

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA

AQUISIÇÃO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS

Definição de arquitetura, método e validação
em protótipo

José Antônio Oliveira de Figueiredo

Dissertação apresentada como requisito parcial
à obtenção do grau de Mestre em Computação
Aplicada na Universidade de Passo Fundo.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Schardong Spalding
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Trindade Rebonatto

Passo Fundo

2016

Substitua esta página pela
Ficha Catalográfica
(obrigatório para
dissertações, inexistente em
monografias)

Substitua esta página pelo
Termo de Apresentação
(obrigatório para
dissertações, inexistente em
monografias)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus pela oportunidade de crescimento. A minha esposa e filhos, pela paciência, auxílio e compreensão durante o andamento do trabalho.

Aos professores Spalding e Rebonatto, pela orientação e compartilhamento de suas experiências na condução de uma pesquisa. Aos demais professores do programa, pelos aprendizados que nos possibilitaram.

Por fim, agradeço também às instituições e empresas que de alguma forma contribuíram ou apoiaram o andamento deste projeto: Hospital São Vicente de Paulo (HSVP), Universidade de Passo Fundo (UPF), Elomed e Instituto Federal Sul-rio-grandense (IFSul).

“Só sei que nada sei...”

(Frase atribuída ao filósofo grego Sócrates)

AQUISIÇÃO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS

RESUMO

O presente trabalho, descreve uma arquitetura e uma metodologia desenvolvidas para viabilizar a aquisição de valores de corrente e tensão em instalações elétricas. A arquitetura é composta por um módulo de coleta, um módulo de processamento e um módulo de visualização: o módulo de coleta é baseado na plataforma Arduino e utiliza sensores eletromagnéticos; o módulo de processamento é responsável pela extração, processamento e armazenamento dos dados; o módulo de visualização é a interface onde o usuário tem acesso às informações processadas. O sistema foi implementado e validado em um protótipo chamado *Monitor de Consumo de energia elétrica, Corrente e Tensão – MCCT*; esta validação foi feita em bancada de testes, onde diversos equipamentos foram ligados (em diversas combinações) enquanto o consumo foi monitorado e registrado. Uma diferença importante deste protótipo, em relação aos equipamentos comerciais que medem consumo ou analisam a qualidade da energia elétrica, é o fato de ele armazenar as formas de onda da corrente e da tensão cada vez que há uma alteração da corrente elétrica, indicando que um equipamento da instalação foi ligado ou desligado. Desta forma, o MCCT está preparado para um trabalho de pesquisa que se seguirá a este. Os principais resultados obtidos são o desenvolvimento de uma plataforma para aquisição de grandezas elétricas, validada pelo protótipo e de uma arquitetura e método capazes de identificar eventos em instalações elétricas. Além disto, durante o andamento do trabalho foram executados diversos experimentos que, compilados, deram origem a um livro intitulado *Cookbook para aquisição de corrente e tensão alternadas com Arduino*; este cookbook tem como objetivo ser um guia didático para novos pesquisadores que sejam inseridos na área de aquisição de grandezas elétricas. Por fim, este trabalho apresenta um leque de oportunidades de aprimoramentos do método e do estudo relacionado a aquisição de grandezas elétricas, bem como para o desenvolvimento de novas aplicações.

Palavras-Chave: Aquisição de sinais elétricos, Computação aplicada, Sistemas embarcados.

ACQUISITION OF ELECTRICAL QUANTITIES

ABSTRACT

This work, describes an architecture and methodology developed to properly acquire electric current and electric potential on installations. The architecture is composed by modules which are: acquisition, processing and visualization. The Acquisition module is based on Arduino platform and uses electromagnetic sensors; the processing module performs data extraction, data processing and data storage; lastly, the visualization module is an interface to the user takes a view about collected informations. The system was implemented and validated in a prototype called *Monitor of energy consumption, electric current and electric potential* (acronym MCCT in portuguese). This validation was made on test bench, where various common equipments were turned on (with several combinations), while his electrical data was acquired and registered. When this prototype is compared to other commercial equipment used to collect/analyze electrical power, an important differential worth mentioning is the ability to storage values of electrical current and potential waveforms. This is done in each detection electric current change, indicating that some equipment was turned on or turned off. That way, the MCCT is ready to several futures research works. The main results are the development of a platform for the acquisition of electrical quantities, validated by a prototype, and also an architecture and method capable of identifying events in electrical installations. During the course of work, were made several experiments. These experiments were assembled in a book called *Cookbook for acquiring electrical current alternating and electrical potential alternating with Arduino*. The purpose of the book is to be a teaching guide for new researchers working on acquisition of electrical values. Finally, this work opens up a range of opportunities to work on electrical values acquisition, in development of new applications and, of course, the improvement of the presented method.

Keywords: Acquisition of electrical signals, Applied computing, Embbeded systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	O caminho percorrido pela energia elétrica até o consumo. (Fonte: www.abradee.com.br)	25
Figura 2.	Diferenças de fase entre R S e T. (adaptado de La Science Pour Tous [9]).	26
Figura 3.	Movimento dos elétrons em um condutor (adaptado de Edminister [6]). .	27
Figura 4.	Representação do campo magnético em um condutor submetido a um fluxo de corrente (adaptado de Fowler [10]).	28
Figura 5.	Representação do campo magnético em um condutor submetido a um fluxo de corrente alternada (adaptado de Fowler [11]).	28
Figura 6.	Gráfico demonstrando valores de pico e valor eficaz para tensão elétrica (do autor).	29
Figura 7.	Diagrama de blocos representando um sistema embarcado (adaptado de Toulson e Wilmshurst [13]).	31
Figura 8.	Diagrama de blocos de um microcontrolador (adaptado de Toulson e Wilmshurst [13]).	32
Figura 9.	Esquema para ligação de tensão de referência externa para o conversor AD (do autor).	36
Figura 10.	Registrador ADCSRA (adaptado de Atmel [16]).	39
Figura 11.	Diagrama representando as partes do sensor (do autor).	41
Figura 12.	Transdutor toroidal com dois terminais no enrolamento secundário. (adaptado de MGS [26]).	42
Figura 13.	Circuito padrão do AD623 (adaptado de Devices [27]).	43
Figura 14.	Gráficos com o sinal não amplificado e o sinal amplificado (do autor). . . .	43
Figura 15.	Gráficos com o sinal sem deslocamento DC e o sinal com deslocamento DC (do autor).	44
Figura 16.	Fotografia de um sensor utilizado (do autor).	45
Figura 17.	Diagrama elétrico para montagem do sensor de tensão (do autor).	47
Figura 18.	Montagem do sensor de tensão em bancada de testes (do autor).	48
Figura 19.	Conector para os sensores (do autor).	49
Figura 20.	Toroides no Protegemed (adaptado de Rebonatto, Hessel e Spalding [24])	53
Figura 21.	Diagrama de componentes do sistema (do autor).	57
Figura 22.	Diagrama de atividades do módulo de coleta (do autor).	58
Figura 23.	Diagrama de atividades do módulo de processamento (do autor).	64

Figura 24.	Fotografia com o sistema todo na bancada, durante um teste de aquisição utilizando lâmpada incandescente (do autor).	72
Figura 25.	Fotografias do módulo de coleta (do autor).	72
Figura 26.	Fotografia dos sensores montados na bancada de testes (do autor).	73
Figura 27.	Captura de tela dos log do módulo de processamento (do autor).	73
Figura 28.	Captura de tela do protótipo MCCT (do autor).	74
Figura 29.	Comparação entre corrente mostrada pelo multímetro com corrente capturada pelo módulo de coleta (do autor).	77
Figura 30.	Gráfico com uma captura de corrente de um evento (do autor)	77
Figura 31.	Gráfico com uma captura de tensão de um evento (do autor)	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Uso de referência externa (adaptado de Arduino [19]).	36
Tabela 2.	Demonstração do <i>Range</i> (adaptado de Arduino [19] e Atmel [17]).	36
Tabela 3.	Exemplos de conversão em 10bits (adaptado de Atmel [17],[18]).	37
Tabela 4.	Passos de conversão em 10bits	38
Tabela 5.	Clock e valores de <i>prescaler</i> (adaptado de Atmel [16]) e Berg [20]).	39
Tabela 6.	Combinações do <i>prescaler</i> (adaptado de Atmel [16]).	39
Tabela 7.	Cálculo do tempo de uma leitura.	50
Tabela 8.	Cálculo do tempo médio em um laço.	51
Tabela 9.	Tempo de Aquisição para 3 sensores	59
Tabela 10.	Aquisição de 3 sensores	60
Tabela 11.	Tratamento do sinal	61
Tabela 12.	Cálculo do Valor Eficaz	61
Tabela 13.	Teste de evento	62
Tabela 14.	Teste de sobretensão	63
Tabela 15.	Cálculo RMS no módulo de processamento.	66
Tabela 16.	Cálculo da FFT	66
Tabela 17.	Cálculo da Harmônica	67
Tabela 18.	Cálculo do ângulo	67

LISTA DE SIGLAS

ABRADEE – Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica

FO – Forma de Onda

GEPID – Grupo de Estudo e Pesquisa em Inclusão Digital

GND – Ground

HSVP – Hospital São Vicente de Paulo

IFSUL – Instituto Federal Sul-rio-grandense

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

LABELO – Laboratórios Especializados em Eletroeletrônica, Calibração e Ensaios

PUC-RS – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

RMS – Root Mean Square

UPF – Universidade de Passo Fundo

VCC – Voltage Continuous Current

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	MOTIVAÇÃO	23
1.2	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	24
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	24
2	CONCEITOS E EXPERIMENTOS DE REFERÊNCIA	25
2.1	GRANDEZAS ELÉTRICAS	25
2.1.1	Tensão elétrica	25
2.1.2	Corrente elétrica	26
2.1.3	Campo magnético	27
2.1.4	Corrente alternada	27
2.1.5	Valor Eficaz e Valor de Pico	29
2.2	SISTEMAS EMBARCADOS	30
2.2.1	Microcontrolador	31
2.2.2	Desenvolvimento para sistemas embarcados	32
2.2.3	Linguagem de programação	33
2.3	ARDUINO	34
2.3.1	Conversor AD da plataforma Arduino	35
2.4	<i>FAST FOURIER TRANSFORM</i>	40
2.5	SENSORES	41
2.5.1	Transdutor	41
2.5.2	Condicionador de sinal	42
2.5.3	Filtragem	43
2.5.4	Amplificação do sinal	43
2.5.5	Elevação do nível DC	44
2.5.6	Tipos de sensores	45
2.6	LIGANDO UM SENSOR AO ARDUINO	48
2.6.1	Alimentação do sensor	48
2.6.2	Saída do sensor	49
2.7	TEMPO DAS AQUISIÇÕES	50
2.7.1	Tempo de uma aquisição	50
2.7.2	Tempo de aquisições em um laço	51

3	METODOLOGIA PARA AQUISIÇÃO	53
3.1	TRABALHOS RELACIONADOS	53
3.2	ESPECIFICIDADES DO CENÁRIO	54
3.3	MÉTODO DE AQUISIÇÃO	56
3.4	ARQUITETURA PROPOSTA	57
3.4.1	Módulo de coleta	57
3.4.2	Módulo de processamento	64
3.4.3	Módulo de visualização	68
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
4.1	ARQUITETURA E METODOLOGIA PARA AQUISIÇÃO	71
4.2	VALIDAÇÃO DA ARQUITETURA E METODOLOGIA PROPOSTAS	71
4.2.1	O módulo de coleta	72
4.2.2	Modulo de processamento	73
4.2.3	Módulo de visualização	74
4.3	TESTES EXECUTADOS	76
4.3.1	Calibração dos sensores	76
4.3.2	Aquisição de corrente alternada	77
4.3.3	Aquisição de tensão alternada	78
4.4	BANCO DE DADOS DOS EVENTOS	79
4.5	PLATAFORMA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS	79
4.6	DOCUMENTAÇÃO DOS EXPERIMENTOS	80
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
5.1	TRABALHOS FUTUROS	82
	REFERÊNCIAS	83
	APÊNDICE A – Diagrama de classe do módulo de processamento	87
	APÊNDICE B – Modelagem do banco de dados	89
	APÊNDICE C – MCCT - Manual do Usuário	91

1. INTRODUÇÃO

A computação é uma ciência que normalmente se inter-relaciona com o estudo de outras ciências. Neste sentido, aplicar técnicas computacionais para resolver problemas, desenvolver soluções ou mesmo novos produtos é um dos objetivos do Mestrado em Computação Aplicada e, conseqüentemente, do presente trabalho.

Neste trabalho são aplicadas técnicas computacionais para a aquisição de valores de corrente e tensão, que são grandezas presentes em qualquer instalação elétrica. Para que a aquisição seja possível, são propostos uma arquitetura e um método. Por fim, a validação é feita por meio de um protótipo. Os dados obtidos poderão ser utilizados para um melhor gerenciamento do consumo de energia pelo usuário final, além de abrir possibilidades para o desenvolvimento de novos trabalhos na área.

1.1 MOTIVAÇÃO

A energia elétrica, particularmente a alternada, é hoje a base energética de praticamente qualquer planta industrial, comercial e residencial. Esta energia chega a estes lugares por meio de linhas de transmissão e transformação até que esteja pronta para o uso, na instalação do cliente.

A qualidade dessa energia depende dos meios de transmissão e frequentemente os usuários não dispõem de mecanismos para verificar se a energia que chega às suas instalações está dentro dos padrões esperados de qualidade. Ou seja, invariavelmente utiliza-se a energia fornecida sem saber se está adequada ao uso e se não causará danos aos equipamentos energizados, conforme pode ser visto em Mehl [1] e Oleskovicz[2] .

Além disso, os usuários não dispõem de mecanismos próprios de gerenciamento ou verificação de consumo elétrico. A única forma de conhecer seu consumo é por meio do informativo mensal fornecido pela concessionária de energia. A ausência de mecanismos para o gerenciamento do consumo diário pode ser um fator que influencia na economia ou no desperdício energético.

Sabe-se também que o Brasil passa atualmente por uma significativa crise energética. Recentemente, em notícia publicada no portal G1 [3], por exemplo, destacava-se a necessidade de importação de energia elétrica do Uruguai para suprir as necessidades da região sul do país. Para além deste problema, conforme Sachs [4] e Kossmann[5], o desperdício ou consumo excessivo de energia é um dos fatores que contribuem para os problemas climáticos do planeta.

Ainda, ao realizar uma busca por equipamentos para medição do consumo de energia em instalações elétricas trifásica, ou mesmo monofásica, percebeu-se que, além do fato de os mesmos serem pouco conhecidos, os fabricantes não ofereciam um sistema capaz de identificar qual equipamento daquela instalação foi ligado ou desligado. Em um determinado momento, percebeu-se que era possível criar um novo produto para tentar atingir também este objetivo. Mas para isso, seria necessário antes, desenvolver uma plataforma capaz de detectar e coletar as alterações nos valores

de corrente na instalação elétrica, além de outras informações, como a forma de onda da tensão e da corrente, bem como medidas de tempo dos eventos, entre outras.

Este trabalho limitou-se a dar este primeiro passo, que é instrumentalizar o usuário final para que este consiga verificar alguns aspectos da qualidade da energia que consome, bem como obtenha meios para gerenciar seu próprio consumo, passando a economizar energia. Em conformidade com esta, que é a nossa principal motivação, a plataforma desenvolvida ainda poderá servir de base, em um segundo momento, para a identificação de equipamentos em uma instalação.

1.2 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Diante deste cenário, surgiu a possibilidade de desenvolver um sistema para análise de energia elétrica com capacidade de identificar as falhas mais comuns, bem como quantificar o consumo de energia em uma instalação elétrica e armazenar dados para processamento posterior.

Para isto, o trabalho propõe a definição de uma arquitetura sobre a qual é executado o método para identificação de eventos “ligar” e/ou “desligar” de aparelhos. Os eventos identificados passam por um processamento de sinais para extração dos dados de interesse, dentre eles a qualidade de energia. Estes eventos e seus dados são armazenados em um banco de dados, a partir do qual são extraídas as informações desejadas.

Um dos propósitos da arquitetura é utilizar uma plataforma de baixo custo e fácil acesso, desta forma o Arduino foi escolhido como base para a prototipação e testes do sistema. Além disto, foram utilizados sensores que não alteram a configuração da rede elétrica monitorada.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O restante deste texto está dividido da seguinte forma: no capítulo 2 é feita uma revisão de conceitos e definições relacionados ao tema estudado; no capítulo 3 são apresentados alguns trabalhos relacionados, bem como a arquitetura e método propostos são detalhados, levando em consideração seus componentes e forma de funcionamento. Os resultados obtidos e sua análise são apresentados no capítulo 4. Por fim, no capítulo 5 são feitas algumas considerações finais acerca do trabalho executado, apontando também possíveis trabalhos futuros.

2. CONCEITOS E EXPERIMENTOS DE REFERÊNCIA

Neste capítulo é feita uma breve revisão sobre os conceitos e definições relativos aos fundamentos que embasam este trabalho, a saber: Grandezas elétricas, Sistemas embarcados, Arduino, Transformada de Fourier e Sensores. Os experimentos apresentados, que também são necessários para o embasamento do trabalho, são: Ligando um sensor ao Arduino e Tempo das aquisições.

2.1 GRANDEZAS ELÉTRICAS

A seguir são apresentados alguns conceitos relacionados à energia elétrica alternada, que é utilizada na grande maioria das instalações comerciais, residenciais ou industriais. Esta revisão é simplificada, pois são enfatizados apenas os aspectos de maior relevância ao trabalho realizado.

2.1.1 Tensão elétrica

Tensão elétrica é definida por Edminister [6] como a diferença de potencial (ddp) entre dois pontos de um circuito elétrico.

Esta diferença de potencial produz o movimento de elétrons dentro dos condutores metálicos entre estes pontos. Quanto maior a ddp, maior o volume de elétrons que são deslocados, ou seja, maior a corrente elétrica no condutor. A ddp, ou simplesmente tensão neste texto, é produzida por geradores de eletricidade que se encontram nas usinas. Estes geradores produzem energia e as linhas de transmissão transportam esta energia para as cidades e até nossas casas e estabelecimentos, onde a tensão elétrica entre o condutor e o solo (terra) é de 220 Volts ou 127 Volts eficazes conforme a região do país.

O Volt é a unidade de medida da tensão no sistema internacional de unidades, termo que é uma homenagem ao cientista Alessandro Volta, inventor da pilha elétrica (Gamov) [7].

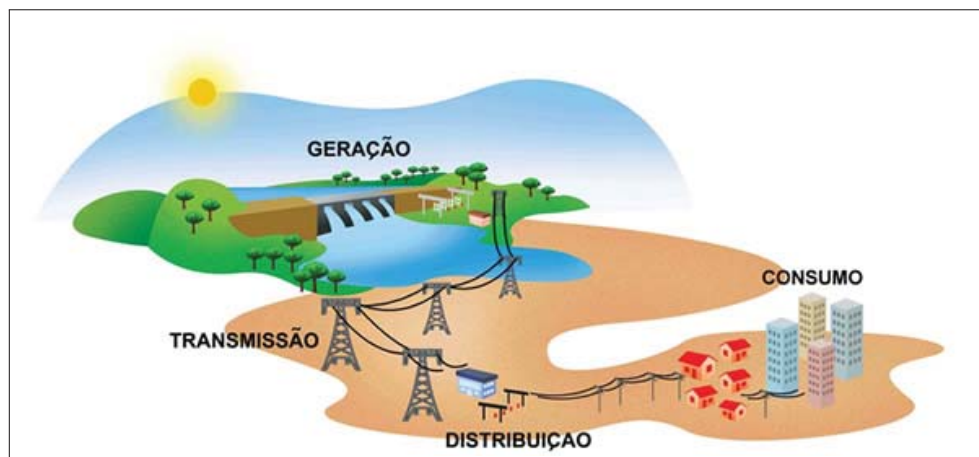


Figura 1. O caminho percorrido pela energia elétrica até o consumo. (Fonte: www.abradee.com.br)

O caminho a partir da geração de energia é demonstrado pela Figura 1, podem ser observados os seguintes estágios descritos pela Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE) [8]:

- Geração: onde a energia é produzida;
- Transmissão: onde a tensão é elevada para a casa centenas de milhares de Volts para ser conduzida até os centros de distribuição;
- Distribuição: a distribuição é composta por subestações que recebem a energia elétrica em alta tensão e fazem um rebaixamento para distribuição dentro dos centros urbanos até os transformadores rebaixadores dos centros urbanos para consumo;
- Consumo: no estágio representado pelo consumo, a tensão é novamente rebaixada por transformadores de distribuição, para valores de 220V ou 127V conforme a região do país, e está pronta para utilização do usuário final.

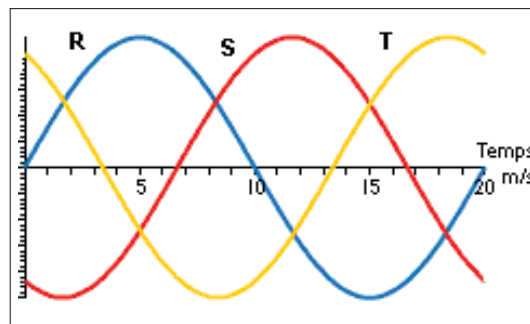


Figura 2. Diferenças de fase entre R S e T. (adaptado de La Science Pour Tous [9]).

Na Figura 2 verifica-se a variação do valor da tensão elétrica em função do tempo. Observa-se também que os geradores nas usinas produzem tensões nos 3 condutores apresentados pela Figura 1. Cada condutor (R, S ou T) deste sistema trifásico, possui uma tensão de valor máximo igual ao outro, mas que não varia da mesma forma que as demais, embora mantenha uma simetria em relação a esta variação. Nesta figura a frequência é de 50 Hz, ou seja, a cada 20 milissegundos a tensão recomeça a variar.

2.1.2 Corrente elétrica

Outra grandeza relacionada à eletricidade é a corrente elétrica, que é o movimento organizado dos elétrons livres de um condutor metálico, quando uma diferença de potencial é aplicada nos extremos deste. A Figura 3 demonstra este movimento.

Na figura apresentada, os elétrons (representados por círculos com um sinal “-” no centro) estão momentaneamente se movendo para a esquerda. Nas correntes que serão medidas neste

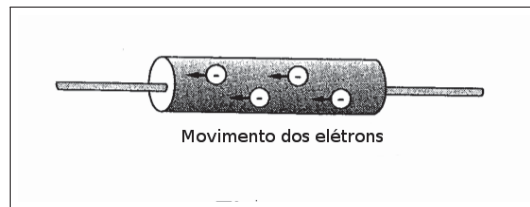


Figura 3. Movimento dos elétrons em um condutor (adaptado de Edminister [6]).

trabalho, os elétrons variam de sentido, ora vão para a esquerda e ora vão para a direita e por esta razão é chamada de corrente alternada.

Em outras palavras, corrente elétrica é a quantidade de carga elétrica que atravessa a superfície transversal de um condutor em um tempo determinado. A compreensão deste conceito é fundamental para compreender como é feita aquisição da corrente, buscando medir o seu valor e capturar sua forma de onda (FO). A forma de onda é um gráfico que mostra como a corrente ou a ddp varia em função do tempo. A forma de onda (FO) da tensão elétrica produzida nas usinas do Brasil é sempre uma forma senoidal, como mostrado na Figura 2. A FO da corrente dependerá também do tipo de equipamento que está sendo alimentado por esta tensão.

A unidade de medida da corrente elétrica é o Ampère, termo que é uma homenagem ao cientista André Marie Ampère, segundo Gamov [7] um dos pioneiros no estudo da eletricidade.

2.1.3 Campo magnético

A presença da corrente elétrica em um condutor produz um campo magnético em torno do mesmo e segundo Gamov [7], este efeito foi descrito por Michael Faraday em meados de 1840.

