verdadeiro.

Nas pesquisas mais recentes é possível encontrar várias formas de definir a proximidade entre os resultados do *NILM* com o resultado real. No entanto, uma vez que todos estes se enquadram no escopo de precisão de desagregação, há uma falta de consenso sobre o que é realmente observado. Por exemplo, em seu trabalho original Hart usou tanto a proporção de eventos de consumo corretamente classificados quanto a proporção de consumo total como métricas de precisão (HART, 1985). Alguns anos mais tarde, o próprio Hart sugeriu que a diferença entre o consumo estimado e o consumo real de cada aparelho deveria ser usado (HART, 1992).

A maioria dos primeiros esforços na pesquisa *NILM* foram dedicados a abordagens baseadas em eventos. Conseqüentemente, várias medidas de precisão de desagregação foram propostas para avaliar tais sistemas. Há casos em que o autor definiu métricas de precisão para detecção de eventos (falha de detecção), classificação (aparelho individual) e computação de potência (diferença entre o consumo real e o previsto) (ZOHA et al., 2012). Abordagens semelhantes, ou seja, considerando diferentes etapas no fluxo de trabalho, foram seguidas por outros autores que propuseram três métricas diferentes para avaliar os sistemas *NILM* (LIANG et al., 2009). Eles levam em consideração os erros de detecção de evento do tipo I (quando nenhum equipamento altera seu estado, mas um evento é detectado) e tipo II (quando um equipamento é alterado, mas nenhum evento é detectado). Para este fim, os autores definiram precisão em termos de precisão de detecção (dada pela razão entre o correto e todos os eventos detectados), precisão de desagregação (excluindo erros de detecção) e precisão geral (incluindo erros de detecção).

Os efeitos dos erros de detecção de eventos tipo I e tipo II desempenham um papel importante nos resultados gerais de desagregação. No entanto, as métricas propostas pressupõem que todos os eventos são de igual importância (ou seja, todos os aparelhos consomem o mesmo), o que está longe de ser uma suposição plausível. Portanto, na tentativa de entender rapidamente a interação entre os erros de detecção e o consumo real de energia, Anderson propôs duas novas métricas: A mudança total de potência e a mudança de potência média, que são a soma e a média, respectivamente, da potência total para todos os erros tipo I e tipo II (ANDERSON et al., 2012).

As abordagens *event-less*, por outro lado, raramente dependem de um processo de detecção de eventos separado e, em vez disso, tentam desagregar a carga total em intervalos de tempo separados usando alguns dos métodos descritos anteriormente. Consequentemente, métricas específicas foram criadas para avaliar tais métodos. Alguns autores propõem uma métrica de precisão que captura o erro total no consumo atribuído pelo consumo real de energia em cada intervalo de tempo médio em todos os aparelhos (KOLTER; JOHNSON, 2011). Outros apresentam uma métrica equivalente, mas que considera o erro individual do aparelho em vez da média entre todos os aparelhos, reduzindo assim a chance de ter grandes erros em determinados intervalos de tempo apenas porque um único aparelho teve um desempenho ruim nesse período (KOLTER; JAAKKOLA, 2012).

Além disso, pesquisadores de abordagens *event-less* também fizeram adequações nas definições de Falso Positivo, Falso Negativo, Verdadeiro Positivo e Verdadeiro Negativo, de forma que métodos estatísticos também possam ser usados para avaliar os algoritmos (BATRA et al., 2014).

4 DESENVOLVIMENTO DO *HARDWARE*

O objetivo do *hardware* proposto é que o mesmo possa ser instalado e utilizado em unidades consumidoras de pequeno porte, como residências e pequenas empresas. Devido à isso, existem algumas limitações que devem ser consideradas no projeto do *hardware*. Entre as questões técnicas que envolvem o projeto, também há a preocupação em manter a privacidade das pessoas que estão sendo monitoradas e garantir a segurança delas. Como a maioria das caixas de distribuição estão dentro de casas ou apartamentos, o sistema deve ser pequeno o suficiente para ser instalado dentro ou próximo das caixas de distribuição, sem maiores complexidades. Devido a esta limitação, o ideal é que o *hardware* seja alimentado pela própria rede que está sendo monitorada, além de possuir comunicação de dados sem fio.

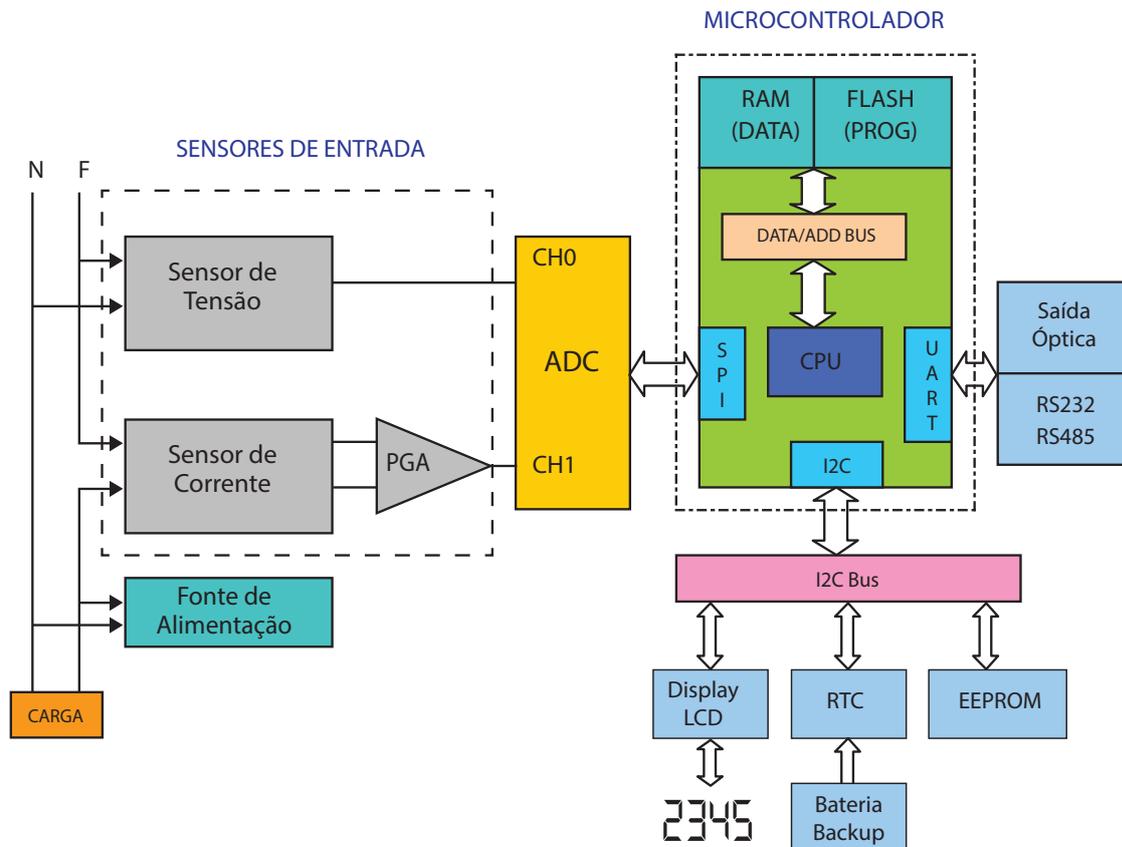
O medidor de energia mede a quantidade de energia elétrica fornecida a uma unidade consumidora. A unidade de medida padrão é o quilowatt-hora (kWh), que é igual à quantidade de energia usada por uma carga de um quilowatt (kW) em uma hora. A Figura 14 mostra um diagrama de blocos de um sistema para um medidor de energia para um sistema monofásico.

O *hardware* do medidor de energia inclui uma fonte de alimentação, uma interface analógica de medição, um microcontrolador e uma interface de comunicação. A interface analógica de medição é a parte que faz interface com a tensão e corrente que estarão sendo medidas, além de converter as altas tensões e altas correntes em tensões suficientemente pequenas para serem medidas diretamente pelo conversor analógico/digital (ADC) do microcontrolador. A amplificação necessária depende da resolução do ADC, bem como da precisão requerida para medição.

O principal componente do circuito é o microcontrolador (*MCU*), que calcula a energia ativa, reativa e aparente com base na medição de tensão e corrente. O ADC faz a amostragem da tensão de entrada e corrente e converte em formato digital. Essas amostras são fornecidas ao *MCU* para calcular as demais grandezas. Além disso, o *MCU* acumula as amostras de tensão e corrente ao longo do tempo. A potência ativa é calculada dividindo esse valor acumulado pelo número de amostras. A multiplicação da energia ativa pelo tempo resulta na energia ativa consumida. As leituras são então transmitidas para um servidor remoto através de uma conexão *wireless*, permitindo o armazenamento remoto das informações e o acesso dos usuários à essas informações.

O medidor de energia também necessita de um relógio de tempo real (*RTC*) para permitir o armazenamento preciso de data e hora mesmo em caso de falta de energia. O *RTC* para essa aplicação deve ser muito preciso, pois qualquer falha nesse componente poderá resultar em um envio de informações conflitantes ao servidor. Além disso, o *RTC*

Figura 14 – Diagrama de blocos do medidor



Fonte: Autor (Adaptado de *Atmel*)

também permitirá dividir as horas do dia em faixas tarifárias, permitindo dessa forma o acompanhamento de estruturas tarifárias horárias, onde tarifas mais altas são aplicadas em horários de ponta e tarifas mais baixas em horários fora do ponta.

Outro ponto relevante para o projeto proposto é o custo final. Obviamente, se o custo do sistema desenvolvido for muito alto, não será rentável ou prático ter esse sistema implantado em pequenas unidades consumidoras, que é o principal foco.

É requisito principal do sistema ora proposto adquirir dados de um único ponto da unidade consumidora, e também fornecer aos usuários *feedback* sobre seu consumo de energia, em tempo real.

As medições são feitas combinando corrente e tensão medidas a partir da alimentação principal. A seleção desse ponto de detecção permite a coleta de uma medição centralizada, abrangendo todo o consumo da unidade consumidora. Os valores medidos são então usados nos algoritmos para detecção, classificação e desagregação do consumo em equipamentos individuais. Os dados de consumo de energia e de eventos de energia são armazenados em um

banco de dados para fornecer *feedback* aos usuários. O sistema proposto é uma combinação de *hardware* (sensores e módulo de medição) e *software* (algoritmos de cálculo de potência, desagregação de consumo e *feedback* aos usuários).

4.1 MEDIÇÃO DE TENSÃO E CORRENTE

O voltímetro é o instrumento usado para medir a tensão ou diferença de potencial elétrico entre dois pontos em circuitos elétricos básicos. Voltímetros analógicos movem um ponteiro através de uma escala proporcional à tensão do circuito. Os voltímetros podem ter uma precisão de alguns por cento da escala total e são usados com tensões de uma fração de volt a vários milhares de volts. Pode-se classificar em Corrente Contínua (CC) e Corrente Alternada (CA). Embora as medições de tensão sejam o mais simples dos diferentes tipos de medições analógicas, elas apresentam desafios únicos devido a considerações de ruído.

A forma mais comum de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica é pelo sistema trifásico. O Brasil, ao contrário de vários países, não possui uma tensão definida para esses sistemas, podendo causar confusão na hora de usar a energia elétrica.

Nos sistemas trifásicos a distribuição é feita por 4 fios, destes 3 possuem tensão e são chamadas fases e um neutro. Esse sistema recebe o nome de sistema trifásico em estrela. Percebe-se que cada tensão tem outro valor associado a ele. Por exemplo, na tensão 127V/220V o valor 127V é obtido quando se mede a tensão entre uma das fases e o neutro. O valor 220V é obtido quando se mede a tensão entre duas fases. Ou seja, o segundo valor é a tensão da linha da rede trifásica dividido pela raiz de 3.

No Brasil existem duas tensões de geração de energia elétrica disponíveis à pequenos consumidores, a 220V e 380V. No início do fornecimento da energia elétrica, no sistema trifásico, havia apenas a tensão 127V/220V para a distribuição. Porém, ao usar uma tensão menor, necessita-se de mais corrente elétrica para suprir a potência do sistema, o que resulta na necessidade de ter transformadores e cabos para tensão 127/220V mais robustos. Assim, pelo lado econômico, pensou-se em aumentar a tensão para 380V, pois assim a corrente seria menor para gerar a mesma potência, resultando em transformadores e condutores menores e mais leves. As primeiras regiões a receberem uma rede de energia elétrica possuem tensão de 127/220V enquanto a outras cidade que receberam o fornecimento mais tarde possuem um sistema de 220V/380V, conforme Tabela 5. A tensão de fornecimento, salvo algumas exceções, está disponível na Tabela 6.

O fornecimento de energia para as unidades consumidoras residenciais, comerciais e industriais pode ser feito por meio de sistemas monofásicos, bifásicos ou trifásicos. A utilização de cada sistema de transmissão ocorre a partir do tipo de estabelecimento que receberá a energia elétrica e da potência total dos equipamentos elétricos ligados à rede.

Tabela 5 – Tensões de Fornecimento de Energia no Brasil

Tensão de Distribuição	Ligação Fase + Neutro	Ligação Fase + Fase
220V	127V	220V
380V	220V	380V

Fonte: Autor

Tabela 6 – Tensão de Fornecimento por Estado

Estado	Tensão Sistema Trifásico	Frequência
Acre	220 V	60 Hz
Alagoas	380 V	60 Hz
Amapá	220 V	60 Hz
Amazonas	220 V	60 Hz
Bahia	380 V	60 Hz
Ceará	380 V	60 Hz
Distrito Federal	380 V	60 Hz
Espírito Santo	220 V	60 Hz
Goiás	380 V	60 Hz
Maranhão	380 V	60 Hz
Mato Grosso	220 V	60 Hz
Mato Grosso do Sul	220 V	60 Hz
Minas Gerais	220 V	60 Hz
Pará	220 V	60 Hz
Paraíba	380 V	60 Hz
Paraná	220 V	60 Hz
Pernambuco	380 V	60 Hz
Piauí	380 V	60 Hz
Rio de Janeiro	220 V	60 Hz
Rio Grande do Norte	380 V	60 Hz
Rio Grande do Sul	380 V	60 Hz
Rondônia	220 V	60 Hz
Roraima	220 V	60 Hz
Santa Catarina	380 V	60 Hz
São Paulo	220 V	60 Hz
Sergipe	380 V	60 Hz
Tocantins	380 V	60 Hz

Fonte: Word Standards, 2007

No sistema monofásico, a rede elétrica é fornecida com dois fios, sendo uma fase e um neutro. A única ligação possível é através da combinação fase+neutro, onde a tensão elétrica obtida será de 110V ou 127V, nas regiões atendidas por sistema trifásico 220V ou nas regiões

atendidas por sistema trifásico 380V será de 220V. Redes monofásicas são fornecidas somente quando a soma das potências de todos os equipamentos de uma unidade consumidora não ultrapassa o valor máximo de 8.000W.

No sistema bifásico, a rede elétrica é fornecida com três fios, sendo duas fases e um neutro. Esse tipo de fornecimento torna possível combinar fase+neutro ou fase+fase para obter diferentes tensões elétricas, que poderão variar entre 110V, 127V ou 220V. Sistemas bifásicos são em geral utilizados para unidades consumidoras com potência instalada entre 8.000W até 25.000W.

No sistema trifásico, a rede elétrica é composta por quatro fios, sendo três fases e um neutro. Assim como no fornecimento bifásico, também é possível combinar fase+neutro ou fase+fase para obter diferentes tensões elétricas, que poderão ser de 127V, 220V ou 380V. Esse tipo de fornecimento é indicado para unidades consumidoras com potência instalada acima de 25.000W e também pode ser utilizada em unidades consumidoras que não atingem essa potência, mas que, no entanto, possuem equipamentos que necessitem de alimentação trifásica, como é o caso e alguns motores.

Uma medição de tensão em corrente alternada será necessária para obter a tensão instantânea fornecida, que será utilizada para calcular a potência ativa, a potência aparente e o fator de potência. Essa medição pode ser feita com maior facilidade e segurança usando um transformador ou adaptador AC para AC. O transformador ou adaptador fornece um isolamento entre a rede elétrica fornecida e o ambiente de medição.

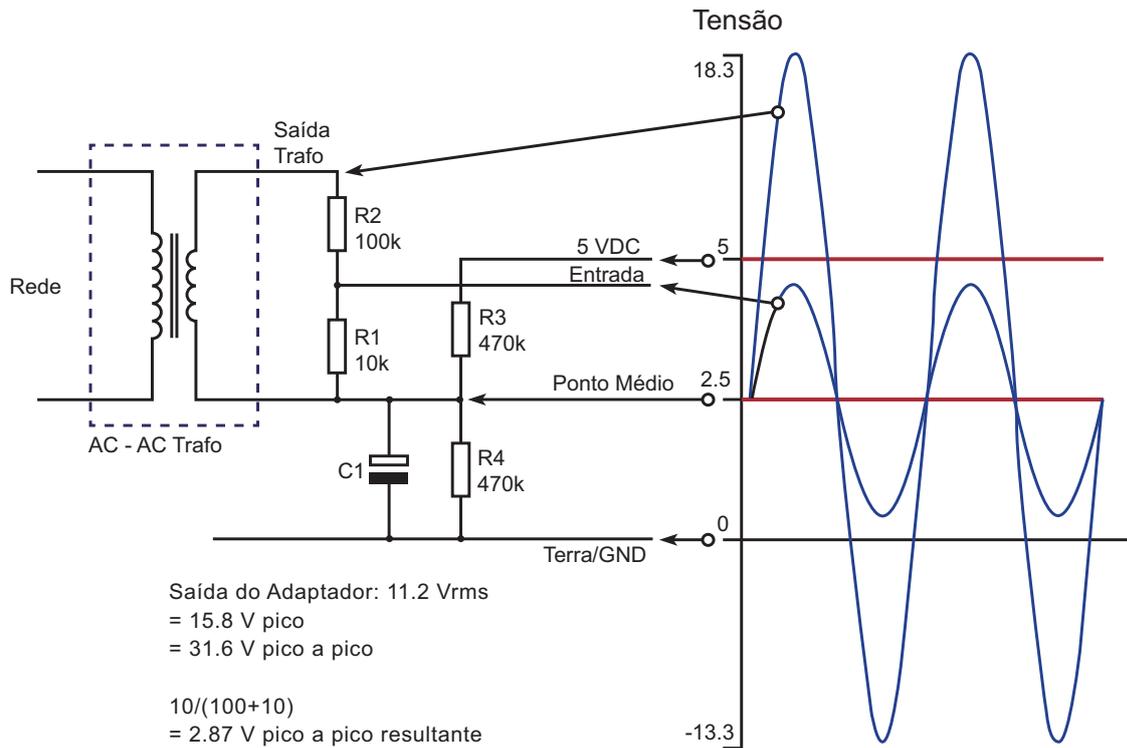
O *hardware* apresentado pode ser utilizado em unidades consumidoras servidas por sistemas monofásicos, bifásicos ou trifásicos, atendidos por distribuição 220V ou 380V. Dessa forma, foi projetada a medição de tensão levando em consideração todas as faixas possíveis de tensão. Utilizou-se também o ponto de medição de tensão para a alimentação do *hardware*.

Os adaptadores de energia CA para CA estão disponíveis em diferentes voltagens, e o sinal de saída do adaptador de tensão CA é uma forma de onda quase senoidal. Utilizando um adaptador de energia de 9V, o pico de voltagem positivo será de 12,7V, o pico negativo de -12,7V. No entanto, devido às características desse tipo de adaptador, quando o mesmo é utilizado descarregado, ou seja, sem nenhuma carga, como é o caso, a saída pode variar, geralmente entre 10-12V, fornecendo uma tensão de pico de 14-17V. A tensão de saída do transformador será sempre proporcional à tensão de entrada de CA, dessa forma pode-se inferir as tensões medidas através de uma equação linear.

Para adequar os valores medidos com os parâmetros do microcontrolador, foi implementado um circuito eletrônico que condiciona o sinal, convertendo a saída do adaptador para uma forma de onda que tenha um pico positivo menor que 5V e um pico negativo que seja maior que 0V. Essa é a faixa de medição para a porta de entrada de sinal analógico do microcontrolador.

