

Sistema de Monitoramento de Grandezas Elétricas de Circuitos Trifásicos de Baixa Tensão

Everton Luis Nunes da Silveira¹, Rafael Corrêa² e Vitor Tumelero Valente³

TCC2 - Curso de Engenharia de Controle e Automação

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - IFRS - Campus Farroupilha

Farroupilha - RS - Brasil

Discente ¹, Orientador ² e Coorientador³

everton.silveira@farroupilha.ifrs.edu.br, rafael.correa@farroupilha.ifrs.edu.br, vitor.valente@farroupilha.ifrs.edu.br

Resumo—O presente artigo tem por objetivo apresentar o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de grandezas elétricas de circuitos elétricos trifásicos de baixa tensão utilizando dois microcontroladores. A aquisição dos sinais de tensão e corrente foi feita utilizando sensores disponíveis no mercado. A aquisição de dados se dá em janelas sucessivas contendo dezesseis ciclos de 60 Hz, compostas de 256 amostras. Os cálculos são realizados em um microcontrolador STM32F e enviados pela porta serial a um Arduino Mega, que apresenta os resultados em um display gráfico e faz o arquivamento destes dados em um cartão de memória a cada minuto. A validação do sistema foi feita por meio da comparação dos resultados práticos obtidos em testes de bancada, do instrumento com um analisador de energia, e com a análise de propagação de incertezas na medição de corrente, com resultados de precisão calculados e reais próximos. O desenvolvimento deste trabalho se deu dentro da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia de Controle e Automação do IFRS - Campus Farroupilha.

Index Terms—Medição de grandezas elétricas, medidor eletrônico de energia, microcontrolador, monitoramento, redes de baixa tensão.

I. INTRODUÇÃO

Com o atual quadro energético do país, onde entre os anos de 2013 e 2017 teve-se uma elevação média no valor da tarifa de 65% de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) [1], cresce a demanda por equipamentos que realizem o monitoramento do consumo de energia elétrica de uma instalação, seja para adequação tarifária, comparação com os dados demonstrados na fatura de energia ou apenas para monitoramento de consumo.

No ramo da medição de energia já existem diversos equipamentos para este fim, como os analisadores e registradores de energia para o consumidor final, seja residencial ou industrial, que apresentam custo elevado e manufaturados de forma a serem equipamentos portáteis e voltados à análise de qualidade de energia, assim como os medidores eletrônicos, de uso específico da distribuidora, que tem a finalidade de monitorar parâmetros referentes a consumo e demanda.

Por meio do acompanhamento dos dados históricos de consumo energético do Campus Farroupilha do IFRS, no período em que o mesmo passou a contar com o fornecimento na Classe A4, notam-se variações consideráveis de consumo ao longo do período de quatro anos, bem como o valor que é destinado ao pagamento da fatura de energia, como mostram

as Figuras 1 e 2, que apresentam informações coletadas nas faturas de energia, ficando evidente a necessidade de um monitoramento com intervalos menores, de horas ao invés de meses, como é o fornecido nas faturas de consumo de energia.

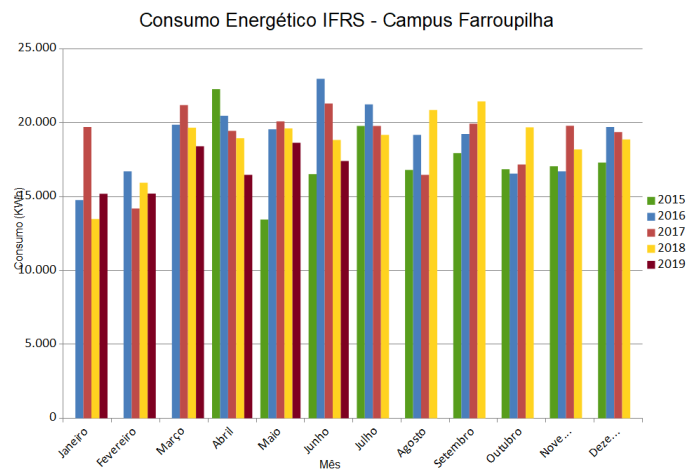


Figura 1: Consumo Fora da Ponta

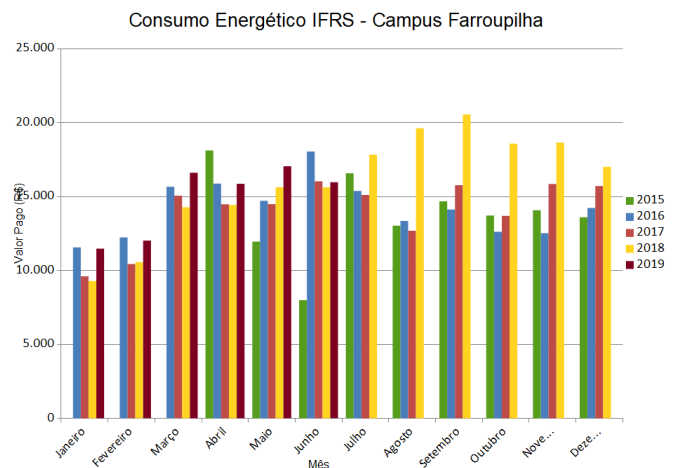


Figura 2: Valor da Fatura de Energia

Após a análise deste cenário, de elevação da tarifa de energia

e da disponibilização de um acompanhamento apenas mensal do consumo, surgiu a proposta de desenvolvimento de um sistema de monitoramento contínuo de consumo de energia que ficasse instalado permanentemente no Quadro Geral de Distribuição de Baixa Tensão (QGBT), da subestação do Campus Farroupilha do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, para assim criar uma base de dados da energia consumida na rede elétrica do campus, podendo-se identificar a presença do desbalanceamento de cargas e dando ainda a possibilidade de uma análise energética de forma a identificar horários em que a utilização de um sistema de geração auxiliar possa ser mais efetivo, de forma a evitar penalidades por parte da distribuidora por ultrapassagem da demanda contratada.