Tal fenômeno é explorado durante este trabalho, pois as variações neste campo são diretamente proporcionais às variações do valor da corrente no condutor. A Figura 4 representa graficamente esse fenômeno, onde as linhas de força (ou campo) são apenas uma representação gráfica, porque o campo está distribuído em círculos contínuos e existe ao longo de todo o comprimento do condutor (Fowler) [10]. Este campo magnético é circular, concêntrico e perpendicular ao sentido da corrente e sua amplitude é proporcional à intensidade desta corrente.

2.1.4 Corrente alternada

Quando um equipamento está sendo energizado por uma corrente alternada, como a que está presente nas tomadas elétricas residenciais ou comerciais, observa-se outro fenômeno relevante para este trabalho. As linhas de força (ou campo) representadas na Figura 4 irão *se expandir* e *se contrair* na mesma frequência da rede elétrica. Além disso, também vão mudar de sentido, sendo ora sentido horário e ora sentido anti-horário.

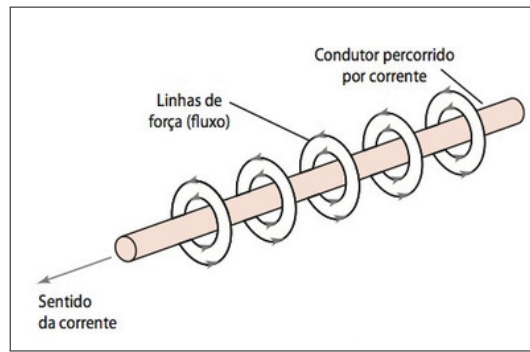


Figura 4. Representação do campo magnético em um condutor submetido a um fluxo de corrente (adaptado de Fowler [10]).

Em outras palavras, o campo magnético que aparece em torno do condutor modifica-se de acordo com a variação da corrente elétrica que circula dentro deste condutor[11]; o mesmo campo varia também em função da frequência da corrente.

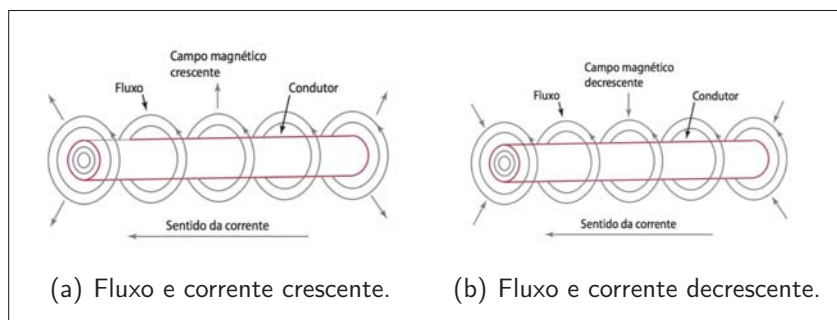


Figura 5. Representação do campo magnético em um condutor submetido a um fluxo de corrente alternada (adaptado de Fowler [11]).

A Figura 5 demonstra este fenômeno de *expandir* e *contrair*. Na Figura 5(a) verifica-se a expansão do campo, enquanto que na Figura 5(b) verifica-se a contração do campo. Quando o sentido da corrente muda, o que ocorre em muitos equipamentos, o sentido das linhas circulares dos campos magnéticos também mudam.

Na literatura, os efeitos descritos acima aparecem nos transformadores de tensão elétrica que estão nos postes das ruas, e também nos transformadores de corrente (TC) e tensão (TP) que medem estas grandezas nas diversas aplicações em sistemas elétricos.

Durante o desenvolvimento da pesquisa, utiliza-se estes efeitos de campo magnético e transdutores toroidais para adquirir os valores da correntes elétrica dos equipamentos, bem como a sua forma de onda.

Os sensores utilizados para aquisição dos valores são apresentados e discutidos na seção 2.5.

2.1.5 Valor Eficaz e Valor de Pico

Nesta seção, são apresentadas algumas informações relacionadas às medidas de valor eficaz e de valor de pico.

Ao observar uma forma de onda alternada, é fácil perceber que a medida de tensão e corrente alterna entre diversos valores da escala. Por este motivo, o sinal apresenta um valor eficaz e um valor de pico, que são medidas diferentes mas que estão inter-relacionadas.

O gráfico da Figura 6 apresenta os valores hipotéticos (gerados artificialmente) de tensão elétrica para instalações em 220 Volts. Este gráfico mostra o intervalo de um ciclo de onda completo com 64 amostras de valor.

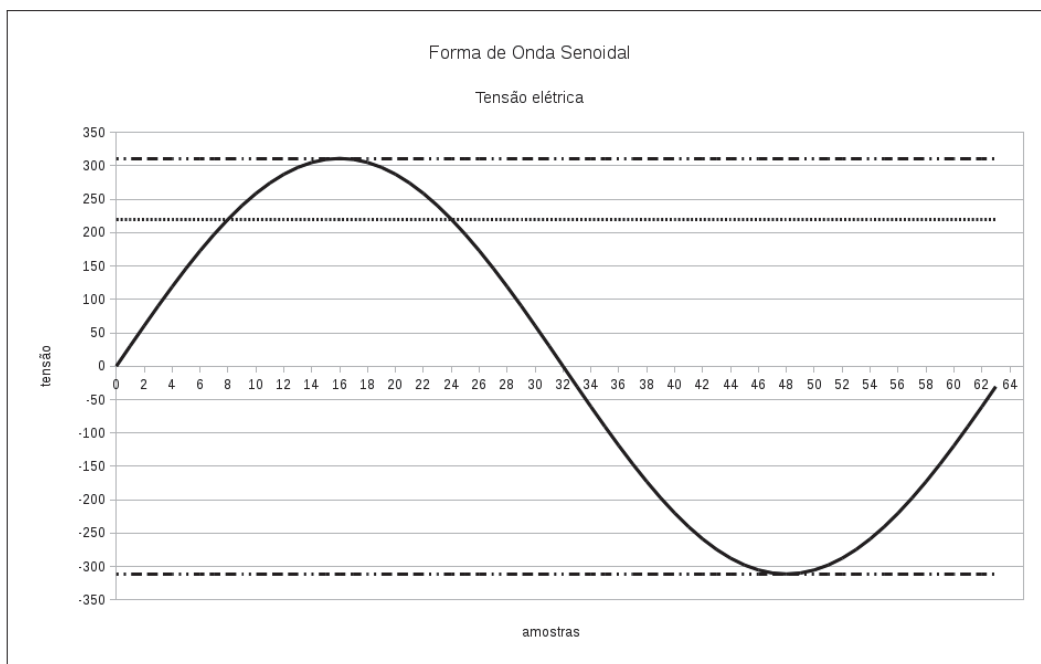


Figura 6. Gráfico demonstrando valores de pico e valor eficaz para tensão elétrica (do autor).

A linha contínua mostra a forma de onda que a tensão assume neste intervalo; as linhas traço-ponto indicam os valores de pico (positivo e negativo) da senoide e a linha pontilhada representa o valor eficaz da senoide.

Os valores de pico são obtidos considerando apenas os extremos da senoide, que no caso são $311,12V$ para o pico positivo e $-311,12V$ para o pico negativo.

Conforme Edminister [6], ao aplicar a tensão da forma de onda representada na Figura 6, uma energia resultante é produzida. Esta mesma energia poderia ser gerada por uma tensão constante¹ de valor correspondente ao valor eficaz da tensão senoidal.

O valor eficaz pode ser obtido por meio do cálculo *Root Mean Square*² (RMS), desta senoide. A Equação 1 demonstra a operação feita para chegar a este valor.

¹Neste caso a forma de onda é uma reta paralela ao eixo dos tempos.

²Em português: valor médio quadrático.

$$valorEficaz = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i)^2} \quad (1)$$

Uma outra forma de calcular o valor eficaz é partindo do valor de pico, se este for conhecido, aplicando a Equação 2. Importante destacar que esta equação é aplicável somente à formas de onda senoidais, enquanto a Equação 1 é aplicável a qualquer forma de onda.

$$valorEficaz = \frac{valorPico}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

2.2 SISTEMAS EMBARCADOS

Atualmente, uma grande variedade de equipamentos, dispositivos ou utilitários são desenvolvidos em plataformas de sistemas embarcados, fazendo com que esta tecnologia tenha cada vez mais importância nos segmentos de nossa sociedade.

São sistemas originalmente desenvolvidos para a indústria, em áreas de controle e automação, e que, em decorrência da redução dos custos na manufatura de microcontroladores dedicados e outros componentes eletrônicos, acabaram sendo utilizados também em outros setores, como na área de comunicações, setores automobilístico, industrial e residencial, entre outros. Lewis [12] afirma que “para cada microprocessador produzido para uso em um computador mais de 100 são fabricados para uso em sistemas embarcados”. O fato é registrado também por Toulson e Wilmshurst [13], quando afirmam que “sistemas embarcados são sistemas extremamente comuns em residências, veículos ou escritórios, entre outros”.

Sistema embarcado é então o termo usado para definir uma forma de tecnologia onde, geralmente, tem-se um circuito eletrônico dedicado, ou de uso específico, associado a um microprocessador e a um software de controle deste microcontrolador. Lewis [12] define esta tecnologia como dispositivos eletrônicos que incorporam microprocessadores em suas implementações.

Já Toulson e Wilmshurst [13] definem sistemas embarcados como equipamentos que possuem um microprocessador dedicado e embarcado (frequentemente oculto) no próprio produto, e que muitas vezes o usuário nem mesmo tem ciência deste fato.

A Figura 7 representa, em um diagrama de blocos, a composição de um sistema embarcado, onde são identificadas as seguintes partes:

- **Variáveis de entrada:** representam o conjunto de informações que alimentam o sistema. Frequentemente, nesta parte são utilizados sensores de monitoramento.
- **Variáveis de saída:** sistemas embarcados podem controlar (acionar) atuadores, em função das variáveis de entrada, de comandos do usuário ou mesmo do processamento executado.
- **Interface de usuário:** por esta interface o usuário irá interagir com o sistema, inserindo dados ou visualizando resultados.

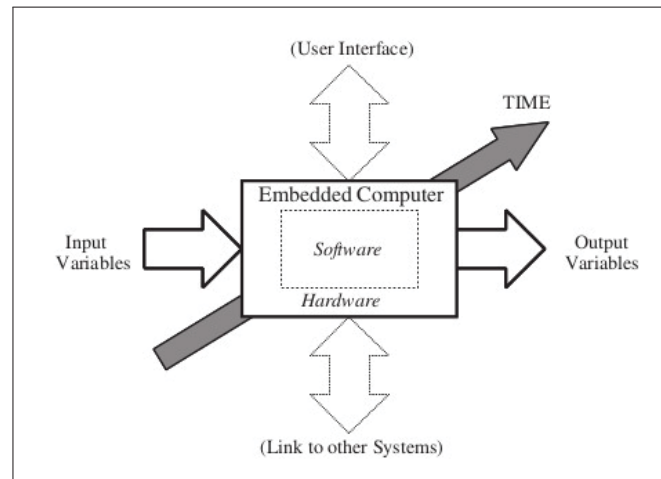


Figura 7. Diagrama de blocos representando um sistema embarcado (adaptado de Toulson e Wilmshurst [13]).

- **Link para sistemas:** não raro, sistemas embarcados comunicam-se com outros sistemas (embarcados ou não). Esta parte representa esta interface.
- **Tempo:** o tempo pode ser uma dimensão importante para muitos sistemas embarcados, pois muitas de suas atividades precisam ser sincronizadas.

O diagrama mostra também um computador embarcado em um hardware (tipicamente um microcontrolador definido em 2.2.1) executando um firmware.

2.2.1 Microcontrolador

O computador embarcado, representado na Figura 7, é um tipo especial (ou dedicado) de microprocessador e frequentemente dispõe de alguns recursos extras que são responsáveis pelo controle da entrada/saída, controle de interfaces, controle de tempo ou outros periféricos. O principal objetivo em fazer uso de um “computador embarcado”, é simplificar o *design* do sistema e garantir flexibilidade para o controle de vários dispositivos e/ou circuitos.

Na Figura 8 está representado, de forma simplificada, esses recursos extras, em um diagrama de blocos, cujos recursos são detalhados na sequência.

- **Microprocessor Core:** é o bloco responsável pelo processamento de dados do sistema; além de controlar todo o conjunto, executa operações aritméticas e lógicas;
- **Program Memory:** é a memória de programa do microcontrolador, utilizada para a execução do código;
- **Data Memory:** é a memória de dados do microcontrolador, utilizada para armazenamento de dados que estão em execução;

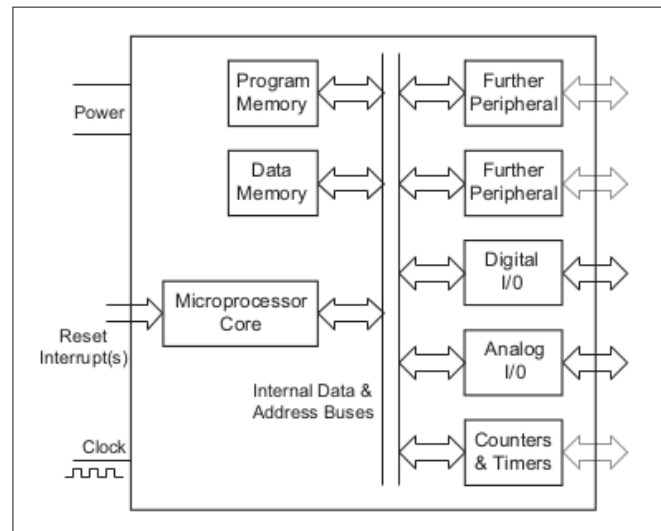


Figura 8. Diagrama de blocos de um microcontrolador (adaptado de Toulson e Wilmshurst [13]).

- **Further Peripheral:** são blocos para interconexão com periféricos genéricos que representam a possibilidade de expansão do microcontrolador, como um teclado alfanumérico.
- **Digital I/O:** é um bloco para interconexão de dispositivos digitais, ou que tem comportamento digital; como por exemplo a leitura de botões de estado;
- **Analog I/O:** é um bloco que representa a interconexão com dispositivos analógicos, ou que apresentam comportamento analógico, como os sensores de temperatura ou ainda corrente elétrica;
- **Counters & Timers:** contadores e temporizadores são recursos que o microcontrolador disponibiliza para que o projetista consiga controlar (e monitorar) seu sistema; por exemplo, a medida de tempo entre eventos.

Vale destacar que esta lista de blocos não é única, pois pode variar conforme a arquitetura adotada pelo fabricante do microcontrolador.

2.2.2 Desenvolvimento para sistemas embarcados

O desenvolvimento para sistemas embarcados difere um pouco da técnica utilizada para desenvolvimento *desktop*. Conforme Lewis [12], enquanto os computadores de uso geral executam softwares com objetivos diferentes, o sistema embarcado executa apenas um software, que foi desenvolvido com um objetivo específico de controlar determinado circuito. Este software dedicado é normalmente chamado de *firmware*.

Existem ainda outras restrições impostas pelo hardware do microcontrolador, como a pouca quantidade de memória para execução do programa ou mesmo para armazenamento deste; limitação na velocidade de operação (ou *clock*) do microcontrolador; limitações de tamanho de barramento

de dados/endereçamento, entre outros. Estas características variam conforme o fabricante e o custo do dispositivo.

Assim, ao desenvolver programas para sistemas embarcados, o projetista precisa levar em consideração estas características, tanto no aspecto do projeto de software como na definição da linguagem de programação. Em Lewis [12], é verificado que o desenvolvimento para este tipo de plataforma traz alguns novos desafios como: custo, estabilidade e performance. Estes desafios são detalhados como se segue.

- **Estabilidade:** a estabilidade está relacionada ao fato de que um sistema embarcado poderá ser (ou fazer parte) de um equipamento que não pode ser reinicializado durante uma execução, como um sistema de freios. Lewis [12] destaca que as boas práticas de codificação e procedimentos de testes ganham, assim, um novo nível de importância;
- **Performance:** a performance está relacionada ao bom desempenho do sistema, obtido com o uso de técnicas de programação eficientes, como *multithreading*, *scheduling* e, é claro, algoritmos eficientes;
- **Custo:** o custo deve ser reduzido, facilitando a entrada do produto no mercado.

2.2.3 Linguagem de programação

A linguagem de programação utilizada na programação de sistemas embarcados pode ser qualquer uma. Pesquisando na literatura, encontramos que as mais utilizadas são o C e o Assembly.

O Assembly é considerado como a linguagem de mais baixo nível que humanos conseguem compreender. Nesta linguagem, cada instrução tem um código *mnemônico* que “facilita” a sua identificação. Conforme Toulson e Wilmschurst [13], esta linguagem poderá ser utilizada quando as necessidades de refinamento de código ou a exigência de desempenho são extremas, porque o Assembly permite que se trabalhe com instruções bem próximas da CPU. O Assembly é considerado, portanto, uma linguagem de baixo nível.

Contudo, linguagens de médio ou alto nível são mais fáceis de serem manipuladas, além de apresentarem maior produtividade. Nesta categoria, entram linguagens como C, Java ou Fortran e muita discussão pode surgir sobre qual seria a mais adequada para o desenvolvimento em sistemas embarcados. Toulson e Wilmschurst [13] evidenciam que existe uma certa concordância de que a linguagem C apresenta vantagens para o desenvolvimento de sistemas deste tipo. A justificativa é de que, mesmo sendo considerada de alto nível, a linguagem é simples e tem instruções que permitem o acesso e a manipulação do hardware quando necessário.

A linguagem C++, que é uma evolução do C, também está sendo largamente utilizada para aplicações embarcadas mais avançadas.

2.3 ARDUINO

Diversas plataformas de computação embarcada estão disponíveis hoje no mercado. A opção pelo Arduino como plataforma para prototipação foi baseada principalmente no fato de a mesma ser de *fácil acesso*, *baixo custo* e de *fácil manuseio/operação*; além de ser conhecida internacionalmente.

De forma bastante simples e direta, o Arduino é uma placa com um *chip* microcontrolador, que tem a capacidade de receber de vários tipos de sensores e controlar atuadores, além de ser capaz de executar diversos tipos de processamentos. Além disso, a plataforma é desenvolvida e distribuída sob o conceito de *Hardware Open Source*, que possibilita a redistribuição do circuito de forma legal.

McRoberts [14] define o Arduino como "um pequeno computador que você pode programar para processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos conectados a ele". Já Margolis [15] define como um ambiente que foi desenhado para ser fácil de usar. Este ambiente ao qual Margolis se refere é resultado do hardware e do software juntos.

Existe hoje, no mercado, uma variedade considerável de modelos de Arduino; modelos que se adaptam às mais variadas aplicações, sendo que neste trabalho utilizamos o Arduino UNO³, uma vez que suas especificações técnicas atendem às necessidades dos experimentos.

O Arduino UNO é, provavelmente, a placa controladora mais conhecida da família Arduino⁴.

O hardware da placa Arduino UNO (Arduino) [16] é apresentado na sequência:

Microcontrolador:

- Marca/Modelo: Atmel ATmega328P;
- Clock: 16MHz;
- SRAM: 2KB;
- Memória Flash: 32KB;
- EEPROM de 1KB;

Entrada e Saída:

- Portas digitais: 14 (6 com PWM);
- Portas analógicas: 6;

Alimentação:

³<https://www.arduino.cc/en/Main/GenuinoProducts>

⁴Nota: No primeiro semestre de 2015, período em que este trabalho começou ser escrito, os fundadores da Arduino anunciam o lançamento da marca Genuino, que será comercializada fora do território norte-americano. Contudo, optamos por manter o termo Arduino durante a execução deste trabalho, pelo fato de as placas de que dispomos ainda serem desta marca.

- Tensão de operação: 5,0V;
- Alimentação: 7,0 – 12,0V;
- Corrente máxima por pino 20mA;
- Saída de tensão de 3,3V;

2.3.1 Conversor AD da plataforma Arduino

Segundo Atmel [16], [17], [18], o processador do Arduino UNO dispõe de 6 entradas para conversão de analógico para digital. Neste trabalho, tais entradas são utilizadas para coletar sinais que tem comportamento analógico. A corrente elétrica de 60Hz, nosso alvo de estudo, é um exemplo de sinal analógico.

O processo de conversão analógico para digital consiste em receber um valor analógico e converter para um valor digital, utilizando notação binária, em função de uma referência. Ou seja, o valor digital é correspondente ao valor analógico que foi convertido. Alguns dos principais aspectos da conversão AD são discutidos a seguir.

Tensão de Referência do AD:

A referência é um nível de tensão que o conversor AD utiliza como base para o processo de conversão - normalmente a referência determina o *range* das conversões (Atmel) [18]. A maioria dos conversores AD atuais, inclusive no Arduino, podem trabalhar com tensão de referência interna ou externa.

A referência interna é mais comum e fácil de se utilizar, porque não requer alteração de hardware. A referência *DEFAULT* é uma referência interna. Para usar uma referência interna diferente da padrão, basta informar no código. Estas referências variam de acordo com a versão do Arduino.

A lista a seguir mostra algumas configurações de referência interna e seus respectivos processadores:

- *DEFAULT*: Referência é setada para 5,0V;
- *INTERNAL* Referência é setada para 1,1V;
- *INTERNAL1V1* Referência é setada 1,1V - apenas para Arduino Mega;
- *INTERNAL2V56*: Referência é setada 2,56V - apenas para Arduino Mega.

Por padrão, todo Arduino utiliza a referência *DEFAULT* - neste caso, o programador não precisa fazer nenhuma alteração em seu código.

Tabela 1. Uso de referência externa (adaptado de Arduino [19]).

```

1. void setup(){
2.   Serial.begin(9600);
3.   analogReference(EXTERNAL);
4.   pinMode(pino, INPUT);
5. }

```

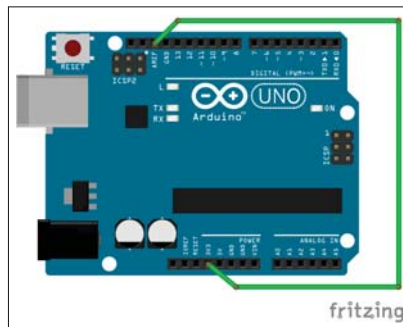


Figura 9. Esquema para ligação de tensão de referência externa para o conversor AD (do autor).

Podemos alterar a referência do conversor AD, utilizando uma interna (vide lista no início desta subseção) ou mesmo uma referência externa. Para isto, precisamos informar dentro do código do programa (normalmente na função *setup()*), através da instrução *analogReference()*. O trecho de código da Tabela 1, na linha 3, mostra o uso desta instrução.

A nível de hardware, é preciso fazer a ligação do pino *AREF* à tensão desejada. Na Figura 9 é mostrado uma ligação criando uma referência de $3,3V$, que é referência sugerida para o desenvolvimento dos experimentos - vide seção 2.6.

Range:

O *range*, ou alcance do conversor AD, é o espaço de valores entre o valor mínimo e máximo que o conversor AD pode trabalhar.

Frequentemente, o *range* vai de $0,0V$ até o valor limite definido pela tensão de referência utilizada no conversor AD, conforme pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2. Demonstração do *Range* (adaptado de Arduino [19] e Atmel [17]).

Referência	Range Aceito
$5,0V$	$0V$ até $5,0V$
$3,3V$	$0V$ até $3,3V$
$2,56V$	$0V$ até $2,56V$

Resolução:

Ao fazer a conversão do sinal analógico para digital, o valor é convertido e armazenado em um número binário. Resolução é o termo que define a quantidade total de bits que o valor convertido ocupa. A resolução será maior ou menor conforme a quantidade de bits disponíveis para conversão.

Geralmente, os conversores AD trabalham com resoluções de 8, 10 ou 12bits, sendo que o microcontrolador do Arduino (Atmel) [17],[18] trabalha com resolução de 10bits. Desta forma, os resultados de conversão são armazenados em uma variável de tipo *inteiro*.