A forma de onda pode ser reduzida usando um divisor de tensão conectado aos terminais do adaptador, e o *offset* (polarização) pode ser adicionado usando uma fonte de tensão criada por outro divisor de tensão conectado à fonte de alimentação do microcontrolador, como verificar-se na Figura 15.

Figura 15 – Diagrama do circuito e formas de onda da tensão



Fonte: Autor (Adaptado de *OpenEnergyMonitor*)

No circuito apresentado, os resistores R1 e R2 formam um divisor de tensão que diminui a tensão CA do adaptador de energia. Os resistores R3 e R4 polarizam a tensão. O capacitor C1 fornece um caminho de baixa impedância ao terra para o sinal AC, e seu valor não é relevante, valores entre $1\mu F$ e $10\mu F$ são satisfatórios.

Os valores de R1 e R2 precisam ser escolhidos para fornecer uma saída de voltagem de pico de 1V. Para um adaptador CA-CA com uma saída de 9V, uma combinação de resistor de 10k para R1 e 100k para R2 é adequada.

$$tensao_{saida} = \frac{R1}{(R1 + R2)} \times tensao_{entrada} \quad (3)$$

$$tensao_{saida} = \frac{10k}{(10k + 100k)} \times 12.7V = 1.15V$$

A polarização de tensão fornecida por R3 e R4 deve ser metade da tensão de alimentação do microcontrolador. Dessa forma, R3 e R4 precisam ser de mesmo valor, utilizando-se resistores de 470k.

Como o microcontrolador empregado funciona com uma tensão de 5V, a forma de onda resultante terá um pico positivo de $2,5V + 1,15V = 3,65V$ e pico negativo de 1,35V, satisfazendo os requisitos de tensão da porta analógica do microcontrolador. Esses valores consideram também alguma folga para minimizar o risco de excesso ou de baixa tensão.

Ao projetar qualquer circuito, é necessário levar em conta as variações inevitáveis que surgem como parte do processo de fabricação e que podem levar à alteração do valor de alguma característica do componente eletrônico, como por exemplo a resistência de um resistor ou a tensão de um regulador, diferindo do valor nominal ou desejado.

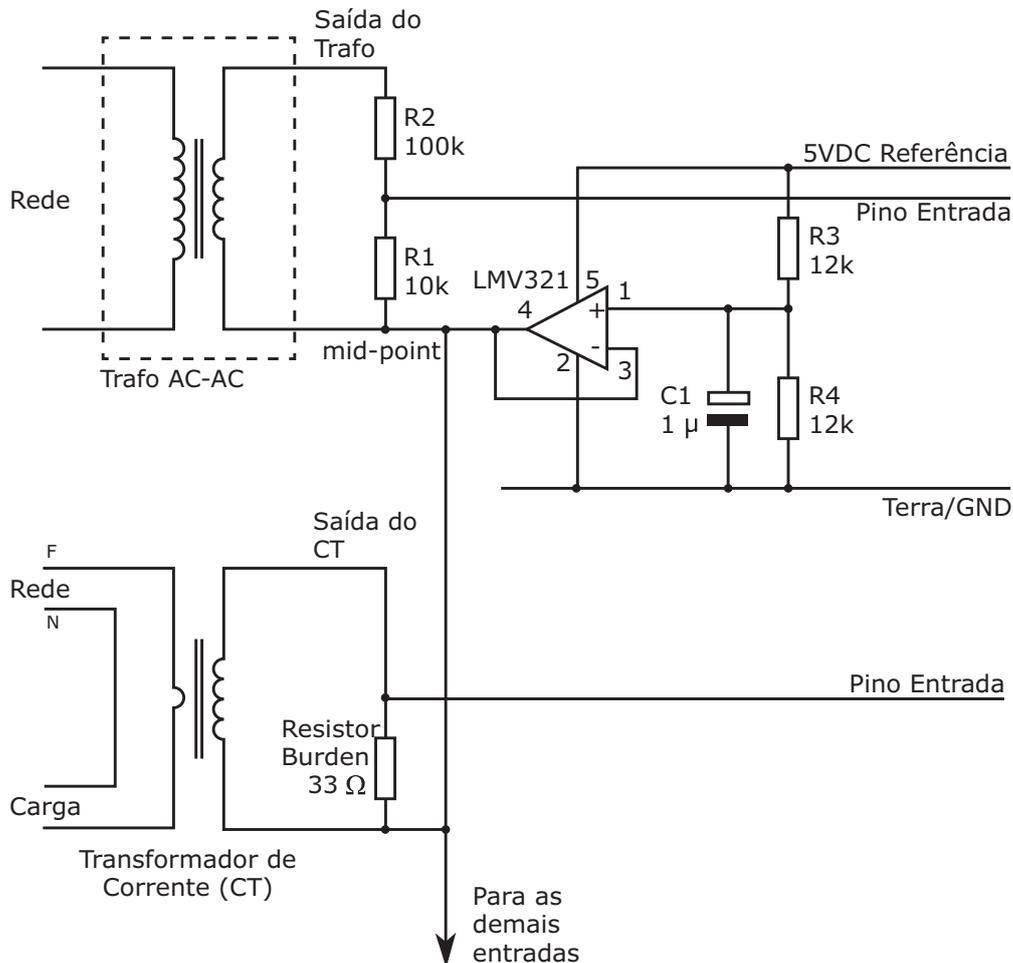
O circuito de polarização de tensão com um adaptador CA para CA tem algumas limitações, e se for necessária alta precisão, pode ser melhorado adicionando um amplificador operacional, como se observa na Figura 16. O amplificador operacional isola a tensão do ponto intermediário entre R3 e R4 do adaptador e do divisor de tensão. Isso reduz significativamente a impedância da fonte de tensão, resultando em melhor desempenho.

Na aplicação proposta para o medidor eletrônico de energia, a tensão em corrente continua será usada somente para o microcontrolador e alguns outros componentes de baixa tensão. Fontes de alimentação baseadas em transformadores ou comutadores não seriam soluções economicamente viáveis para essa aplicação. As soluções baseadas em transformadores e os conjuntos formados por indutor/*MOSFET*/controlador possuem um custo relativamente elevado além de ocupar uma quantidade considerável de espaço. O custo e o tamanho dos componentes relacionados à fonte de alimentação podem ser significantes no projeto final, por esse motivo algumas alternativas foram estudadas.

Em resumo, existem vários métodos para a medição de tensão e corrente, cada um com suas vantagens e desvantagens. A tensão precisa ser reduzida para a faixa de leitura do ADC através de um circuito divisor de tensão. A corrente é medida por um transdutor. O transdutor pode ser do tipo *Shunt*, que requer a interrupção do circuito, ou CT que efetua a medição através do campo magnético gerado. Os dois modelos tem suas vantagens e desvantagens. A Figura 17 apresenta alguns exemplos de sensores de corrente *Shunt*.

A queda de tensão no transdutor do tipo *Shunt* é proporcional à corrente requerida pela carga. Esta queda de tensão é então interpretada como o sinal de entrada de corrente. O sensor de corrente do tipo *Shunt* funciona ligado em série com a carga, ou seja, para sua instalação é necessária a interrupção do circuito. Esse requisito, por si só, já inviabiliza o uso desse modelo de sensor nesse projeto, pois o objetivo é que a instalação ocorra de forma mais simples possível.

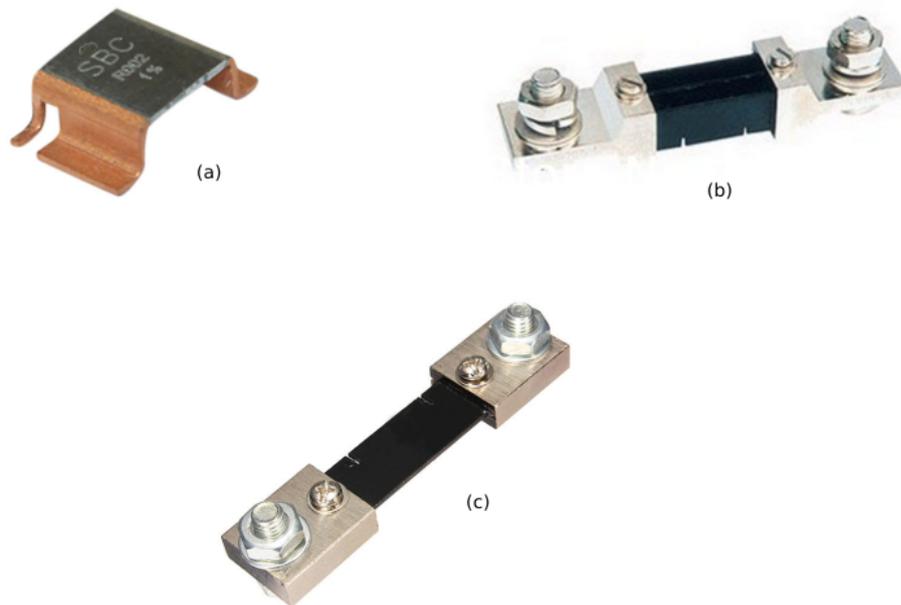
Figura 16 – Circuito de tensão com amplificador operacional



Fonte: Autor (Adaptado de *OpenEnergyMonitor*)

A corrente também pode ser medida por Transformadores de Corrente (CT). O sensor do tipo CT também pode fornecer isolamento galvânica em seu enrolamento primário, aumentando dessa forma a segurança na instalação. Os transformadores de corrente são baseados em núcleos magnéticos que em determinadas condições podem saturar e exibir uma resposta de fase não linear, causando erros de medição, por isso é necessário implementar uma funcionalidade de correção de fase. A Figura 18 apresenta alguns exemplos de sensores de corrente do tipo CT.

Em ambos os casos, está sujeita a instalação em um local com a presença de ruídos, por isso é necessário um circuito suplementar que promova a devida filtragem e amplificação dos sinais antes do fornecimento ao ADC, para que a medição seja obtida com a máxima precisão. A Figura 19 mostra um diagrama de implementação do filtro de entrada analógico.

Figura 17 – Modelos de sensor de corrente *Shunt*

Fonte: Autor (Imagens obtidas na internet)

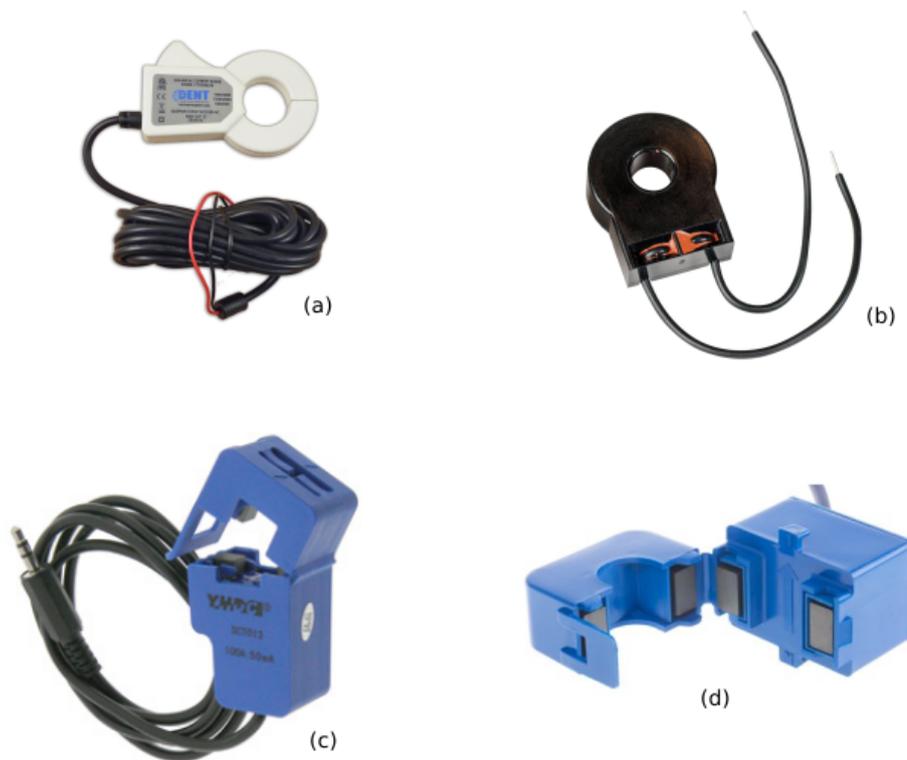
4.2 CONVERSOR ANALÓGICO-DIGITAL (ADC)

O medidor eletrônico de energia depende de uma conversão analógico-digital de alta precisão. Essa função é realizada pelo conversor Analógico/Digital (ADC). O ADC coleta amostras instantâneas dos sinais analógicos em função do tempo. Essas amostras instantâneas ou sinais de tempo são então convertidos em valores numéricos pelo ADC, conforme mostrado na Figura 20.

De acordo com o teorema *Nyquist*, a frequência máxima do sinal de entrada deve ser menor ou igual a metade da taxa de amostragem, caso contrário, o sinal de entrada pode receber sinais dispersos (como a frequência da rede elétrica, por exemplo) que podem conter frequências mais altas que a frequência de *Nyquist*. Essas frequências podem influenciar o sinal real, conduzindo, dessa forma a resultados imprecisos. Para garantir o conteúdo da frequência do sinal de entrada, um filtro *anti-aliasing*, ou seja, um filtro que passa baixas frequências, mas atenua as altas frequências, foi adicionado antes da entrada do ADC.

A entrada de tensão faz interface com tensões de amplitude considerável, o que a torna uma fonte potencial de ruído. As perturbações emitidas nos circuitos de medição de tensão e corrente, podem interferir no sinal real a ser medido. Normalmente, isso é constatado como um erro não linear em pequenas amplitudes de sinal. No fator de potência unitário, os sinais de tensão e corrente estão em fase e o *crosstalk* entre os canais de tensão e corrente

Figura 18 – Modelos de sensor de corrente CT

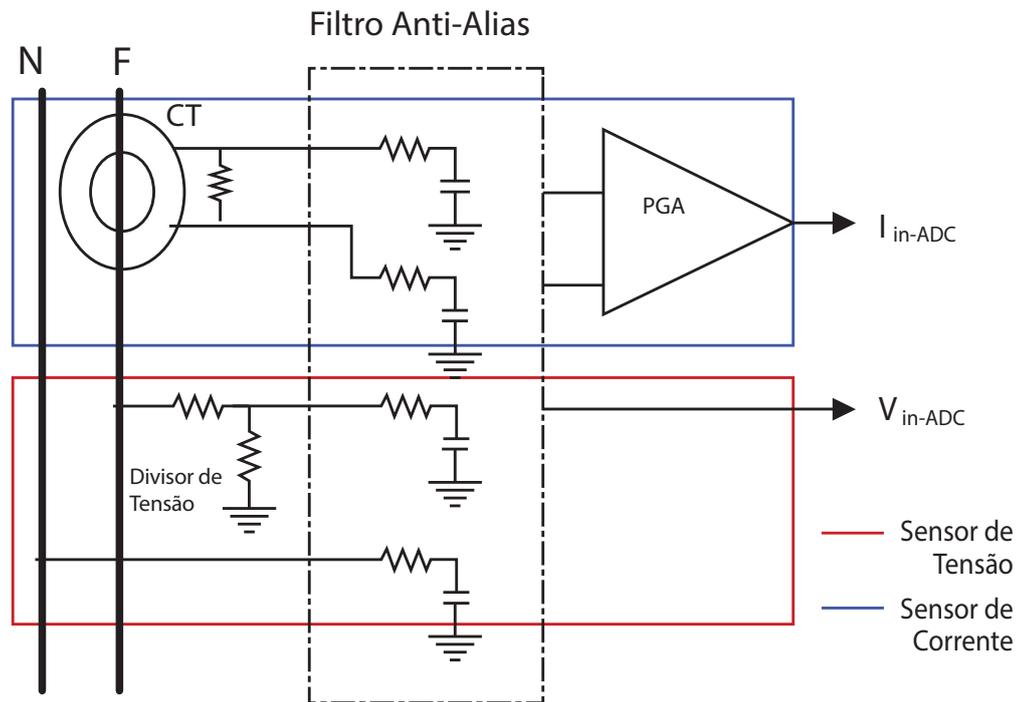


Fonte: Autor (Imagens obtidas na internet)

aparece apenas como um erro de ganho, o que pode ser facilmente corrigido durante a calibração. Quando a tensão e a corrente não estiverem em fase, o *crosstalk* terá um efeito não linear nas medições, o que não pode ser corrigido pela calibração. Sinais de corrente com baixa amplitude são amplificados antes de serem amostrados e processados, o que significa que qualquer ruído no sinal será também ampliado. Esses ruídos e erros de *crosstalk* podem ser minimizados por meio do bom planejamento das placas de circuito impresso e do uso de componentes de boa qualidade.

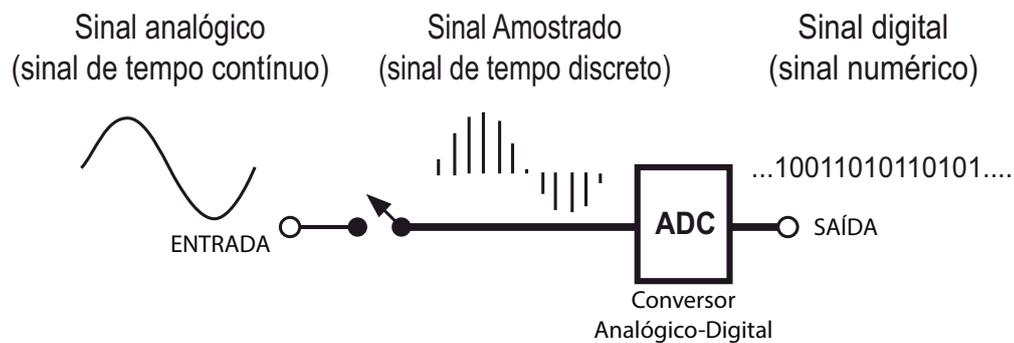
O *ADC* utilizado no projeto deverá possuir precisão suficiente para a aplicação, e por esse motivo deverá ter alta resolução, normalmente acima de 12 bits e conseqüentemente uma ampla faixa dinâmica. Além disso, uma alta taxa de amostragem é necessária, com valores entre 2.000 e 4.000 amostras por segundo. Uma regra básica da teoria de amostragem afirma que a taxa (frequência) de amostragem deve ser pelo menos o dobro da frequência mais alta de sinal. Isso é conhecido como taxa de *Nyquist*. Nossa aplicação exigirá uma medição precisa do conteúdo de frequência até a 20ª harmônica, que é de 1,2 kHz no caso de uma rede elétrica de 60 Hz.

Figura 19 – Diagrama de implementação do filtro de entrada analógico



Fonte: Autor (Adaptado de Atmel)

Figura 20 – Fluxo de conversão analógico-digital



Fonte: Autor (Adaptado de Atmel)

O ADC incorporado ao microprocessador tem resolução de 12 bits e é capaz de converter até dois milhões de amostras por segundo (msps). A seleção de entrada é flexível, e podem ser efetuadas tanto medições de terminação única quanto diferenciais. Para medições diferenciais, um estágio de ganho opcional pode ser utilizado para aumentar a faixa dinâmica. Além disso, várias entradas internas de sinal estão disponíveis.

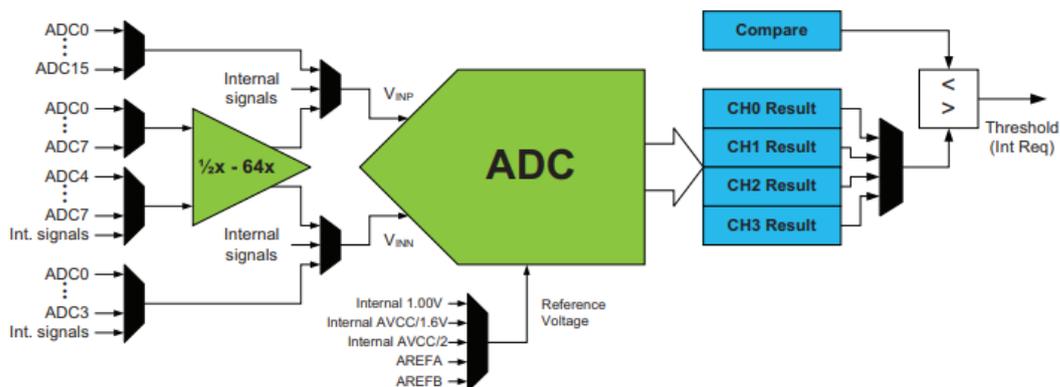
O *ADC* consiste em vários estágios consecutivos. O *design* de *pipeline* permite uma alta taxa de amostragem em uma baixa frequência de *clock* do sistema. Isso também significa que uma nova entrada pode ser amostrada e uma nova conversão *ADC* iniciada enquanto outras conversões do *ADC* ainda estão em andamento. Isso remove dependências entre a taxa de amostragem e o atraso de propagação.