Com este objetivo foi elaborado o presente artigo, que consiste no desenvolvimento de um sistema de medição e monitoramento de grandezas elétricas, que realiza a medição dos valores de tensão e corrente a quatro fios de um determinado circuito trifásico de alimentação das edificações do campus, ficando o equipamento instalado na subestação, tendo a capacidade de processar estas medições de forma a obter os valores de potência e energia consumida, salvá-los em um cartão de memória, criando um banco de dados para posterior utilização.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os trabalhos já publicados na área de medição de energia apresentam abordagens diversas, tanto nos equipamentos e sensores utilizados, microcontroladores e ambientes de programação, tipo de comunicação, formas de disponibilização das informações e medidas realizadas, e tipo de instalação a ser atendida.

Para [2], a abordagem na medição de grandezas elétricas baseou-se no monitoramento tendo em base a instrumentação virtual, onde a interface com o usuário se dá pela tela do computador, com o uso de sistemas supervisórios e dando outras opções de informações ao usuário por meio da seleção de botões virtuais de seleção e com os sensores e equipamentos conectados às entradas do computador com o uso de conversores de sinais, utilizando o *Labview* como ambiente de desenvolvimento.

Para [3], o enfoque foi o desenvolvimento de uma plataforma para a aquisição de medidas elétricas de tensão e corrente alternadas, calculando a potência consumida por uma carga, utilizando um microcontrolador ATmega32U4 (*Atmel*) para o processamento dos dados enviando-os por *bluetooth* para um dispositivo móvel com sistema operacional *Android*, disponibilizando-as em uma página *web*. Parte do trabalho é voltada a programação e desenvolvimento do aplicativo para aparelho móvel e da página *web*, chegando a resultados considerados aceitáveis para uma instalação residencial, com correntes de até 30 A, devido ao sensor utilizado.

Para [4] o enfoque se tratou na implementação de uma rede inteligente (*Smart Grid*) para utilização no Campus Florianópolis do IFSC, para monitoramento e publicação dos dados de consumo e demanda, utilizando os dados obtidos

através de um Medidor Eletrônico de Energia modelo ELO 2113, utilizado em redes consumidoras das classes A e B, que possui um barramento de comunicação, onde é possível capturar os dados de interesse e após a demonstração dos dados referentes à consumo de energia em uma página *web*.

Para [5] a proposta foi a fabricação de um medidor digital de energia trifásico baseado em um circuito integrado MAXQ3183 AFE, que captura os valores de tensão e corrente e envia os dados a um microcontrolador Arduino por meio de comunicação SPI, no qual obteve resultados considerados satisfatórios de precisão, tamanho e custo.

Para [6] a proposta baseou-se na implementação da medição de energia elétrica trifásica utilizando um dispositivo FPGA (*Field Programmable Gate Arrays*), Zynq Z7020 - CLG484, realizando processamento paralelo para a aquisição de sinais, por meio de um conversor analógico-digital ADS8568, de forma a atender normas internacionais de medição de energia, com sua programação baseada em uma linguagem de descrição de *hardware*.

Existem ainda os multimedidores, instrumentos eletrônicos desenvolvidos de forma a atenderem aplicações como o monitoramento de grandezas elétricas diretamente nas instalações como o MMW02-M da empresa Weg, que permite a leitura das seguintes grandezas elétricas: tensão, corrente, frequência, potência, fator de potência, energia e THD, utiliza a comunicação Modbus-RTU para disponibilizar os valores medidos e calculados na rede, pode ser utilizado tanto para instalações monofásicas quanto trifásicas, com relógio interno para a gravação de eventos, alarmes configuráveis e memória interna de 16Mb [7]. O equipamento é apresentado na Figura 3a.

Para aplicações mais completas, como a análise de qualidade de energia, existem equipamentos como o analisador de energia RE6081, que de acordo com [8] é caracterizado como um medidor registrador de grandezas elétricas em tempo real, que realiza a medição de tensão, corrente, potências e distorção harmônica total (DHT), com entradas para tensão e três correntes. Além destas funcionalidades o equipamento possui memória interna que realiza o registro dos dados obtidos em intervalos predeterminados, esta memória será descarregada em um computador para uso posterior em *software* fornecido com o equipamento. Um exemplo do referido equipamento pode ser observado na Figura 3b.