A Equação (3), conforme Toulson e Wilmshurst [13], mostra o cálculo que o conversor faz para a conversão, onde: V_i é o valor analógico a ser convertido; V_{ref} é a tensão de referência do conversor AD; n é o número de bits do conversor e D é o resultado da conversão.

$$D = \frac{V_i}{V_{ref}} \cdot (2^n - 1) \quad (3)$$

Desta forma, ao converter, por exemplo, um valor de 2,35V usando uma referência de 3,3V em um conversor de 10bits, temos que:

$$D = \frac{2,35}{3,3} \cdot (2^{10} - 1) \therefore D = 728,5 \quad (4)$$

Na Equação (4) o resultado da operação gerou um número com valores decimais, mas o conversor AD desconsidera a parte decimal deste valor e trabalha apenas a parte inteira. O resultado é armazenado em uma variável do tipo *Integer*.

A Tabela 3 apresenta alguns exemplos de conversão, mostrando o resultado em binário e também em decimal, considerando uma referência de 3,3V e uma resolução de 10bits.

Tabela 3. Exemplos de conversão em 10bits (adaptado de Atmel [17],[18]).

Vin	Decimal	Binário
3,3V	1023	111111111
0,0V	0	000000000
0,1V	31	000001111
0,096V	3	000000011
1,648V	511	011111111
2,648V	821	1100110101

Com base na visualização da Tabela 3, pode-se verificar que há uma relação direta entre o valor analógico e o resultado digital já convertido. A transição entre um bit e outro é chamada de passo.

Esta visualização nos leva à Tabela 4, onde estão exemplificados os valores obtidos para os 5 primeiros passos de conversão.

Tabela 4. Passos de conversão em 10bits

V _{in}	Decimal	Binário
0,0V	0	0000000000
0,0032V	1	0000000001
0,0064V	2	0000000010
0,0096V	3	0000000011
0,012V	4	0000000100

Em outras palavras, para uma resolução de 10bits com referência em 3,3V, o valor de tensão máximo entre um passo e outro é de 3,2mV.

Erro de quantização:

O erro de quantização, conforme Toulson e Wilmshurst [13], é o valor máximo de erro entre um passo da conversão. Qualquer conversor AD apresenta este erro uma vez que é uma característica inerente a digitalização de sinais analógicos, em função do passo entre uma conversão e outra.

A Equação (5), adaptado de Atmel [17], demonstra o cálculo do erro de quantização para o Arduino UNO, que possui um conversor AD com resolução de 10bits. Para facilitar a compreensão da equação usamos o termo *ErrQ* para referir Erro de Quantização.

$$ErrQ = \frac{V_{ref}}{\frac{resolu}{2}} \quad (5)$$

Ao aplicarmos uma tensão de referência de 5,0V, tem-se um Erro de Quantização de 2,44mV, conforme é demonstrado na Equação (6).

$$ErrQ = \frac{5,0}{\frac{1.024}{2}} \therefore 2,44mV \quad (6)$$

Entretanto, ao fixar a tensão de referência em 3,3V, tem-se um erro de quantização de 1,61mV, conforme demonstra a Equação (7).

$$ErrQ = \frac{3,3}{\frac{1.024}{2}} \therefore 1,61mV \quad (7)$$

Prescaler do conversor AD:

Prescaler é um recurso de hardware, que fica no microcontrolador e que permite a alteração da frequência base de operação do conversor AD. Este recurso é necessário porque todo microcontrolador trabalha em uma determinada frequência enquanto seus componentes internos (normalmente I/O) trabalham em uma frequência menor.

O conversor AD é controlado pelo registrador *ADCSRA*, de 8bits (Arduino) [16]. Cada bit deste registrador possui uma função específica, sendo que o *prescaler* é controlado pelos bits 0,

Tabela 5. Clock e valores de *prescaler* (adaptado de Atmel [16]) e Berg [20]).

Clock Interno	<i>Prescaler</i>	Clock no AD
16MHz	2	8MHz
16MHz	4	4MHz
16MHz	8	2MHz
16MHz	16	1MHz
16MHz	32	500KHz
16MHz	64	250KHz
16MHz	128	125KHz

1 e 2, identificados respectivamente por *ADPS0*, *ADPS1* e *ADPS2*. Na Figura 10 é apresentado o diagrama de blocos deste registrador e seus respectivos bits.

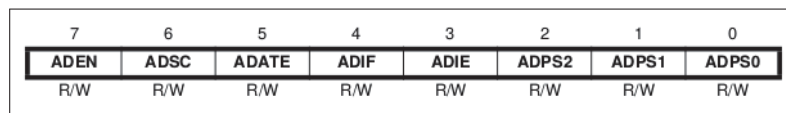


Figura 10. Registrador ADCSRA (adaptado de Atmel [16]).

As combinações dos bits *ADPS0*, *ADPS1* e *ADPS2* são mostradas na Tabela 6.

Tabela 6. Combinações do *prescaler* (adaptado de Atmel [16]).

ADPS2	ADPS1	ADPS0	Divisor do clock
0	0	0	2
0	0	1	2
0	1	0	4
0	1	1	8
1	0	0	16
1	0	1	32
1	1	0	64
1	1	1	128

O microcontrolador ATmega328P do Arduino UNO, por exemplo, trabalha com um clock interno de 16MHz, enquanto que o conversor AD trabalha em uma frequência de 125KHz, configuração *default* aplicada pela biblioteca *wiring.c*.

A frequência de 125KHz é obtida pela divisão do clock interno do microcontrolador por 128 (*ADPS0* = 1, *ADPS1* = 1 e *ADPS2* = 1), que é valor padrão do *prescaler* para a família Arduino.

Como visto, o conversor AD do Arduino trabalha em uma frequência base de 125KHz e, buscando na documentação dos microcontroladores Atmel [17], verificamos que uma conversão

padrão do AD consome 13 ciclos do clock. A partir disto, podemos conhecer o número máximo de conversões em um determinado período de tempo.

Conforme mostra a Equação (8), nesta frequência o conversor AD consegue executar um máximo de 9.615 conversões em 1s.

$$Amostras/s = \frac{FreqADC}{CiclosGastosConversao} \cdot \frac{125KHz}{13} = 9.615aq/s \quad (8)$$

Se for necessário executar mais que 9.615 aquisições em 1s, é preciso aumentar a frequência do conversor AD, alterando o prescaler para algum dos divisores listados na Tabela 6. Alterando o *prescaler* para divisor 64, o conversor AD será forçado a trabalhar em 250KHz; aplicando novamente a Equação (8) o número de aquisições em um 1s sobe para 19.230, conforme exposto a Equação (9).

$$Amostras/s = \frac{250KHz}{13} = 19.230aq/s \quad (9)$$

Em outras palavras, a alteração do *prescaler* faz com que o conversor AD trabalhe em modo acelerado, deixando as conversões mais rápidas, aumentando a quantidade de conversões em um determinado período de tempo.

De acordo com Berg [20], o conversor AD do Arduino pode trabalhar com o máximo de 1MHz sem que ocorra degradação significativa na precisão das conversões executadas. Nesta frequência pode-se trabalhar com aproximadamente 77.000 amostras por segundo, que segundo Atmel [17], é um número compatível com o teorema de amostragem de Nyquist.

2.4 FAST FOURIER TRANSFORM

Em 1807, o matemático e físico Jean Baptiste Josep Fourier apresentou um trabalho para representar distribuições de temperatura em ondas senoidais. Neste trabalho enunciou a “afirmativa de que qualquer sinal periódico contínuo pode ser representado pela soma de ondas senoidais adequadamente escolhidas”[21]. Mais tarde, a análise de Fourier tornar-se-ia base para muitos tipos de processamento digital de sinais. “Dito de forma simples, a transformada de Fourier permite que um sinal no domínio do tempo, seja representado no domínio da frequência”[21]. Isto significa que, ao lermos um sinal qualquer, podemos encontrar (e manipular) as frequências que o compõem. O inverso disto também é possível pois, “se conhecemos a frequência de um sinal, a inversa de Fourier nos permite determinar este sinal no domínio do tempo”[21].

Existem atualmente algumas variações desta operação, como, por exemplo, a Transformada de Fourier, Séries de Fourier, Séries de Fourier de Tempo Discreto e Transformada Discreta de Fourier. Steven [21] esclarece que “o único membro desta família que é relevante para o processamento digital de sinais é a Transformada Discreta de Fourier (DFT⁵)”. Formas eficientes para cálculo da DFT são chamados de algoritmos FFT⁶, onde diversas técnicas são desenvolvidas, como

⁵Discrete Fourier Transform.

⁶Em português: Transformada Rápida de Fourier.

FFT recursiva, radix-2 e suas derivações radix-3, radix-4, etc. Além destas, segundo RAO [22], outras formas também podem ser adotadas .

Em geral, os algoritmos rápidos reduzem a complexidade assintótica de uma DFT de $O(n^2)$ para aproximadamente $O(n \log n)$ operações aritméticas complexas, podendo ainda oferecer uma significativa redução de requisitos de armazenamento. Aqui, vale ressaltar que diversos autores esclarecem que qualquer algoritmo eficiente da DFT é chamado de FFT, ou seja, a FFT não é um outro tipo de DFT e sim apenas uma forma eficiente de executar o mesmo cálculo ou transformada.

2.5 SENSORES

Para adquirir as grandezas presentes no condutor, bem como a forma de onda das mesmas, é necessário utilizar um sensor que capte o campo magnético presente em torno do condutor e transforme-o em um sinal elétrico compatível com a entrada analógica do microcontrolador.

Este sensor deve ser instalado em um dos condutores da rede elétrica que está sendo analisada⁷. A instalação é feita sem que o condutor precise ser interrompido ou sofra qualquer alteração.

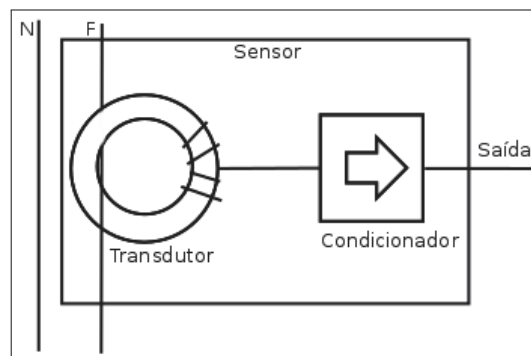


Figura 11. Diagrama representando as partes do sensor (do autor).

Conforme representado no diagrama da Figura 11, este sensor é composto por um transdutor e um condicionador de sinal. O sensor foi desenvolvido para o projeto Protegemed (Spalding) [23] e sua descrição é encontrada em Rebonatto [24] e em Rebonatto, Hessel e Spalding [25]. As partes do sensor são detalhadas a seguir.

2.5.1 Transdutor

O transdutor de núcleo toroidal utilizado é um componente que transforma o campo magnético presente em torno de qualquer condutor que tenha alguma corrente circulando e variando, em um nível de tensão equivalente. O campo magnético é um fenômeno discutido no seção 2.1.3.

⁷Sugerimos que seja instalado no condutor fase, que é o condutor que está conectado ao disjuntor termomagnético.

O núcleo do transdutor que utilizamos é composto por material nanocristalino, que é um material com alta capacidade de concentração do campo magnético. Este núcleo também pode ser feito com um material magnético nanocristalino que tem muita facilidade de concentrar campo magnético. Este último tipo pode ser encontrado no interior dos disjuntores diferenciais.

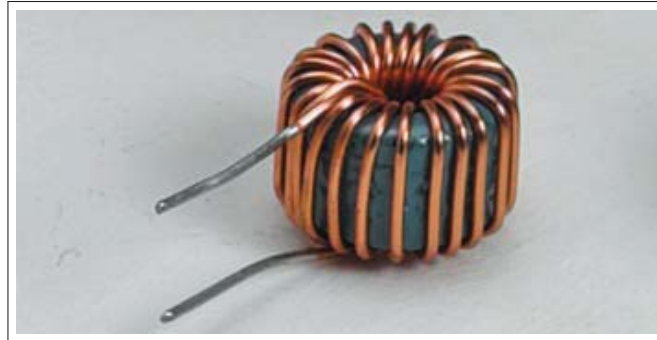


Figura 12. Transdutor toroidal com dois terminais no enrolamento secundário. (adaptado de MGS [26]).

A Figura 12 mostra o transdutor toroidal e o enrolamento do condutor secundário, que, no nosso protótipo, tem cem (100) voltas. O enrolamento primário é simplesmente o condutor que passa pelo meio do toroide.

Nos terminais deste enrolamento secundário é gerada uma tensão proporcional ao campo magnético no material nanocristalino do toroide, que, por sua vez, é proporcional à corrente elétrica do condutor que passa pelo meio deste. Logo, tem-se um valor de tensão nestes dois terminais que é proporcional à corrente que queremos medir e da qual se quer capturar a FO. O problema é que esta tensão é muito pequena para ser medida pelo conversor A/D microcontrolador disponível, sendo necessário fazer um tratamento deste sinal utilizando um circuito Condicionador de Sinal.

2.5.2 Condicionador de sinal

Para adaptar a linguagem utilizada ao que é comum ser encontrado nos livros de eletrônica, esta tensão proporcional à corrente que se quer ler recebe o nome de “sinal”. O condicionador de sinal é um circuito eletrônico do tipo *amplificador de instrumentação*, baseado no circuito integrado AD623 fabricado pela *Analog Devices*. O AD623 é detalhado no livro do fabricante (datasheet) em *Devices* [27] e o circuito utilizado no sensor baseia-se no esquema disponível neste datasheet. O diagrama é mostrado na Figura 13.

O condicionador de sinal recebe o sinal gerado pelo transdutor e aplica um tratamento neste sinal, tornando o mesmo compatível com os valores de tensão do conversor AD do microcontrolador.

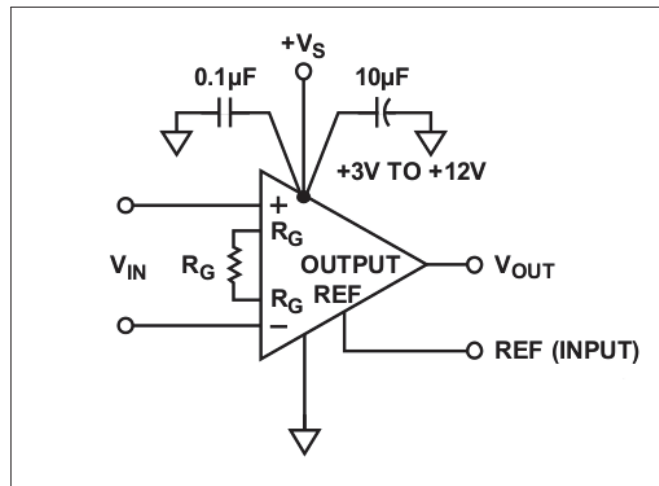


Figura 13. Circuito padrão do AD623 (adaptado de Devices [27]).

2.5.3 Filtragem

Os terminais do enrolamento secundário do toroide são conectados a um capacitor de $100nF/25V$. Nesta situação, o capacitor atua como um filtro de frequências mais elevadas, evitando que, na entrada do AD, apareçam sinais de frequência maiores do que $1,0kHz$ com valores proporcionalmente grandes de tensão em relação à frequência de $60Hz$.

Esta etapa de filtragem impede que sinais sem relevância para este trabalho sejam levados até o módulo de processamento.

2.5.4 Amplificação do sinal

O sinal entregue pelo transdutor ao circuito condicionador está na ordem de milivolts (mV), sendo necessário um estágio de amplificação de sinal.

Na Figura 14(a) é apresentado um sinal senoidal hipotético com amplitude de $100mV$ e na Figura 14(b) o mesmo sinal amplificado em 30 vezes.

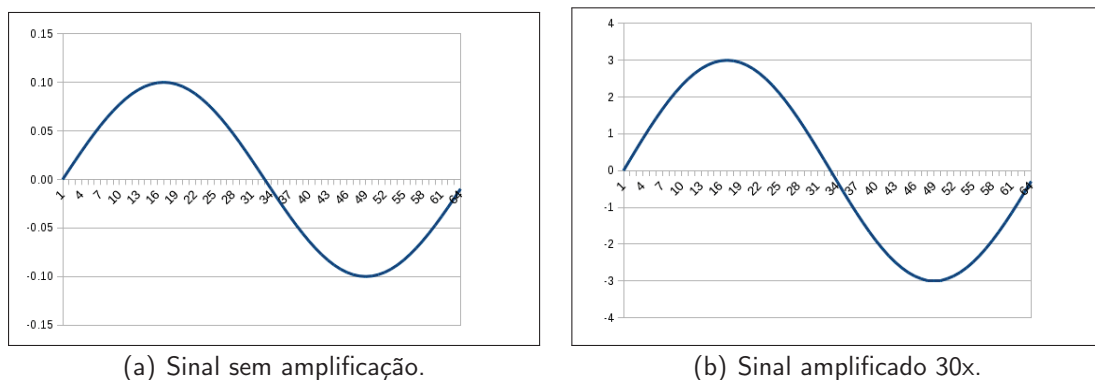


Figura 14. Gráficos com o sinal não amplificado e o sinal amplificado (do autor).

Num primeiro momento poder-se-ia estar satisfeitos, pois o conversor AD do Arduino pode receber sinais de até 3,3 Volts e na Figura 14(b) a amplitude máxima é 3,0V. Entretanto, se o sinal visto nesta figura, fosse aplicado na entrada do conversor AD do Arduino, ele iria “ver” somente a parte entre 0,0V e 3,3V, pois a entrada do AD não é capaz de medir sinais negativos. Em outras palavras, o sinal negativo é rejeitado pelo AD.

A solução então é reduzir o ganho e achar uma forma de elevar todo o sinal para cima de 0,0V.

2.5.5 Elevação do nível DC

Como pode ser observado na Figura 15(a), o sinal está oscilando entre um valor positivo e negativo. A parte do sinal que está abaixo do eixo x (negativo), não é compreendida pelo conversor AD do microcontrolador. Para resolver este problema, o circuito condicionador faz um deslocamento do sinal, deixando ele totalmente positivo.

O nome deste procedimento é elevação do nível DC⁸ e o resultado é mostrado na Figura 15: Em 15(a) tem-se um gráfico mostrando um sinal sem o deslocamento, onde nota-se que o mesmo alterna entre valores positivos e negativos; já na Figura 15(b), tem-se o mesmo sinal deslocado em 1,65V, onde nota-se que o sinal alterna totalmente no quadrante positivo do plano cartesiano; ou seja, não existem mais valores negativos.

Os valores de ambas as figuras foram geradas artificialmente apenas para demonstração das funções do circuito do sensor.

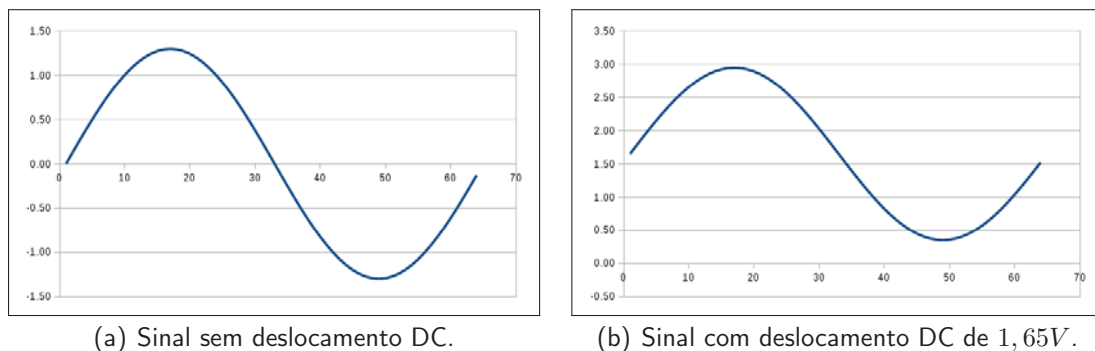


Figura 15. Gráficos com o sinal sem deslocamento DC e o sinal com deslocamento DC (do autor).

Os sensores utilizados neste trabalho foram fornecidos diretamente pela empresa Elomed⁹, apoiadora deste projeto. Vale destacar que estes mesmos sensores podem ser feitos por um Engenheiro ou técnico em Eletrônica e os circuitos podem ser melhorados.

A Figura 16 mostra um sensor utilizado neste trabalho. Outros detalhes podem ser obtidos nas referências Spalding [23],[28] e em Rebonatto [25].

⁸Direct Current é abreviatura utilizada na língua inglesa. Em português, é mais usual encontrarmos CC - Corrente Contínua.

⁹<http://www.elomed.com.br>

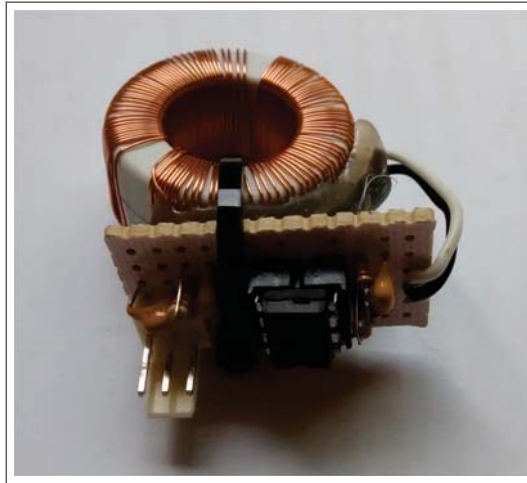


Figura 16. Fotografia de um sensor utilizado (do autor).

2.5.6 Tipos de sensores

O mesmo tipo de sensor pode ser modificado para aquisição de diferentes níveis de corrente elétrica e até mesmo de tensão. Nesta seção são demonstradas algumas alterações feitas nos sensores para esta adequação, uma vez que é trabalhado com sensores para 3 níveis diferentes de corrente, que são:

- Entre 0 a 2,0 mA;
- Entre 2,0 mA e 1,5 A;
- Entre 1,5 e 90A.

Para isto, é necessário alterar o ganho do circuito conforme a aplicação do sensor. O componente responsável por esta alteração é o resistor de ganho - (R_g), demonstrado na Figura 13, e a Equação (10) retirada de Devices [27] demonstra o cálculo utilizado para esta operação. Este resistor de ganho é ligado entre os pinos 2 e 3 do AD623.

$$Ganho = \frac{100k\Omega}{R_g} + 1 \quad (10)$$

Sensor para correntes até 2,0mA:

Se for preciso medir correntes muito pequenas, é necessário utilizar um sensor com alta sensibilidade e para aumentar esta sensibilidade, aumenta-se o ganho do sensor.

O resistor de ganho do sensor utilizado para baixas correntes é de 560Ω ; obtendo um ganho de 179,5 vezes, conforme demonstra a Equação (11).

$$Ganho = \frac{100k\Omega}{560\Omega} + 1 \therefore Ganho = 179,5 \quad (11)$$

O sensor nesta configuração é capaz de medir correntes entre $0,0A$ e $2,0mA$.

Sensor para correntes até 1,5A:

Para correntes baixas, como por exemplo entre $2mA$ e $1,5A$, é preciso alterar o sensor diminuindo sua sensibilidade; em outras palavras, diminuir o ganho.

O resistor de ganho do sensor para correntes até $1,5A$ é de $1k8\Omega$; obtendo um ganho de 56,5 vezes, conforme demonstra a Equação (12).

$$Ganho = \frac{100k\Omega}{1k8\Omega} + 1 \therefore Ganho = 56,5 \quad (12)$$

Sensor para correntes acima de 1,5A:

Para correntes acima de $1,5A$, é preciso um sensor com um ganho bem menor. No circuito utilizado, um resistor de ganho de $47k\Omega$ é utilizado, resultado em um ganho de 3,12 vezes, conforme demonstra a Equação (13).

$$Ganho = \frac{100k\Omega}{47k\Omega} + 1 \therefore Ganho = 3,12 \quad (13)$$

Este sensor é capaz de medir correntes dentro de um *range* de $1,5A$ até $90A$.