O *ADC* possui quatro canais de conversão com seleção de entrada individual, registros de resultados e controle de início de conversão. O *ADC* pode, então, manter e usar quatro configurações e resultados paralelos, o que facilita o uso de aplicativos com alta taxa de transferência de dados ou de vários módulos usando o *ADC* de forma independente. É possível usar o *DMA* para mover os resultados do *ADC* diretamente para a memória ou periféricos quando as conversões são feitas. Ambas as tensões de referência interna e externa podem ser usadas. Um sensor de temperatura integrado está disponível para uso com o *ADC*.

O *ADC* tem uma função de comparação para monitoramento preciso de limites definidos pelo usuário com a mínima intervenção de *software* necessária.

Duas entradas podem ser amostradas simultaneamente, já que tanto o *ADC* quanto o estágio de ganho incluem circuitos de amostragem e de retenção, e o estágio de ganho tem ajuste de ganho de 1x. Quatro entradas podem ser amostradas dentro de $1,5 \mu\text{s}$ sem a necessidade de qualquer intervenção do *software*. O *ADC* pode ser configurado para amostrar resultados em 8 ou 12 bits, reduzindo o tempo mínimo de conversão (atraso de propagação) de $3,5 \mu\text{s}$ em 12 bits para $2,5 \mu\text{s}$ para resultados amostrados em 8 bits. Os resultados da conversão do *ADC* são fornecidos à esquerda ou à direita ajustados com preenchimento opcional de "1" ou "0". Isso facilita o cálculo quando o resultado é representado através de um número inteiro com sinal, sendo que, nesse caso será utilizado um número de 16 bits com sinal. A Figura 21 mostra uma visão geral do *ADC* incorporado ao microprocessador.

Figura 21 – Visão geral do *ADC* embutido no microprocessador



Fonte: Autor (Adaptado de Atmel)

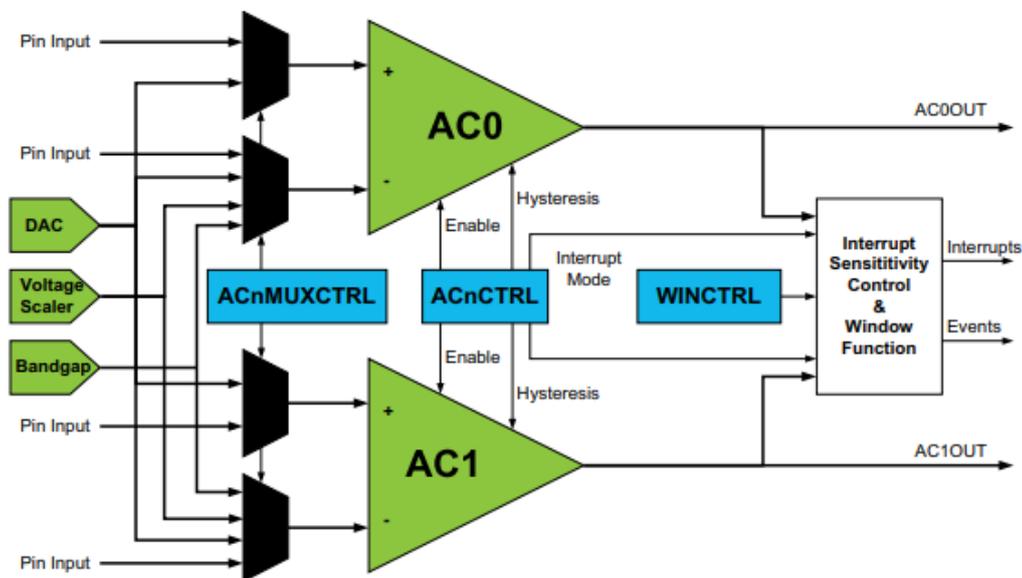
4.3 COMPARADOR ANALÓGICO

O comparador analógico (AC) compara os níveis de tensão em duas entradas analógicas e fornece uma saída digital com base nessa comparação. O comparador analógico pode ser configurado para gerar solicitações de interrupção ou eventos em diversas combinações diferentes conforme o resultado da comparação das entradas.

Duas propriedades importantes do comportamento dinâmico do comparador analógico são a histerese e o atraso de propagação. Ambos os parâmetros podem ser ajustados para obter a operação ideal para cada aplicação.

A seleção de entrada inclui pinos de porta analógica, vários sinais internos e um *scaler* de tensão programável de 64 níveis. O estado de saída do comparador analógico também pode ser redirecionado para um pino para uso por dispositivos externos. Uma visão geral do comparador analógico está na Figura 22.

Figura 22 – Visão geral do comparador analógico

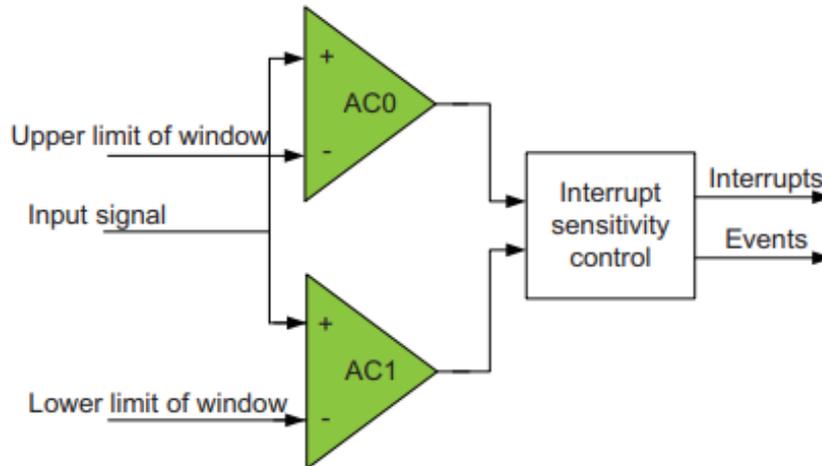


Fonte: Autor (Adaptado de Atmel)

Uma fonte de corrente constante pode ser ativada e redirecionada para um determinado pino de saída, permitindo substituir, por exemplo, resistores externos usados para carregar capacitores em aplicações de sensor capacitivo. Os comparadores analógicos são sempre agrupados em pares em cada porta. Estes são denominados comparador analógico 0 (AC0) e comparador analógico 1 (AC1). Eles têm comportamento idêntico, mas registradores de controle separados. Usados como par, eles podem ser configurados em modo de janela para comparar um sinal amostrado a uma faixa de tensão ao invés de um nível de tensão, por exemplo.

A função de comparador em modo de janela é realizada conectando as entradas externas dos dois comparadores analógicos em um par, conforme Figura 23.

Figura 23 – Comparador analógico em modo janela



Fonte: Autor (Adaptado de Atmel)

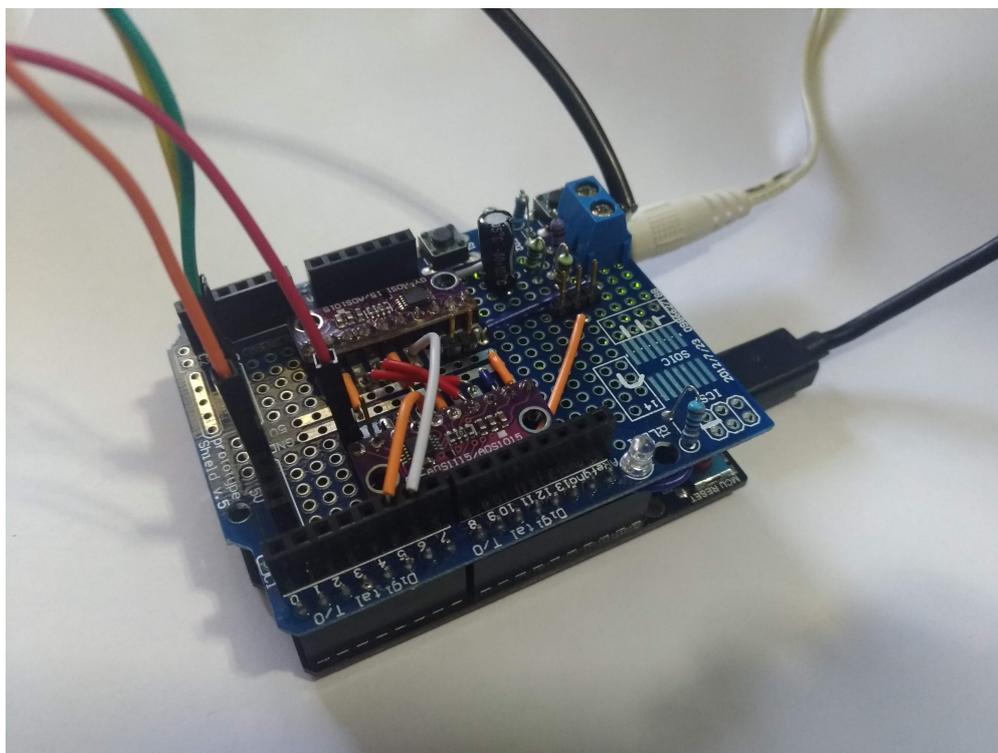
4.4 MICROCONTROLADOR

O primeiro protótipo do medidor de energia, apresentado na Figura 24, baseou-se no microcontrolador ATmega328 fabricado pela Atmel, tendo sido o principal foco, nessa caso, o baixo custo e a facilidade de implementação. Devido às limitações técnicas desse microcontrolador, principalmente no que tange à baixa capacidade de processamento, foi desenvolvido um segundo protótipo.

O segundo protótipo do medidor de energia, apresentado na Figura 25, baseou-se no microcontrolador SAM3X8E, também fabricado pela Atmel, mas que consiste de um microcontrolador ARM Cortex-M3 de 32 bits. Este projeto, apesar de ter um custo sensivelmente mais alto que o primeiro, ainda é uma solução de baixo custo, considerando todos os requisitos para o medidor de energia discutidos nas seções anteriores. O diagrama de blocos do medidor de energia proposto é mostrado na Figura 26.

Em referência aos requisitos do ADC para o medidor de energia, o ADC deve ser de baixo custo, capaz de prover uma alta taxa de amostragens e possuir uma faixa dinâmica relativamente ampla. O projeto usa os conversores integrados de 12 bits e ganho flexível para medir corrente. O ADC integrado ao microcontrolador utilizado é capaz de converter até dois milhões de amostras por segundo. Devido às características do microcontrolador utilizado, não será necessário utilizar um amplificador de ganho externo.

Figura 24 – Protótipo 1: Microcontrolador ATmega328



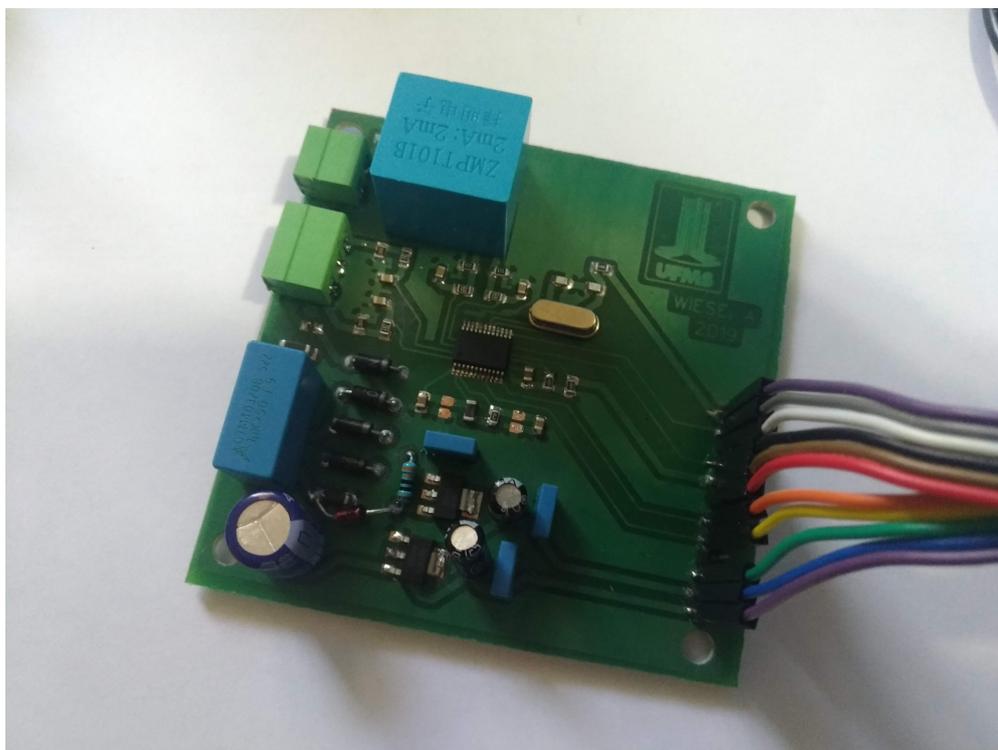
Fonte: Autor

O projeto proposto utiliza dois elementos de medição de corrente para medir a potência ativa nos caminhos de avanço e retorno da corrente. Isso permite que o medidor detecte, indique e obtenha medições com confiabilidade em unidades consumidoras que façam uso de fontes de produção própria de energia. O medidor é facilmente configurado para se ajustar a qualquer configuração de tensão e corrente. Foram aplicados testes quando à precisão com diferentes faixas de tensão, utilizando um algoritmo de calibração automatizada que foi implementado em *software*. A memória interna do microcontrolador é usada para armazenar os coeficientes de calibração, informações sobre as tarifas e horários de utilização e outros dados de registro. Isso elimina a necessidade de uma memória externa.

Toda a inteligência do medidor é o *software* desenvolvido para essa aplicação, que é fornecido em código aberto. O *software* foi totalmente escrito em C++, o que facilita a implementação de novas funções ou características. Os detalhes do *software* serão apresentados no próximo capítulo.

Foi implementada uma fonte de alimentação capacitiva regulada, condicionamento de sinais para medição de tensão e corrente, uma interface simples através de um *display* LCD e alguns botões e uma interface de comunicação *wireless*.

Figura 25 – Protótipo 2: Microcontrolador SAM3X8E

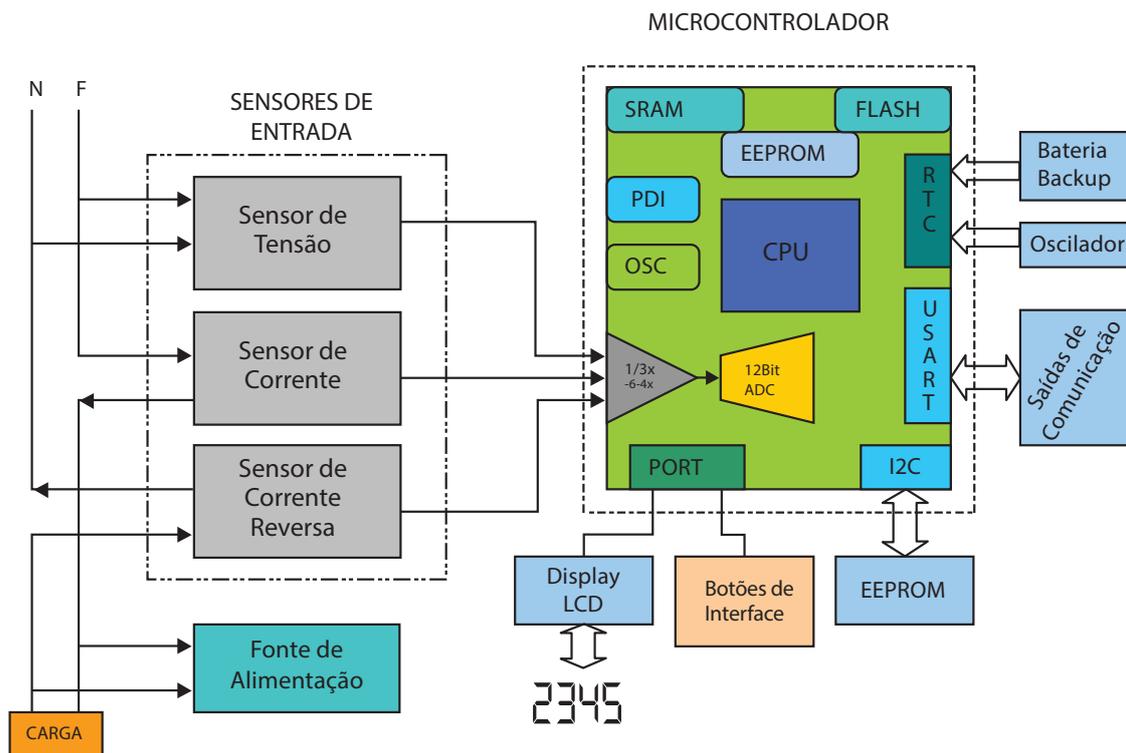


Fonte: Autor

A fonte de alimentação utilizada é do tipo capacitiva, sem utilização de transformador, fornecendo uma alternativa simples, de baixo custo, menor espaço ocupado e maior imunidade à interferências. O circuito da fonte de alimentação capacitiva é mostrado na Figura 27.

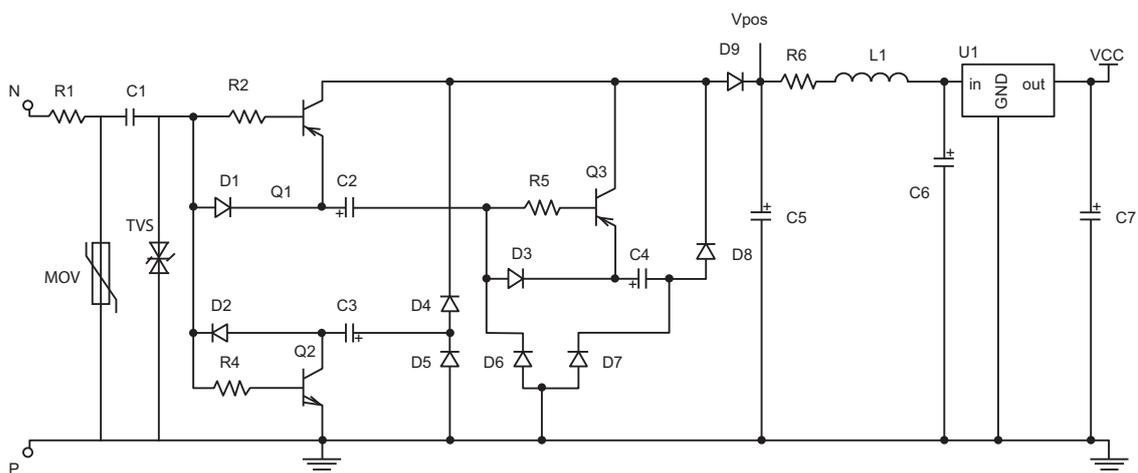
O circuito utilizado funciona tanto no ciclo positivo quanto no negativo da entrada CA e por esse motivo oferece uma saída regulada e estabilizada, ideal para a aplicação. O princípio de funcionamento da fonte de alimentação de baixa corrente é que ela usa a mesma corrente para carregar vários capacitores ao mesmo tempo. Este método resulta em maior eficiência energética, menor corrente de entrada para a mesma potência de saída e menor valor do capacitor de entrada. Alguns cuidados devem ser tomados para evitar a ocorrência de sobretensão nos capacitores, pois como não há componentes que limitem a tensão de carga nos mesmos, então, para evitar danos ao capacitor devido a surtos ou em caso de sobretensão na entrada da rede elétrica, foi utilizado um diodo *Zener* AC após o capacitor de alta tensão. Além disso, um resistor de $100\ \Omega$ (R1) foi colocado no lado da alta tensão para reduzir a tensão de surto para o diodo *Zener*.