(a) Multimetro

(b) Analisador

Figura 3: Medidores comerciais de grandezas elétricas

III. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo [9], o documento que delimita a análise e medição de grandezas quanto ao fornecimento de energia é o Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), elaborado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [10], que em seu módulo 8 apresenta os requisitos para sistemas de medição, estabelecendo também a forma com que serão tratadas as amostras, tempos de aquisição, intervalos de dados a serem considerados e formas de cálculos das grandezas de interesse.

Para melhor entendimento dos conceitos relacionados a medição de grandezas elétricas e princípio de funcionamento dos equipamentos eletrônicos de medição, estes serão abordados em seções específicas, apresentadas a seguir.

Para a verificação dos resultados se faz necessária a revisão de alguns conceitos, como a análise de propagação de incertezas e erros de medição.

A. Grandezas Elétricas

Se faz extremamente necessária a definição de algumas conceitos que serão utilizados para a determinação dos valores de potência, fator de potência, demanda e energia consumida.

1) *Valor Médio*: Segundo [11], quando temos em um mesmo circuito a presença de um sinal de corrente alternada (CA) e um sinal de corrente contínua (DC), o valor médio deste sinal representará a componente DC de tensão, podendo ser obtido pela equação (1).

$$X_{medio} = \frac{\sum_n X_n}{n} \quad (1)$$

Onde:

X_{medio} é o valor médio de Tensão ou corrente;
 X_n é a amostra que está sendo analisada, tensão ou corrente;
 n é o número de amostras.

2) *Valor Eficaz*: Segundo [9] o valor eficaz ou *RMS (root mean square)* de um sinal discretizado (amostrado digitalmente), será obtido pela raiz quadrada da soma quadrática de todas as amostras (X_n), dividida pelo quantidade de amostras (n), desde que as amostras se refiram a um número inteiro de períodos, como pode ser observada pela equação (2).

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_n X_n^2}{n}} \quad (2)$$

Onde:

X_{rms} é o valor eficaz de Tensão ou corrente;
 X_n é a amostra que está sendo analisada, tensão ou corrente;
 n é o número de amostras. Esta formulação deverá ser utilizada para o cálculo da tensão e corrente eficazes.

3) *Potência*: A potência é obtida pelo produto da corrente eficaz drenada pela carga e da tensão eficaz fornecida pela fonte de alimentação, para circuitos puramente resistivos. Para circuitos mistos, ou seja, com cargas resistivas, indutivas e capacitivas, passa-se a diferenciá-las, como segue:

- *Potência Ativa*: quantidade de energia elétrica solicitada por unidade de tempo, expressa em Watts (W).

$$P = V_{rms} \times I_{rms} \times FP [W] \quad (3)$$

Onde:

P é a potência ativa;

V_{rms} é a tensão eficaz;

I_{rms} é a corrente eficaz;

FP é o cosseno do ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente.

A potência ativa também pode ser calculada como a média da potência instantânea. Este cálculo é apresentado na equação (4).

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \times i(t) \cdot dt [W] \quad (4)$$

Onde:

P é a potência ativa;

T é o período;

$v(t)$ é a tensão instantânea;

$i(t)$ é a corrente instantânea.

Que na forma discretizada e para um número inteiro de ciclos é apresentada como mostra a equação (5):

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \times i_i}{n} [W] \quad (5)$$

Onde:

P é a potência ativa;

n é o número de amostras;

v_i é a tensão instantânea amostrada;

i_i é a corrente instantânea amostrada.

- *Potência Aparente*: corresponde à soma fasorial das potências ativa e reativa, é expressa em volt-ampère (VA). Representada pela letra S , que pode ser determinada pelo produto da corrente e tensão eficazes, como mostra a equação (6).

$$S = V_{rms} \times I_{rms} [VA] \quad (6)$$

Onde:

S é a potência aparente;

V_{rms} é a tensão eficaz;

I_{rms} é a corrente eficaz.

- *Potência Reativa*: definida como a raiz quadrada da diferença dos quadrados da potência aparente e da potência ativa segundo a equação (7), expressa em volt-ampères reativos (var) e seus múltiplos. Representada pela letra Q .

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} [var] \quad (7)$$

Onde:

Q é a potência reativa;

P é a potência ativa;

S é a potência aparente.

As equações para cálculo de potência, até aqui apresentadas, destinam-se a determinar a potência por fase, ou circuito, desta

forma é imprescindível a determinação de equações destinadas aos cálculos de potências totais. Segundo [11], os valores de potências totais são obtidos da seguinte forma:

- Potência Ativa Total P_t : será obtida pelo somatório das potências ativas das fases, como mostra a equação (8):

$$P_t = P_1 + P_2 + P_3 \text{ [W]} \quad (8)$$

Onde:

P_t é a potência ativa total do sistema;
 P_1 , P_2 e P_3 são as potências ativas de cada fase;

- Potência Reativa Total Q_t : é a diferença entre as potências reativas fornecidas às cargas indutivas e cargas capacitivas, ficando em um circuito trifásico como mostra a equação (9), o sinal da potência fica convencionado da seguinte forma: positivo para indutiva e negativo para capacitiva.

$$Q_t = \pm Q_1 \pm Q_2 \pm Q_3 \text{ [var]} \quad (9)$$

Onde:

Q_t é a potência reativa total do sistema;
 Q_1 , Q_2 e Q_3 são as potências reativas de cada fase;

- Potência Aparente Total P_t : soma quadrática das potências ativas totais e potências reativas totais como mostra a equação (10).

$$S_t = \sqrt{P_t^2 + Q_t^2} \text{ [VA]} \quad (10)$$

Onde:

S_t é a potência aparente total do sistema;

4) *Fator de Potência*: De acordo com [12], o fator de potência (FP) é a relação entre a potência ativa e a potência aparente consumidas por um dispositivo ou equipamento, independente da forma que as ondas de tensão e correntes apresentem, desde que os sinais variantes no tempo sejam periódicos. Como mostrado na equação (11).

$$FP = \frac{P}{S} \quad (11)$$

Onde:

FP é o fator de potência;

P é a potência ativa;

S é a potência aparente.