Sensor de tensão elétrica:

Como este projeto prevê a medição da tensão elétrica, nesta seção é demonstrado como esta medição pode ser feita, fazendo uso de um sensor de correntes até $2,0mA$, fazendo uma pequena intervenção na rede elétrica monitorada.

Neste caso, somente é preciso medir a tensão do condutor de corrente em relação ao condutor neutro da instalação. Esta medida de tensão é necessária para calcular a potência e a energia elétrica consumida pelos equipamentos ligados ao condutor da corrente que está sendo medida.

Para fazer a medição da tensão elétrica entre os condutores fase e neutro, é preciso ligar um resistor de $220k\Omega$ entre estes condutores, com o objetivo de fazer uma corrente muito baixa circular neste resistor; o sensor de baixa corrente detecta esta corrente e informa o valor para o microcontrolador. No microcontrolador, são feitos alguns cálculos para transformar o valor lido em tensão.

Este resistor deve ser ligado entre o fio fase e neutro da rede elétrica, conforme visto na Figura 17. Um fio deve ser ligado com solda nos terminais do resistor de forma que o sensor fique a uma distância segura da fiação. Esta ligação deve ser protegida com material isolante adequado, evitando o risco de choque elétrico ao pesquisador.

Quando um resistor de $220k\Omega$ é ligado entre os condutores fase e neutro de uma instalação elétrica de $220V$, espera-se uma corrente resultante de $1mA$. Este valor é calculado pela lei de Ohm, conforme demonstra a Equação (14).

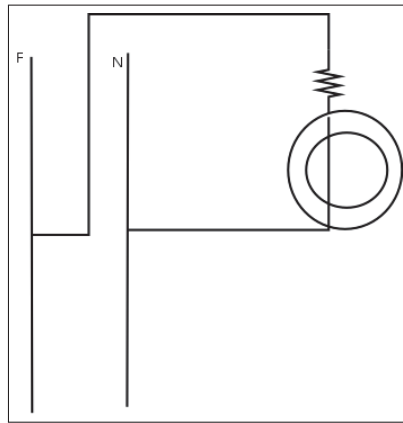


Figura 17. Diagrama elétrico para montagem do sensor de tensão (do autor).

$$E = IR \therefore I = \frac{E}{R} \therefore I = \frac{220V}{220k\Omega} \therefore I = 1,0mA \quad (14)$$

Contudo, o valor de $220k\Omega$ é nominal, ou seja, não corresponde ao valor exato do resistor em uso. Assim, é necessário aplicar na equação o valor real do resistor, que foi medido com um multímetro. Para o experimento, demonstrado na Figura 18, mediu-se um valor de 224.900Ω , valor passado para Equação (15). Um solução de maior precisão, seria fazer uso de um resistor com tolerância de 1%.

$$I = \frac{E}{R} \therefore I = \frac{220V}{224.900\Omega} \therefore I = 0,000978A \quad (15)$$

Sempre que a tensão variar, a corrente resultante varia de forma diretamente proporcional. Para fazer o cálculo da tensão, é necessário percorrer o caminho inverso, multiplicando a corrente medida pelo valor do resistor utilizado, conforme Equação (16).

Esta técnica é aplicada no *firmware* de coleta de tensão, desenvolvida no capítulo 3. A intenção de mostrar estas equações é didática, pois no momento da calibração é possível utilizar valores inteiros como 220 V e 220 kOhms e somente ajustar o ganho.

$$E = IR \therefore E = 0,000978A * 224.900\Omega \therefore E = 220,0V \quad (16)$$

Na Figura 18 é mostrado esta montagem em bancada. O resistor (identificado pela seta preta) ligado no fio azul, está protegido com fita isolante. O sensor de tensão, identificado na figura deverá ser ligado ao Arduino.

A régua de tomada serve para ligação de cargas de testes com leitura de corrente elétrica¹⁰.

¹⁰Importante destacar a necessidade de isolamento adequado deste sistema devido ao risco de choque.

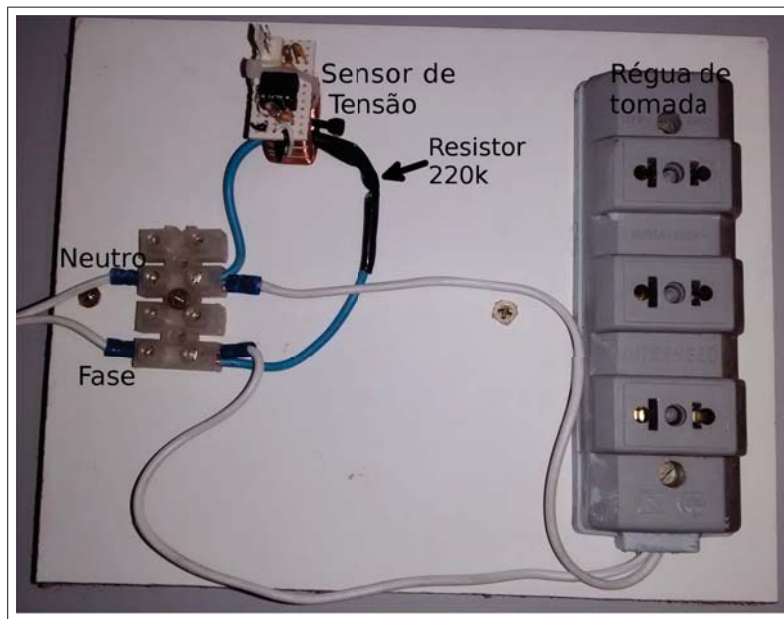


Figura 18. Montagem do sensor de tensão em bancada de testes (do autor).

2.6 LIGANDO UM SENSOR AO ARDUINO

O sensor utiliza uma conexão com 3 vias, sendo 2 vias para alimentação VCC e GND e uma para entrega do sinal. Para fazer a ligação pode ser utilizado um cabo de 3 vias. Mostra-se na Figura 19(a) o conector com as respectivas marcações:

- +: Pino de alimentação VCC;
- S: Pino de saída de sinal;
- gnd: Pino de alimentação GND;

Para conexão com o sensor, é utilizado um conector KK Fêmea (tipo alojamento) de 3 vias, 2,54mm, conforme verificado na Figura 19(b). Um cabo com pelo menos 3 vias deverá ser utilizado¹¹.

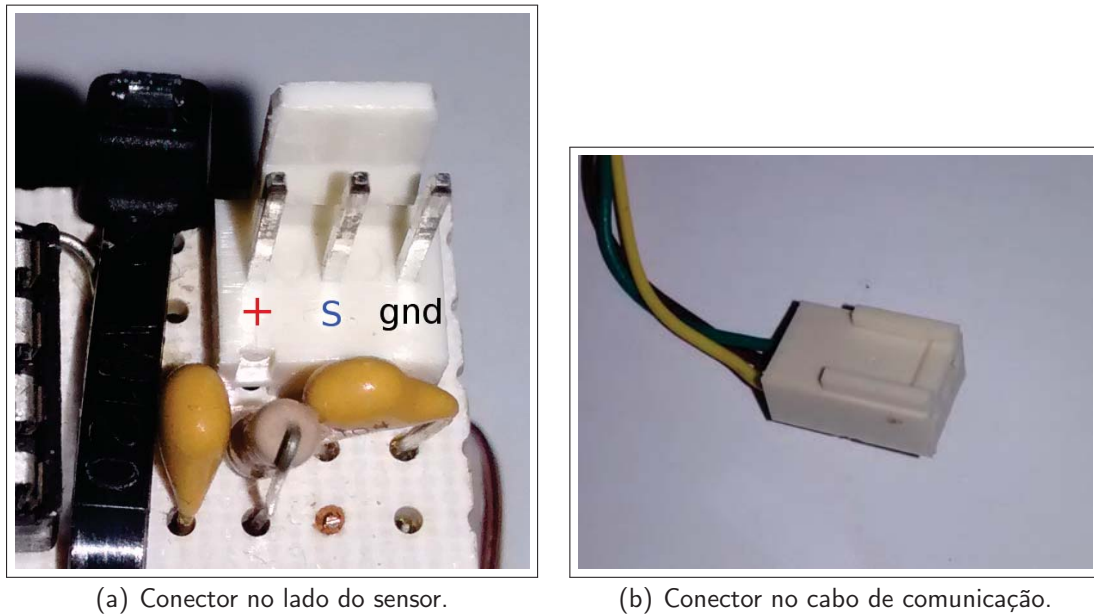
No lado do Arduino poderão ser utilizados quaisquer tipos de conector, que encaixem na barra de expansão. Para facilitar a ligação, uma *proto-board* poderá ser utilizada como intermediária.

2.6.1 Alimentação do sensor

O sensor opera com alimentação de 5,0V ou 3,3V, ambas fornecidas pela placa Arduino, bastando fazer a ligação dos pinos corretos.

A escolha da alimentação deverá ser compatível com a referência utilizada para o conversor AD; se a referência for 5,0V, então a alimentação para o sensor deve ser 5,0V; se a referência for

¹¹Recomendamos o uso de um cabo flexível, tipo cabo para áudio.



(a) Conector no lado do sensor.

(b) Conector no cabo de comunicação.

Figura 19. Conector para os sensores (do autor).

3,3V, então a alimentação deve ser 3,3V. Neste trabalho, optou-se pela utilização de tensão e referência fixadas em 3,3V.

O consumo de cada sensor é de aproximadamente $550\mu A$, podendo, assim ser considerado baixo.

2.6.2 Saída do sensor

Fixando a alimentação do circuito em 3,3V, e não tendo tensão ou corrente no circuito monitorado (estando com a rede elétrica desligada) o sensor irá mostrar na saída o valor de 1,65V. Isto ocorre em função da elevação do nível DC, descrito na seção 2.5.5.

Esta tensão na saída do sensor indica que não há corrente na rede monitorada, uma vez que a rede está desligada. Ao converter este valor no AD, o inteiro resultante será de 512. Desta forma, 512 irá corresponder ao valor 0,0V na rede elétrica.

A Equação (17) demonstra o cálculo para identificar este valor, nomeado aqui por D . Ainda na equação, 2^n corresponde à resolução do conversor AD e que, no Arduino, é de 10bits. Apenas a parte inteira do número é utilizada pelo conversor.

$$D = \frac{1,65}{V_{ref}} \cdot (2^n - 1) \therefore D = \frac{1,65}{3,3} \cdot 1023 \therefore D = 511 \quad (17)$$

2.7 TEMPO DAS AQUISIÇÕES

Um dos desafios da aquisição de sinais é perceber e compreender o tempo gasto por aquisição feita no conversor AD do microcontrolador utilizado, e desta forma fazer os ajustes para executar as aquisições no tempo certo. Para encontrar este tempo, foram feitas diversas medições utilizando um simples recurso de software disponível na plataforma Arduino - a função *micros()*¹². As seções a seguir explicam esta etapa.

2.7.1 Tempo de uma aquisição

Um experimento simples para identificar o tempo de uma aquisição é fazer a leitura do conversor AD medindo este tempo com a função *micros()*. O trecho de código na Tabela 7 demonstra este experimento.

Tabela 7. Cálculo do tempo de uma leitura.

```

1. inicio =micros();
2. leitura = analogRead(A0);
3. tempo = micros() - inicio;
4. Serial.print(tempo);
5. inicio = micros();
6. leitura = analogRead(A0);
7. tempo = micros() - inicio;Serial.print(tempo);

```

O trecho de código faz duas leituras do canal analógico A0; ambas as leituras são cronometradas com a função *micros()*. O resultado da primeira leitura mostra um valor de aproximadamente $208\mu s$ (a função *micros()* retorna o valor em microsegundos).

Já a segunda amostragem será de um valor entre $116\mu s$ e $120\mu s$, consumindo apenas 13 ciclos. Isto ocorre porque, conforme Berg [20] e Atmel [17], a primeira leitura de qualquer canal do conversor AD, demora um pouco mais que as leituras subsequentes em função da inicialização do circuito analógico. Atmel [18] esclarece que neste instante o circuito conversor AD passa do modo econômico para modo ativo, consumindo 25 ciclos.

Desta forma, sempre que for necessário medir ou controlar o tempo de aquisições na conversão AD, será necessário descontar (descartar) a primeira leitura de cada canal, pois caso contrário as medidas feitas poderão sofrer alterações.

¹²<https://www.arduino.cc/en/Reference/Micros>

2.7.2 Tempo de aquisições em um laço

Considerando que o tempo de aquisição de apenas uma leitura não é fixo, é preciso também conhecer o tempo médio de aquisições em um laço.

Para buscar esta informação, realizou-se um experimento simples, também utilizando a função *micros()*, mas agora calculando a média deste tempo para o número de iterações do laço. O trecho de código é demonstrado na Tabela 8.

Tabela 8. Cálculo do tempo médio em um laço.

```

1. leitura = analogRead(A0);
2. inicio = micros();
3. for(byte i = 0; i < AMOSTRAS; i++){
4.   leitura = analogRead(A0);
5. }
6. tempo = micros() - inicio;
7. Serial.print(tempo / AMOSTRAS);

```

Conforme identificado na seção 7, a primeira leitura de um canal precisa ser descartada para que o cálculo do tempo seja válido. No trecho de código da Tabela 8 isto é feito já na linha 1.

Na linha 2 o contador de tempo é inicializado; na linha 3 o laço é iniciado com o número de iterações definido pela variável *AMOSTRAS*¹³. A linha 4 é a execução da leitura do canal A0. Na linha 6 temos o encerramento da contagem de tempo; o tempo total do laço é armazenado na variável *tempo*. Por fim, na linha 7 é mostrado, pelo monitor serial, a média do tempo.

Neste experimento o valor mostrado será algo em torno de $112\mu s$, que é um valor ligeiramente menor que o tempo de apenas uma aquisição.

Neste capítulo foram apresentados os conceitos teóricos e os experimentos que fundamentam o desenvolvimento do trabalho desenvolvido. No próximo capítulo são apresentadas a arquitetura e a metodologia propostas, bem como a validação destas a partir da prototipação em bancada de testes.

¹³A definição desta variável não é mostrada neste trecho de código.

3. METODOLOGIA PARA AQUISIÇÃO

Neste capítulo são apresentados alguns trabalhos relacionados, com destaque à plataforma de referência (Protegedmed), que foi o ponto de partida deste projeto. Na sequência, é demonstrado o cenário no qual a pesquisa é desenvolvida e a metodologia definida para aquisição de corrente e tensão, bem como seus tratamentos para obtenção de algumas informações importantes sobre a instalação elétrica. Serão descritas as técnicas de aquisição da plataforma embarcada e o tratamento posterior dos dados, a nível de software desktop.

3.1 TRABALHOS RELACIONADOS

O Protegedmed [23] é um sistema composto por hardware e software, que foi idealizado para detectar correntes de fuga em equipamentos eletromédicos, de forma automática, durante o uso em procedimentos cirúrgicos. Originalmente, o aparelho tinha por objetivo apenas detectar e quantificar a corrente de fuga. Posteriormente, a análise da forma de onda desta corrente também foi implementada [25].

Corrente de fuga é uma falha elétrica que pode ocorrer em qualquer equipamento eletroeletrônico e é caracterizada pela diferença entre as correntes medidas no condutor fase e no condutor neutro. No caso desta falha ocorrer em um equipamentos eletro-médico, na melhor das hipóteses, esta corrente de fuga será drenada para o aterramento. Na pior, pode passar pelo paciente, produzindo risco a sua saúde.

Para fazer este monitoramento de correntes, o sistema Protegedmed utiliza toroides, “coletando” o campo magnético no condutor. Os toroides são instalados na tomada onde o equipamento médico será ligado, conforme a Figura 20. Observa-se que a instalação é bastante simples, bastando enrolar o condutor fase e o condutor neutro no toroide. Após isto o equipamento médico poderá ser utilizado normalmente. Na versão atual, um equipamento Protegedmed monitora 3 tomadas elétricas.

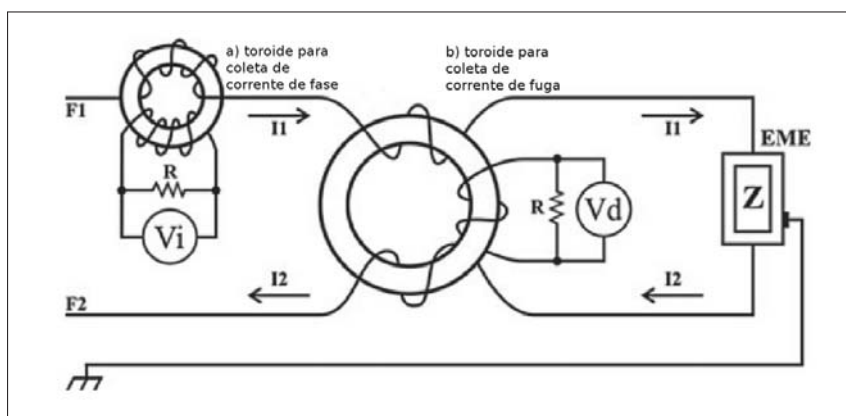


Figura 20. Toroides no Protegedmed (adaptado de Rebonatto, Hessel e Spalding [24])

Na Figura 20, o toroide de corrente diferencial (identificado pela letra *b*) é usado para monitorar a corrente de fuga. Nesta posição, o toroide coleta um campo magnético que representa a diferença entre as correntes que estão circulando no condutor F1 e F2; caso esta diferença seja diferente de 0, significa que há corrente elétrica “escapando” de alguma forma, por algum lugar neste equipamento ou circuito. Na mesma figura pode-se ver o toroide de corrente de fase (identificado pela letra *a*), para coleta do campo magnético que é correspondente à corrente total consumida pelo aparelho enquanto está ligado.

O sistema Protegemed serviu como ponto de referência para esta pesquisa pois ao realizar o estudo de seu funcionamento, verificou-se que alguns conceitos poderiam ser utilizados no desenvolvimento de um sistema para aquisição de grandezas elétricas de maior valor.

O tema monitoramento de energia aparece também em outros trabalhos. Cardoso e Cabral [29] apresentam um sistema para monitoramento de consumo de energia, que não foca na análise da qualidade da energia fornecida. O sistema descrito utiliza um sensor de corrente que requer interrupção de um condutor da rede elétrica; outro aspecto relevante é que este sistema foi prototipado utilizando energia de baterias, ou seja, não foi testado em redes de tensão alternada.

No trabalho de Paula [30], também é desenvolvido um medidor de consumo utilizando o mesmo sensor de corrente que requer a interrupção do condutor. Nesta pesquisa os dados que o sistema coleta não são armazenados em banco de dados para consulta posterior, além de não contemplar a análise de qualidade de energia.

Na busca por trabalhos relacionados também são encontrados pedidos de patentes, das quais destacamos o trabalho de Rivera [31]. O pedido registrado é baseado em microprocessador, mas igualmente não conta com um banco de dados ou mesmo com sistema para análise de qualidade de energia.

Foram encontrados equipamentos nacionais e importados que realizam as medições de correntes e tensões e também calculam potências e consumo de energia, mas não armazenam a forma de onda das medições. Alguns também fazem a análise da qualidade de energia, sendo que estes últimos apresentam um custo elevado, na faixa de R\$50.000,00, fator que inviabiliza ao usuário residencial ou comercial/industrial de pequeno/médio porte a utilização deste equipamento em suas instalações.

3.2 ESPECIFICIDADES DO CENÁRIO

Instalações elétricas industriais/comerciais ou residenciais apresentam corrente elétrica alta, quando comparadas aos valores monitorados pelo sistema Protegemed. Isto ocorre porque os equipamentos operam com um consumo mais elevado. Uma lâmpada comum, por exemplo, tem uma corrente elétrica de aproximadamente $450mA$; um chuveiro, dependendo de sua potência, tem uma corrente elétrica de aproximadamente $34A$.

Desta forma, o consumo de corrente global de uma instalação dependerá da quantidade e do tipo dos equipamentos instalados e em funcionamento em determinado momento.

A tensão elétrica da rede é outro aspecto importante no cenário, pois interfere no consumo de corrente dos equipamentos ligados. Nesse sentido, é necessário identificar também o valor da tensão em determinado evento para que seja possível a execução dos cálculos.

Outro fator relevante neste cenário é a identificação de eventos, ou seja, **quando** um equipamento foi ligado ou desligado na instalação, bem como a duração destes eventos.

A partir da aquisição dos valores de corrente e tensão elétricas, busca-se identificar ou extrair as informações listadas a seguir:

- Identificar quando algum equipamento foi ligado ou desligado: Esta informação é fundamental para que o sistema processe e armazene informações somente quando houveram alterações na rede elétrica, ou seja, quando algum aparelho foi ligado ou desligado;
- Calcular a potência instantânea do evento: Esta informação é importante para o cálculo de consumo de energia;
- Calcular o consumo de energia de cada evento: Esta informação mostra quanto de energia cada evento consome;
- Calcular o consumo de energia global: Além do consumo de cada evento, é necessário conhecer o consumo de energia global, pois isto mostra quanto de energia está sendo consumida em uma instalação elétrica;
- Identificar a ocorrência de picos de tensão: Picos de tensão são caracterizados por uma elevação muito rápida no valor instantâneo da tensão elétrica na rede, podendo trazer danos aos equipamentos instalados;
- Identificar a ocorrência de sobre-corrente ou consumo excessivo: A sobre-corrente se caracteriza pelo excesso de corrente na fiação e é outro fator que muitas vezes pode trazer danos à rede e aos equipamentos;
- Identificação das harmônicas: A identificação de harmônicas nos sinais coletados é um processamento que tem por objetivo capturar a forma de onda do evento;
- Alerta de corrente de fuga: A corrente de fuga é caracterizada pela diferença entre a corrente que entra na instalação e a corrente que sai; esta corrente de fuga pode ser responsável por diversos problemas elétricos e sua identificação também é importante;
- Consumo por equipamento: A identificação do consumo por equipamento é relevante para que o usuário tenha possibilidade de saber quanto cada equipamento está consumindo em sua rede, além de saber quando os equipamentos foram ligados/desligados.

Assim, o trabalho desenvolvido nesta etapa consiste em produzir um protótipo de um medidor eletrônico microprocessado, a partir de uma metodologia para aquisição de grandezas elétricas, que seja capaz de adquirir e armazenar formas de onda de tensão e corrente elétricas. A partir destes

valores armazenados, identificar o consumo global da rede, bem como alguns problemas elétricos mais comuns. Futuramente, estes dados poderão ser utilizados para identificação de equipamentos elétricos na instalação.

A metodologia para identificação de equipamentos e medição de consumo por equipamento, não será abordada neste trabalho, uma vez que os esforços foram concentrados no desenvolvimento de uma plataforma para aquisição de grandezas elétricas, na forma descrita a seguir na seção 3.3, até então inexistente no cenário exposto.

3.3 MÉTODO DE AQUISIÇÃO

Para coletar grandezas elétricas em corrente alternada e conseguir aplicar algum processamento sobre estas grandezas, é necessário que o sistema de coleta seja capaz de capturar a forma de onda que está circulando no condutor. Em outras palavras, a aquisição precisa levar em conta que os sinais são alternados e esta alternância interfere diretamente no processamento destas grandezas. A corrente alternada é descrita na seção 2.1.4.

No Brasil, uma rede elétrica convencional trabalha na frequência padrão de 60Hz, isto significa que o sinal elétrico executa 60 ciclos completos em um período de 1s. Por este motivo, é preciso capturar a forma de onda de um ciclo completo, que tem duração de $16.666\mu s$ ($16,666ms$). A duração do período (T) é demonstrada pela Equação (18).

$$T = \frac{1}{60} = 16.666\mu s \quad (18)$$

Uma vez capturado, este pequeno intervalo representa o sinal que está circulando no condutor em determinada captura ou evento e será o principal objeto de discussão nas próximas seções. Nesta pesquisa, o intervalo é dividido em 64 amostras, que conforme o teorema de Nyquist [21] é um número adequado para aquisição em corrente alternada. Um número menor de amostras produziria uma captura com pouca resolução (não confiável) e, por outro lado, um número maior de amostras causaria um consumo excessivo de memória no microcontrolador.