Figura 26 – Diagrama de blocos do medidor proposto



Fonte: Autor (Adaptado de Atmel)

Figura 27 – Diagrama da fonte de alimentação capacitiva



Fonte: Autor

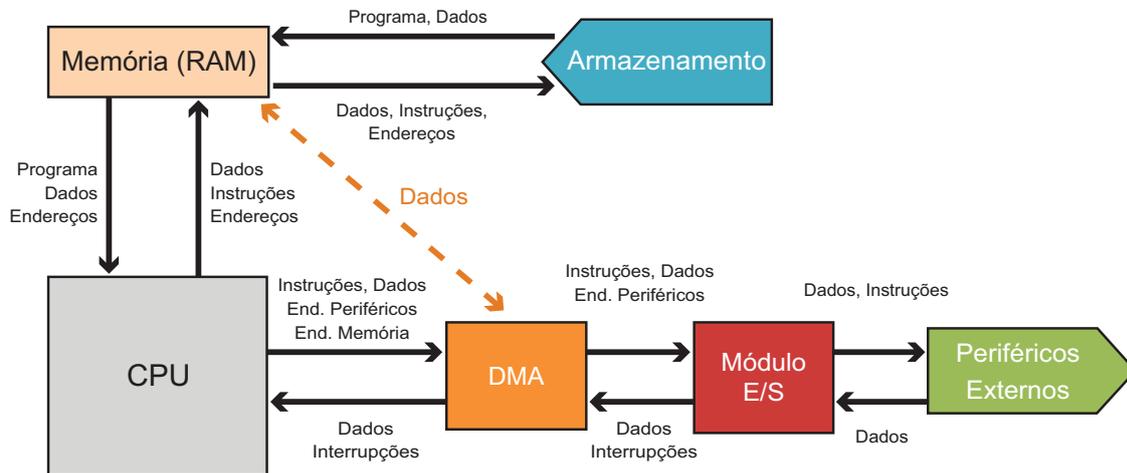
O projeto utiliza um sensor de corrente do tipo transformador de corrente (CT) para medir corrente de fase com a aplicação de um filtro *anti-aliasing* e transformador de corrente para medir a corrente reversa. A conversão dos sinais de entrada analógica para digital é feita pelo *ADC* interno do microcontrolador. Como o microcontrolador possui amplificador de ganho interno, não foi necessário implementar nenhum amplificador de ganho externo.

4.4.1 Acesso Direto à Memória (*DMA*)

O controlador de acesso direto à memória de quatro canais (*DMA*) pode transferir dados entre a memória e periféricos liberando, dessa forma, essas tarefas da *CPU* e permitindo, ainda, altas taxas de transferência de dados com mínima intervenção da *CPU*. Os quatro canais *DMA* permitem até quatro transferências independentes e paralelas. O controlador *DMA* pode mover dados entre a memória *SRAM* e os periféricos, entre diferentes locais da memória *SRAM* e diretamente entre periféricos. Com acesso a todos os periféricos, o controlador de *DMA* pode gerenciar a transferência automática de dados entre os módulos de comunicação. O controlador *DMA* também pode efetuar a leitura da memória *EEPROM*.

As transferências de dados são feitas em fluxos contínuos de 1, 2, 4 ou 8 *bytes*, formando blocos de tamanho configurável entre 1 *byte* a 64 *KB*. Um contador de repetição pode ser usado para repetir cada transferência de bloco para transações únicas de até 16 *MB*. O endereçamento de origem e de destino pode ser estático, incremental ou decremental, e o recarregamento automático de origem e/ou destino dos endereços podem ser feitos após cada transferência, ou quando uma transação é concluída. *Software*, periféricos e eventos podem acionar transferências de *DMA*, sendo que os quatro canais *DMA* possuem configurações individuais, incluem origem, destino, acionadores e tamanho da transação. O diagrama de funcionamento do *DMA* pode ser visto na Figura 28.

Figura 28 – Diagrama de funcionamento do *DMA*



Fonte: Autor (Adaptado de Atmel)

Com configurações individuais de interrupção, os pedidos de interrupção podem ser gerados quando a transação está concluída ou quando o controlador *DMA* detecta um erro em um canal específico. Para permitir transferências contínuas, dois canais podem ser interligados para que o segundo assuma a transferência quando o primeiro estiver concluído e vice-versa.

4.4.2 Sistema de Eventos

O sistema de eventos permite comunicação e sinalização direta entre diferentes periféricos. Ele permite que uma mudança no estado de um periférico acione ações automaticamente em outros periféricos. Ele é projetado para fornecer um sistema previsível para tempos de resposta curtos. Ele permite o controle periférico autônomo e a interação sem o uso de interruptores, recursos de controlador de *CPU* ou *DMA* e, portanto, é uma ferramenta poderosa para reduzir a complexidade, o tamanho e o tempo de execução do código do aplicativo. Também permite sincronizar as ações em vários módulos periféricos.

Uma alteração no estado de um periférico é chamada de evento e geralmente corresponde às condições de interrupção do periférico. Os eventos podem ser transmitidos diretamente para outros periféricos usando uma camada de roteamento dedicada chamada de rede de roteamento de eventos. A forma como os eventos são roteados e utilizados pelos periféricos pode ser configurada via *software*.

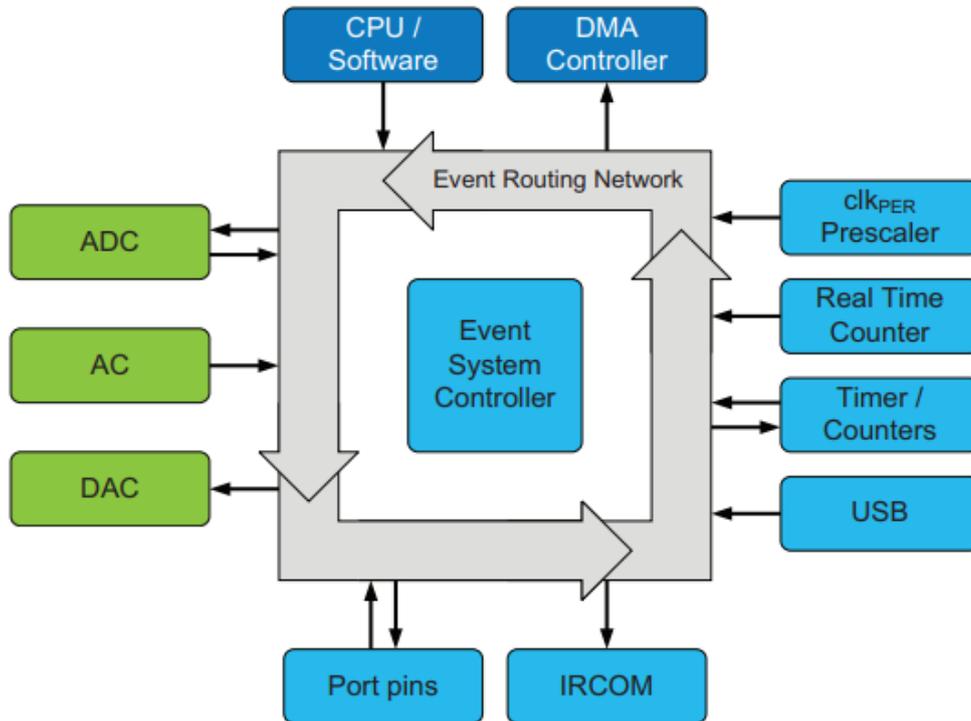
A Figura 29 mostra um diagrama básico de todos os periféricos interligados. O sistema de eventos pode conectar diretamente os conversores analógicos e digitais, comparadores analógicos, pinos de porta de entrada e saída, relógio de tempo real, temporizadores, contadores, módulos de comunicação e interface USB. Também pode ser usado para acionar transações no controlador *DMA*. Os eventos também podem ser gerados a partir do *software* e do relógio.

A rede de roteamento de eventos consiste em oito multiplexadores configuráveis por *software* que controlam como os eventos são roteados e utilizados. Eles são chamados de canais de eventos e permitem até oito configurações de roteamento de eventos paralelos. A latência máxima de roteamento é de dois ciclos de *clock*. O sistema de eventos funciona tanto no modo ativo quanto no modo inativo.

4.4.3 Relógio do Sistema e Relógio de Tempo Real

O microprocessador inclui um sistema de relógio de tempo real que suporta um grande número de fontes. É possível a utilização de osciladores internos de precisão, osciladores externos de cristal e também suporte ao uso de ressonador. Um circuito fechado de fase de alta frequência (*PLL*) e *prescalers* de relógio podem ser usados para gerar uma ampla faixa de frequências de *clock*. Um recurso de calibração (*DFLL*) está disponível e pode ser usado para calibração automática em tempo de execução dos osciladores internos para remover o desvio de frequência em relação a tensão e temperatura. Um monitor de falha do oscilador pode ser ativado para emitir uma interrupção e alternar para o oscilador interno se o oscilador externo ou *PLL* falhar.

Figura 29 – Diagrama do sistema de eventos



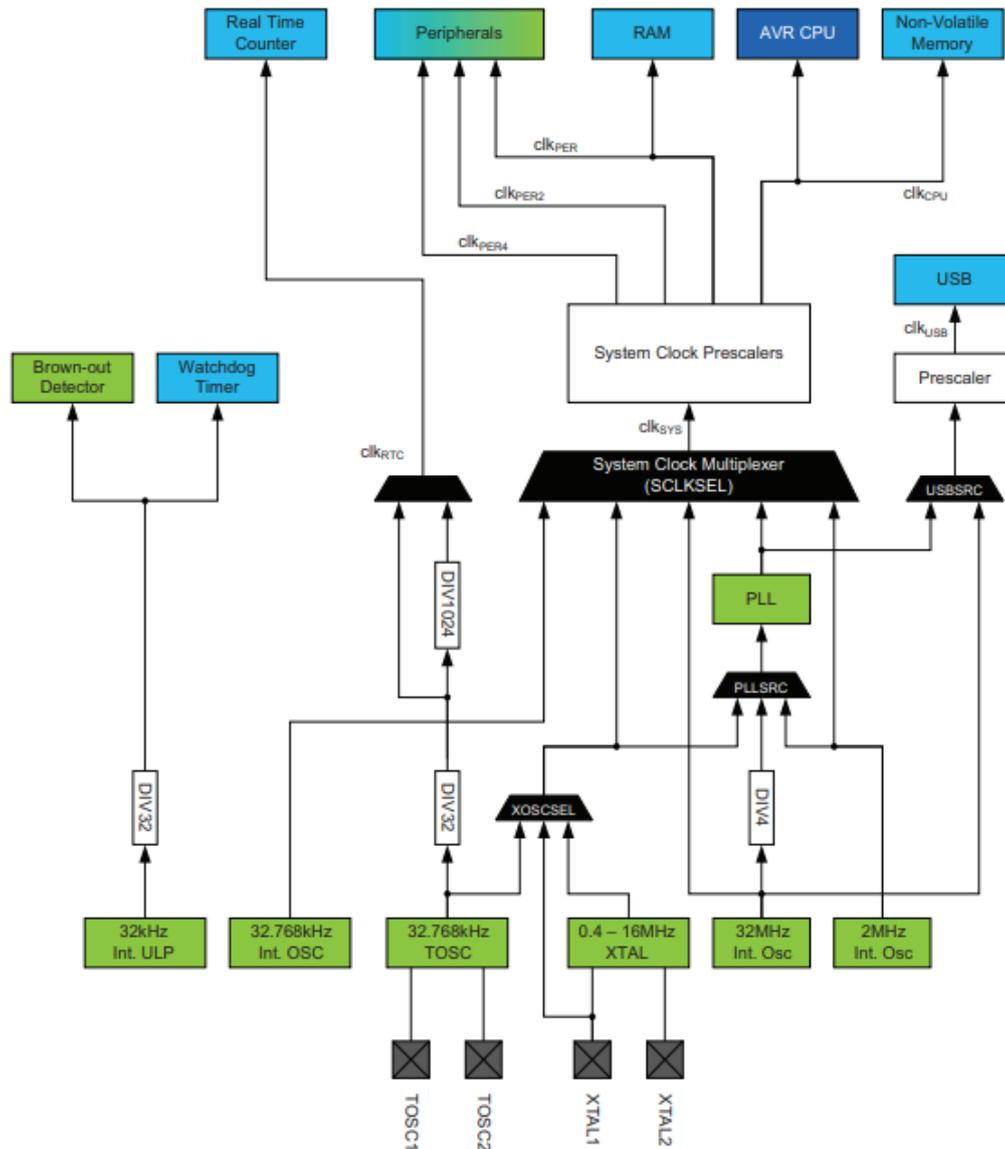
Fonte: Autor (Adaptado de Atmel)

Quando ocorre uma reinicialização, todas as fontes de relógio, exceto o oscilador de baixa potência de 32kHz, são desabilitadas. Após a reinicialização, o dispositivo sempre será executado a partir do oscilador interno de 2MHz. Durante a operação normal, a fonte do relógio do sistema e os *prescalers* podem ser alterados a partir do *software* a qualquer momento.

A Figura 30 mostra o sistema de relógio do microcontrolador. Os relógios da CPU e alguns periféricos podem ser parados usando o modo *sleep*, reduzindo o consumo.

As fontes de relógio são divididas em dois grupos principais: osciladores internos e fontes de relógio externas. A maioria das fontes de relógio pode ser ativada e desativada diretamente via *software*, enquanto outras são ativadas ou desativadas automaticamente, dependendo das configurações dos periféricos. Após a reinicialização, o dispositivo é iniciado a partir do oscilador interno de 2MHz. As demais fontes estarão, por padrão, desativadas.

O oscilador interno de 2MHz é calibrado em tempo de execução e é a fonte padrão do relógio do sistema após a reinicialização. Ele é calibrado durante a produção para fornecer uma frequência padrão próxima à sua frequência nominal. Pode ser ativada a calibração automática em tempo de execução do oscilador para compensar a temperatura e o desvio de tensão e otimizar a precisão do oscilador.

Figura 30 – Diagrama do sistema de *clocks* do microprocessador

Fonte: Autor (Adaptado de Atmel)

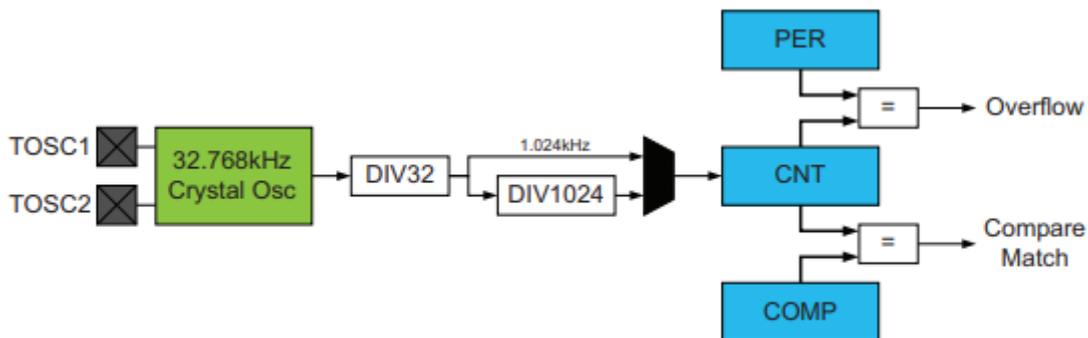
O oscilador interno de 32 MHz é um oscilador de alta frequência, também calibrado durante a produção para fornecer uma frequência padrão próxima à sua frequência nominal. Pode ser ativada a calibração automática em tempo de execução do oscilador para compensar a temperatura e o desvio de tensão e otimizar a precisão do oscilador. Este oscilador também pode ser ajustado e calibrado para qualquer frequência entre 30MHz e 55MHz.

O relógio de tempo real (*RTC*) de 32 bits é um contador que é executado continuamente, inclusive em modos de economia de energia, para controlar o tempo. Ele pode ligar automaticamente o dispositivo a partir dos modos de suspensão ou desligar o dispositivo em

intervalos de tempo pré-determinados. O *clock* de referência é gerado a partir de um cristal de 32.768kHz de alta precisão, e o *design* é otimizado para baixo consumo de energia. O *RTC* normalmente opera em modos de baixa potência, mantendo o controle de tempo e ligando o dispositivo em intervalos regulares.

O relógio de tempo real (*RTC*) pode ser obtido de uma saída pré-calibrada de 1.024kHz ou 1Hz do relógio de referência de 32.768kHz. O *RTC* fornecerá uma solicitação de interrupção de comparação ou um evento pré-determinado quando o valor do contador for igual ao valor do registro *Compare*. O *RTC* fornecerá uma solicitação de interrupção de estouro ou um evento pré-determinado quando o valor do contador for igual ao valor do registro *Period*. O estouro do contador também redefinirá o valor do contador para zero. O diagrama de funcionamento do *RTC* pode ser visto na Figura 31.

Figura 31 – Diagrama do relógio de tempo real (*RTC*)



Fonte: Autor (Adaptado de Atmel)

4.4.4 Portas de Entrada e Saída

Cada porta é composta por oito pinos, numerados de 0 a 7. Cada pino pode ser configurado como entrada ou saída com configurações individuais de *driver* e *pull*. Eles também implementam a detecção de entrada síncrona e assíncrona com interrupções e eventos para condições selecionáveis por software. O sensor assíncrono de mudança de pino indica que uma troca de pino pode acionar o dispositivo a partir de qualquer modo de suspensão, incluindo os modos em que nenhum relógio está em execução.

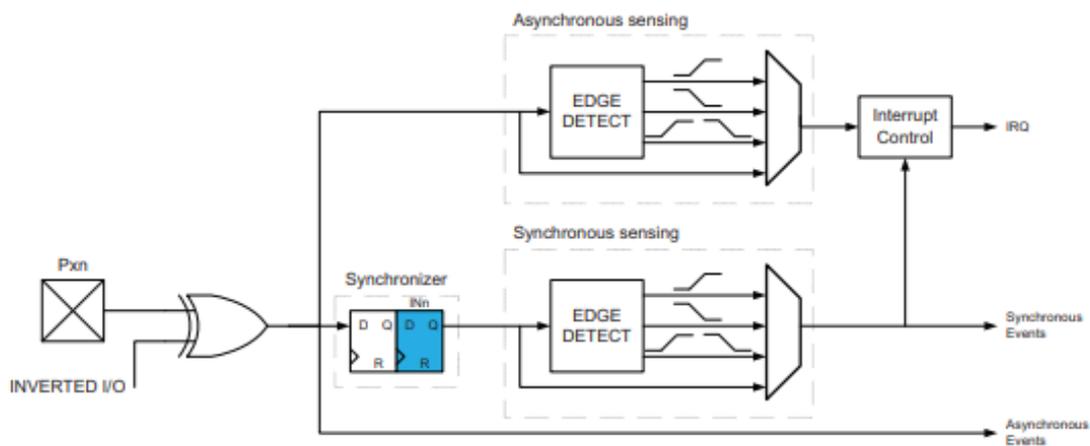
Todas as funções são individuais e configuráveis por pino, mas vários pinos podem ser agrupados, facilitando a configuração. Os pinos têm funcionalidade de leitura, modificação e gravação implementada através de *hardware* para alteração do valor do inversor e configuração do resistor de *pull*, sendo que a direção de um pino pode ser alterada sem alterar inadvertidamente a direção de qualquer outro pino.

A configuração do pino da porta também controla a seleção de entrada e saída de outras funções do dispositivo, por exemplo, é possível ter o *clock* da saída do relógio em tempo real associado à um pino de porta, disponível para uso externo. O mesmo se aplica ao sistema de eventos que também podem ser usado para sincronizar e controlar funções externas. Outros periféricos digitais, como *UART*, *SPI*, temporizador e contadores podem ser remapeados para pinos selecionáveis, a fim de otimizar as necessidades de pinagem de acordo com as necessidades da aplicação.

Quando configurados como saída, os pinos possuem saída programável. Os pinos também possuem configuração que possibilita limitar a taxa de variação para reduzir a emissão eletromagnética.