5) *Demanda*: Média das potências elétricas ativas, solicitadas ao sistema elétrico pela parcela da carga instalada em operação na unidade consumidora, durante um intervalo de tempo determinado de 15 minutos. Dada em quilowatt (kW).

6) *Energia Elétrica*: Produto da potência elétrica pelo intervalo de tempo de utilização de um equipamento ou de funcionamento de uma instalação (residencial, comercial ou industrial), como pode ser observada pela equação (12), representada pela unidade quilowatt-hora (kWh).

$$E = P \times t \text{ [kWh]} \quad (12)$$

B. Medidores Eletrônicos de Energia

Segundo [13] neste tipo de instrumento, os sinais de tensão e corrente são digitalizados e após processados por um microprocessador dedicado.

1) *Transdutores*: Parte do equipamento de medição de energia responsável pela captura das amostras dos sinais de corrente e tensão e a sua devida adequação para níveis suportados pelo conversor analógico digital.

2) *Conversor Analógico Digital*: Conversores analógicos digitais (ADC ou A/D) são dispositivos que convertem um nível de tensão ou corrente (entrada analógica) em um número binário (saída digital) [13], ou seja neste bloco do equipamento se dá a conversão do sinal amostrado em um número que será interpretado pelo microprocessador, podendo ser utilizado um ADC externo ou integrado ao microprocessador. São características importantes do ADC:

- Resolução: maior diferença entre qualquer tensão na entrada em relação ao número de saída, referida normalmente como "resolução de n bits". Pode ser obtida por meio da equação (13).

$$R = \frac{V_{REFH} - V_{REFL}}{M} \quad (13)$$

Onde:

R é a resolução do ADC;

V_{REFH} é o maior valor lido pelo ADC;

V_{REFL} é o menor valor lido pelo ADC;

M é o maior valor de saída do ADC, obtida por $M = 2^n$ e n é quantidade de bits do ADC.

- Tempo de Conversão: Tempo necessário para produzir a saída digital após o início da conversão;
- Taxa de Conversão: maior taxa que o ADC pode realizar as conversões.

3) *Microprocessador*: Segundo [13], o tipo de microprocessador pode variar desde microcontroladores dedicados providos de recursos específicos, até Processadores Digitais de Sinais (DSPs), rápidos o suficiente para realizar o processamento em tempo real dos sinais, bem como a transmissão via rede ou outro meio de comunicação. Nestes processadores também podem ser implementados filtros e outras funcionalidades, fazendo com que o processamento ocorra de forma mais rápida e inteligente, possibilitando a inserção de rotinas de autocalibração, e possibilitando que o equipamento possua dimensões reduzidas, se comparado aos tradicionais medidores de indução eletromagnética.

C. Estimativa de Incerteza na Medida

O objetivo de qualquer sistema de medição/monitoramento de grandezas elétricas é obter o valor verdadeiro do mensurando. Entretanto, sempre haverá erros associados ao valor medido de modo que o valor verdadeiro atual de uma grandeza será sempre desconhecido. A incerteza é uma propriedade inerente a qualquer medida ou estimativa realizada em qualquer ambiente físico e, portanto, precisa ser levada em consideração ao modelar sistemas que gerenciam dados reais [14].

Segundo [13], ao se proceder a medição de uma quantidade ou mensurando, deve-se estabelecer um intervalo no qual estão dispersos os resultados em torno da melhor estimativa. Este parâmetro depende das condições ambientais, da operação do instrumento, entre outros. A este parâmetro dá-se o nome de incerteza da medição e é representado como:

$$Q \pm \Delta Q \quad (14)$$

Onde:

Q é a melhor estimativa da quantidade medida;

ΔQ é a incerteza padrão, calculada de acordo com procedimentos normalizados [15].

Desta forma, o resultado de uma medição, mesmo sendo feitas as correções de erros sistemáticos, ainda é uma aproximação do valor verdadeiro, e este fato é atribuído à incerteza relacionada aos mais diversos fatores, tanto de grandezas intermediárias, quanto de grandezas que compõem o dispositivo de medição. Alguns exemplos de fontes de incerteza são:

- Tolerância dos valores de componentes;
- Resolução finita de um dispositivo;
- Precisão do valor da grandeza;
- Amostragem não significativa.

A teoria de incertezas auxilia na determinação do valor que melhor representa uma grandeza, valendo-se também de probabilidades, de quanto esse valor pode ser diferente do valor verdadeiro, caracterizando a incerteza desta medida [13]. O termo incerteza-padrão refere-se a dispersão das medidas em torno da melhor estimativa.