Para obter uma visão ampla da rede elétrica, optou-se, neste método, por fazer a leitura de 3 sensores, que são: um sensor de tensão, um sensor de corrente até 1,5A e um sensor de corrente acima de 1,5A. Desta forma, é possível ter uma visão do comportamento elétrico da rede desde baixas correntes até correntes mais altas.

Além disto, o método deve ser capaz de identificar o momento em que os equipamentos são ligados e/ou desligados na rede. O processamento deve então, ser aplicado sobre os sinais capturados nestes momentos.

3.4 ARQUITETURA PROPOSTA

Esta seção identifica as partes envolvidas no processo de aquisição e processamento das grandezas elétricas. Na Figura 21 é mostrado o diagrama de componentes que demonstra a arquitetura proposta para o funcionamento do sistema.

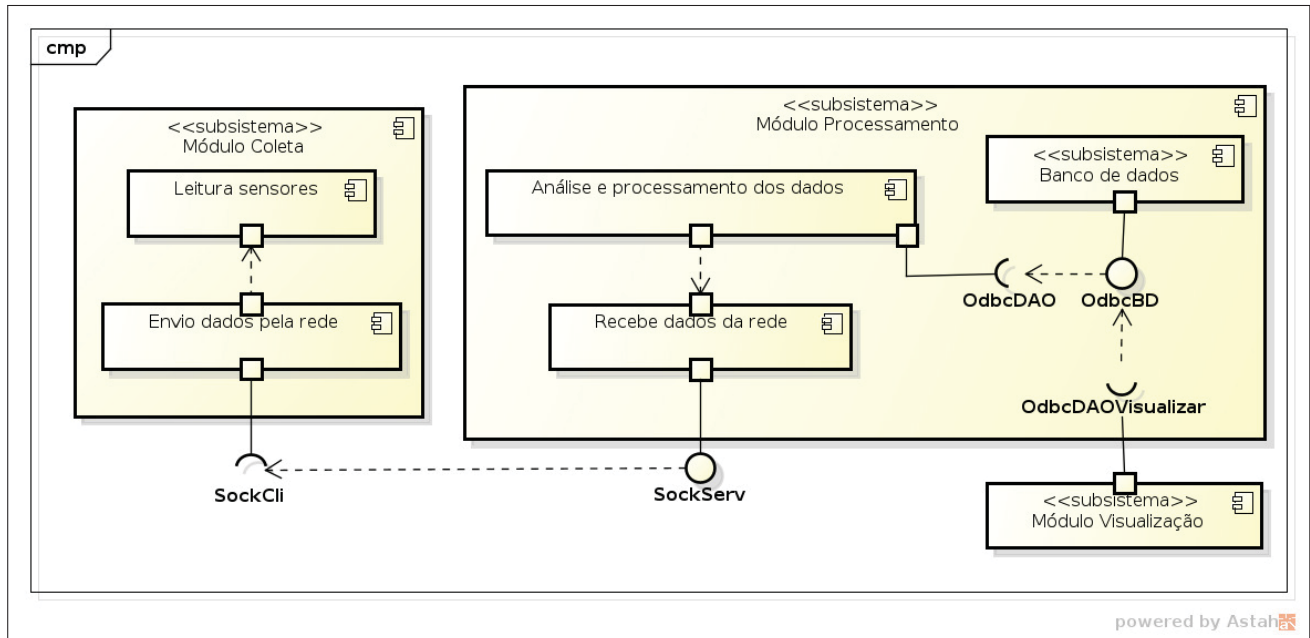


Figura 21. Diagrama de componentes do sistema (do autor).

A arquitetura é dividida em subsistemas com funcionalidades específicas e interdependentes. O primeiro subsistema é o módulo de coleta, que é responsável pela aquisição (ou coleta) dos sinais e identificação dos eventos (ligar e/ou desligar de equipamentos); ao identificar um evento, os dados deste são enviados por *socket* ao próximo subsistema, o módulo de processamento.

No módulo de processamento os dados brutos são tratados e processados para armazenamento em um banco de dados. Por fim, temos o último subsistema que é o Módulo de Visualização, responsável por apresentar os dados ao usuário.

Os subsistemas identificados são detalhados a seguir.

3.4.1 Módulo de coleta

O módulo de coleta é responsável pela leitura dos valores de corrente no condutor e identificação de eventos. Na Figura 22 é apresentado, de forma resumida, o diagrama de atividades deste módulo.

O módulo inicia com uma preparação de ambiente (**Prepara Ambiente**) onde são inicializadas as variáveis que o microcontrolador irá utilizar, como, por exemplo, vetores para armazenamento das leituras, número de amostras, período das leituras bem como intervalo entre uma

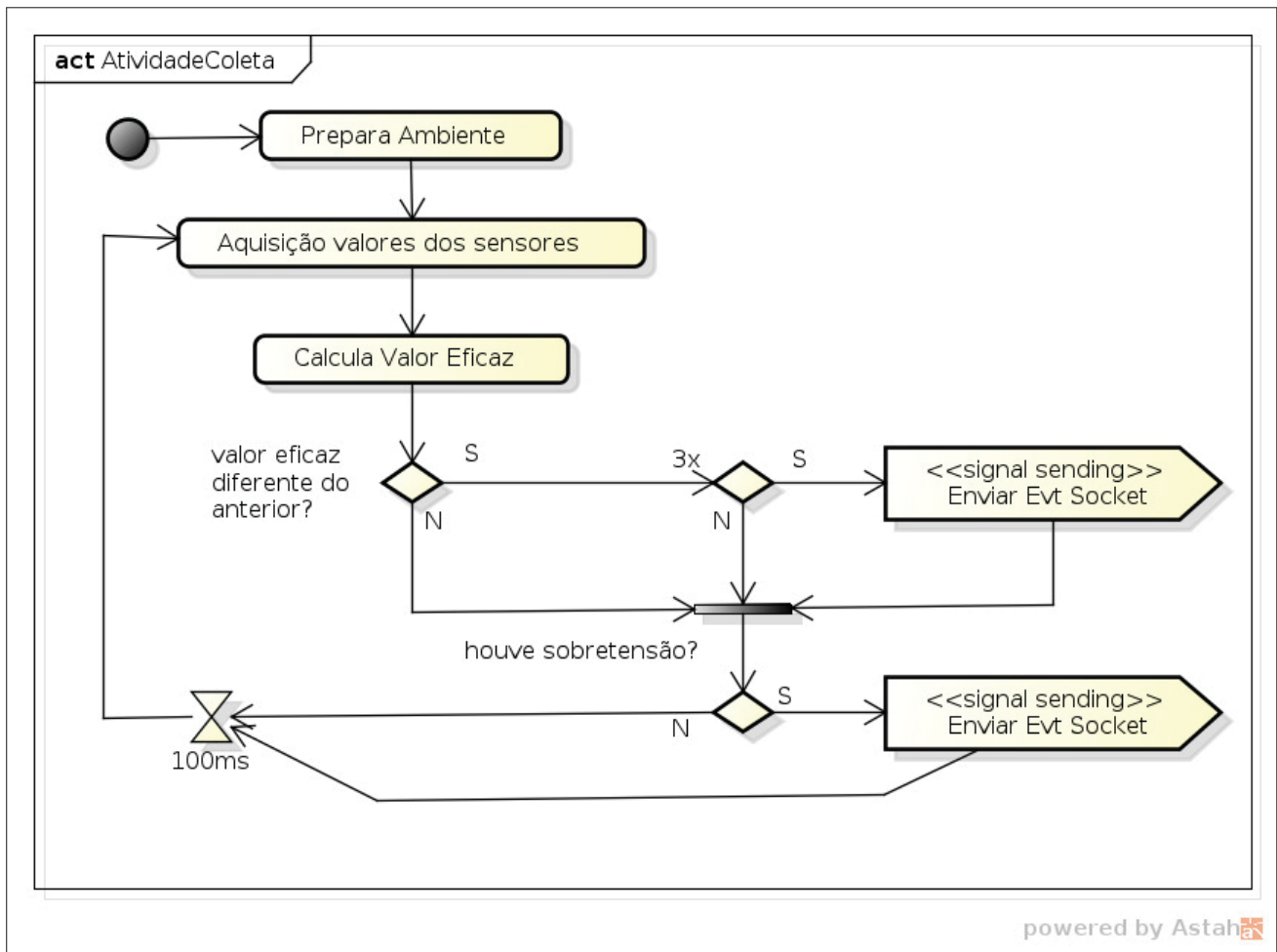


Figura 22. Diagrama de atividades do módulo de coleta (do autor).

aquisição e outra. Esta atividade é executada apenas na inicialização do microcontrolador. As demais atividades são executadas em laço infinito.

A atividade de aquisição (**Aquisição valores dos sensores**) é responsável pela leitura dos sensores e o tratamento dos valores lidos. Uma vez tratados, os valores são entregues à atividade para o cálculo do valor eficaz (**Calcula Valor Eficaz**). A próxima atividade da sequência é o teste para verificar se houve alteração do valor eficaz (**valor eficaz diferente do anterior?**) da corrente elétrica em relação ao estado inicial; neste ponto o módulo de coleta verifica se ocorreu um evento: se sim envia pelo *socket* - atividade **Enviar Evt Socket**; se não o fluxo passa para o teste de sobretensão.

A próxima etapa é o teste de sobretensão (**houve sobretensão?**), que ocorre independente de identificação de evento. Se houve sobretensão, um evento é gerado e também é enviado pela rede, por meio da atividade **Enviar Evt Socket**. Por fim, o sistema aguarda $100ms$, faz nova aquisição de valores e refaz a sequência de atividades. Este tempo de espera foi definido de forma empírica para facilitar a visualização de dados no Monitor Serial enquanto o módulo estivesse sendo testado.

Os dados enviados pela rede são os valores brutos do evento; nesta arquitetura tais valores estão armazenados em um vetor com 64 amostras do sensor de corrente e 64 amostras do sensor de tensão.

Aquisição de valores dos sensores:

A atividade *Aquisição valores dos sensores* é de grande importância para o funcionamento do sistema, pois é responsável pela aquisição dos valores de corrente e tensão no tempo certo.

Como visto no início desta seção, é necessário fazer 64 leituras de 3 sensores. Neste caso, é preciso estar atento ao tempo que cada leitura leva para ser executada, pois para que seja possível aproveitar as leituras em pós-processamentos, como por exemplo na análise da forma de onda, é necessário adquirir um ciclo de onda completo, que corresponde ao período de $16.666\mu s$.

Considerando que são executadas 64 capturas dentro deste período, tem-se uma janela de tempo de $206.4\mu s$ (Equação (19)) para executar nossas leituras.

$$Janela = \frac{16666\mu s}{64} = 260,40\mu s \quad (19)$$

Considerando também que cada captura tem um tempo médio de $112\mu s$ (vide seção 2.7.2), é possível executar apenas 2 leituras dentro desta janela de tempo (Equação (20)). Em outras palavras, com esta velocidade, não é possível adquirir sinal de 3 sensores ou mais .

$$Leituras/janela = \frac{260,40\mu s}{112\mu s} = 2,32 \quad (20)$$

Diante deste cenário, adota-se então a técnica de aceleração da conversão AD (seção 2.3.1). A Tabela 9 demonstra como esta operação é feita.

Tabela 9. Tempo de Aquisição para 3 sensores

```

1.  const uint8_t ps64 = (1 << ADPS2) | (1 << ADPS1) | (0 << ADPS0);
2.  const uint8_t ps128 = (1 << ADPS2) | (1 << ADPS1) | (1 << ADPS0);
3.  ADCSRA &= ps128;
4.  ADCSRA |= ps64;
5.  leitura = analogRead(A0);
6.  leitura = analogRead(A1);
7.  leitura = analogRead(A3);
8.  inicio = micros();
9.  for(byte i = 0; i < AMOSTRAS; i++){
10.  leitura = analogRead(A0);
11.  leitura = analogRead(A1);
12.  leitura = analogRead(A3); }
13.  tempo = micros() - inicio;
14.  tempMedio = (float)tempo/AMOSTRAS;
15.  tempEspera = (float)(16666 / AMOSTRAS) - tempMedio;

```

Na linha 1 e 2 são criadas constantes que armazenam o valor binário para controle do registrador *ADCSRA*. A linha 3 "desativa" o *prescaler* 128 enquanto a linha 4 "carrega" a configuração para o *prescaler* 64. Nas linhas 5 a 7 é feita a primeira leitura para cada um dos canais AD em uso (A0, A1 e A3).

Na linha 8 inicia-se a contagem do tempo para o laço com 3 leituras. Na linha 14 é feito o cálculo do tempo médio¹ destas 3 leituras de 64 amostras cada. Por fim na linha 15 é calculado o quanto cada laço deverá ter de *delay* para garantir que a aquisição dos 3 sensores, com 64 amostras cada, ocorra dentro do intervalo de $16.666\mu s$.

O tempo médio das 3 aquisições de 64 amostras, com *prescaler* configurado para 64 ("modo acelerado") foi de $168\mu s$. Desta forma, a variável *tempEspera*, que armazena o tempo que cada laço deverá aguardar, fica com um valor de aproximadamente $92,4\mu s$.

A aquisição propriamente dita é demonstrada no trecho de código da Tabela 10. Nota-se na linha 8, que o laço faz uma pausa com o tempo calculado em *tempEspera*.

Tabela 10. Aquisição de 3 sensores

```

1. for(byte i = 0;i<AMOSTRAS;i++){
2.   aqCorrA[i] = analogRead(A1);
3.   aqCorrMA[i] = analogRead(A0);
4.   aqTensao[i] = analogRead(A3);
5.   accCorrA += aqCorrA[i];
6.   accCorrMA += aqCorrMA[i];
7.   accTensao += aqTensao[i];
8.   delayMicroseconds(tempEspera);}
9.   medCorrA = accCorrA / AMOSTRAS;
10.  medCorrMA = accCorrMA / AMOSTRAS;
11.  mediaTensao = accTensao / AMOSTRAS;

```

Nas linhas 2, 3 e 4 os valores do sensores são lidos e armazenados em um vetor respectivo ao tipo do sensor. Na linha 2, é feita a leitura do sensor de corrente *acima* de $1.5A$; na linha 3, a leitura do sensor de corrente *até* $1.5A$ e na linha 4 a leitura do sensor de tensão.

Nas linhas 5, 6 e 7, os valores lidos são acumulados para uso posterior no valor médio (linhas 9, 10 e 11) de cada vetor. Os valores destes vetores passam então para a próxima etapa, que é o tratamento do sinal coletado, para cálculo do valor eficaz e identificação de eventos.

Tratamento do sinal:

O tratamento do sinal dentro do módulo de coleta é necessário para que o cálculo do valor eficaz das grandezas seja possível. Neste tratamento é feita a remoção do valor DC, inserido no sinal pelo sensor (vide seção 2.5.5).

¹O tempo de apenas uma leitura no modo acelerado, com *prescaler* 64, é de $60\mu s$.

Para isso, utiliza-se um recurso matemático onde cada valor do vetor é subtraído da média de todos os valores, calculada na seção anterior. Desta forma os valores de cada amostra “voltam” ao valor original, antes da elevação do nível DC. O trecho de código da Tabela 11 demonstra como isto é feito dentro do *firmware* do módulo de coleta.

Tabela 11. Tratamento do sinal

```

1. for(byte i = 0;i<AMOSTRAS;i++){
2.   vetCorrAsemDC[i] = (float)aqCorrA[i] - medCorrA;
3.   vetCorrmAsemDC[i] = (float)aqCorrmA[i] - medCorrmA;
4.   vetTensaoSemDC[i] = (float)aqTensao[i] - mediaTensao;
5. }

```

Verifica-se no código um laço que percorre todos os vetores que foram adquiridos anteriormente; para cada ponto do vetor é feita a subtração da média e o valor resultante é armazenado em outro vetor, agora do tipo *float* para cada uma das grandezas.

Cálculo do Valor Eficaz:

O cálculo do valor eficaz de cada grandeza adquirida, é feito pela atividade **Calcula Valor Eficaz**. Esta atividade executa a operação matemática raiz média quadrática (RMS), ou soma dos quadrados médios (vide seção 2.1.5) sobre os valores adquiridos.

Tabela 12. Cálculo do Valor Eficaz

```

1. for(byte i = 0;i<AMOSTRAS;i++){
2.   accCorrArms += (vetCorrAsemDC[i] * vetCorrAsemDC[i]);
3.   accCorrmArms += (vetCorrmAsemDC[i] * vetCorrmAsemDC[i]);
4.   accTensaoRMS += (vetTensaoSemDC[i] * vetTensaoSemDC[i]);
5. }
6. corrArms = sqrt(accCorrArms/AMOSTRAS)/gSensCorrA;
7. corrmArms = sqrt(accCorrmArms/AMOSTRAS)/gSensCorrmA*1000;
8. tensaoRMS = sqrt(accTensaoRMS/AMOSTRAS)/gSensTensao*valRes;

```

O trecho de código da Tabela 12 mostra uma aplicação do cálculo RMS para encontrar o valor eficaz de cada uma dos valores adquiridos. No laço entre as linhas 1 e 5 é feito o somatório dos quadrados de cada valor da amostra adquirida e tratada.

Nas linhas 6, 7 e 8 é calculada a raiz quadrada do somatório dividido pelo número de amostras. Cada um dos valores está sendo dividido também pelo ganho do sensor. A linha 7 transforma o resultado para unidade *mA* e a linha 8 transforma o valor lido para tensão elétrica (*Volts*).

Identificação de eventos:

O termo **evento** é utilizado para identificar a ocorrência de ligar ou desligar algum equipamento na rede. Sempre que um equipamento é ligado há uma alteração (aumento) na corrente elétrica presente na instalação; se o equipamento é desligado também há uma alteração (diminuição) desta corrente.

A etapa que verifica se houve alteração de valor RMS de corrente é composta pelos testes **valor eficaz diferente do anterior?** e **3x**, que podem ser vistos na Figura 22. Basicamente o valor eficaz de cada leitura é comparado com o valor eficaz da leitura anterior.

Ao iniciar, o valor eficaz de corrente é inicializado para um valor muito pequeno - no caso, utilizamos o valor 0,001. Qualquer evento significativo (ligar de uma lâmpada, por exemplo) em uma rede elétrica será maior do que isto.

Para se ter certeza de que a alteração na corrente corresponde a um evento real, o teste é executado três vezes (teste 3x). Só então o módulo de coleta confirma a ocorrência de um evento. O trecho de código da Tabela 13 mostra este teste sendo feito para o sensor de correntes acima de 1,5A.

A definição de três repetições do teste, para identificar se uma leitura corresponde a um evento, foi feita de forma empírica. Com um número menor o sistema detecta qualquer variação na rede e classifica como evento; já com um número maior do que três testes o sistema passa a perder a identificação de eventos reais.

Tabela 13. Teste de evento

```

1. float dif = newRMS - rmsAnterior;
2. if(abs(dif) > 0.10){
3.   numVezesDiferente++;
4.   if(numVezesDiferente >= limiteDiferencas){
5.     numVezesDiferente=0;
6.     rmsAnterior = newRMS;
7.     sendtoSocket(3, vetorV, 1, vetormA, testaDif(dif)); } }
8. else{
9.   NumVezesDiferente=0; }

```

Na linha 1 está o cálculo da diferença entre o valor eficaz anterior e o valor eficaz novo (desta nova leitura). Na linha 2, um teste que verifica se esta diferença é maior que 0,10A; se sim, a variável *numVezesDiferente* é incrementada uma vez; se não, a variável *numVezesDiferente* é zerada.

No teste da linha 4 tem-se uma outra verificação que testa se a *numVezesDiferente* atingiu um limite (*limiteDiferencas* = 3) estabelecido na inicialização do *firmware*. Se o limite foi atingido, tem-se então um novo evento. O valor eficaz atual substitui o anterior e a função *sendtoSocket()* é chamada para enviar os dados coletados ao Módulo de Processamento.

Identificação de sobretensão:

Além de identificar se houve um evento, o módulo de coleta faz uma verificação de picos de tensão. Esta etapa é executada pelo teste *houve sobretensão?*. Este teste é executado para toda leitura feita.

O teste percorre o vetor que armazenou as amostras da leitura de tensão, buscando se algum dos 64 pontos excede um limite superior e inferior. O trecho de código da Tabela 14 demonstra como este teste está sendo feito.

Tabela 14. Teste de sobretensão

```

1. for(uint16_t i=0; i<AMOSTRAS; i++){
2.   if (vetorV[i] >= TENSAO_LIMIT_S || vetorV[i] <= TENSAO_LIMIT_I){
3.     sendtoSocket(3, vetorV, 2, vetorA,'a');
4.     Serial.print("Detectado sobre tensao");
5.     break; } }

```

O teste na linha 2 verifica se cada um dos pontos do vetor de leitura da tensão elétrica excedeu o limite superior, definido em $TENSAO_LIMIT_S = 640$ e limite inferior, definido em $TENSAO_LIMIT_I = 400$. Caso algum dos limites tenha sido excedido, o vetor é enviado ao Módulo de Processamento pela função *sendtoSocket()*. Estes limites são definidos por *labels* no início do código do módulo de coleta.

Os valores limites estabelecidos, correspondem ao valor positivo e negativo máximos (ou de pico) que a tensão elétrica pode assumir durante uma aquisição. Qualquer valor que exceda estes limites é considerado pelo sistema como uma sobretensão.

Envio do evento:

O módulo de coleta identifica os eventos e envia pela rede, por meio de um socket TCP, todos os dados coletados para o processamento e armazenamento no módulo de processamento.

Os dados enviados representam o estado da corrente elétrica e da tensão elétrica no momento do evento; isto significa que são enviadas 64 amostras da corrente elétrica e 64 amostras da tensão elétrica, representando um ciclo de onda completo de cada uma das grandezas. Outras informações também podem ser enviadas, como, por exemplo, se o evento foi "Ligar" ou "Desligar" e o número do sensor que identificou o evento.

Os dados relativos a leitura de corrente são enviados de apenas um dos sensores. Esta escolha é feita a partir da identificação da quantidade de corrente no evento. Caso a corrente do evento seja menor que $1,0A$, o módulo seleciona para enviar as leituras do sensor de corrente até $1,5A$; caso a corrente do evento esteja acima do limite de $1,0A$ então o módulo seleciona as leituras do sensor de correntes acima de $1,5A$.

3.4.2 Módulo de processamento

Este módulo é responsável pelo processamento dos valores de corrente elétrica e tensão elétrica de cada evento identificado no módulo de coleta. O diagrama de atividades exposto na Figura 23 mostra as principais atividades desta etapa.

Em uma primeira análise, poderá parecer que o módulo de processamento está sendo redundante pelo fato de que alguns processamentos já são feitos na fase de coleta. Destaca-se, no entanto, que o processamento executado pelo módulo de coleta tem por função apenas identificar a ocorrência de *Eventos*; uma vez identificado algum evento, os valores *brutos* deste evento são entregues ao módulo de processamento que precisa aplicar os tratamentos novamente.