Quando configurados como entrada, a detecção pode ser síncrona ou assíncrona, dependendo do *clock* habilitado para as portas, e a configuração é mostrada na Figura 32.

Figura 32 – Funcionamento da porta de entrada síncrona ou assíncrona



Fonte: Autor (Adaptado de Atmel)

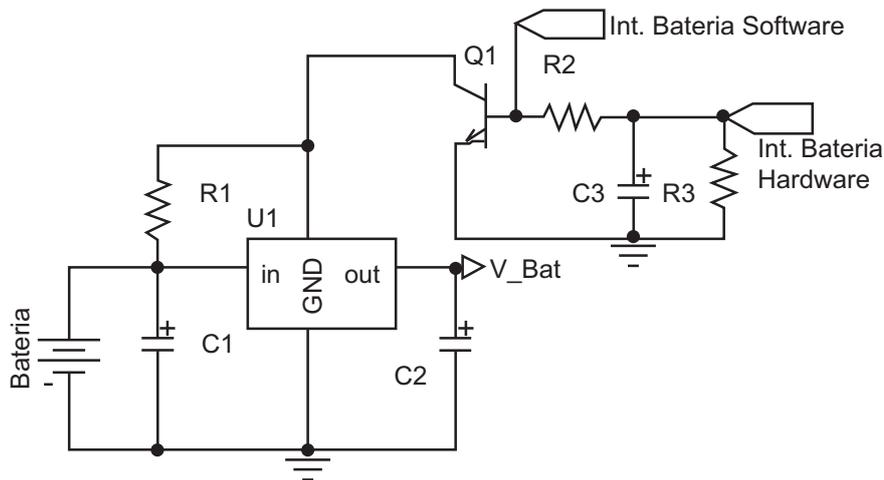
A maioria dos pinos tem funções alternativas, além de entrada e saída. Quando uma função alternativa é ativada, ela pode substituir a função normal do pino ou o valor do pino. Isso acontece quando outros periféricos que exigem pinos são habilitados ou configurados para usar pinos.

4.4.5 Bateria de *Backup*

O relógio de tempo real (*RTC*) do medidor deve estar funcionando mesmo quando o mesmo não estiver sendo alimentado pela rede elétrica principal, portanto, é necessário implementar um recurso de *backup* através de uma bateria. A frequência de *clock* do cristal externo é usada como fonte principal do relógio *RTC* para obter uma melhor precisão. Um circuito dinâmico de alimentação é mostrado na Figura 33 e é usado para migrar do domínio

V_{CC} para o domínio V_{BAT} se o V_{CC} ficar abaixo do nível de tensão de operação do dispositivo. Quando a tensão do V_{CC} é restaurada, a energia volta para o V_{CC} . Este interruptor dinâmico pode ser acionado por *software* ou por *hardware*. O tempo de comutação deve ser tratado com o devido cuidado, para evitar a reinicialização do *RTC* durante essa transição.

Figura 33 – Circuito de alimentação de bateria de *backup*



Fonte: Autor (Adaptado de Atmel)

4.5 CALIBRAGEM E AFERIÇÃO

Após a montagem do protótipo os sensores foram conectados à rede elétrica e foram obtidas amostras de tensão e corrente, que foram então comparadas com os dados obtidos de um alicate wattímetro *Minipa ET-4080* calibrado, que pode ser visto na Figura 35. Como carga de teste foi utilizado um banco com 11 lâmpadas halógenas de 70W cada, cujo resultado visualiza-se à Figura 34. Para variar a tensão de entrada foi utilizado um *VARIAC* com entrada em 127V e saída ajustável entre 0 e 250V.

Figura 34 – Carga de teste utilizando lâmpadas halógenas



Fonte: Autor

Figura 35 – Alicate wattímetro *Minipa ET-4080*

Fonte: Minipa

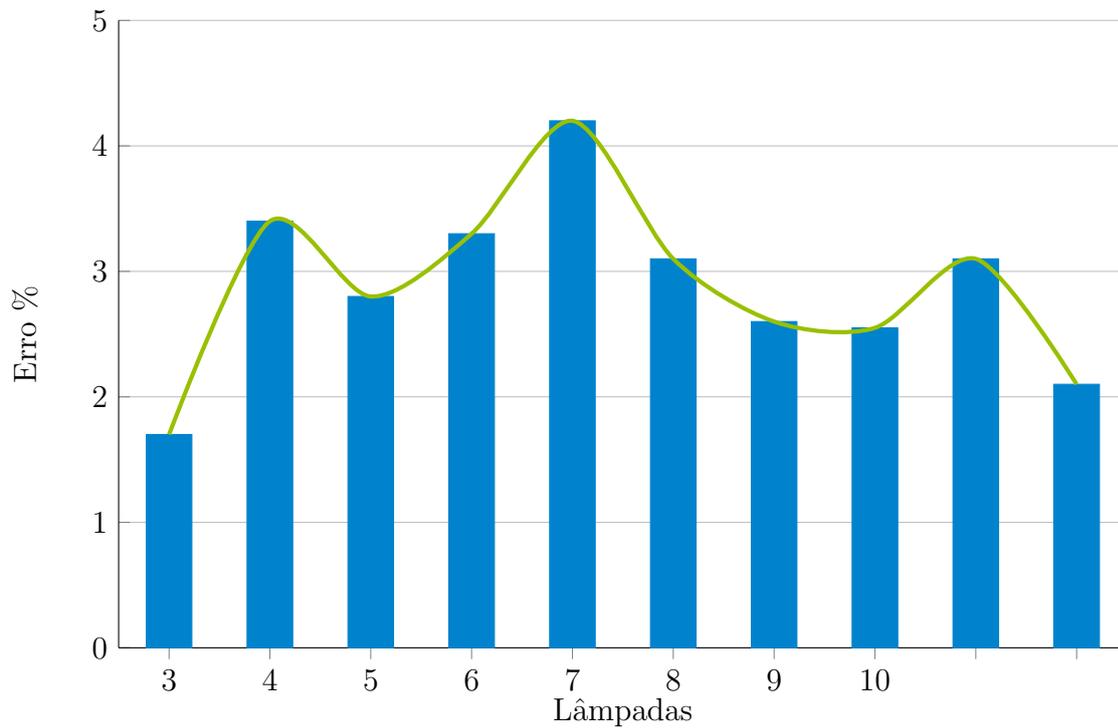
4.5.1 Medições de Corrente

O banco de lâmpadas foi ligado em uma tensão ajustada em $127V_{RMS}$. As lâmpadas foram ligadas uma por uma. A cada lâmpada ligada foram colhidos os valores de corrente mostrados pelo protótipo e pelo multímetro certificado. Com base nos valores obtidos, efetuou-se a calibração do protótipo. Após os testes e calibrações, os resultados obtidos foram os demonstrados na Figura 36. Em todas as medições realizadas os erros ficaram abaixo de 4,5%.

4.5.2 Medições de Tensão

A calibração do sensor de tensão foi feita de forma similar à utilizada no sensor de corrente. A tensão de entrada foi variada utilizando-se o VARIAC, coletando-se os valores obtidos no multímetro certificado, e efetuando as calibrações necessárias no protótipo. A Tabela 7 mostra os resultados, onde pode ser verificado que nas medições de tensão os erros ficaram abaixo de 1%.

Figura 36 – Resultados obtidos nas medições de corrente



Fonte: Autor

Tabela 7 – Resultados Obtidos nas Medições de Tensão

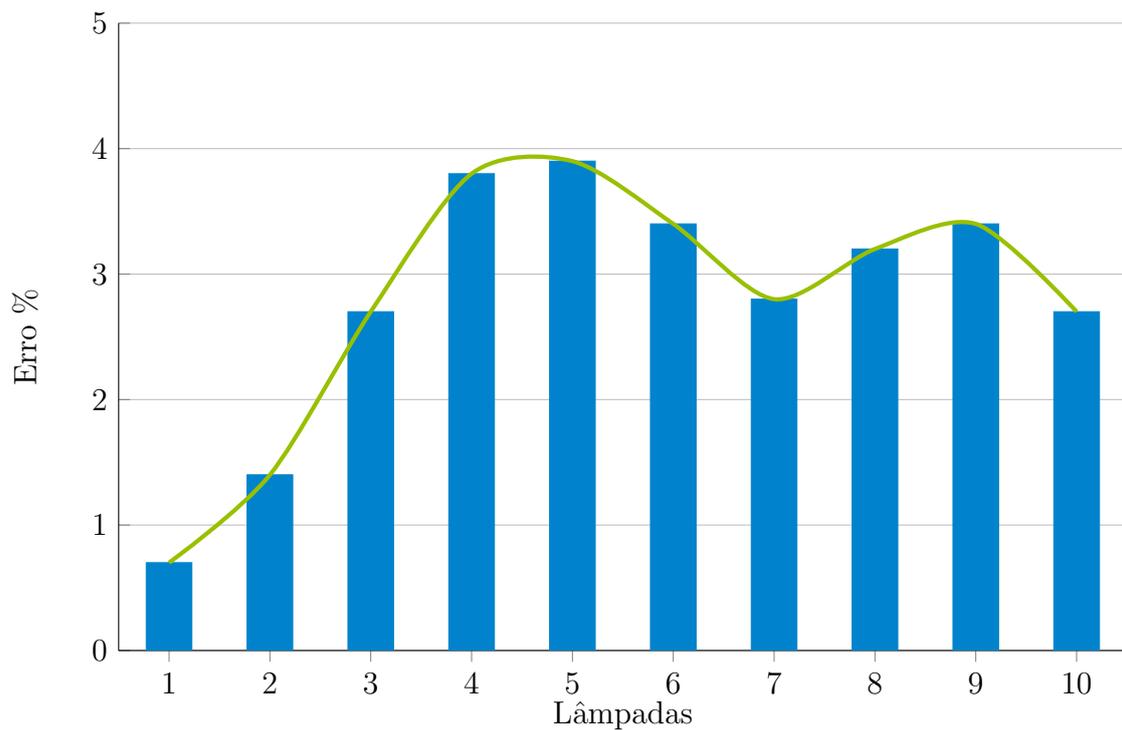
Voltímetro (V)	Sensor (V)	% Erro
90	90,8	0,89%
100	100,7	0,70%
110	110,5	0,45%
120	121,1	0,92%
130	130,9	0,69%
200	201,2	0,60%
210	211,7	0,81%
220	220,6	0,27%
230	231,7	0,74%
Média		0,67%

Fonte: Autor

4.5.3 Medições de Potência

O protótipo calcula a potência utilizando as medições já calibradas de corrente e tensão. Para validar os cálculos, repetiu-se o procedimento de medição de corrente, dessa vez comparando os dados calculados pelo protótipo com os dados do multímetro calibrado, cujos resultados obtidos podem ser vistos na Figura 37, onde foi possível observar erros abaixo dos 4%.

Figura 37 – Resultados obtidos nas medições de potência



Fonte: Autor

5 DESENVOLVIMENTO DO *SOFTWARE*

Os *softwares* desenvolvidos para a implementação das soluções propostas estão dividido em 3 categorias, que se baseiam no domínio onde os mesmos estarão sendo executados, e na função desempenhada por cada um deles:

1. **Firmware** - É o *software* executado no domínio do hardware medidor de energia, responsável pela coleta de dados dos sensores, amostragem dos valores, cálculo das grandezas elétricas e envio dessas informações consolidadas ao servidor;
2. **Servidor** - É o *software* executado no domínio do servidor (em nuvem) que receberá as informações do medidor, tratando e armazenando as mesmas em banco de dados, executando os algoritmos de desagregação de consumo (*NILM*) e notificando os usuários dentro dos parâmetros propostos;
3. **Aplicativo** - É o *software* responsável pela interface com o usuário, que permitirá a consulta dos dados de consumo, relatórios, notificações e sugestões relacionadas;

5.1 ESCALONAMENTO DE PROCESSOS

Escalonamento de processos é o ato de alternar processos ativos de acordo com regras bem estabelecidas, para que todos os processos tenham a chance de usar a *CPU* de acordo com suas prioridades e relevâncias, sem que se corra o risco de preterência de tarefas, que deveriam ser realizadas em intervalos regulares ou em horários específicos.

O escalonador é a parte do sistema operacional que fica encarregada de escolher entre os processos pendentes qual deles estará sendo executado a cada momento.

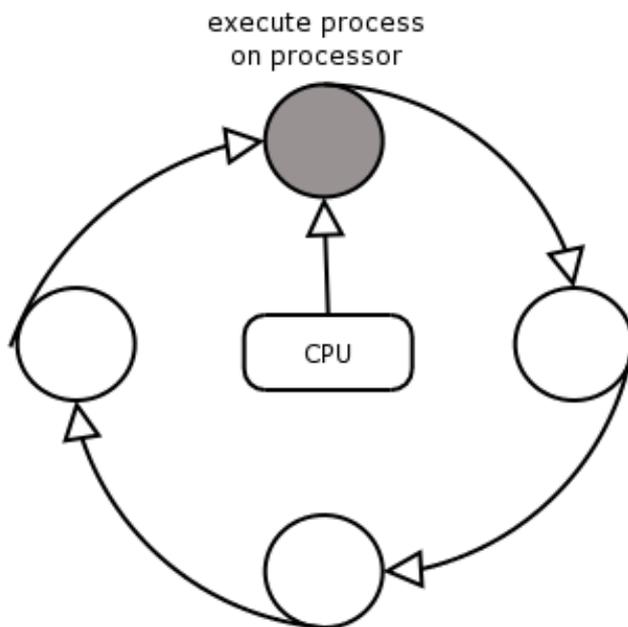
Ao contrário da ideia de executar um determinado processo até a conclusão, o que poderia levar muito tempo, levando à preterição de outros processos de igual ou maior prioridade, é utilizado o escalonamento preemptivo, ou seja, o sistema operacional interrompe um processo em execução e executa o escalonador para decidir qual será o próximo processo que deverá ser executado.

Existem várias maneiras de implementar o escalonamento e devem ser seguidos critérios como equidade (cada processo obtendo sua parcela devida de tempo de *CPU*), eficiência (garantindo 100% de ocupação de tempo da *CPU*), minimizando o tempo de resposta a comandos interativos do usuário e maximizando o número de tarefas processadas em um intervalo de tempo.

5.1.1 Escalonamento *Round-Robin*

Cada processo recebe um intervalo de tempo, denominado *quantum* e se o processo ainda estiver em execução quando seu *quantum* terminar, esse processo é retirado da *CPU* e o escalonador seleciona um novo processo para executar. O escalonador mantém uma lista de processos executáveis, ou seja, aqueles que estão prontos para serem executados, e quando o *quantum* de um processo termina, ele é colocado no final dessa lista. O escalonador sempre seleciona o primeiro processo desta lista para execução. O valor do *quantum* deve ser escolhido com cuidado, pois se o valor for muito pequeno, teremos muito do tempo de execução da *CPU* perdido com o processo de substituição e, se o valor for muito grande, isso poderá causar um tempo de resposta muito longo para os usuários. Processos com uso intensivo da *CPU* devem ganhar um *quantum* maior, para reduzir o número de chaveamento realizado neste processo, e dessa forma garantir melhor performance. Uma representação do funcionamento está mostrada na Figura 38.

Figura 38 – Diagrama de funcionamento do *round-robin*



Fonte: Autor (Adaptado de *Linux*)

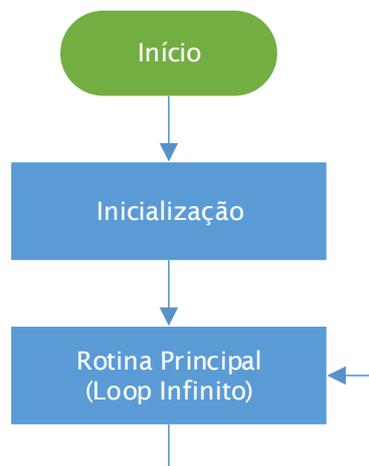
5.2 FIRMWARE

O *firmware* é organizado em tarefas executadas através do método *round-robin*, utilizando eventos e interrupções. O *firmware* implementa a coleta dos dados dos sensores e efetua os cálculos das grandezas, a exibição de kWh, tensão RMS, corrente e outros parâmetros

básicos no *LCD*, e envia as mesmas informações para um servidor externo, em nuvem. Além da medição de energia básica, esse projeto também inclui recursos adicionais que permitem a coleta e tratamento de informações mais abrangentes.

O relógio de tempo real embutido fornece uma fonte de tempo que permite calcular e rastrear a demanda de pico atual e histórica, além de permitir o acompanhamento de consumo em função do horário, fornecendo informações acerca das vantagens ou desvantagens na opção pela cobrança através de tarifação horária, como a recém implementada tarifa branca. Todos os dados medidos são armazenados de forma segura na memória interna não volátil, e também armazenadas em cache local, para o caso de falha de conexão com o servidor ou falta de conexão com a internet, permitindo o envio posterior das informações, quando restabelecida a conexão. O fluxograma básico do *firmware* de medição de energia é mostrado na Figura 39.

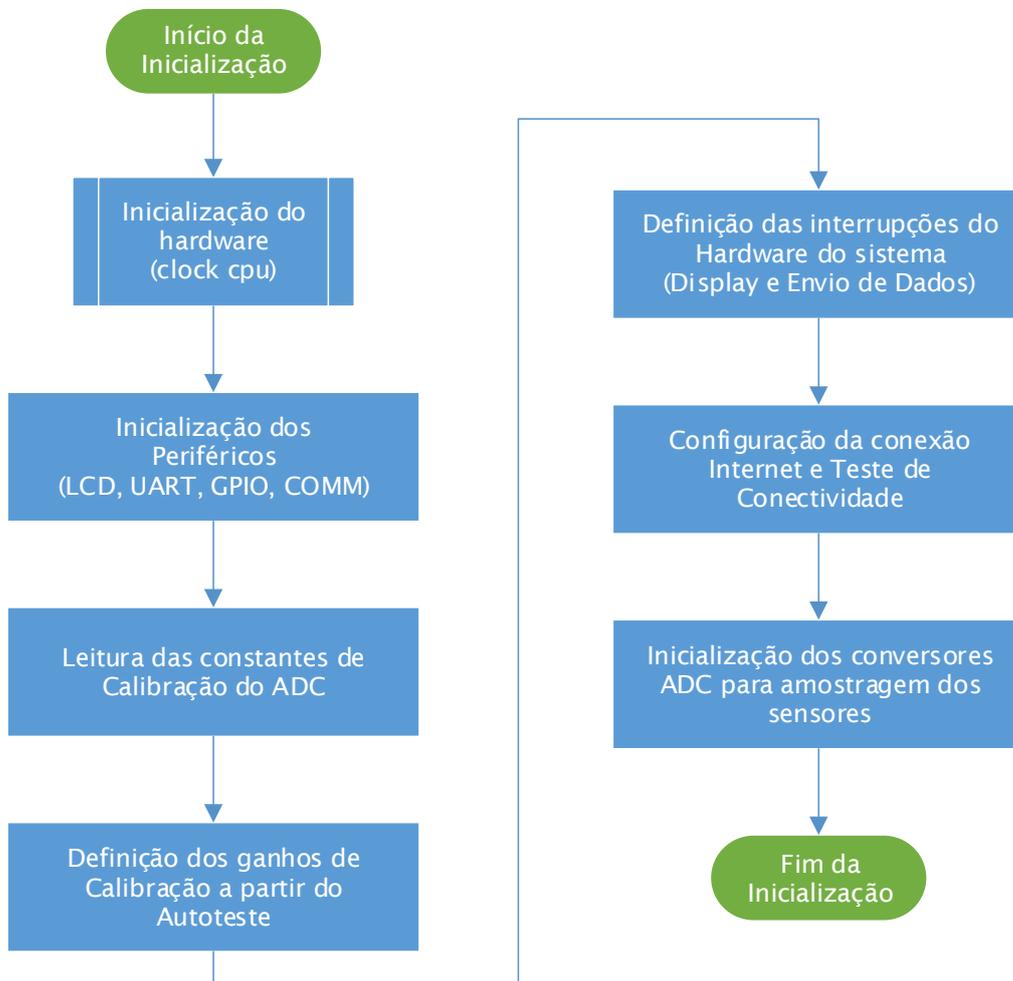
Figura 39 – Fluxograma básico do *firmware*



Fonte: Autor

O *firmware* é dividido em dois módulos: Inicialização e *Loop* Infinito. As funções presentes na etapa de Inicialização, cujo fluxograma pode ser visto na Figura 40, são executados uma única vez, logo após o sistema receber energia elétrica, e só são executados novamente se o microcontrolador for reiniciado. As funções presentes no *Loop* Infinito são executados repetidamente, até que o microcontrolador seja desligado. É nessa etapa que são executadas as amostragens dos sensores e os cálculos dos parâmetros elétricos.