1) *Função que representa a medição*: Deve-se expressar em termos matemáticos a dependência do mensurando (saída) nas quantidades de suas entradas.

2) *Correção de erros sistemáticos*: Erros sistemáticos que sejam identificados serão corrigidos antes da identificação de possíveis fontes de incerteza.

3) *Fontes de Incerteza*: A determinação da incerteza de uma medição é iniciada pela identificação das fontes de incerteza, que serão as variáveis da função matemática que representa o resultado da medição. Estas fontes de incerteza deverão ser identificadas por tipo, como:

- Tipo A, para análise com dados estatísticos de dados obtidos por meio de amostragem;
- Tipo B, quando os dados de tolerância estão apresentados em um manual, folhas de dados, gravados nos componentes, no caso de resistores, ou resultados de calibrações.

Ao se identificar o tipo de fonte de incerteza, obtém-se o desvio padrão do valor medido, na posse deste dado é feita a análise do tipo de distribuição deste valor, para dados de tolerância é seguida uma distribuição retangular, com esta informação é possível determinar a incerteza-padrão para esta fonte.

4) *Balanco de Incertezas*: O balanço de incertezas é feito levando-se em conta o tipo de distribuição de probabilidade associada a cada uma das fontes de incerteza, neste caso como esta não é determinada, parte-se do pior caso possível,

a distribuição retangular. Os valores de tolerância de cada uma das fontes determina o desvio padrão, e com este dado é possível obter a incerteza padrão pela equação (15).

$$u_i = \frac{s}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

5) *Incerteza combinada*: Tendo-se os valores de incerteza padrão para cada fonte, é realizada a análise da interferência de cada fonte de incerteza na incerteza total da medição, a equação (16) indica como deve ser feita esta combinação [13].

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{\delta F}{\delta X_i} \right)^2 \cdot u_i^2} \quad (16)$$

Onde:

u_c é a incerteza combinada, onde são consideradas todas as fontes;

$\frac{\delta F}{\delta X_i}$ é o coeficiente de sensibilidade da função, derivada parcial, em relação a cada uma das fontes de incerteza, na equação (16) esta é elevada ao quadrado para eliminar a presença de um sinal negativa e não interferir no somatório u_i é a incerteza padrão de cada fonte de incerteza, da mesma forma é elevada ao quadrado para eliminar qualquer sinal negativo.

6) *Incerteza Expandida*: De acordo com [13], a incerteza expandida U deve ser obtida multiplicando-se a incerteza combinada u_c por um fator k , como mostra a equação (17).

$$U = k \times u_c \quad (17)$$

Onde:

U é a incerteza expandida;

u_c é a incerteza combinada de todas as fontes de incerteza. A obtenção do valor de k é feita por meio da consulta à tabela de distribuição T, para um determinado nível de confiança de acordo com o número efetivo de graus de liberdade, podendo este para uma avaliação do tipo B ser considerado ∞ .

IV. PROPOSTA

No presente artigo é apresentado o desenvolvimento um sistema de monitoramento de grandezas elétricas com as seguintes características:

- Instalação trifásica de baixa tensão a quatro fios;
- Aquisição dos sinais de tensão e corrente de cada fase e do neutro;
- Condicionamento dos sinais utilizando circuitos analógicos desenvolvidos com amplificadores operacionais;
- Utilização de um ADC de 12 bits em ciclos fixos de amostragem, evitando a perda de informações;
- Processamento dos sinais amostrados utilizando-se um microcontrolador STM32F, para realizar a conversão dos mesmos;
- Cálculo dos valores de tensão, corrente, potências ativa e reativa, fator de potência, demanda e energia;

- Armazenamento dos valores de grandezas em um cartão de memória para futura utilização;
- Precisão de até 1% da leitura;
- Possibilidade de expansão do equipamento para realizar o monitoramento nos diferentes circuitos trifásicos do QGBT da instalação;
- Interface com o usuário por meio de um mostrador gráfico digital, que possibilite a navegação entre diferentes telas.

A. Diagrama de blocos

Na Figura 4 é apresentada a estrutura do equipamento. Neste diagrama são apresentados dois microcontroladores, o primeiro, um STM32F, sendo responsável pela aquisição dos sinais, por meio dos sensores e circuitos de condicionamento, tratamento das amostras, cálculo das grandezas de interesse e envio dos resultados pela comunicação serial para o segundo microcontrolador, um Arduino Mega 2560, ficando este com a função de indicação de resultados (interface), calendário/relógio e a criação do banco de dados.

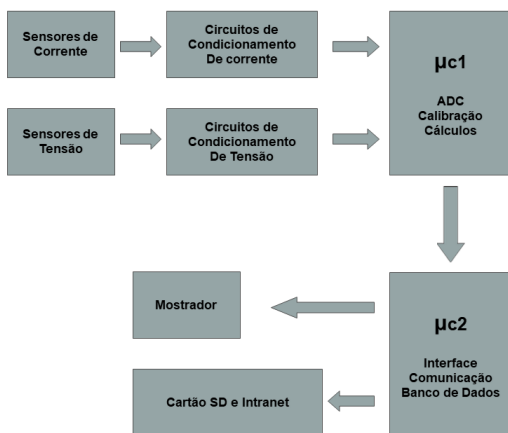


Figura 4: Diagrama de blocos do equipamento

B. Microcontroladores

Foram utilizados dois microcontroladores no desenvolvimento do protótipo, um STM32F, responsável pelo processamento dos sinais oriundos dos sensores e circuitos de condicionamento e os cálculos referentes aos valores de tensão, corrente, potências e fator de potência, e um Arduino Mega 2560, responsável pela indicação dos valores de grandezas e arquivamento de dados. A seguir detalhes sobre os dois microcontroladores serão melhor abordados.