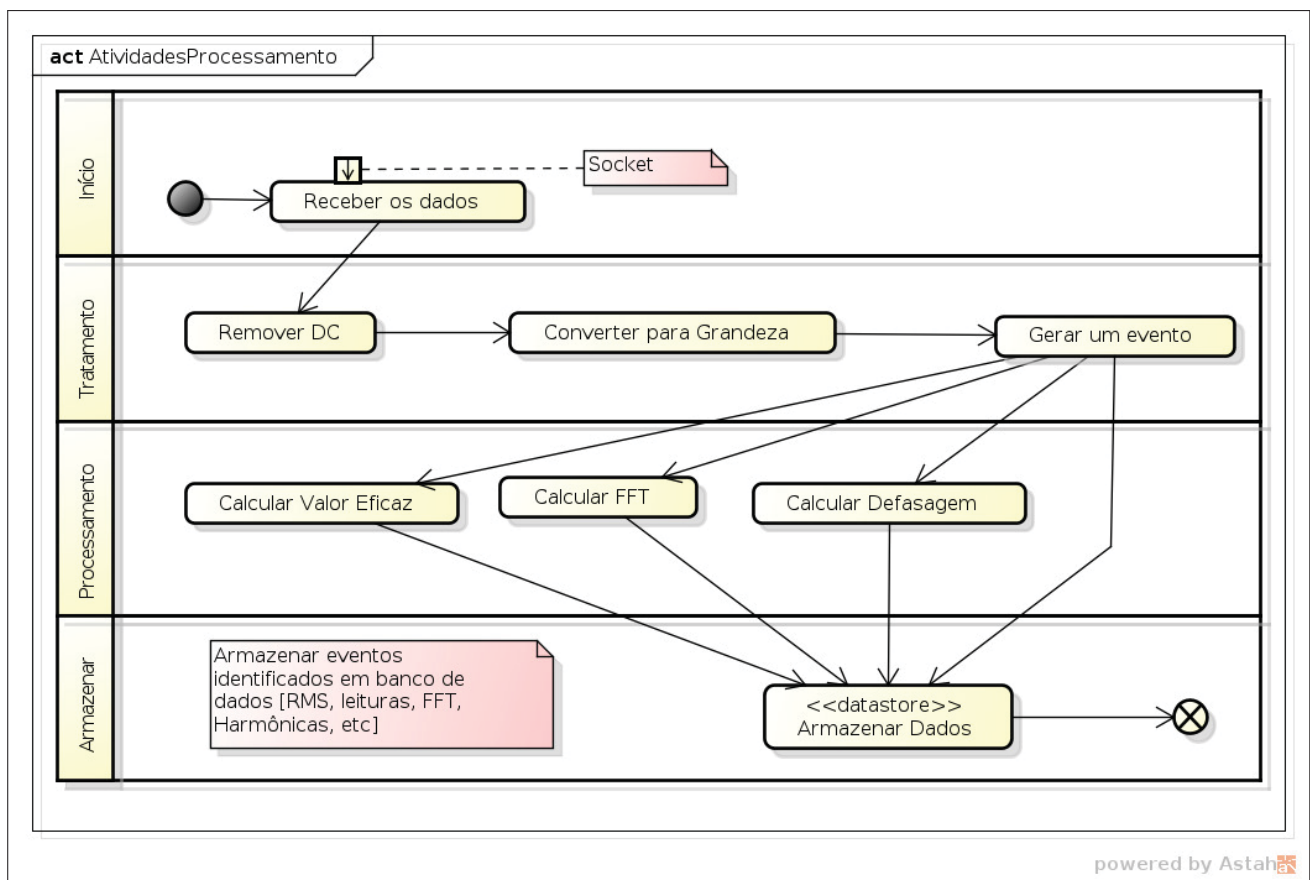


Figura 23. Diagrama de atividades do módulo de processamento (do autor).

A seguir, as etapas mostradas na Figura 23 são apresentadas e discutidas².

Recebimento dos dados:

Esta parte é responsável pelo recebimento dos dados enviados pelo módulo de coleta e é executada pela atividade **Receber Dados**. O módulo de processamento comporta-se como um servidor que aguarda o envio de dados do módulo de coleta (cliente). Para facilitar a comunicação

²Esta etapa foi prototipada utilizando Orientação a Objetos, logo as atividades serão executadas por classes/métodos.

pelo *socket*, os dados enviados estão no formato *Integer*, que correspondem aos dados brutos de tensão e corrente de cada evento coletado.

Como os dados recebidos estão no formato bruto (não passaram ainda por nenhum tratamento) é necessário aplicar os tratamentos de remoção do nível DC e transformação para grandeza correta.

Tratamento dos dados:

O tratamento dos dados consiste primeiro em eliminar a componente DC, este procedimento é feito para cada grandeza recebida na atividade **Remover DC**. O cálculo é executado por uma classe que encontra o valor médio entre os valores recebidos; depois um novo *array* é criado, armazenando a diferença entre o valor de cada posição da média.

Este novo *array* está agora sem a componente DC.

Conversão dos valores:

Converter para grandeza é a atividade responsável por transportar os valores brutos coletados para os valores da grandeza correspondente. O *array* bruto de corrente (já sem a componente DC) é convertido para corrente elétrica, em miliAmpéres (mA) ou Ampéres (A) conforme o sensor. Da mesma forma, o *array* bruto de tensão (já sem a componente DC) é convertido para tensão elétrica em Volts.

A conversão dos valores de corrente é feita percorrendo o *array* com os 64 valores lidos da aquisição; cada valor é então dividido pelo ganho do sensor, resultando em uma nova estrutura, agora no formato *Double* com os valores já convertidos.

Os valores do *array* de tensão precisam ainda ser multiplicados pelo resistor que está acoplado ao sensor, retornando desta forma à tensão no momento da leitura.

O ganho do sensor é encontrado a partir do procedimento de calibração, descrito na seção 4.3.

Criação de eventos:

Uma vez que os dados tenham sido tratados e convertidos, o sistema gera um evento pela atividade **Gerar um evento**. Este evento é composto por todas as informações relacionadas ao evento detectado pelo módulo de coleta. O evento gerado é então enviado ao banco de dados, onde é armazenado para consultas posteriores, bem como para diversos outros cálculos, como por exemplo o cálculo de consumo elétrico.

Como mostra o diagrama da Figura 23, o evento é a base para as atividades subsequentes.

Cálculo do valor eficaz:

Para encontrar o valor eficaz do evento, é aplicado o cálculo RMS na atividade **Calcular valor eficaz**. O trecho de código da Tabela 15 mostra esta parte do processamento.

Tabela 15. Cálculo RMS no módulo de processamento.

```

1. public static Double calcularRMS(List<Double> valoresLidos) {
2.     double sum = 0.0;
3.     for (Double val : valoresLidos) {
4.         sum += Math.pow(val, 2); }
5.     return Math.sqrt(sum) / Math.sqrt(valoresLidos.size()); }

```

As linhas 3 e 4 mostram um laço para fazer o somatório dos quadrados de cada amostra do *array*. Na linha 5, o método retorna o resultado do cálculo.

O valor eficaz calculado é então enviado para o banco de dados.

Identificação das harmônicas do evento:

O cálculo da FFT, definido na seção 2.4, é responsável por extrair informações sobre a forma de onda capturada. Nesta implementação, a classe *FastFourierTransform*³, que compõe a *API Apache Commons Math*, é utilizada. Estes processamentos são executados dentro da atividade **Calcula FFT**.

O resultado do cálculo FFT, que pode ser visto no trecho de código da Tabela 16, é um *array* de números complexos.

Tabela 16. Cálculo da FFT

```

1. private Complex[] calculaFFT(double[] val) {
2.     FastFourierTransformer fft =
2.     new FastFourierTransformer(DftNormalization.UNITARY);
3.     Complex[] result = fft.transform(val, TransformType.FORWARD);
4.     return result;}

```

Na linha 2 a classe *FastFourierTransform* é instanciada e na linha 3 é aplicado o método *transform* sobre o *array val*. O resultado é um novo *array* do tipo *Complex* (de números complexos).

A partir deste resultado, utilizou-se um método que faz os cálculos de harmônicas (Tabela 17) e seu respectivo ângulo (Tabela 18).

Para encontrar a magnitude e o ângulo de cada ponto, é aplicado o teorema de Pitágoras (Tabela 17 - linha 5) entre os componentes do número complexo obtido pela FFT. O resultado é um novo vetor com o conjunto de harmônicas.

O ângulo (Tabela 18 - linha 5) entre as componentes também é uma aplicação da operação trigonométrica $\frac{1}{\tan}$ sobre os componentes do número complexo obtido pela FFT.

³<https://commons.apache.org/proper/commons-math/apidocs/overview-summary.html>

Tabela 17. Cálculo da Harmônica

```

1. public double[] calculaHarmonicas(Complex[] res) {
2.     int i = 0;
3.     double[] resultado = new double[res.length];
4.     for (Complex complex : res) {
5.         resultado[i] = (Math.sqrt(Math.pow(complex.getReal(), 2) +
5.         Math.pow(complex.getImaginary(), 2)));
6.         i++;}
7.     return resultado;}

```

Tabela 18. Cálculo do ângulo

```

1. public double[] calculaAngulos(Complex[] resFFT) {
2.     double[] angulos = new double[resFFT.length];
3.     int i = 0;
4.     for (Complex complex : resFFT) {
5.         angulos[i] = (Math.atan(complex.getImaginary() / complex.getReal()));
6.         i++; }
7.     return angulos; }

```

Estes dados serão utilizados posteriormente, para fins de estudo da forma de onda. Por fim, o vetor de harmônica e seus respectivos ângulos também são armazenados no banco de dados.

Cálculo da defasagem:

A defasagem é a diferença entre o ângulo da corrente elétrica e da tensão, este valor informa o Fator de Potência da rede, e é importante pois este valor representa o quanto a rede elétrica está indutiva. A atividade **Calcular Defasagem** é responsável por este cálculo e o resultado também é armazenado no banco de dados do sistema.

Para este cálculo, foi criada uma classe que percorre as grandezas tensão elétrica e corrente elétrica, buscando os pontos em que os valores passam pelo valor zero (eixo x do plano cartesiano). A partir destes valores o ângulo é calculado.

Armazenamento dos dados:

A atividade **Armazenar Dados** é executada por um pacote de classes do tipo DAO⁴, que faz o controle do armazenamento no banco de dados. A arquitetura armazena as seguintes informações:

⁴Data Acces Object.

- Evento: Diversas informações relativas ao evento são armazenadas, como: o valor eficaz da tensão e da corrente, data e hora do evento, código do sensor que capturou o evento e tipo do evento (ligar ou desligar);
- Coletas de Tensão: Para cada evento, o sistema registra 64 amostras de tensão, representando um ciclo da forma de onda desta grandeza;
- Coletas de Corrente: Para cada evento identificado, o sistema armazena também 64 amostras de corrente, representando um ciclo da forma de onda desta grandeza;
- Harmônicas de Corrente: A forma de onda da corrente elétrica no momento do evento, é armazenada no banco de dados a partir do processamento de harmônicas;
- Harmônicas de Tensão: Da mesma maneira, a forma de onda da tensão elétrica no momento do evento é armazenada no banco de dados, a partir do processamento das harmônicas desta grandeza;
- Alertas de sobrecorrente: Em caso de identificação de sobrecorrente, o evento desta ocorrência também é armazenado no banco de dados, bem como todos os processamentos relativos a este evento;
- Alertas de sobretensão: Ao identificar sobretensão, o evento desta ocorrência também fica registrado no banco de dados, bem como todos os processamentos relacionados com este evento.

3.4.3 Módulo de visualização

O módulo de visualização é responsável pela apresentação dos resultados ao usuário do sistema. Nesta arquitetura, o objetivo é fazer com que o usuário tenha uma visão do seu consumo e de eventos identificados pelo sistema.

A lista a seguir mostra algumas das informações que a arquitetura deve apresentar ao “usuário”.

- Data e Hora do evento: Mostrar o momento em que o último evento ocorreu;
- Último evento: Mostrar as informações do último evento identificado;
- Tensão Elétrica: Valor de tensão lido no último evento identificado;
- Pico de tensão: Caso o sistema tenha detectado, mostrar quantos picos foram identificados;
- Corrente elétrica: Mostrar a corrente do último evento;
- Sobrecorrente: Mostrar alerta em caso de sobrecorrente;
- Fator de potência (defasagem): Mostrar a defasagem lida no último evento;

- Potência e Consumo: Mostrar a potência e também o consumo de energia de cada evento;
- Consumo acumulado: Mostrar o consumo acumulado em um determinado período.

A obtenção destas informações é feita executando-se consultas ao banco de dados de eventos identificados.

Neste capítulo foram apresentados as principais etapas do desenvolvimento do trabalho, que são a concepção da arquitetura, bem como seus módulos, e o planejamento do método. No próximo capítulo são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos a partir deste trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados e comentados os principais resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho.

4.1 ARQUITETURA E METODOLOGIA PARA AQUISIÇÃO

O primeiro resultado concreto obtido com este trabalho é o desenvolvimento de um método e de uma arquitetura para coleta de grandezas elétricas. O protótipo desenvolvido e apresentado na seção 4.2 valida a arquitetura e método propostos.

O processo de aquisição de grandezas elétricas, que é aplicável na indústria/comércio e também residências, pode ser útil tanto para pesquisadores que buscam compreender o funcionamento deste tipo de instalações, bem como para a indústria, que pode aplicar o método para o desenvolvimento de novas tecnologias na área de equipamentos elétricos ou monitoramento elétrico.

A metodologia de aquisição proposta foi baseada na plataforma Arduino, que é bem conhecida no meio acadêmico e que facilita o processo de pesquisa, além de ser considerada uma plataforma acessível. Destaca-se que esta mesma metodologia pode ser facilmente transposta para outras plataformas, de maior aceitação no meio industrial.

Cabe ressaltar que o principal diferencial desta metodologia em relação às metodologias encontradas é a identificação de eventos, que permite ao sistema quantificar o consumo e avaliar a qualidade da energia a partir do processamento de sinais adquiridos no momento em que aparelhos elétricos são ligados ou desligados. Este mecanismo contribui para um uso racional do banco de dados.

4.2 VALIDAÇÃO DA ARQUITETURA E METODOLOGIA PROPOSTAS

Para que a metodologia e a arquitetura propostas se transformassem em resultado efetivo, foi necessário que as mesmas passassem por uma fase de validação. Sendo assim, foi desenvolvido um protótipo, apresentado na Figura 24, que permitiu a execução de diversos testes, visualizações de dados, bem como intervenções para o aprimoramento de algumas funções do sistema. A seguir são mostrados os módulos de hardware e software prototipados e alguns dos testes executados.

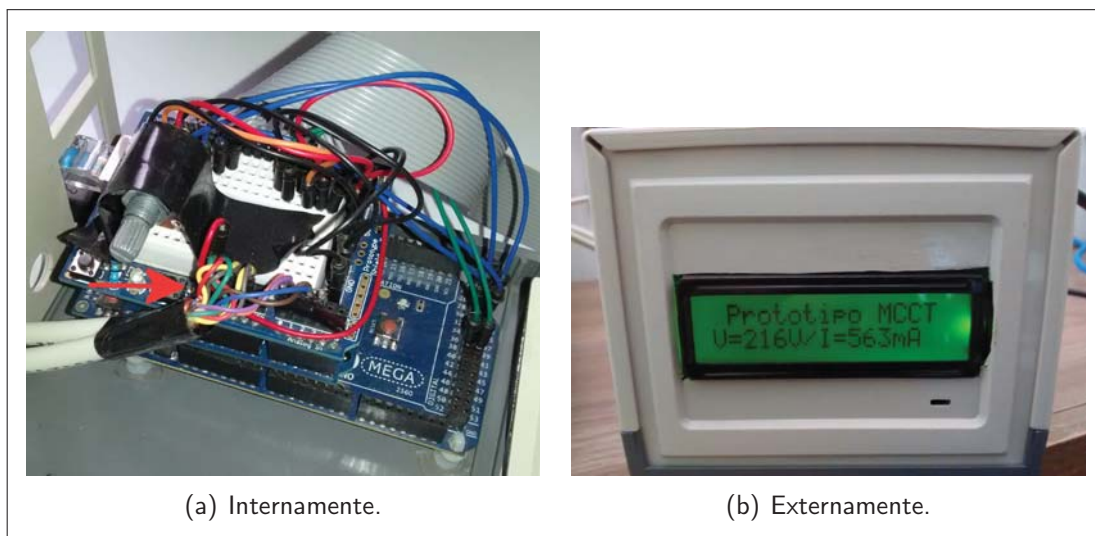


Figura 24. Fotografia com o sistema todo na bancada, durante um teste de aquisição utilizando lâmpada incandescente (do autor).

4.2.1 O módulo de coleta

O módulo de coleta foi implementado utilizando-se um microcontrolador da plataforma Arduino e, para comunicação em rede, foi utilizado uma *shield ethernet*¹. O *firmware* desenvolvido está disponibilizado pelo github².

Na Figura 25 são mostradas as partes do módulo de coleta. Na parte 25(a) está o microcontrolador e a *shield ethernet*. Na última camada temos a fiação dos sensores (indicação pela seta vermelha) e do *display*. Na parte 25(b) está sendo mostrado o *display* com valores de tensão e corrente lidos.



(a) Internamente.

(b) Externamente.

Figura 25. Fotografias do módulo de coleta (do autor).

¹<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoEthernetShield>

²<https://github.com/josefigueiredo/MonitorEnergia>

Foram utilizados três sensores, sendo um para tensão elétrica e dois sensores de corrente elétrica, sendo um para correntes até $1.5A$ e um para correntes até $96A$, todos discutidos na seção 2.5. A fotografia apresentada na Figura 26 demonstra a montagem destes sensores em bancada de testes. Os sensores estão nomeados em vermelho.

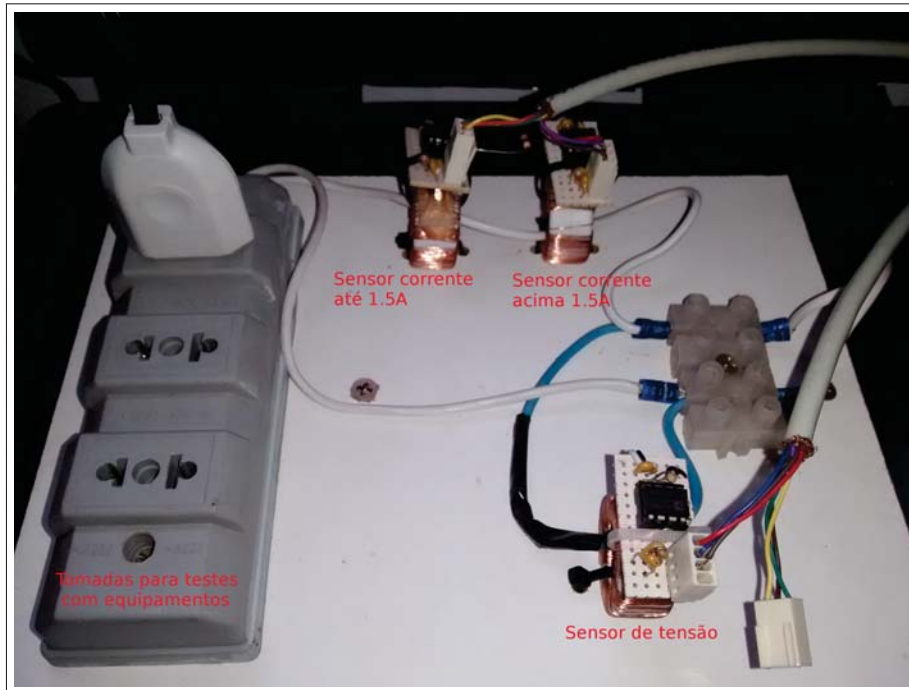


Figura 26. Fotografia dos sensores montados na bancada de testes (do autor).

4.2.2 Módulo de processamento

O módulo de processamento trabalha em modo servidor (*daemon*) não tendo uma tela para interação com usuário. Na Figura 27 são apresentados apenas os *logs* de eventos identificados pelo sistema e o aviso de inserção no banco de dados. O diagrama de classes genérico deste módulo pode ser visualizado no Apêndice A.

```

ModuloProcessamento (1) [Java Application] /usr/lib/jvm/java-7-openjdk-amd64/bin/java
Corrente RMS do evento: 0.004
Feito inserção de evento...
-----
Tensão RMS no evento: 206.0
Corrente RMS do evento: 0.269
Feito inserção de evento...
-----
Tensão RMS no evento: 206.4
Corrente RMS do evento: 0.003
Feito inserção de evento...
-----
|

```

Figura 27. Captura de tela dos log do módulo de processamento (do autor).

O código foi desenvolvido utilizando a linguagem Java e diversas classes foram desenvolvidas para resolver as demandas do programa. O código fonte completo está disponibilizado no github³.

O banco de dados utilizado para armazenar as coletas e os processamentos relacionados foi implementado utilizando-se o HSQLDB⁴, que é um Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD) embarcado desenvolvido em Java. A modelagem do banco é visualizada no Apêndice B.

4.2.3 Módulo de visualização

O módulo de visualização mostra para o usuário uma série de dados relacionados com a rede elétrica que está sendo monitorada. Na Figura 28 são apresentadas as informações que são obtidas neste protótipo.

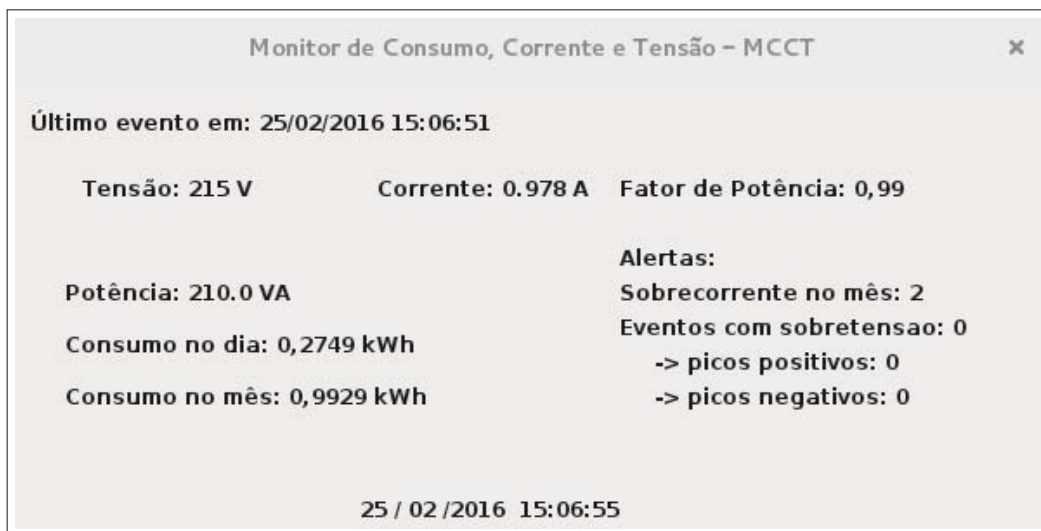


Figura 28. Captura de tela do protótipo MCCT (do autor).

Nesta versão, a tela não possui formas de interação com o usuário, ou seja é estática. As informações mostradas pela tela são detalhadas a seguir:

- Data e hora atuais: Este mostrador, localizado no rodapé da tela, informa a data e a hora locais.
- Último evento: Este mostrador informa quando foi o último evento elétrico identificado pelo sistema.
- Tensão: Este mostrador informa a tensão presente na instalação e que é medida pelo sensor de tensão - a unidade de medida desta grandeza é o Volt (V). Conhecer a tensão da rede elétrica,

³<https://github.com/josefigueiredo/ModuloProcessamentoV3>

⁴<http://www.hsqldb.org/web/hsqldbFeatures.html>

a cada evento, permite ao usuário monitorar a qualidade da energia que está chegando em sua instalação, bem como monitorar algumas possíveis falhas elétricas.