O *firmware* inicializa todos os registros necessários antes de entrar no *loop* infinito. Variáveis de medição e sinalizadores são apagados e os temporizadores são redefinidos. Os periféricos são inicializados chamando as respectivas funções de inicialização. A inicialização do

Figura 40 – Fluxograma de inicialização do *firmware*

Fonte: Autor

ADC dos sinais de entrada para as corrente de fase, tensão e corrente de neutro é configurada. Todas as entradas são medidas no modo diferencial do *ADC* e por esse motivo não necessitam utilizar uma fonte externa de nível.

A tensão de referência interna de 1V é utilizada como referência para o *ADC*. O amplificador de ganho diferencial interno é usado nas medições de sinal de corrente e tensão de entrada.

A constante de calibração do *ADC* é carregada nos registros *ADC* a partir da memória flash. As constantes de calibração são obtidas da *EEPROM* interna e armazenadas nas variáveis de memória locais para os cálculos de consumo.

O *RTC* é inicializado para gerar uma interrupção a cada 1 segundo. Essa interrupção *RTC* é usada para calcular os parâmetros básicos, cálculo de consumo e atualização do *display LCD*. Os registradores são inicializados de acordo com a taxa de amostragem necessária de 4kHz para iniciar a conversão *ADC*. Os valores necessários para os registros são calculados a partir da Equação. A interrupção é ativada no momento da amostragem para acionar a conversão do *ADC*.

O *DFLL* interno é usado para melhorar a precisão do oscilador interno de 32MHz, comparando a frequência deste com um oscilador externo de cristal de 32.768kHz, mais preciso, permitindo a calibração automática do oscilador em tempo de execução. O *DFLL* também controla a relação entre a frequência do oscilador de cristal de 32.768kHz e a frequência do oscilador interno de 32MHz. Se o oscilador interno funcionar muito rápido ou muito lento, o *DFLL* diminuirá ou incrementará seu valor de registro de calibração para ajustar a frequência do oscilador.

O *loop* principal, cujo fluxograma pode ser visto na Figura 41, é responsável por atualizar o registro de kWh, manter a exibição visual mostrada no *display LCD*, verificar periodicamente a presença de alterações significativas nas medições e calcular as demais grandezas. Todas essas funções são executadas quando o medidor está no modo ativo.

5.2.1 Amostragem

O *ADC* possui quatro canais de conversão com seleção individual de entrada, e registros de resultado e controle de início de conversão. Este projeto utiliza cinco canais de conversão para as entradas analógicas de amostragem de tensão, corrente de três fases e corrente de neutro. O temporizador do microprocessador irá acionar o *ADC* para iniciar a conversão na taxa de amostragem (F_s). A taxa de amostragem (F_s) é calculada de acordo com a Equação (4), onde *PER* na equação é o conteúdo do registrador *Period* do temporizador e F_{timer} é a frequência do temporizador. No protótipo utilizou-se 7,68kHz como taxa de amostragem, obtendo dessa forma 128 amostras em cada ciclo de rede em 60Hz.

$$F_s = \frac{F_{timer}}{(PER + 1)} \quad (4)$$

Após o *hardware* ter sido devidamente inicializado, os valores de ganho dos sensores de tensão e corrente são carregados a partir da memória *flash* do microcontrolador. As variáveis de calibração dos sensores são armazenadas na memória *flash* para que essas informações possam ser lidas mesmo se o sistema for desligado e, portanto, a calibração dos sensores de tensão e corrente só necessita ser feita uma única vez antes da instalação dos mesmos, e só precisará ser refeita caso os sensores ou algum dos componentes relacionados sejam substituídos.

Depois de efetuada a leitura dos ganhos dos *ADC*, os mesmos são inicializados. Os conversores são então calibrados automaticamente para compensação de deslocamento. Os *ADC* integrados ao microprocessador utilizado têm um deslocamento máximo de 0,2%, tornando possível que sejam eliminados quase que totalmente com um procedimento de calibração. Uma vez calibrados, os deslocamentos praticamente não variam durante a operação do microcontrolador. A calibração de inicialização é realizada através dos seguintes passos:

1. As portas de entrada de cada um dos conversores utilizados são colocadas internamente em curto, resultando em uma diferença de potencial de 0V em suas entradas;
2. São realizadas 128 leituras em cada um dos conversores;
3. As médias da amostra de cada conversor são calculadas. O valor obtido corresponde ao deslocamento de cada conversor.
4. As portas de entrada dos conversores são reconectadas aos sensores de tensão e corrente.

Após esse procedimento, todas as amostras coletadas têm seus valores corrigidos, subtraindo os valores de deslocamento obtidos na calibração.

Após a inicialização, o *firmware* entra em um *loop* infinito, onde as amostras de tensão e corrente são lidas, armazenadas e processadas, calculando-se as grandezas elétricas para cada ciclo de rede. Considerando que os conversores estarão operando com uma taxa de amostragem de 7,68 kHz, em redes elétricas de 60 Hz, como no Brasil, serão necessárias 128 amostras para que tenhamos um ciclo completo.

O cálculo das grandezas elétricas só será iniciado depois que 128 amostras de tensão e corrente sejam lidas e armazenadas, garantindo, dessa forma, que os valores amostrados contenham informações de um ciclo completo de rede.

As grandezas elétricas são então calculadas: tensão eficaz, corrente eficaz, potência ativa, potência aparente, fator de potência e módulos das 5 primeiras harmônicas do sinal de corrente. Esses cálculos são obtidos utilizando as equações detalhadas a seguir.

A tensão eficaz é calculada através da Equação (5):

$$V_{RMS} = G_v \sqrt{\sum_{n=1}^N \frac{v[n]^2}{N}} \quad (5)$$

onde V_{RMS} é o valor da tensão eficaz, G_v é o ganho das amostras de tensão, n é o índice da amostra, $v[n]$ é a n ésima amostra do sinal de tensão e N é o número total de amostras, que no caso é 128.

A corrente eficaz é calculada através da Equação (6):

$$I_{RMS} = G_i \sqrt{\sum_{n=1}^N \frac{i[n]^2}{N}} \quad (6)$$

onde I_{RMS} é o valor da corrente eficaz, G_i é o ganho das amostras de corrente, n é o índice da amostra, $i[n]$ é a n -ésima amostra do sinal de corrente e N é o número total de amostras, que no caso é 128.

A potência ativa é calculada através da Equação (7):

$$P = G_i \times G_v \sqrt{\sum_{n=1}^N \frac{(i[n] \times v[n])}{N}} \quad (7)$$

onde P é o valor da potência ativa, G_i é o ganho das amostras de corrente, G_v é o ganho das amostras de tensão, n é o índice da amostra, $i[n]$ é a n -ésima amostra do sinal de corrente, $v[n]$ é a n -ésima amostra do sinal de tensão e N é o número total de amostras, que no caso é 128.

A potência aparente (S) é calculada a partir dos valores de tensão eficaz e corrente eficaz através da Equação (8):

$$S = V_{RMS} \times I_{RMS} \quad (8)$$

O fator de potência (FP) é calculado a partir da potência ativa e aparente através da Equação (9):

$$FP = \frac{P}{S} \quad (9)$$

Os módulos das componentes harmônicas do sinal de corrente são calculadas usando uma fórmula baseada na equação clássica da Transformada Discreta de *Fourier*, de acordo com a Equação (10):

$$|I[k]_{RMS}| = \frac{\sqrt{\text{Re}\{I[k]\}^2 + \text{Im}\{I[k]\}^2}}{N} \times G_i \times \sqrt{2} \quad (10)$$

As fases das componentes harmônicas do sinal de corrente são calculadas usando a Equação (11):

$$\angle I[k] = \arctang \left(\frac{Im \{I[k]\}}{Re \{I[k]\}} \right) \quad (11)$$

onde k é o índice do componente harmônico do sinal de corrente no domínio da frequência discreta, $|I[k]_{RMS}|$ é o módulo do k -ésimo componente harmônico do sinal de corrente, $\angle I[k]$ é a fase do k -ésimo componente harmônico do sinal de corrente, $Re \{I[k]\}$ é a parte real do k -ésimo componente harmônico do sinal de corrente, $Im \{I[k]\}$ é a parte imaginária do k -ésimo componente harmônico do sinal de corrente, G_i é o ganho das amostras de corrente e N é o número total de amostras, que no caso é 128.

A parte real ($Re \{I[k]\}$) e a parte imaginária ($Im \{I[k]\}$) do componente harmônico do sinal de corrente são calculados através da Equação (12) e da Equação (13):

$$Re \{I[k]\} = \sum_{n=1}^N i[n] \times \cos \left(\frac{2\pi kn}{N} \right) \quad (12)$$

$$Im \{I[k]\} = \sum_{n=1}^N i[n] \times \sen \left(\frac{2\pi kn}{N} \right) \quad (13)$$

onde k é o índice do componente harmônico do sinal de corrente no domínio da frequência discreta, n é o índice da amostra de corrente no domínio do tempo discreto, $Re \{I[k]\}$ é a parte real do k -ésimo componente harmônico do sinal de corrente no domínio da frequência discreta, $Im \{I[k]\}$ é a parte imaginária do k -ésimo componente harmônico do sinal de corrente no domínio da frequência discreta e $i[n]$ é a n -ésima amostra do sinal de corrente no domínio do tempo discreto.

O algoritmo responsável pelos cálculos é executado em duas etapas. Na primeira etapa, que pode ser visualizada na Figura 42, todas as amostras de tensão e corrente são processadas e os resultados dos cálculos são armazenados em totalizadores. Na segunda etapa, que pode ser visualizada na Figura 43, as grandezas elétricas são calculadas a partir dos totalizadores calculados na primeira etapa.

5.2.2 Comunicação

As grandezas elétricas calculadas anteriormente, bem como a configuração e calibração do módulo, são enviados através de comunicação com a internet via rede *wireless*. O módulo de medição acumula as informações geradas a cada 5 segundos, formando um pacote de dados, que é compactado para reduzir o seu tamanho final e conseqüentemente reduzir o tempo de transferência, minimizando também a utilização da rede de dados e possibilitando o funcionamento em locais com conexão de dados limitada ou com velocidade reduzida.

O pacote de dados é enviado através de um método *post* em um servidor rodando um *webapi*, que verifica a origem do pacote, descompacta os dados recebidos e envia para o banco de dados.

5.3 SERVIDOR

Para a função de servidor do projeto ora proposto, fez-se necessário disponibilizar em nuvem, e dessa forma acessível através da Internet, um servidor capaz de receber as informações que são geradas pelos módulos de medição.

Registros de dados de variáveis determinadas, também denominados conjuntos de observações, que representam um período determinado, são o que se considera série temporal. Muitas vezes o armazenamento desses dados é feito em bancos de dados tradicionais, no formato de entidade relacionamento, sendo possível e plausível estruturar esses dados nesse tipo de modelagem.

Em geral, séries temporais são usadas para formar gráficos que representam um determinado período, como por exemplo o consumo de energia por hora ao longo de um dia, ou ainda um gráfico de utilização das cargas de uma empresa em um determinado mês. Essas séries de dados que cruzam um período são as séries temporais.

Nesse projeto, foi implementado um servidor *InfluxDB* que foi instalado em um servidor na infraestrutura do *Microsoft Azure* para o armazenamento dos dados gerados pelos módulos de medição de energia elétrica.

O *InfluxDB* é um servidor de banco de dados desenvolvido e utilizado para armazenar dados através de séries temporais, ou seja, ele foi projetado e construído pra tratar séries temporais de uma maneira otimizada em performance e modelagem. O *InfluxDB* é um banco de dados *open source*, se destacando pela simplicidade de instalação, com poucas dependências, e ainda flexível, com alta escalabilidade para utilizações mais complexas. A tela apresentada durante o funcionamento do servidor *InfluxDB* pode ser vista na Figura 44.

5.4 APLICATIVO

Com a função de visualização dos dados coletados pelos medidores e armazenados no servidor, o aplicativo é a interface de interação com os usuários finais.

Através de gráficos e alertas, interface com o usuário deve permitir que se visualize, em tempo real, o consumo de energia na unidade, as cargas em uso, e ainda permitir uma consulta por período.

O *software Grafana* se destaca como uma boa opção para visualização de dados em tempo real. Possui recursos para construção de *dashboards* com indicadores customizados. Além disso, traz várias outras vantagens, como uma grande flexibilidade e quantidade de recursos.

O *Grafana* é uma plataforma para visualizar e analisar métricas por meio de gráficos. Ele tem suporte para diversos tipos de bancos de dados — tanto gratuitos quanto pagos —, e pode ser instalado em qualquer sistema operacional.

Para facilitar a visualização dos gráficos, é possível criar *dashboards* dinâmicos que podem ser compartilhados pelos usuários. Além disso, a ferramenta permite configurar alertas com base nas métricas, que são analisadas de forma contínua para notificar os usuários sempre que preciso, de acordo com as regras definidas por ele. É bastante utilizado por sistemas de monitoramento para gerar gráficos em tempo real.

O fato de o *Grafana* ser uma ferramenta *open source* estimula a participação de uma grande comunidade que está sempre em busca de otimizações em seu funcionamento. Dessa forma, é possível contar com uma grande variedade de *templates* para os *dashboards* e gráficos, *plugins* e novas aplicações que são criadas e atualizadas constantemente.

Um *dashboard* que apresenta algumas funções básicas do aplicativo *Grafana* pode ser visto na Figura 45. Nesse *dashboard* estão sendo apresentados o número de lâmpadas ligadas no circuito, a tensão de alimentação medida, a potência ativa e a potência aparente. Os dados são atualizados na tela do aplicativo a cada 5 segundos. A quantidade de lâmpadas ligadas e a tensão medida em volts mostram os valores atuais, ou seja, os valores mais recentes disponíveis no banco de dados. A potência ativa e a potência aparente são apresentadas em formato de gráfico, permitindo uma melhor visualização em função do tempo.

Os dados utilizados para a formação do *Dashboard* são obtidos em tempo real do banco de dados *InfluxDB*. O servidor de banco de dados e o aplicativo *Grafana*, por uma questão de praticidade e custo, foram hospedados no mesmo servidor virtual. Esse cenário não apresentou quaisquer problemas durante as experimentações realizadas nesse projeto.

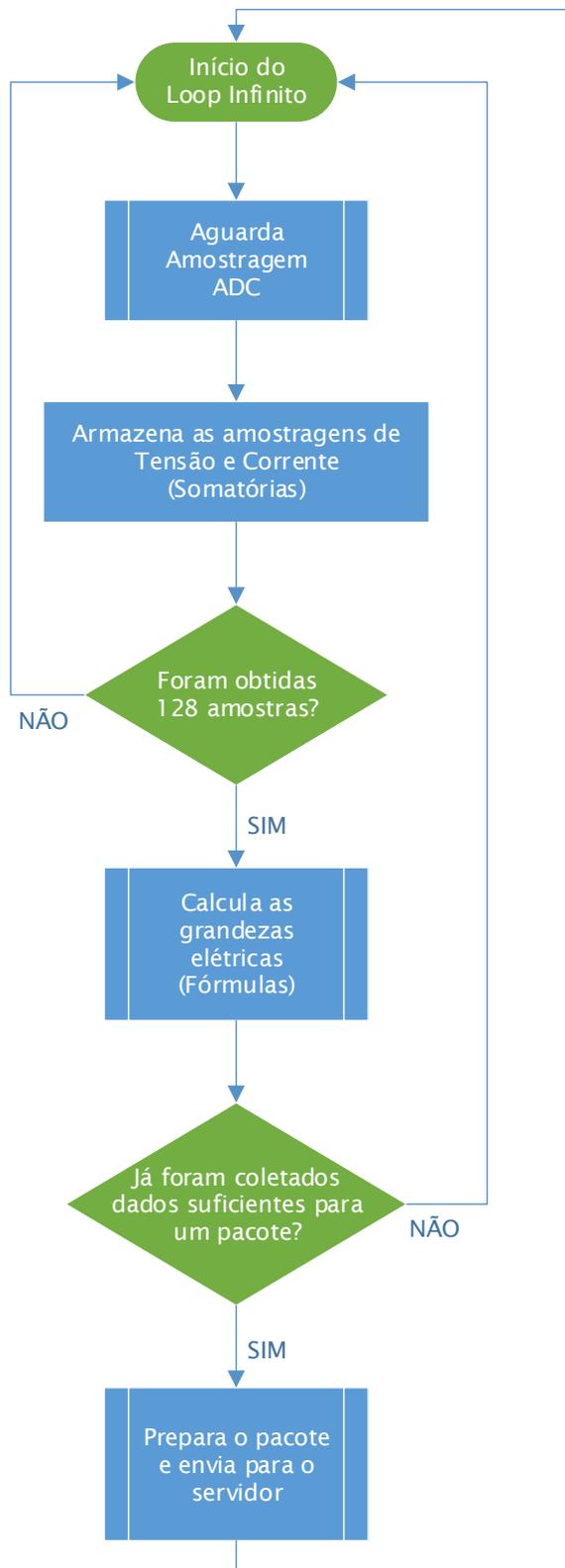
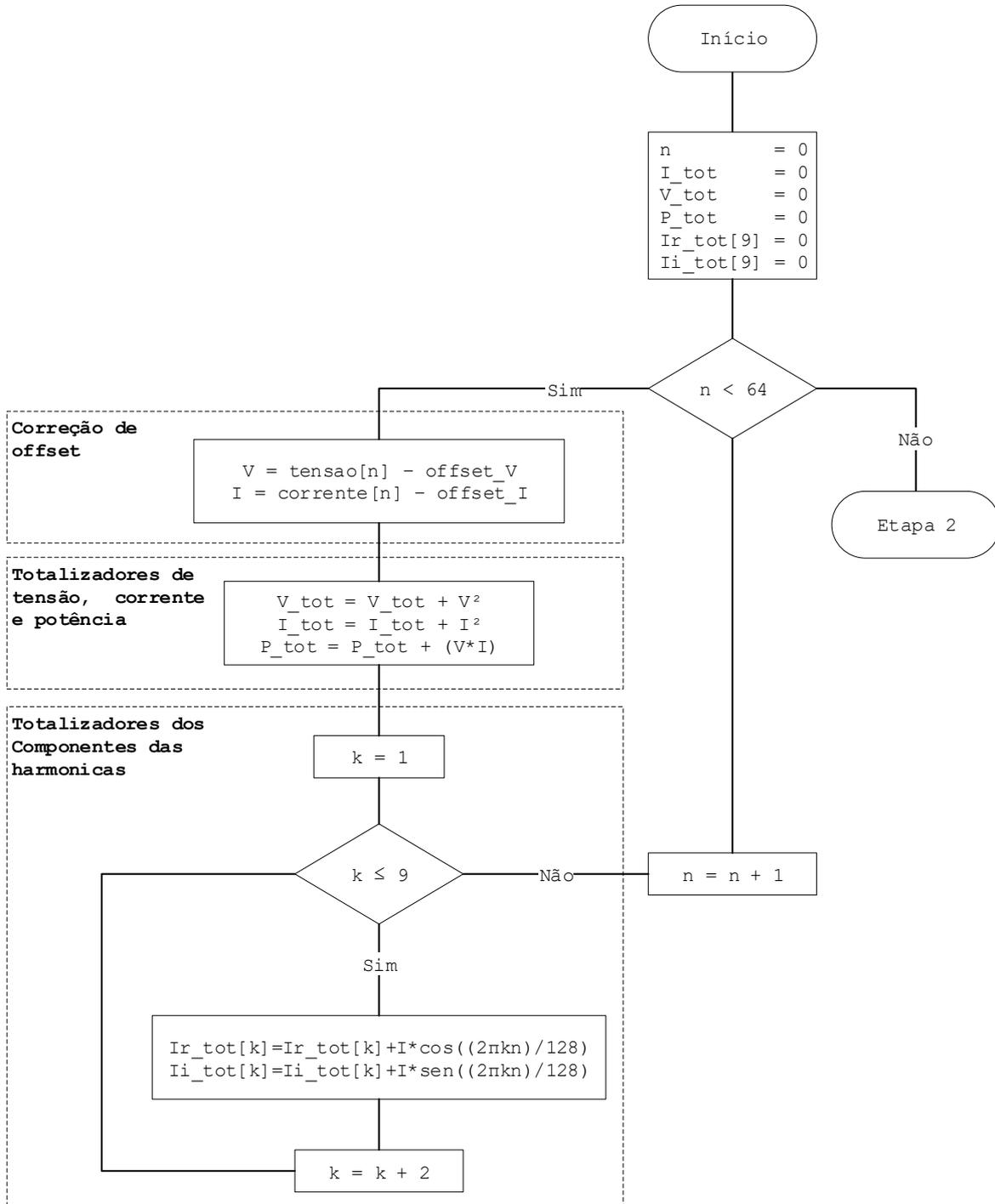
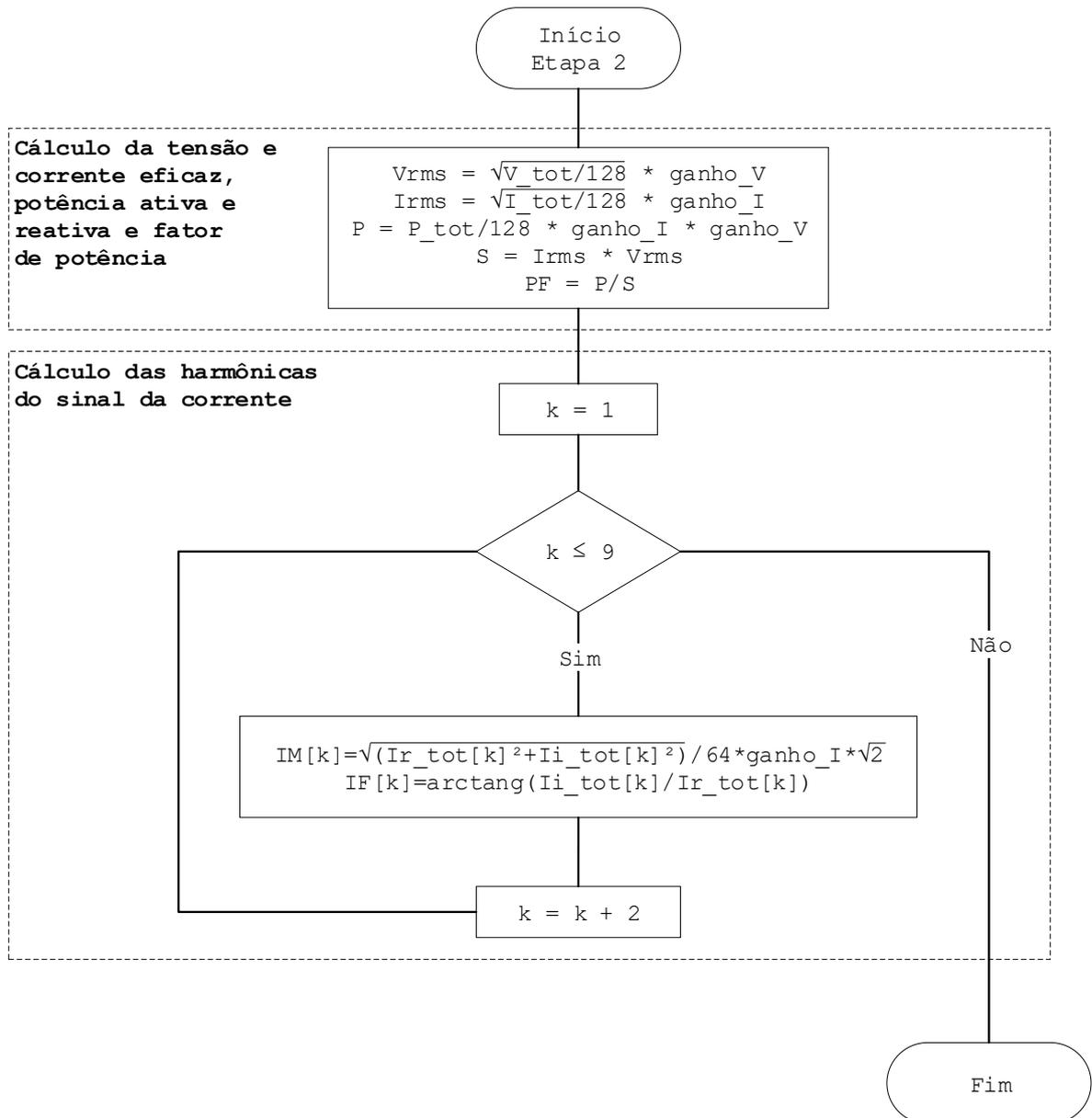
Figura 41 – Fluxograma principal do *firmware* (*loop* infinito)