- **Corrente:** Este mostrador informa a corrente medida pelo sensor em determinado evento - a unidade de medida da corrente é o Ampere (A). Esta corrente varia em função da quantidade de equipamentos instalados na rede e da potência de cada um deles. Quanto maior a potência, mais corrente será necessária para fazer este aparelho funcionar. Conhecer a corrente permite ao usuário do sistema calcular o quanto sua rede está consumindo de energia, e desta forma acompanhar seus gastos. Além disto, conhecer a corrente de uma instalação auxilia na prevenção de sobrecargas na rede.
- **Fator de Potência:** Este mostrador informa ao usuário o fator de potência calculado a cada evento identificado. Conhecer o fator de potência é importante pois este valor representa o quanto a rede elétrica está indutiva. Uma rede muito indutiva apresenta uma perda de energia e por consequência um gasto desnecessário, sendo recomendada uma correção.
- **Potência:** Este mostrador indica a potência consumida a cada evento identificado pelo sistema. Conhecer a potência por evento é importante para que o sistema possa fazer os cálculos de consumo acumulado no dia e no mês. A partir deste valor pode-se calcular o consumo de energia de cada evento.
- **Consumo no dia:** Este campo mostra ao usuário o consumo de energia acumulado de sua instalação desde o início do dia. Este consumo é medido em kWh e é calculado pela soma de consumos de cada evento identificado durante o dia.
- **Consumo no mês:** Este campo mostra ao usuário o consumo de energia acumulado de sua instalação desde o início do mês. Este consumo também é medido em kWh e é calculado pela soma de consumos de cada evento identificados desde o início do mês.
- **Alertas:** O sistema conta com um mecanismo de alerta em caso de problema elétrico.
 - **Sobrecorrente no mês:** Este campo mostra quantas vezes, no período de um mês, o sistema mediu correntes muito próximas ao limite do disjuntor principal da rede. Identificar ocorrências de sobrecorrente é relevante porque sinaliza ao usuário a necessidade de revisar sua instalação elétrica, evitando assim acidentes graves como incêndios e/ou queima de aparelhos.
 - **Eventos com sobretensão:** A sobretensão também é um contador mensal utilizado para mostrar a quantidade de eventos em que a tensão ultrapassou os limites da tensão de pico convencional, incluindo 15% de tolerância frequentemente praticado pelas distribuidoras. O contador de sobretensão detalha as ocorrências em picos positivos e negativos, que mostram respectivamente o número de picos contados dentro de um ciclo completo da onda.

4.3 TESTES EXECUTADOS

Diversos testes foram executados com o sistema de coleta prototipado. Para execução dos testes, foram ligados na régua de tomadas mostrada na Figura 26, equipamentos variados como forno micro-ondas, geladeira, ferros de solda, aquecedores, lâmpadas e computadores.

Foram executadas diversas aquisições, e, no momento, temos 4.283 eventos registrados com 272.576 coletas de tensão e corrente. Foram detectados 180 eventos de sobretensão e 39 eventos de sobrecorrente, estes últimos produzidos em ambiente de testes.

As seções seguintes descrevem como os testes foram executados, partindo do procedimento adotado para calibração do sistema de coleta.

4.3.1 Calibração dos sensores

Ao iniciar as aquisições, verificou-se que os valores coletados não eram condizentes com os valores esperados. Por exemplo, em um teste com uma lâmpada de 100W na tensão estimada de 220V, esperava-se que a corrente monitorada fosse de aproximadamente 0,45A; mas o valor obtido pelo módulo coletor foi de 0,36A. Esta disparidade indicava a necessidade de calibração dos sensores.

Para executar a calibração foi necessário alterar o ganho do sensor no software do módulo de coleta, aproximando o valor coletado com o valor mostrado por um multímetro de referência. O aparelho de referência utilizado para esta calibração foi um multímetro *Minipa ET-1649*, com capacidade *True RMS*. Na ocasião, o aparelho foi gentilmente cedido pelo Grupo de Estudo e Pesquisa em Inclusão Digital (GEPID)⁵.

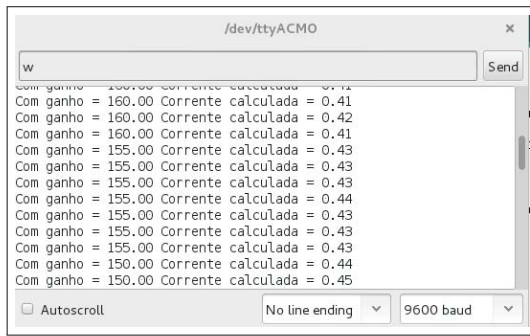
Esta parte do software foi montada para que o Arduino recebesse comandos via comunicação serial e alterasse (aumentasse ou diminuísse) o ganho do sensor que está sendo calibrado. A cada alteração do ganho, o valor eficaz coletado pelo sensor é mostrado via monitor serial.

Para aumentar o ganho os comandos definidos foram “q” e “a”, que aumentam o ganho respectivamente em 5 e 0,5. Para diminuir o ganho, foram definidos os comandos “w e “s”, que diminuem o ganho respectivamente em 5 e 0,5. Este procedimento foi adotado para calibração dos sensores de corrente e também de tensão.

Ao final da calibração, a leitura do sensor é executada e o resultado mostrado via monitor serial.

Conforme pode ser verificado no Monitor Serial, o ganho para este sensor, que no experimento é um sensor de corrente, deve ser de 150,00, que é o ponto onde o Arduino mostra a corrente exatamente igual ao multímetro.

⁵Agradecimento ao professor Marco Antônio Sandini Trentin.



(a) Monitor Serial.



(b) Amperímetro RMS.

Figura 29. Comparação entre corrente mostrada pelo multímetro com corrente capturada pelo módulo de coleta (do autor).

Para que o programa trabalhe com este valor em definitivo, basta inseri-lo diretamente na variável declarada na linha 10 (`float ganhoSensor = 150.0;`), não sendo mais necessário repetir este procedimento de calibração para este sensor.

4.3.2 Aquisição de corrente alternada

Este teste mostra o evento de número 3195, onde foi executada uma aquisição de corrente, feita pelo módulo de coleta e armazenada no banco de dados. O programa adquiriu 64 amostras em um intervalo de $16.666\mu s$.

Para execução deste teste utilizou-se uma carga resistiva simples, no caso um pequeno soldador⁶ com potência nominal de $50W$. Conforme a lei de Ôhm, demonstrada na Equação (14), em uma tensão eficaz de 220 Volts, espera-se medir uma corrente eficaz de 0,22 Ampéres.

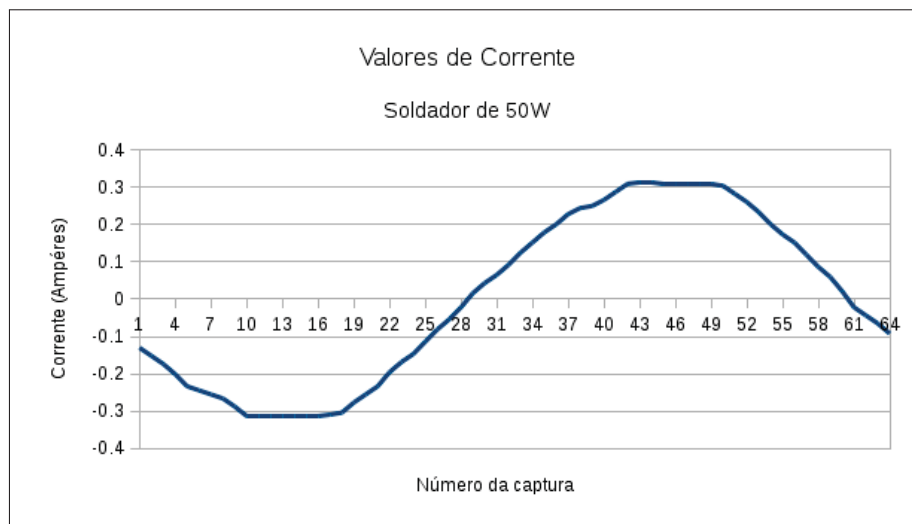


Figura 30. Gráfico com uma captura de corrente de um evento (do autor)

⁶Marca: Hikari Plus, Modelo: SC-60

Os valores são armazenados em um vetor e passam pelo processamento de sinal dentro do microcontrolador. Após o processamento, o gráfico da Figura 30 pode ser visualizado com apoio de uma planilha eletrônica.

Para facilitar a visualização, as unidades utilizadas para o eixo x correspondem ao número da captura do evento. A primeira leitura ocorre no instante 0; a segunda leitura ocorre no instante $260,40\mu s$; a quarta leitura ocorre no instante $781,2\mu s$ e assim sucessivamente até que a 64ª leitura ocorre, no instante $16.666\mu s$. Este intervalo corresponde a um ciclo de onda da corrente elétrica capturada.

O valor eficaz calculado para esta amostra de corrente é de $0,23A$ e o pico identificado foi de $0,32A$. No módulo de processamento, este valor de corrente é relacionado com outras grandezas para obtenção de outras informações, como, por exemplo, consumo de energia elétrica. Nesta captura não foi identificado evento de sobrecorrente. A tensão eficaz do evento foi de 215 Volts.

Sabe-se que a medida está correta pelo cálculo da lei de ôhm, que valida os valores medidos. Ou seja, com a tensão eficaz de 215 Volts e corrente eficaz de $0,23$, obtemos uma potência de $49,5W$, que corresponde a potência nominal do aparelho utilizado no teste. Além disto, o uso simultâneo do amperímetro comprovou o valor da corrente medida.

As deformações na F.O. visualizada podem ser reduzidas com algumas alterações, a saber: a) Utilização de filtros ativos, baseados em amplificadores operacionais, nos sensores; b) Aumento do número de amostras por ciclo, trabalhando com 128 ou 256 amostras; c) Utilização da transformada inversa de Fourier para reconstrução da F.O., ou seja, implementação de um filtro digital.

4.3.3 Aquisição de tensão alternada

O procedimento para coleta de tensão alternada é muito semelhante ao procedimento para coleta de corrente. A diferença está no cálculo que transforma a corrente lida em tensão elétrica. Logo após o cálculo de corrente eficaz o resultado é multiplicado pelo valor da resistência instalada no sensor de tensão. O gráfico mostrado na Figura 31 apresenta uma amostra de coleta de tensão.

Este teste de coleta também é relativo ao evento de número 3195, onde um soldador foi ligado. A tensão coletada é validada tanto pela aplicação da lei de Ôhm como por uso de voltímetro.

O valor eficaz calculado para esta amostra foi de $215V$; o valor de pico positivo identificado foi de $300V$ e o valor de pico negativo foi de $-300V$. Não foram identificados valores de sobretensão neste evento.

Da mesma forma que a captura de corrente, mostrada na seção 4.3.2, o eixo x do gráfico representa uma escala de tempo dividida em intervalos de $260,4\mu s$.

Por fim, as soluções possíveis para correção das imperfeições na F.O. de tensão são as mesmas apresentadas para aquisição de corrente alternada.

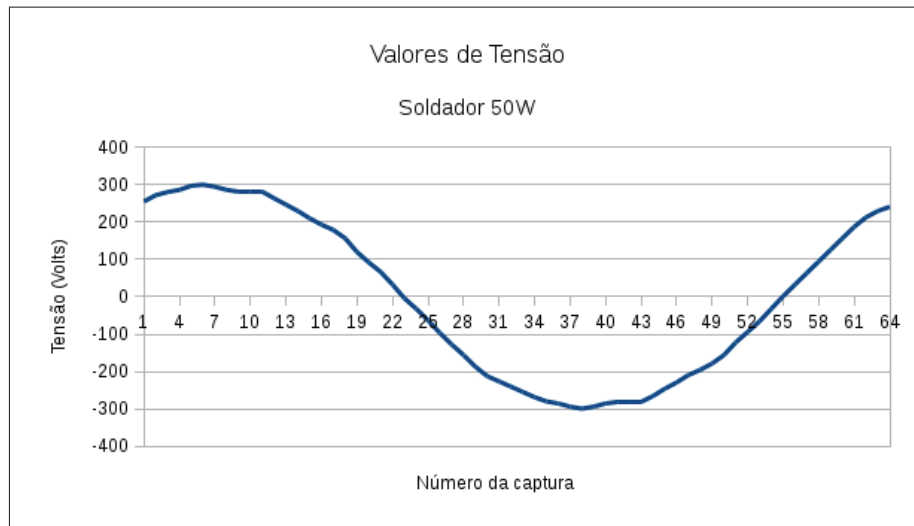


Figura 31. Gráfico com uma captura de tensão de um evento (do autor)

4.4 BANCO DE DADOS DOS EVENTOS

O banco de dados com os eventos e seus respectivos processamentos, também é um dos resultados destacados, em função de sua importância para novas pesquisas relacionadas ao estudo do comportamento elétrico de instalações industriais/comerciais ou mesmo residenciais.

Este banco de dados, que surgiu com a implementação do protótipo, registra dados dos quais o sistema retira as informações a que se propõe, como, por exemplo, consumo de energia e alerta de falhas.

Destaca-se que o registro destas informações abre um leque significativo de possibilidades para análise elétrica, dentre elas, a identificação do consumo por equipamento.

4.5 PLATAFORMA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

Ao iniciar o desenvolvimento de uma metodologia para identificar o consumo por equipamentos, ou mesmo qual equipamento foi ligado/desligado em determinado evento, deparou-se com a falta de uma plataforma base para aquisição de dados e execução desta pesquisa. Por este motivo, foi necessário primeiro desenvolver a plataforma para aquisição de dados, que é um dos resultados concretos obtidos e apresentados neste trabalho.

Neste momento, agregado as suas demais funcionalidades, o equipamento prototipado está preparado, tanto a nível de hardware quanto a nível de software, para servir de apoio ao desenvolvimento de uma metodologia para identificação de consumo por equipamento.

4.6 DOCUMENTAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

A documentação dos experimentos também é um resultado a ser destacado. Durante o andamento dos testes, diversos experimentos de aquisição utilizando o Arduino foram feitos e documentados. Esta documentação foi organizada e transcrita para o formato de livro, resultando no *Cookbook para aquisição de corrente e tensão alternadas com Arduino*.

O livro⁷ apresenta um passo-a-passo didático para execução da aquisição das grandezas elétricas com Arduino e pretende auxiliar o pesquisador que se interesse pelo tema. O material conta com uma fundamentação teórica sobre o assunto e 11 experimentos, organizados segundo seu grau de complexidade, para se chegar a coleta das grandezas como um todo.

A seguir, são descritos alguns dos tópicos documentados neste material:

- Aquisição de tensão elétrica: Como a aquisição da tensão elétrica pode ser feita utilizando os mesmos sensores de corrente;
- Análise do tempo das coletas: São experimentos que demonstram o tempo das coletas executadas;
- Utilização de múltiplos canais no Arduino: Experimentos que mostram como é feita a aquisição de valores de três ou mais sensores com Arduino, uma vez que isto requer o funcionamento acelerado do conversor AD do microcontrolador;
- Obtenção do valor eficaz: Como é feito o processamento dos sinais coletados para obtenção dos valores eficazes de cada grandeza;
- Calibração dos sensores: Experimentos que demonstram como a calibração dos sensores pode ser feita.

Por fim, este livro será submetido ao processo de apreciação, com vistas publicação pela UPF Editora, na Série Pós-Graduação, que tem por objetivo publicar obras relacionadas a trabalhos *stricto sensu*, desenvolvidos nos programas de Pós-Graduação da UPF. Se aceito, o material será disponibilizado na página da UPF Editora, para download no formato digital.

Neste capítulo foram apresentados os principais resultados obtidos com o desenvolvimento deste trabalho, bem como algumas considerações sobre sua importância. No próximo capítulo, encontram-se as considerações finais relativas ao trabalho desenvolvido.

⁷Nesta fase do trabalho, o material ainda precisa passar pelo processo de editoração e publicação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho desenvolveu-se uma arquitetura e um método para aquisição dos valores de corrente e tensão em instalações elétricas. Além do método e da arquitetura, o desenvolvimento do trabalho resultou em um produto prototipado e em um livro didático.

Na arquitetura, o módulo responsável pela coleta dos valores é capaz de identificar eventos elétricos como ligar e/ou desligar de aparelhos. Para isto, foi desenvolvido um método capaz de perceber a alteração na quantidade de corrente elétrica presente no condutor monitorado. Os dados do evento identificado são capturados e enviados para um servidor. Neste servidor encontra-se outro módulo da arquitetura que é responsável pelo processamento e armazenamento dos dados recebidos.

O processamento dos eventos identificados tem por objetivo extrair outros dados relacionados com este evento e permitir ao usuário visualizar algumas informações, como, por exemplo, consumo de energia acumulado no mês, consumo de energia do evento, alertas de sobrecorrente e sobretensão, entre outros.

A arquitetura e o método foram validados em um protótipo chamado *Monitor de Consumo de Energia Elétrica, Corrente e Tensão - MCCT*. Esta validação foi feita a partir do monitoramento das grandezas de alguns equipamentos elétricos de uso comum. O equipamento prototipado resolve também a necessidade de uma plataforma base para a continuidade da pesquisa no desenvolvimento de uma metodologia para identificação de consumo por equipamento.

O MCCT está sendo avaliado pela empresa Elomed para ser absorvido em um projeto de monitoramento elétrico para equipamentos hospitalares de alta complexidade, como por exemplo Ressonância Magnética. O projeto prevê o monitoramento elétrico para identificação de falhas no funcionamento bem como monitoramento da qualidade da energia utilizada. Para que o aparelho possa ser utilizado com segurança, a empresa submeterá o MCCT para calibração nos Laboratórios Especializados em Eletroeletrônica, Calibração e Ensaios (LABELO)¹, da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS)², que tem credenciamento no Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO)³.

Além disso o MCCT é um aparelho com potencial para industrialização e comercialização no ramo do monitoramento elétrico residencial ou industrial e, apesar de ainda ser um protótipo, um manual⁴ de instalação e utilização foi desenvolvido para o MCCT, cuja versão atual pode ser encontrada no Apêndice C.

Ainda, a partir da implementação do MCCT, um conjunto de experimentos foi compilado dando origem ao livro *CookBook para aquisição de corrente e tensão alternada com Arduino*. Este material pode servir de base para novos pesquisadores na área, uma vez que tem um enfoque didático e procura orientar os experimentos na forma de passo-a-passo.

¹<http://retic.org.br/pt-br/laboratorio/labelo-pucrs>

²<http://www.pucrs.br/portal/>

³<http://www.inmetro.gov.br/>

⁴Download do manual completo em: <https://goo.gl/4ppxqi>.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho abre algumas possibilidades de trabalhos onde a pesquisa pode ter continuidade. Destes, destacam-se os listados a seguir:

- Aprimoramento do sistema para aplicações específicas, como, por exemplo, análise de energia em aparelhos de alta complexidade ou de alto custo operacional;
- Desenvolvimento e implementação de métodos de identificação de cargas, permitindo ao sistema identificar qual equipamento foi ligado dentro da instalação;
- Desenvolvimento de um módulo para aquisição do comportamento padrão (tipo *datalogger*) de equipamentos específicos;
- Aprimoramento do ambiente de consulta e visualização de dados, o qual, atualmente, não é interativo com o usuário. Esta etapa está sendo encaminhada a partir de um trabalho de conclusão de curso do aluno Giovani Rizzardi, no curso Ciência da Computação da UPF;
- Por fim, a submissão e publicação de trabalhos em periódicos de interesse do grupo de pesquisa.

Para além dos resultados alcançados, no âmbito da aquisição de valores de corrente e tensão, espera-se que este trabalho, desenvolvido no contexto de um Mestrado em Computação Aplicada, possa ter evidenciado também as amplas possibilidades desta ciência quando aplicada em favor da resolução de problemas relacionados a outras áreas do conhecimento, bem como nas possibilidades de desenvolvimento tecnológico de nossa sociedade.

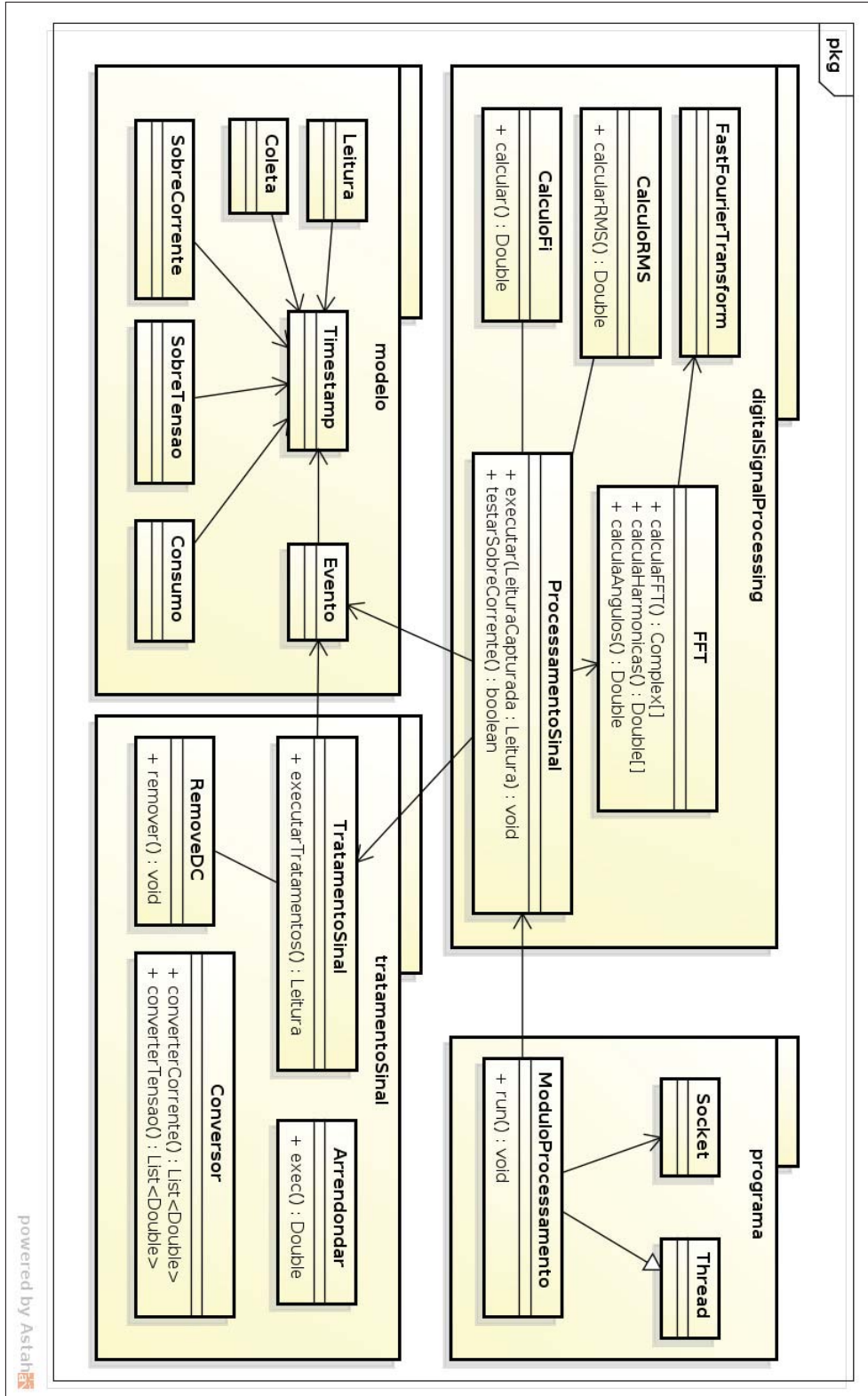
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MEHL, E. L. Qualidade da energia elétrica. *Universidade Federal do Paraná*, 2012.
- [2] OLESKOVICZ, M. et al. Estudo comparativo de ferramentas modernas de análise aplicadas à qualidade da energia elétrica. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, SciELO Brasil, v. 17, n. 3, p. 331–341, 2006.
- [3] G1. *Ministério reconhece necessidade de importação de energia do Uruguai*. globo.com, 2015. Online. Disponível em: <<http://goo.gl/fQVtsA>>. Acesso em: 5, Jan. 2016.
- [4] SACHS, I. A revolução energética do século XXI. *Estudos avançados*, SciELO Brasil, v. 21, n. 59, p. 21–38, 2007.
- [5] KOSSMANN, I. Crise Climática. *Cadernos de Biodiversidade*, Atmel Corporation, 2009. Disponível em: <<https://www.grain.org/article/entries/1239-crise-climatica-caderno-29.pdf>>. Acesso em: 20, Mai. 2015.
- [6] EDMINISTER, J. A. *Circuitos Elétricos*. 2ª. ed. [S.l.]: Pearson do Brasil (Coleção Shaum), 1991.
- [7] GAMOV, G. *The great physicists from Galileo to Einstein*. [S.l.]: Dover Publications, New York, 1861.
- [8] ABRADÉE. *Visão geral do setor*. Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica, 2016. Online. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/visao-geral-do-setor>>. Acesso em: 5, Jan. 2016.
- [9] LA SCIENCE POUR TOUS. *Electricitéla suite*. [S.l.], 2003. Disponível em: <<http://goo.gl/WLWu6k>>. Acesso em: 31, Mai. 2015.
- [10] FOWLER, R. *Fundamentos de Eletricidade: Corrente Contínua e Magnetismo*. 7ª. ed. [S.l.]: VitalSouce bookshelf version, 2012.
- [11] FOWLER, R. *Fundamentos de Eletricidade: Corrente Alternada e Instrumentos de Medição*. 7ª. ed. [S.l.]: VitalSouce bookshelf version, 2012.
- [12] LEWIS, D. W. *Fundamentals of embedded software: with the ARM Cortex -M3*. 2nd. ed. [S.l.]: Pearson, 2013. 238 p. ISBN 9780132916547.
- [13] TOULSON, R.; WILMSHURST, T. *Fast and effective embedded: systems design : applying the ARM mbed*. [S.l.]: Elsevier, 2012. 379 p. ISBN 9780080977683.
- [14] MCROBERTS, M. *Arduino básico*. [S.l.]: Novatec Editora, 2011.
- [15] MARGOLIS, M. *Arduino Cookbook*. Second edition. [S.l.]: O'Reilly Media, Inc., 2011. ISBN 978-1-449-31387-6.