Figura 42 – Fluxograma do processamento de tensão e corrente (Etapa 1)



Fonte: Autor (Baseado em Huang, 2011)

Figura 43 – Fluxograma do processamento de tensão e corrente (Etapa 2)



Fonte: Autor (Baseado em Huang, 2011)

Figura 44 – Tela do servidor *InfluxDB*

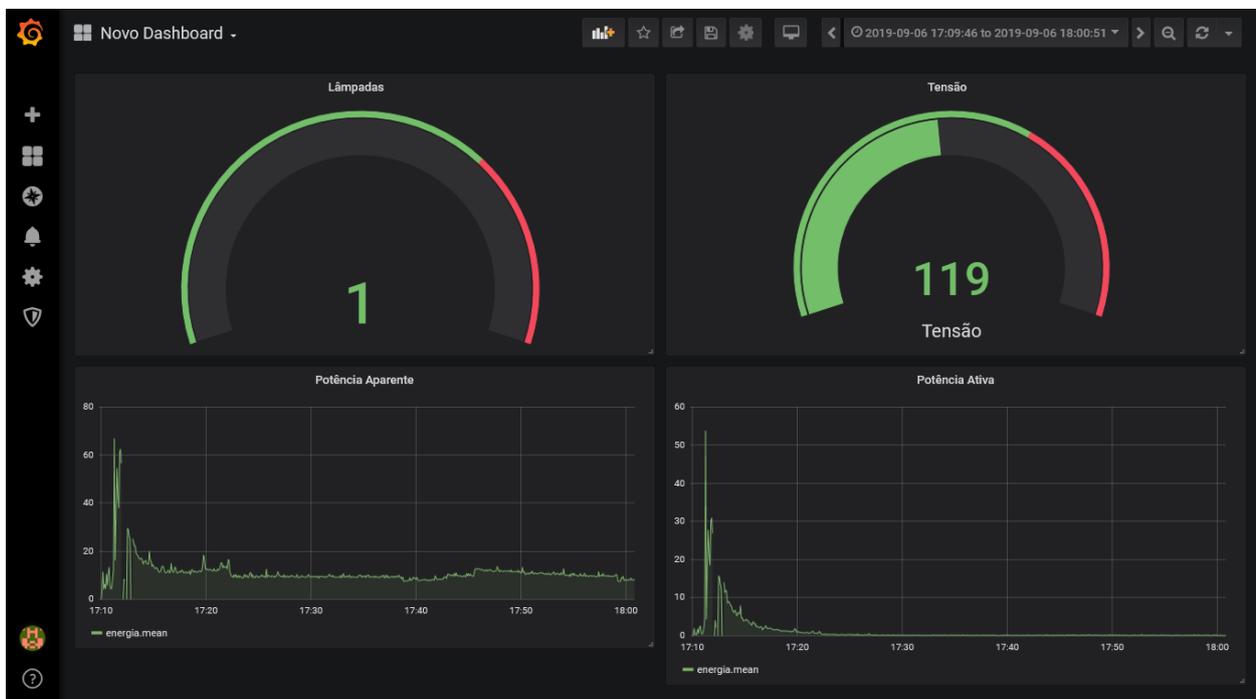
```

C:\Servidor\influxdb-1.7.8-1\influxd.exe
88888888      .d888 888      88888888b. 8888888b.
888      d88P" 888      888  "Y88b 888  "88b
888      888      888      888      888  888  888  .88P
888 888888b. 8888888 888 888 888 888 888 888 88888888K.
888 888 "88b 888 888 888 888 Y8bd8P' 888 888 888 "Y88b
888 888 888 888 888 888 888 X88K 888 888 888 888
888 888 888 888 888 Y88b 888 .d8""8b. 888 .d88P 888 d88P
88888888 888 888 888 888 "Y888888 888 888 88888888P" 88888888P"

2019-10-02T16:23:06.965002Z info InfluxDB starting {"log_id": "0IFKMepl000", "version": "1.7.8", "branch": "
1.7", "commit": "ff383cdc0420217e3460dabe17db54f8557d95b6"}
2019-10-02T16:23:06.966007Z info Go runtime {"log_id": "0IFKMepl000", "version": "go1.11", "maxprocs": 4}
2019-10-02T16:23:07.101958Z info Using data dir {"log_id": "0IFKMepl000", "service": "store", "path": "C:\\Users\\
\\Alex\\.influxdb\\data"}
2019-10-02T16:23:07.102926Z info Compaction settings {"log_id": "0IFKMepl000", "service": "store", "max_concur
rent_compactions": 2, "throughput_bytes_per_second": 50331648, "throughput_bytes_per_second_burst": 50331648}
2019-10-02T16:23:07.103929Z info Open store (start) {"log_id": "0IFKMepl000", "service": "store", "trace_id":
"0IFKMFNl000", "op_name": "tsdb_open", "op_event": "start"}
2019-10-02T16:23:07.209735Z info Opened file {"log_id": "0IFKMepl000", "engine": "tsm1", "service": "filestore
", "path": "C:\\Users\\Alex\\.influxdb\\data\\Mestrado\\autogen\\2\\00000003-00000002.tsm", "id": 0, "duration": "10.61
5ms"}
2019-10-02T16:23:07.251711Z info Opened shard {"log_id": "0IFKMepl000", "service": "store", "trace_id": "0IFKMF
Nl000", "op_name": "tsdb_open", "index_version": "inmem", "path": "C:\\Users\\Alex\\.influxdb\\data\\Mestrado\\autogen\\2
", "duration": "80.904ms"}
2019-10-02T16:23:07.275695Z info Reading file {"log_id": "0IFKMepl000", "engine": "tsm1", "service": "cacheload
er", "path": "C:\\Users\\Alex\\.influxdb\\wal\\_internal\\monitor\\5\\_00001.wal", "size": 29434}
2019-10-02T16:23:07.297681Z info Opened file {"log_id": "0IFKMepl000", "engine": "tsm1", "service": "filestore
", "path": "C:\\Users\\Alex\\.influxdb\\data\\_internal\\monitor\\4\\00000001-00000001.tsm", "id": 0, "duration": "4.99
7ms"}
2019-10-02T16:23:07.303677Z info Opened file {"log_id": "0IFKMepl000", "engine": "tsm1", "service": "filestore
", "path": "C:\\Users\\Alex\\.influxdb\\data\\_internal\\monitor\\3\\00000001-00000001.tsm", "id": 0, "duration": "2.99
7ms"}
2019-10-02T16:23:07.322666Z info Opened shard {"log_id": "0IFKMepl000", "service": "store", "trace_id": "0IFKMF
Nl000", "op_name": "tsdb_open", "index version": "inmem", "path": "C:\\Users\\Alex\\.influxdb\\data\\_internal\\monitor\\

```

Fonte: Autor

Figura 45 – Tela do aplicativo *Grafana*

Fonte: Autor

6 IMPLANTAÇÃO E TESTES

As questões técnicas referem-se aos diferentes desafios ao desenvolver e implantar esse tipo de sistema. Nesse projeto em particular evidenciaram-se três questões principais relacionadas à implantação do sistema que devem ser levadas em consideração:

1. Instalação e manutenção;
2. Conectividade Internet;
3. Gerenciamento do servidor e banco de dados;

6.1 INSTALAÇÃO E MANUTENÇÃO

Com relação à instalação do sistema, os principais desafios estão relacionados à localização do quadro de distribuição, principalmente ao implantar a primeira versão do sistema. Por exemplo, apesar de todas as unidades consumidoras na primeira instalação terem o quadro de distribuição em local de fácil acesso, havia casos em que não havia nenhum espaço suficiente dentro do quadro para a correta adequação do equipamento, dificultando a instalação. Da mesma forma, também é esperado que, em algumas casas mais antigas, não exista um quadro de distribuição interno, ou em algumas casas mais novas, o tamanho do quadro seja muito restrito, impedindo a instalação do equipamento dentro do próprio quadro.

A instalação do sistema dentro do quadro de distribuição é uma tarefa que requer especial atenção, e que deve ser realizada por um profissional capacitado, pois envolve, além da instalação dos transformadores de corrente (*CT*) que é uma tarefa relativamente simples, a obtenção da tensão para alimentação do sistema e para o monitoramento de tensão envolve a necessidade de instalação de uma tomada junto ao quadro.

O maior desafio está relacionado à localização física dos quadros de distribuição e à situação de que eles não estão preparados para a instalação deste tipo de sistema, ficando muitas vezes em locais com espaço limitado, atrás de portas e em passagens (corredores). Este fato foi particularmente evidente em uma instalação onde não havia espaço para armazenar o *hardware* necessário dentro ou próximo ao quadro de distribuição.

A manutenção das unidades consumidoras em longo prazo envolve a necessidade de monitorar constantemente as instalações para garantir que tudo esteja funcionando sem problemas. Além disso, deve-se levar em consideração que monitorar constantemente o status da implantação não significa necessariamente que todas as falhas sejam detectadas.

6.2 CONECTIVIDADE INTERNET

A plataforma de funcionamento do sistema depende muito da disponibilidade de conectividade de rede estável, por vários motivos, incluindo transmissão de dados e manutenção do sistema. Ao contrário do que se poderia esperar, as conexões de Internet e, particularmente, as redes *wireless* não estão amplamente disponíveis ou são de fácil acesso. Em alguns casos a posição do roteador ou a velocidade de internet podem não ser suficientes ou estáveis para garantir a comunicação ininterrupta do sistema com o servidor.

Ao implantar o sistema, é importante levar em consideração que as conexões com a Internet podem representar custos extras. Isso se tornará ainda mais importante se as implantações ocorrerem em locais remotos onde as únicas conexões disponíveis sejam móveis (3G ou 4G), pois são normalmente mais caras do que as conexões fixas tradicionais.

6.3 GERENCIAMENTO DO SERVIDOR E BANCO DE DADOS

Um dos desafios relevantes na implantação foi gerenciar a taxa na qual os dados foram gerados pelos medidores de energia instalados. Tomando como exemplo as leituras de energia que são armazenadas em uma amostra por segundo, após apenas uma semana, foram gerados mais de 500.000 registros no banco de dados, resultando em mais de 2 milhões de registros por mês.

Fazer a escolha certa da tecnologia de hospedagem do servidor em nuvem e consequentemente do banco de dados é uma etapa crucial ao implantar esse sistema. Em particular, há alguns aspectos que consideramos de grande importância:

1. Desempenho do servidor: Deve ser capaz de atender à requisição dos medidores dentro do menor intervalo de tempo possível, para não criar um gargalo entre as medições subsequentes;
2. Velocidade de internet no servidor: Deve ser capaz de suportar a conexão dos medidores que ocorrerão em intervalos curtos de tempo;
3. Banco de dados: Deve possuir um desempenho adequado para receber a grande quantidade de registros, oferecendo boa velocidade de gravação e leitura;

Espera-se que o desempenho do servidor e do banco de dados sejam primordiais para o desempenho dos sistemas como um todo, pois dependerão da velocidade de envio e resposta dos dados armazenados, como, por exemplo, nos aplicativos de interface com o usuário.

Dadas as inúmeras opções de tecnologia e fornecedores disponíveis no mercado, foi feito um levantamento com diferentes provedores e diferentes bancos de dados, a fim de determinar as principais diferenças de performance entre os mesmos, balizando os impactos na usabilidade do sistema.

7 CONCLUSÃO

Esta pesquisa foi dividida em duas etapas: primeiro, foram realizados experimentos para identificar quais grandezas elétricas derivadas das curvas de tensão e corrente são mais adequadas para definir a assinatura da carga. Em seguida, um medidor de energia inteligente foi implementado para calcular todos esses parâmetros e enviá-los através da comunicação *wireless* para um servidor em nuvem.

O *hardware* foi projetado para ser executado em tempo real em um microprocessador embarcado usando dados amostrados em uma frequência de 3,84kHz com o objetivo de demonstrar que a disponibilização de mais informações aliada a desagregação de consumo é de fato um método viável para possibilitar que os usuários entendam como sua unidade consumidora usa a energia elétrica. Esse melhor entendimento permitiria aos usuários tomar decisões inteligentes e conscientes sobre como eles utilizam a energia elétrica, o que, em todos os casos, é um processo decisório pessoal e muito dinâmico, pois os objetivos dos usuários envolvem muitos fatores, tais como as características da unidade consumidora, os níveis de conforto requeridos pelos usuários e as restrições orçamentárias, entre outras.

Os testes indicaram a tensão e corrente efetivas, as potências ativa e reativa, o fator de potência e os componentes harmônicos ímpares do sinal de corrente como as grandezas mais adequadas para identificação das principais cargas encontradas em residências e empresas de pequeno porte.

Constatou-se que as informações mais úteis para identificar cargas através do espectro de frequência foram encontradas nos primeiros cinco harmônicos ímpares (1o, 3o, 5o, 7o e 9o) do sinal de corrente. Observou-se também que a amplitude e a forma da curva de tensão podem variar consideravelmente dependendo das cargas em uso e, portanto, esse fenômeno deve ser levado em consideração no processo de identificação de carga.

Uma análise preliminar de transientes de cargas residenciais indicou que é possível usar também os transientes de energia para a identificação de cargas, e que cargas acionadas por chaves eletromecânicas, como lâmpadas e ventiladores, podem ser identificadas por pulsos de potência reativa. No entanto, para obter informações transitórias das cargas, é necessário efetuar a medição das grandezas elétricas em uma taxa de amostragem maior, sendo que experimentalmente foi verificado como ideal que as amostragens ocorram em intervalos de 15ms, pois alguns equipamentos apresentam transientes com duração de algumas centenas, ou mesmo dezenas de milissegundos, equivalente a cerca de 3 a 7 ciclos de rede.

Nesse projeto um medidor de energia inteligente foi desenvolvido para uso em sistemas de identificação de cargas residenciais ou outras pequenas unidades consumidoras, como escritórios ou pequenas empresas, através da identificação e reconhecimento de suas assinaturas

elétricas. Este medidor é capaz de operar em redes monofásicas, bifásicas e trifásicas com tensão nominal de até 127 ou 220V e corrente de até 50A por circuito monitorado, sendo capaz de medir: tensão eficaz, corrente eficaz, potência ativa, potência reativa, fator de potência e os primeiros cinco componentes harmônicos ímpares do sinal de corrente. Os módulos de medição permitem o monitoramento de grandezas elétricas de até 3 fases simultaneamente.

Utilizando técnicas de programação e adequações de projeto implementadas foi possível desenvolver um módulo de medição com a precisão esperada e baixo custo, usando um microcontrolador simples e de baixo consumo, capaz de calcular várias grandezas elétricas a uma taxa de amostragem de 3,84kHz. O módulo desenvolvido é capaz de calcular todas as grandezas elétricas mencionadas e transmiti-las utilizando a internet, para um servidor em nuvem, capaz de tratar e armazenar os dados em um banco de dados relacional, possibilitando aos usuários não só o acesso às informações em tempo real, mas também o acesso às informações e sugestões de hábitos para melhorar a eficiência na utilização da energia elétrica.