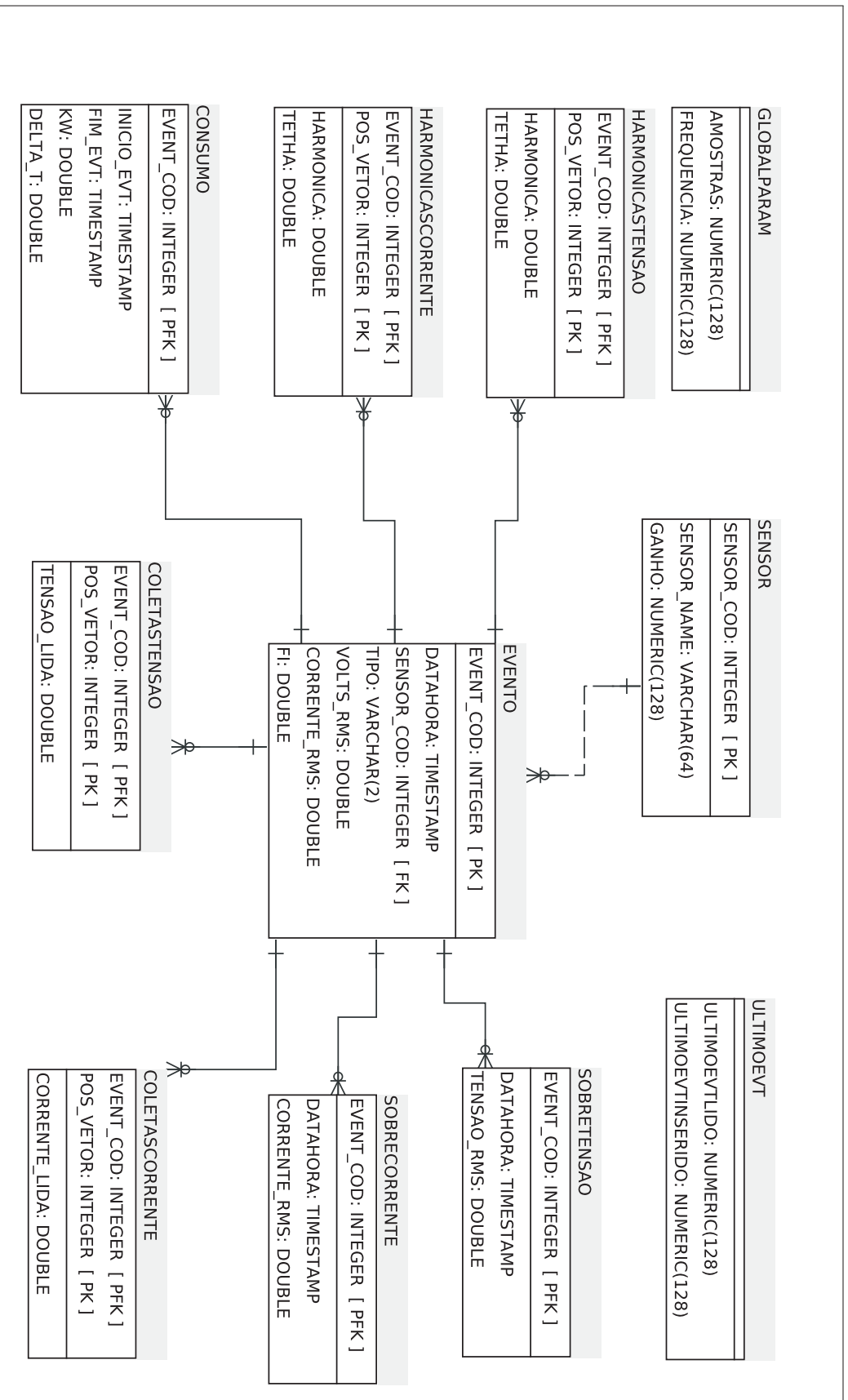
- [16] ATMEL. *ATmega48PA/88PA/168PA/328P*. [S.l.], 2014. Disponível em: <<http://www.atmel.com/Images/7766s.pdf>>. Acesso em: 20, Jun. 2014.
- [17] ATMEL CORPORATION. *AVR120: Characterization and Calibration of the ADC on an AVR*. [S.l.], 2014. Disponível em: <<http://www.atmel.com/images/doc2559.pdf>>. Acesso em: 20, Jun. 2014.
- [18] ATMEL CORPORATION. *Atmel AVR127: Understanding ADC Parameters*. [S.l.], 2014. Disponível em: <<http://goo.gl/UbQ4MQ>>. Acesso em: 25, Jun. 2014.
- [19] ARDUINO. *Language Reference*. [S.l.], 2015. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Reference/HomePage>>. Acesso em: 17, Mai. 2014.
- [20] BERG, G. v. d. *Advanced Arduino ADC – Faster analogRead()*. [S.l.], 2014. Disponível em: <<http://www.microsmart.co.za/technical/2014/03/01/advanced-arduino-adc>>. Acesso em: 31, Mai. 2015.
- [21] STEVEN, W. S. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. 2^a. ed. [S.l.]: The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, 1999.
- [22] RAO, K.; KIM, D. N.; HWANG, J. J. *Fast Fourier Transform-Algorithms and Applications: Algorithms and Applications*. [S.l.]: Springer, 2011.
- [23] SPALDING, L. E. S. *DETECÇÃO DE RISCO DE MICROCHOQUE ATRAVÉS DA CORRENTE DIFERENCIAL EM EQUIPAMENTOS ELETROMÉDICOS*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- [24] REBONATTO, M. T. et al. Protegemed2: an extended platform based on RFID to identify EME and improve the detection of microshocks. *Medical & biological engineering & computing*, Springer, v. 51, n. 6, p. 719–727, 2013.
- [25] REBONATTO, M. T.; HESSEL, F. P.; SPALDING, L. E. S. EME Electric Supervision embedded on gas panel with microshock dangerousness degree . In: *27th International Conference on VLSI Desing*. [S.l.: s.n.], 2014.
- [26] MGS ELETRONICA LTDA. *Produtos*. MGS Eletronica LTDA, 2016. Online. Disponível em: <<http://www.mgsel.com.br/mgsel/index.php/produtos/toroide.html>>. Acesso em: Jan. 05, 2016.
- [27] DEVICES, A. (Ed.). *Datasheet AD623*. [S.l.], 2015.
- [28] SPALDING, L. et al. Análise da corrente elétrica para supervisão de segurança em equipamentos eletromédicos durante procedimento cirúrgico. In: *Congresso Brasileiro de Informática em Saúde*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 9, n. 2004, p. 1–6.

- [29] CARDOSO, V. H. R.; TAVARES CABRAL, L. Sistema para Monitoramento do Consumo Elétrico. *Engenharia de Computação em Revista*, v. 1, n. 1, 2015.
- [30] PAULA, G. J. d. Medidor de demanda de energia elétrica residencial com acesso remoto. 2013.
- [31] RIVERA, R. S. *MONITOR SINALIZADOR MICROPROCESSADO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA*. 2003. Disponível em: <<https://gru.inpi.gov.br/pePl/servlet/PatenteServletControllerf>>. Acesso em: 20, Mai. 2015.

APÊNDICE A – DIAGRAMA DE CLASSE DO MÓDULO DE PROCESSAMENTO



APÊNDICE B – MODELAGEM DO BANCO DE DADOS



APÊNDICE C – MCCT - MANUAL DO USUÁRIO

Manual do Usuário

Monitor de consumo de energia elétrica,
corrente e tensão

MCCT

José de Figueiredo

7 de novembro de 2015

Sumário

Aplicações	2
1.1 O que este sistema faz?	2
Partes do sistema	4
2.1 Módulo coletor	4
2.2 Software	5
2.2.1 Módulo de processamento	5
2.2.2 Tela de monitoramento	5
2.3 Requisitos do sistema	5
As telas do sistema	6
3.1 Display no módulo de coleta	6
3.2 Tela do software no computador	6
3.2.1 Mostradores	7
Instalação a execução do sistema	10
4.1 Instalação do módulo coletor	10
4.2 Módulo de visualização	10
Termos técnicos:	11

Aplicações

O Monitor de Corrente, Tensão e Consumo - MCCT, é um sistema capaz de medir as grandezas elétricas de uma instalação e mostrar para o usuário, através de uma interface simplificada, valores instantâneos de corrente, tensão e consumo de energia, além de outras informações úteis.

Para isto, o sistema identifica os eventos¹ ocorridos na instalação que está sendo monitorada. Além disto, pela identificação destes eventos, o sistema detecta alguns tipos de anomalias na rede elétrica, como, por exemplo, sobrecorrente e sobretensão, detalhadas na seção 3.2.1.

No transcorrer deste manual a tela do monitor será detalhada, explanando em detalhes os seus indicadores.

1.1 O que este sistema faz?

O MCCT é um sistema que foi projetado para fazer o acompanhamento do consumo de energia elétrica de uma instalação. Pode ser útil em uma ou mais das aplicações listadas a seguir:

Medir consumo de energia: O sistema faz medições do consumo de energia de uma instalação identificando e registrando quando equipamentos foram ligados ou desligados na instalação. O consumo é mostrando por dia e por mês.

Medição da potência instantânea: O sistema calcula e mostra a potência consumida por evento identificado na rede, mostrando o resultado em Volt-Ampère.

Avaliar a qualidade da tensão: O sistema registra eventos quando os valores de tensão excedem os picos máximo permitidos, permitindo ao usuário saber como estão os valores de tensão em sua rede, e desta forma, monitorar a qualidade da energia em sua instalação.

¹O termo evento é utilizado aqui para identificar quando um aparelho foi ligado ou desligado.

Conhecer o comportamento da rede: A partir da análise, pela identificação de harmônicas², das formas de onda de corrente e tensão, o sistema auxilia na tarefa de conhecer e registrar o comportamento da rede elétrica.

Identificar consumo excessivo: O sistema alerta para o consumo excessivo em uma instalação, permitindo que o usuário identifique qual o momento em que isto aconteceu.

Alertar para risco de desligamento de disjuntor: O sistema alerta para o risco de desarmamento de disjuntor de circuitos que estejam sobrecarregados.

Alerta de corrente de fuga: O sistema identifica e quantifica a presença de corrente de fuga na instalação.

²Harmônicas são as frequências que compõem um sinal; são múltiplas inteiras da frequência fundamental ($60Hz$).

Partes do sistema

O sistema é composto basicamente por 3 partes: módulo coletor, servidor de dados e tela de monitoramento. Cada um destes componentes será explicado em detalhes nas seções seguintes.

2.1 Módulo coletor

O módulo coletor é um hardware embarcado, onde estão o microcontrolador, sensores e circuitos eletrônicos responsáveis pela coleta, condicionamento e pré processamento dos sinais.

A Figura 2.1 mostra uma fotografia da versão atual (*protótipo*), mostrando valores de corrente e tensão na rede em que está instalado.



Figura 2.1: MCCT - Vista frontal

Na parte traseira são feitas as conexões dos sensores de corrente, tensão, alimentação e de comunicação com a rede conforme a Figura 2.2.

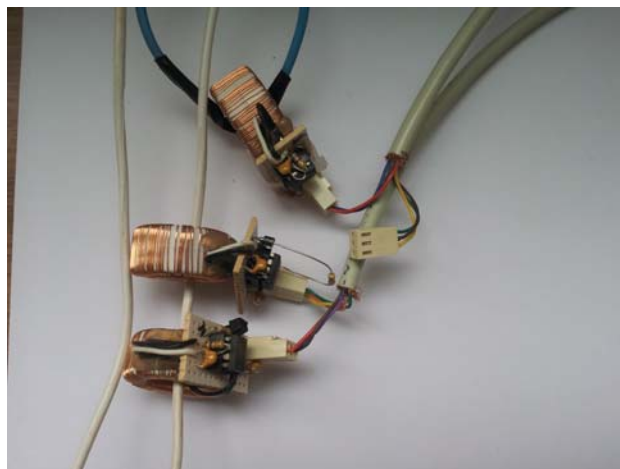


Figura 2.2: MCCT - Vista sensores.

2.2 Software

Módulo de processamento e tela de monitoramento são os softwares que compõem o sistema. Ambos são detalhados a seguir.

2.2.1 Módulo de processamento

O módulo de processamento é um software que foi desenvolvido para receber, tratar, processar e armazenar os dados obtidos pelo módulo coletor. Esta parte do sistema roda em *background*, ou seja, não tem interface de usuário.

2.2.2 Tela de monitoramento

Esta parte do software foi desenvolvida para mostrar a situação atual da rede elétrica. Na versão atual nenhuma interação é requerida, sendo que os dados visualizados são trazidos diretamente do servidor de dados.

2.3 Requisitos do sistema

Os requisitos do sistema todo são:

- Computador com rede;
- Ponto de rede onde o módulo coletor será instalado;
- Java 1.7 atualizado ou superior.

As telas do sistema

3.1 Display no módulo de coleta

O módulo de coleta, que é instalado no CD da rede elétrica monitorada, tem um display que mostra valores instantâneos de tensão e corrente. Conforme mostrado na Figura 3.3.



Figura 3.3: MCCT - Display do módulo de coleta.

3.2 Tela do software no computador

A Figura 3.4 apresenta a tela de monitoramento, com suas respectivas medidas.



Figura 3.4: MCCT - Tela do sistema

3.2.1 Mostradores

Data e hora atuais: Este mostrador, localizado no rodapé da tela, informa a data e a hora locais.

Último evento: Este mostrador informa quando foi o último evento elétrico identificado pelo sistema.

Tensão: Este mostrador informa a tensão presente na instalação e que é medida pelo sensor de tensão - a unidade de medida desta grandeza é o Volt (V). Conforme a região do Brasil, a tensão pode ser entregue ao consumidor final em 220V ou 115V com uma tolerância de variação de até 15%. Além desta tolerância, percebemos que esta tensão sofre oscilações em função de diversos fatores, que poderão ser externos ou internos a instalação que está sendo monitorada.

Conhecer a tensão da rede elétrica, a cada evento permite ao usuário monitorar a qualidade da energia que está chegando em sua instalação, bem como monitorar algumas possíveis falhas elétricas.

Corrente: Este mostrador informa a corrente medida pelo sensor em determinado evento - a unidade de medida da corrente é o Ampere (A). Esta corrente varia em função da quantidade de equipamentos instalados na rede, e da potência de cada um deles. Quanto maior a potência mais corrente será necessária para fazer este aparelho funcionar. Alterações de tensão também influenciam a corrente elétrica em uma instalação.

Conhecer a corrente permite ao usuário do sistema calcular o quanto sua rede está consumindo de energia, e desta forma acompanhar seus gastos. Além disto, conhecer a corrente de uma instalação auxilia na prevenção de sobrecargas na rede.

Fator de Potência: Este mostrador informa ao usuário o fator de potência calculado a cada evento identificado. Fator de potência não tem unidade de medida, uma vez que representa uma relação de defasagem entre as grandezas tensão e corrente, que são medidas pelo sistema. Este valor é influenciado por muitos fatores, mas seu valor será alterado principalmente por instalações com muitos motores e equipamentos indutivos.

Conhecer o fator de potência é importante pois este valor representa o quanto a rede elétrica está indutiva. Uma rede muito indutiva apresenta uma perda de energia e por consequência um gasto desnecessário, sendo recomendado uma correção. Se isto for necessário, contate um engenheiro eletricista.

Os valores mostrados por esta medida oscilam entre 0 e 1, sendo que quanto mais perto de 1, melhor está o fator de potência.

Potência: Este mostrador mostra a potência consumida por cada evento identificado pelo sistema. O cálculo da potência é feito conforme a Fórmula 3.1 e o resultado é dado em Volt-Ampere (VA).

$$Potência(VA) = TensãoEficaz * CorrenteEficaz \quad (3.1)$$

Conhecer a potência por evento é importante para que o sistema possa fazer os cálculos de consumo acumulado no dia e no mês. A partir deste valor podemos calcular o consumo de energia de cada evento que é feito a partir da Fórmula 3.2, onde temos: Potência em VA (Fórmula 3.1) e $\Delta(t)$ que representa a duração do evento em horas.

$$Consumo(kWh) = \frac{Potência(VA)}{1000} * \Delta(t) \quad (3.2)$$

Consumo no dia: Este campo mostra ao usuário o consumo de energia acumulado de sua instalação desde o início do dia. Este consumo é medido em kWh e é calculado pela soma de consumos de cada evento identificado durante o dia.

Esta informação auxilia o usuário a conhecer o padrão de consumo de sua instalação.

Consumo no mês: Este campo mostra ao usuário o consumo de energia acumulado de sua instalação desde o início do mês. Este consumo é medido em kWh e é calculado pela soma de consumos de cada evento identificados desde o início do mês.

Esta informação mostra o quanto de energia foi consumida em sua instalação mensalmente, permitindo ao usuário ter uma prévia de seu gasto global.

Alertas: O sistema conta com um mecanismo de alertas em caso de problema elétrico.

Sobrecorrente no mês: Este campo mostra quantas vezes, no período de um mês, o sistema mediu correntes muito próximas ao limite do disjuntor principal da rede. Correntes com 90% ou mais do limite estabelecido pelo disjuntor são consideradas sobrecorrentes e incrementam este contador.

Identificar ocorrências de sobrecorrente é importante porque sinaliza ao usuário a necessidade de revisar sua instalação elétrica, evitando assim acidentes graves como incêndios e/ou queima de aparelhos. Em caso de sobrecorrente entre em contato imediatamente com um eletricista qualificado.

Eventos com sobretensão: A sobretensão também é um contador mensal utilizado para mostrar a quantidade de eventos em que a tensão ultrapassou os limites da tensão de pico convencional, incluindo 15% de tolerância frequentemente praticado pelas distribuidoras.

O contador de sobretensão detalha as ocorrências em picos positivos e negativos, que mostram respectivamente o número de picos contados dentro de um ciclo completo da onda. O gráfico mostrado na Figura 3.5 apresenta este fenômeno.

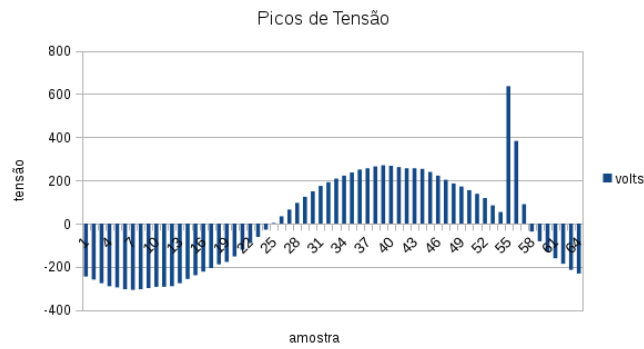


Figura 3.5: Picos de Tensão

Picos de tensão, como mostrados no gráfico da Figura 3.5, podem danificar aparelhos eletroeletrônicos. Caso este contador esteja muito elevado o usuário poderá procurar a consultoria de um engenheiro eletricista, ou ainda entrar em contato com sua concessionária de energia.

Instalação a execução do sistema

Recomendamos que o MCCT seja instalado por um profissional qualificado, indicado pelo fornecedor do sistema.

4.1 Instalação do módulo coletor

O módulo coletor precisa ser instalado no quadro de distribuição (CD) da rede elétrica que será monitorada e os condutores elétricos precisam passar pelos sensores de corrente do sistema. Recomendamos que esta parte da instalação seja executada por um técnico capacitado pelo fornecedor do sistema.

4.2 Módulo de visualização

A instalação é um procedimento simples, bastando descompactar o arquivo em um pasta de sua preferência. Na pasta *ColetorEnergia* estarão armazenados o banco de dados e os executáveis do sistema.

- bancoDados - que armazena o banco de dados embarcado e o seu executável;
- ModuloProcessamento.jar - executável que recebe, processa e armazena os dados;
- TelaMonitoramento.jar - executável que mostra os valores que estão sendo coletados no momento.

Execução: Na versão atual do sistema, iniciamos o banco de dados primeiro. Na pasta bancoDados executar o script rodaBanco:

```
$ ./rodaBanco
```

Após a execução do banco, é preciso executar o Módulo de processamento

```
$ java -jar ModuloProcessamentoVersaoFinal.jar
```

Termos técnicos:

Nesta seção, são explicados alguns dos termos técnicos utilizados neste manual.

- Rede elétrica monitorada: Compreende uma instalação elétrica a partir do CD;
- CD: Centro de distribuição é um ponto central, onde ficam os disjuntores da instalação elétrica que protegem os condutores de cada circuito elétrico;
- Circuito elétrico: Parte da instalação elétrica, composta por dois condutores, que alimenta vários equipamentos e que, neste contexto, é protegida por um disjuntor;
- Eventos: Um evento é identificado quando um aparelho é ligado ou desligado dentro da rede elétrica que está sendo monitorada;
- Tensão elétrica: É a diferença de potencial elétrico, medido na unidade Volt, entre os dois condutores que fornecem energia elétrica a um circuito elétrico ou a uma instalação elétrica;
- Corrente elétrica: É a quantidade de cargas elétricas que se movimentam ordenadamente em uma instalação, por segundo, quando uma tensão elétrica é aplicada a um equipamento ou conjunto deles;
- Fator de Potência: Relação entre duas potências dos equipamentos elétricos: a que consome energia e a que não consome energia da rede elétrica. Este fator de potência surge quando existe uma defasagem entre tensão e corrente elétrica;
- Defasagem entre tensão e corrente elétrica: fenômeno que ocorre quando os equipamentos produzem correntes elétricas que não acompanham a variação da tensão elétrica. Esta defasagem é uma medida angular, entre 0 e 90 graus, e seu valor é utilizado para determinar o fator de potência;
- Volt-Ampère: É a unidade de medida de potência elétrica em instalações elétricas. O fator de potência irá influenciar este cálculo.