Foram realizados testes para verificar a exatidão e a precisão das grandezas elétricas monitoradas. Medidas realizadas com carga resistiva de 700W apresentaram erros de 0,12% na potência ativa, 0,19% na potência aparente, 0,09% no fator de potência, 0,08% no valor da tensão eficaz e 0,21% na corrente eficaz. Os experimentos para avaliar a precisão dos componentes harmônicos do sinal de corrente indicaram erros de 0,06% para o componente fundamental, 0,47% para o 3º harmônico, 4,17% para o 5º harmônico, 6,79% para o 7º harmônico e 11,57% para o 9º harmônico. Em todos os ensaios realizados, os valores dos desvios-padrão das grandezas medidas apresentaram valores relativamente baixos, em comparação com outros equipamentos disponíveis no mercado, indicando precisão suficiente do sistema desenvolvido. Pequenas variações, de menos de 10%, na amplitude e frequência da tensão da rede não diminuíram a exatidão e a precisão das medições.

As empresas distribuidoras de energia elétrica tem um conflito de interesses ao tentar fornecer ferramentas que ajudem os usuários a economizar energia. Isso decorre do fato de que essas empresas têm um objetivo, e mais do que isso, uma obrigação, perante seus acionistas, de ganhar dinheiro. Fornecer ferramentas que economizem energia e ajudem os usuários a economizar energia elétrica significaria que as empresas estariam gerando menos receita, ou seja, uma ação contrária ao objetivo principal das empresas. Como os usuários devem participar ativamente da redução no consumo de energia elétrica, as ferramentas disponíveis devem ser seguras e confiáveis.

A eficiência pode ainda ser alcançada ao fornecer uma solução de baixo custo e de código aberto, e ainda atenuar as possíveis preocupações com a privacidade. Uma solução ideal pode incentivar os usuários a criar metas de redução de consumo com a confiança de usar uma plataforma simples de *hardware* e *software*. Isso, na verdade, balizou o desenvolvimento, usando algoritmos que são executados *on-line* em um ambiente seguro, em nuvem, que é

computacionalmente restrito. Isto significa que o projeto foi desenvolvido utilizando modelos e métodos eficientes, de construção simples e baixo custo, mas ricos em informação. Além disso, o sistema utiliza algoritmos de inferência de alta eficiência, e é poderoso o suficiente para amostrar todas as possíveis grandezas elétricas sem arredondamento. As validações de medição, detecção de estado de carga, assinatura e o *hardware* de medição desenvolvido formam uma solução viável para fornecer uma plataforma acessível aos usuários.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

O trabalho fornece uma base sólida para continuar a pesquisa em várias áreas diferentes. Um dos itens de alta prioridade é a melhoria nos ambientes de interação com os usuários finais, possibilitando o acesso melhor às informações, relatórios detalhados e notificações através de mensagens.

Existem ainda várias abordagens diferentes que precisam ser exploradas. Por exemplo, explorando diferentes maneiras de realizar o ajuste da curva de aprendizado de assinatura de cargas. Além disso, alguns ajustes finos ainda precisam ser estudados, usando diferentes tipos de carga semelhantes e conjuntos de dados mais amplos. Esses ajustes também podem incluir novas abordagens de aprendizado não supervisionado, se os modelos de assinatura de carga não forem derivados dos conjuntos de dados usados para teste.

A interface com outros sensores também é uma área frequentemente discutida, mas pouco estudada. Existem diversos sensores importantes, além do consumo de energia elétrica propriamente dito, incluindo sensores de consumo de água e gás. A maioria dos usuários teriam interesse em, além do consumo de energia elétrica, obter também dados de sensor adicionais que podem aumentar ainda mais a eficiência do sistema. Ter sensores adicionais trabalhando em conjunto, ou ainda implementar uma solução que possa ligar ou desligar cargas automaticamente, com base em critérios programados pelos usuários poderia fornecer recursos avançados de automação.

7.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diversos modelo, métodos e algoritmos de desagregação de consumo frequentemente são negligenciados ou simplesmente apresentados superficialmente pela comunidade, devido principalmente às suas limitações teóricas, ou dificuldade de implementação. Não fosse assim, poderiam resultar soluções promissoras e mais efetivas. São muitos os trabalhos em que diferentes técnicas são apresentadas, em teoria, mas raros os trabalhos que vão além, implementando, construindo e testando tais modelos na prática. Essa limitação impede uma análise profunda dos dados, modificações que poderiam ser implementadas nesses modelos e algoritmos que permitiriam o uso na prática.

Referências

ALCALÁ, J. M.; UREÑA, J.; HERNÁNDEZ, Event-based detector for non-intrusive load monitoring based on the Hilbert Transform. In: **19th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2014**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–4. ISBN 9781479948468.

ANDERSON, K. D. et al. Event detection for Non Intrusive load monitoring. In: **IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 3312–3317. ISSN 1553-572X.

ARMEL, K. et al. Is disaggregation the holy grail of energy efficiency? The case of electricity. **Energy Policy**, v. 52, p. 213–234, 2013. ISSN 03014215.

BAETS, L. D. et al. **Event Detection in NILM using Cepstrum smoothing**. 2016. 1–4 p.

BARANSKI, M.; VOSS, J. Detecting patterns of appliances from total load data using a dynamic programming approach. **Proceedings - Fourth IEEE International Conference on Data Mining, ICDM 2004**, v. 0, p. 327–330, 2004.

BARANSKI, M.; VOSS, J. Genetic algorithm for pattern detection in NIALM systems. In: **Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics**. [S.l.: s.n.], 2004. v. 4, p. 3462–3468. ISBN 0780385667. ISSN 1062922X.

BARSIM, K. S.; MAUCH, L.; YANG, B. **Neural Network Ensembles to Real-time Identification of Plug-level Appliance Measurements**. Vancouver, BC, Canada, 2018. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1802.06963>>.

BARSIM, K. S.; YANG, B. Toward a semi-supervised non-intrusive load monitoring system for event-based energy disaggregation. In: **2015 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing, GlobalSIP 2015**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 58–62. ISBN 9781479975914.

BATRA, N. et al. NILMTK: An Open Source Toolkit for Non-intrusive Load Monitoring. **International Conference on Future Energy Systems, Cambridge, UK**, v. 80, n. 1, p. 1–10, 2014. ISSN 03787796. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1404.3878>>
<<http://dx.doi.org/10.1145/2602044.2602051>>.

BERGES, M. E. **A Framework for Enabling Energy-Aware Facilities Through Minimally-Intrusive Approaches**. [S.l.]: CARNEGIE MELLON UNIVERSITY, 2010.

BOUHOURAS, A. S. et al. Load signatures improvement through the determination of a spectral distribution coefficient for load identification. In: **9th International Conference on the European Energy Market, EEM 12**. [S.l.: s.n.], 2012. ISBN 9781467308328.

CARUANA, R.; NICULESCU-MIZIL, A. Data mining in metric space. In: . [S.l.: s.n.], 2004. p. 69.

CHAN, W. L.; SO, A. T. P.; LAI, L. L. Harmonics load signature recognition by wavelets transforms. In: **International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies**. [S.l.]: Proceedings. DRPT 2000, 2002. p. 666–671.

CHANG, H. H. et al. A new measurement method for power signatures of nonintrusive demand monitoring and load identification. In: **IEEE Transactions on Industry Applications**. [S.l.: s.n.], 2012. v. 48, n. 2, p. 764–771. ISSN 00939994.

CLARKE, F. J. J.; STOCKTON, J. R. Principles and theory of wattmeters operating on the basis of regularly spaced sample pairs. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, v. 15, n. 6, p. 645–652, 1982. ISSN 00223735.

COLE, A.; ALBICKI, A. Nonintrusive identification of electrical loads in a three-phase environment based on harmonic content. In: . [S.l.: s.n.], 2002.

CONNELLEY, J. A. Digital integrated electronics. **Proceedings of the IEEE**, McGraw-Hill, v. 65, n. 12, p. 1735–1736, 2008. ISSN 0018-9219.

COVERT, T.; GREENSTONE, M.; KNITTEL, C. R. Will We Ever Stop Using Fossil Fuels? **Journal of Economic Perspectives**, v. 30, n. 1, p. 117–138, 2016. ISSN 0895-3309.

FARINACCIO, L.; ZMEUREANU, R. Using a pattern recognition approach to disaggregate the total electricity consumption in a house into the major end-uses. **Energy and Buildings**, v. 30, n. 3, p. 245–259, 1999. ISSN 03787788.

FERRI, J. H.-O. C. et al. An experimental comparison of performance measures for classification,. **Pattern Recognit. Lett**, v. 30, n. 1, p. 27–38, 2009. ISSN 01678655.

FESENKO, A. et al. Increasing of equipment efficiency by intensification of technological processes. **Periodica Polytechnica Mechanical Engineering**, v. 63, n. 1, p. 67–73, 2019. ISSN 1587379X.

FIRTH, S. et al. Identifying trends in the use of domestic appliances from household electricity consumption measurements. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 5, p. 926–936, 2008. ISSN 03787788.

FISCHER, C. Feedback on household electricity consumption: A tool for saving energy? **Energy Efficiency**, v. 1, n. 1, p. 79–104, 2008. ISSN 1570646X.

GAO, J. et al. **A feasibility study of automated plug-load identification from high-frequency measurements**. 2016. 220–224 p.

GIRI, S.; BERGÉS, M. An energy estimation framework for event-based methods in Non-Intrusive Load Monitoring. **Energy Conversion and Management**, Elsevier Ltd, v. 90, p. 488–498, 2015. ISSN 01968904.

GONÇALVES, H. et al. Unsupervised disaggregation of appliances using aggregated consumption data. In: **Environmental Engineering**. [S.l.]: CA, USA, 2011. ISBN 9781450308403.

GUPTA, S.; REYNOLDS, M. S.; PATEL, S. N. ElectriSense: Single-Point Sensing Using EMI for Electrical Event Detection and Classification in the home. **UbiComp 2010**, p. 139–148, 2010.

HART, G. W. Prototype Nonintrusive Appliance Load Monitor. In: ENERGY LABORATORY TECHNICAL REPORT, AND ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE TECHNICAL REPORT. [S.l.], 1985. p. 1–170.

HART, G. W. Nonintrusive Appliance Load Monitoring. **Proceedings of the IEEE**, v. 80, n. 12, p. 1870–1891, 1992. ISSN 0018-9219.

HASSAN, T.; JAVED, F.; ARSHAD, N. An Empirical Investigation of V-I Trajectory Based Load Signatures for Non-Intrusive Load Monitoring (submitted abstract for 2014 General Meeting). **IEEE Transactions on Smart Grid**, PP, n. 99, p. 1–9, 2013. ISSN 1949-3061.

HUANG, S. J. et al. Classification of home appliance electricity consumption using power signature and harmonic features. In: **Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 596–599. ISBN 9781612849997.

International Energy Agency. **World Energy Outlook 2018**. [S.l.]: OECD, 2018. (World Energy Outlook). ISBN 9789264064522.

JIN, Y. et al. Robust adaptive event detection in non-intrusive load monitoring for energy aware smart facilities. In: **ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 4340–4343. ISBN 9781457705397.

Jürgen Voss; Michael Baranski. Nonintrusive appliance load monitoring based on an optical sensor. In: . [S.l.]: Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, 2012. p. 4–8.

KELLY, J.; KNOTTENBELT, W. Metadata for energy disaggregation. In: **Proceedings - IEEE 38th Annual International Computers, Software and Applications Conference Workshops, COMPSACW 2014**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 578–583. ISBN 9781479935789.

KHAN, N.; ABAS, N. **Comparative study of energy saving light sources**. 2011. 296–309 p.

KIM, H. et al. Unsupervised Disaggregation of Low Frequency Power Measurements. In: **Proceedings of the 2011 SIAM International Conference on Data Mining**. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2011. p. 747–758. ISBN 978-0-89871-992-5.

KOAY, B. S. et al. Design and implementation of Bluetooth Energy Meter. **ICICS-PCM 2003 - Proceedings of the 2003 Joint Conference of the 4th International Conference on Information, Communications and Signal Processing and 4th Pacific-Rim Conference on Multimedia**, v. 3, p. 1474–1477, 2003.

KOLTER, J. Z.; BATRA, A. Y. N. S. Energy Disaggregation via Discriminative Sparse Coding. In: **Advances in Neural Information Processing Systems**. [S.l.: s.n.], 2002. ISBN 9781617823800.

KOLTER, J. Z.; JAAKKOLA, T. Approximate inference in additive factorial HMMs with application to energy disaggregation. **Journal of Machine Learning Research**, v. 22, p. 1472–1482, 3 2012. ISSN 1533-7928.

KOLTER, J. Z.; JOHNSON, M. J. REDD : A Public Data Set for Energy Disaggregation Research. In: **SustKDD workshop**. [S.l.]: CA, USA, 2011. xxxxx, n. 1, p. 1–6. ISBN 9781450308403.

KRAMER, O. et al. On ensemble classifiers for nonintrusive appliance load monitoring. In: **Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)**. [S.l.]: Volume Part, 2012. v. 7208 LNAI, n. PART 1, p. 322–331. ISBN 9783642289415. ISSN 03029743.

LAI, P.-h. et al. **Database Establishment for Machine Learning in NILM**. Pittsburgh, PA, 2012. 12–14 p. Disponível em: <http://www.ices.cmu.edu/psii/nilm/abstracts/li_Samsung_NILM2012_abstract.pdf>.

LAM, H. Y.; FUNG, G. S. K.; LEE, W. K. A novel method to construct taxonomy electrical appliances based on load signatures. In: **IEEE Transactions on Consumer Electronics**. [S.l.: s.n.], 2007. v. 53, n. 2, p. 653–660.

LEE, K. D. et al. Estimation of variable-speed-drive power consumption from harmonic content. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 2005. ISSN 08858969.

LEEB, S. B.; NORFORD, L. K. Non-intrusive electrical load monitoring in commercial buildings based on steady-state and transient load-detection algorithms. **Energy and Buildings**, v. 24, n. 1, p. 51–64, 1996. ISSN 03787788.

LIANG, J. et al. Load Signature Study—Part I: Basic Concept, Structure, and Methodology. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 25, n. 2, p. 551–560, 2009. ISSN 0885-8977.

LIN, G. Y. et al. **Applying power meters for appliance recognition on the electric panel**. 2010. 2254–2259 p.

LUO, D. et al. Monitoring HVAC equipment electrical loads from a centralized ... **ASHRAE Trans**, v. 108, p. 841–857, 2002.

MARCEAU, M. L.; ZMEUREANU, R. Nonintrusive load disaggregation computer program to estimate the energy consumption of major end uses in residential buildings. **Energy Conversion and Management**, v. 41, n. 13, p. 1389–1403, 2000. ISSN 01968904.

MARCHIORI, A. et al. Circuit-level load monitoring for household energy management. **IEEE Pervasive Computing**, v. 10, n. 1, p. 40–48, 2011. ISSN 15361268.

MAYHORN, E. T. et al. Characteristics and Performance of Existing Load Disaggregation Technologies (No. PNNL-24230). **Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WS, USA, PNNL-24230, Richland, WA (United States)**, null, n. April, p. null, 2015.

MEEHAN, P.; MCARDLE, C.; DANIELS, S. An efficient, scalable time-frequency method for tracking energy usage of domestic appliances using a two-step classification algorithm. **Energies**, v. 7, n. 11, p. 7041–7066, 2014. ISSN 19961073.

MITTELSDORF, M. et al. Submeter based Training of Multi-class Support Vector Machines for Appliance Recognition in Home Electricity Consumption Data. In: . [S.l.: s.n.], 2013. p. 151–158.

MORO, J. Z. et al. A Home Appliance Recognition System Using the Approach of Measuring Power Consumption and Power Factor on the Electrical Panel, Based on Energy Meter ICs. **Circuits and Systems**, v. 04, n. 03, p. 245–251, 2013. ISSN 2153-1285.

PARKER, D. et al. How Much Energy Are We Using ? Potential of Residential Energy Demand Feedback Devices. In: **Solar Energy**. [S.l.]: CA - USA, 2006. p. 1606–1665.

PARSON, O. et al. Non-intrusive load monitoring using prior models of general appliance types. **Proceedings of the 26th AAAI Conference on Artificial Intelligence**, p. 356–362, 2012.

PATEL, S. N. et al. At the Flick of a Switch: Detecting and Classifying Unique Electrical Events on the Residential Power Line. **UbiComp 2007: Ubiquitous Computing**, p. 271–288, 2007. ISSN 0302-9743. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-74853-3_16>.

PEREIRA, L. et al. SustData: A Public Dataset for ICT4S Electric Energy Research. In: **Proceedings of ICT for Sustainability 2014, Stockholm, Sweden**. [S.l.: s.n.], 2014.

QV, L. M. A. R.; MONGA, R. **Building high-level features using large scale unsupervised learning**. 2012. 81–88 p.

RAHIMI, S.; CHAN, A. D. C.; GOUBRAN, R. A. Usage monitoring of electrical devices in a smart home. In: **Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS**. [S.l.: s.n.], 2011. v. 2011, p. 5307–5310. ISBN 9781424441211. ISSN 1557170X.

RICHARDSON, I. et al. Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1878–1887, 2010. ISSN 03787788.

RUZZELLI, A. G. et al. Real-Time Recognition and Profiling of Appliances. In: **7th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–9.

SAIDUR, R. et al. **Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings**. 2012. 543–550 p.

SHAO, H.; TECH, V.; MARWAH, M. **A Temporal Motif Mining Approach to Unsupervised Energy Disaggregation**. 2012. 1–2 p.

SHAW, S. R.; LAUGHMAN, C. R. A Kalman-filter spectral envelope preprocessor. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 2007. ISSN 00189456.

- SHYR, A. et al. **Crowdsourcing Appliance Labels for Energy Disaggregation**. [S.l.]: Vancouver, BC, Canada, 2016.
- SRINIVASAN, D.; NG, W. S.; LIEW, A. C. Neural-network-based signature recognition for harmonic source identification. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, n. 1, p. 398–405, 2006. ISSN 08858977.
- STREUBEL, R.; YANG, B. Identification of electrical appliances via analysis of power consumption. In: **Proceedings of the Universities Power Engineering Conference**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 2011–2012. ISBN 9781467328562.
- THEIS, T.; TOMKIN, J. **Sustainability: A Comprehensive Foundation**. [S.l.]: University of Illinois, 2015. 643 p.
- TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz energética brasileira: uma prospectiva. **Novos Estudos - CEBRAP**, n. 79, p. 47–69, 2008.
- TRUNG, K. N. et al. **Event Detection and Disaggregation Algorithms for NIALM System**. 2014. 2–5 p.
- U.S. Energy Information Agency. **International Energy Outlook**. [S.l.], 2017. 312 p.
- VIEIRA, D. M.; CORREA, P. M.; CARMO, R. A. Os desafios para a expansão da oferta de energia elétrica. **Revista do TCU**, v. 1, n. 1, p. 44–53, 2012.
- WEISS, M. **Ubiquitous Computing Technologies for Residential Energy Conservation**. [S.l.]: PhD, ETH, Zurich, 2012.
- WEISS, M. et al. Leveraging smart meter data to recognize home appliances. In: **2012 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, PerCom 2012**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 190–197. ISBN 9781467302586.
- WILD, B.; BARSIM, K. S.; YANG, B. A new unsupervised event detector for non-intrusive load monitoring. In: **2015 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing, GlobalSIP 2015**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 73–77. ISBN 9781479975914.
- WONG, Y. F. et al. Recent approaches to non-intrusive load monitoring techniques in residential settings. In: **IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications in Smart Grid, CIASG**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 73–79. ISBN 9781467360029. ISSN 2326-7682.
- ZEIFMAN, M.; ROTH, K. Nonintrusive appliance load monitoring: Review and outlook. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v. 57, n. 1, p. 76–84, 2011. ISSN 00983063.
- ZHU, X.; GOLDBERG, A. B. Introduction to Semi-Supervised Learning. In: **Synth. Lect. Artif. Intell. Mach. Learn.** [S.l.: s.n.], 2009. v. 3, n. 1, p. 1–130.
- ZOHA, A. et al. Non-Intrusive Load Monitoring Approaches for Disaggregated Energy Sensing: A Survey. **Sensors**, v. 12, n. 12, p. 16838–16866, 2012. ISSN 14248220.