1) *STM32F*: O microcontrolador STM32F possui as seguintes características [16]:

- 64 kb de memória *flash*;
- 20 kb de memória RAM e 48 pinos;
- 48 pinos;
- ARM® 32-bit Cortex® -M3 CPU Core;
- 72 MHz de frequência máxima;
- ADC de 12 bits, com faixa de leitura de 0 a 3,3 V;

O ambiente de programação utilizado é o *software* Keil µVision versão 4.74, programado em C.

1.1) *Configurações Iniciais*: Para utilização correta das funcionalidades necessárias no desenvolvimento do projeto inicia-se realizando a configuração da frequência de operação (*clock*), via código, nos diferentes barramentos do microcontrolador, estes barramentos são: AHB (barramento avançado de alto desempenho), APB1 e o APB2 (barramento de periféricos). Habilitando assim os diferentes periféricos como: DMA (acesso direto a memória), *timers* de interrupções TIM2 e TIM3, comunicação serial USART3, grupos de pinos de entrada e saída GPIOA, GPIOB e ADC1. Após é feita a configuração dos pinos de entrada e saída, GPIO's.

1.2) *Configuração dos periféricos*: Com o *clock* ajustado para cada periférico, se faz necessário o ajuste via código dos demais parâmetros de configuração, como segue:

- USART3: *baudrate*, taxa de envio de dados por segundo, configurada em 57600 bps, controle de fluxo (não), paridade (não), modo (envio), tamanho do *bit* de parada (1 *bit*), tamanho do dado (8 *bits*), bem como a inicialização dos pinos do microcontrolador que serão utilizados;
- *Timers* de interrupção TIM2 e TIM3: a configuração de interrupções por tempo se dá por meio da alteração de dois parâmetros numéricos, que serão utilizados para delimitar a frequência e o tempo da interrupção, estes parâmetros são: *TIM_Prescaler* e *TIM_Period*, que são utilizados na equação (18);

$$F = \frac{Clock}{TIM_Prescaler + 1} \cdot (TIM_Period + 1) \quad (18)$$

- DMA: a configuração do acesso direto a memória, DMA, se dá via código, indicando o tamanho do *buffer* utilizado, ou seja, a quantidade de entradas analógicas, neste caso, que serão amostradas ininterruptamente.
- ADC1: a configuração do conversor analógico digital baseia-se na seleção dos pinos utilizados e ajuste ciclo de amostragem das entradas.

1.3) *Interrupção*: Devido a necessidade da aquisição de 16 amostras por ciclo [10], o *timer* TIM2 será calculado, utilizando a equação (18), para uma frequência de 960 Hz, ou seja uma frequência 16 vezes a da rede elétrica (60 Hz). Como a amostragem ocorre de forma contínua no ADC, nas entradas analógicas de A0 até A6, existe a necessidade de um segundo *buffer*, com 7 colunas e 256 linhas, que será preenchido todo vez que for disparada a interrupção TIM2, a cada 1,04 ms. Ao se concluir a aquisição das 256 amostras para cada entrada do ADC estes dados são transferidos para uma variável identificada pela grandeza (V ou I) e a fase (1, 2 ou 3) ou neutro (N), um vetor de 256 posições, que serão utilizados para o cálculo dos valores RMS. Já o *timer* TIM3, tem a finalidade de ajustar o tempo de ciclo de envio dos valores de grandeza calculados no STM32F pela rede serial para o Arduino Mega 2560, a frequência utilizada será de 2 Hz, garantindo o envio dos dados pela serial a cada 500 ms. Os valores utilizados para *TIM_Prescaler* e *TIM_Period* em cada uma das interrupções são apresentados na tabela I.

Interrupção	Clock [MHz]	Prescaler	Period	T[ms]	F[Hz]
TIM2	72	2499	29	1,04	960
TIM3	72	17999	1999	500	2

Tabela I: Parâmetrização dos Timers

1.4) *Cálculo das Grandezas Elétricas:* Com os valores amostrados em tempo fixo e salvos em variáveis que identificam a grandeza a que se referem, os mesmos são separados por fase e neutro, já que existe a aquisição de 7 entradas, três de tensão e quatro de corrente. Estes são passados como parâmetros para funções que realizam o cálculo das grandezas de interesse, valores RMS de tensão e corrente, potências ativa, aparente e reativa, e fator de potência para as fases e valor RMS de corrente do neutro. Para a realização dos cálculos foi montado o seguinte passo a passo:

- Passo 1 - Conversão da palavra digital amostrada em um valor de ponto flutuante, realizando o produto de cada amostra com a resolução do ADC, que é obtida utilizando a equação (13), como pode ser visto a seguir:

$$R = \frac{3,3}{2^{12}} = 805,66 \mu V$$

- Passo 2 - Cálculo do valor de *offset*, inserido pelo circuito de condicionamento, obtido por meio do cálculo de valor médio do sinal amostrado. Obtendo a componente DC presente no sinal amostrado, para a realização deste cálculo é utilizada a equação (1).
- Passo 3 - Dentro de um mesmo laço de repetição são percorridos os vetores que contém as amostras salvas de tensão e corrente e é realizada a preparação das amostras para o cálculo de RMS, da seguinte forma:
 - Subtração do valor de *offset* de tensão e corrente, calculados anteriormente;
 - Multiplicação do resultado da subtração do *offset* por um ganho, proveniente das funções de transferências dos sensores e circuitos de condicionamento;

Após é feito o somatório de três variáveis que recebem as seguintes informações:

- 1 - Soma dos quadrados dos valores de tensão;
- 2 - Soma dos quadrados dos valores de corrente;
- 3 - Soma do produto dos valores de tensão e corrente;

Estas variáveis são utilizadas para o cálculo dos valores RMS de tensão e corrente (1 e 2), utilizando a equação (2) e para o cálculo de potência ativa (3), utilizando a equação (5).

- Obtidos os valores de tensão RMS, corrente RMS e potência ativa torna-se possível a obtenção dos valores de:
 - Potência Aparente, por meio da equação (6);
 - Potência Reativa, por meio da equação (7);

- Fator de Potência, por meio da equação (11)

- Potências Totais - Os cálculos dos valores totais de potências ativa, reativa e aparente, e fator de potência são realizados utilizando as equações (8), (9), (10) e (11), respectivamente.

O cálculo dos valores de energia são realizados no segundo microcontrolador, durante os intervalos de arquivamento de dados.

1.5) *Protocolo de Comunicação:* Para o envio, por meio da comunicação serial, de forma eficaz e confiável dos valores de grandeza calculados ao Arduino Mega, foi montado um protocolo que faça o envio *byte a byte*, como segue:

- 1 - Envio de um *byte* de início de transmissão;
- 2 - Dois *bytes* identificadores da variável e o grupo a que pertence (fase 1, 2, ou 3, neutro, valores totais);
- 3 - Quatro *bytes* referentes ao valor da grandezas a ser enviada, estes *bytes* são originados na conversão dos valores, que se encontram em ponto flutuante, em valores inteiros, utilizando-se a multiplicação do original por 10000, e após feito o deslocamento de *bits*, salvando o resultado em um vetor de 4 *bytes*, que serão enviados;
- 4 - Utilizando o operador Xor é feito o cálculo de CRC, para envio no final do protocolo, este será utilizado para verificação de integridade da mensagem no recebimento.

O protocolo montado pode ser observado na tabela II.

Byte	Dado
1	Byte de Início
2	Variável
3	Grupo
4	Valor >> 24 bits
5	Valor >> 16 bits
6	Valor >> 8 bits
7	Valor
8	CRC

Tabela II: Protocolo de Comunicação

2) *Arduino Mega 2560:* Microcontrolador baseado em um processador Atmel ATmega640 V-2560, de 8 bits, com 54 entradas digitais e 16 entradas analógicas, com suporte para comunicação serial, I2C e SPI.

O Arduino Mega 2560 tem a função básica de interface com o usuário (IHM) e arquivamento de dados (*Datalogger*), as funcionalidades/características utilizadas são:

- Comunicação Serial, para a recepção dos dados enviados pelo STM32F;
- Comunicação I2C, para sincronização com o relógio de tempo real (RTC);
- Comunicação SPI, para utilização do *display* gráfico e arquivamento dos dados no cartão SD;
- Leitura de entradas digitais para leitura do *encoder* de navegação entre as telas.

Para a melhor utilização das funcionalidades, foram desenvolvidas as seguintes funções:

- Leitura da porta serial - Faz a recepção dos dados na serial e a remontagem dos dados (protocolo inverso ao realizado no envio do STM32F);

- Indicação de dados no display - Os valores das grandezas são separados em grupos, de acordo com a fase, valores totais e valores de energia;
- Arquivamento dos dados de potências, energia e demanda em cartão SD.

Para uma melhor compreensão das rotinas executadas no Arduino, na Figura 5 é apresentado o fluxograma do programa.

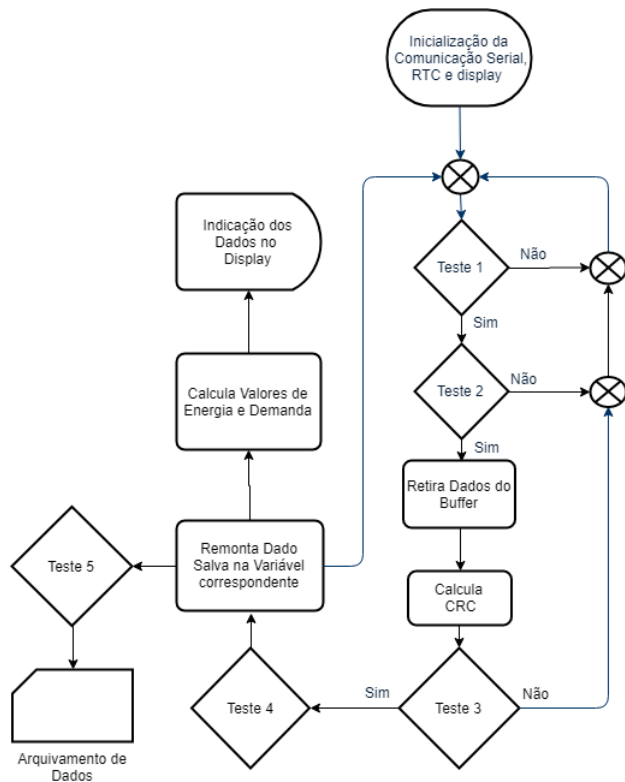


Figura 5: Fluxograma programa do Arduino

Segue a função de cada um dos testes executados no programa:

- Teste 1 - Verifica a existência de dados no *buffer* de entrada da Serial;
- Teste 2 - Verifica se o primeiro *byte* do *buffer* confere com o *byte* de início de pacote;
- Teste 3 - Faz a comparação entre o valor de CRC calculado e o último *byte* do pacote recebido;
- Teste 4 - Realiza a identificação da variável recebida, por meio dos dois bytes identificadores da variável e grupo a que pertence;
- Teste 5 - Faz o controle dos intervalos de arquivamento dos valores das grandezas;

C. Sensor de Corrente e Circuito de condicionamento de Corrente

Para a aquisição dos sinais de corrente, nas três fases e no neutro, existe a necessidade da análise do funcionamento do sensor de corrente e o desenvolvimento dos circuitos de condicionamento do sinal medido.

Tendo em vista a faixa de leitura de corrente, de 0 a 200 A, determinada previamente, é necessário que estes valores não extrapolem a faixa de leitura do ADC do microcontrolador, que é de 0 a 3,3 V, e por isso devem ser condicionados corretamente.

1) *Sensor de Corrente*: O sensor utilizado é uma garra de corrente da marca Minipa, modelo CA-601, que possui classe de segurança CAT III (600 V), para até 600 A, com uma relação de transformação de 1 mV/A. Com o uso de cargas de teste, foram realizadas algumas medições de corrente utilizando o sensor escolhido. Para estes testes foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Carga resistiva com 5 faixas de potência;
- Alicete amperímetro Fluke 375;
- Multímetro Minipa ET-2600;
- Variador de tensão, variac.

Para a obtenção dos valores de corrente de teste foi realizada a variação da tensão aplicada e da resistência da carga. As faixas de corrente testadas e os resultados das medições são apresentados na tabela III.

I_{medida} [A]	V_{medida} [mV]	I/V
1	1,13	0,885
2	2,18	0,917
3,1	3,25	0,953
4,2	4,39	0,956
5,2	5,46	0,952
6,2	6,42	0,966
7	7,32	0,956
8,3	8,65	0,965
9,2	9,54	0,964
10,3	10,65	0,967
11	11,2	0,962
12,1	12,7	0,953
13	13,35	0,974
14	14,41	0,972
15,2	15,69	0,968

Tabela III: Testes da Garra de Corrente

Por meio destes teste foi possível constatar que a garra de corrente possui um faixa quase linear de medição à partir de 3 A.

2) *Circuito de condicionamento de Corrente*: O projeto do circuito de condicionamento de corrente parte do princípio de que o valor máximo de tensão na saída da garra de corrente será 200 mV eficazes, ficando o valor da tensão de pico a pico como mostra a equação (19):

$$V_{pp} = 2 \times \sqrt{2} \times V_{RMS} \quad (19)$$

$$V_{pp} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 200 \cdot 10^{-3} = 565,68 \text{ mV}$$

Amplificação: Para eliminar os efeitos de ruídos de origens diversas, como eletromagnéticas, é utilizado de um amplificador de instrumentação AD620, que além de eliminar o ruído fará a amplificação do sinal amostrado. Desta forma sabendo-se que as entradas analógicas do microcontrolador tem seu valor máximo de 3,6 V para o STM32F de acordo com sua folha de dados, fica determinado que o máximo valor de tensão

na saída do circuito de condicionamento de corrente será 3,6 V. Para o cálculo do resistor de ganho toma-se as equações (20) e (21), retiradas da folha de dados do amplificador de instrumentação [17]. O circuito projetado é apresentado na Figura 6, onde IN1 e IN2 são as saídas de tensão da garra de corrente e Out1 a saída do circuito de amplificação para o próximo estágio.

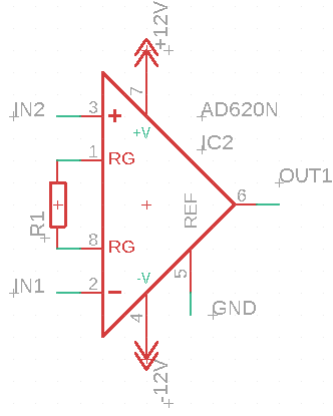


Figura 6: Circuito de amplificação

$$R_G = \frac{49,4k}{G - 1} [\Omega] \quad (20)$$

$$G = \frac{V_{max}}{V_{pp}} \quad (21)$$

Onde:

V_{max} é o máximo valor de tensão suportável pela entrada AD do microcontrolador, definida anteriormente como 3,6 V;

V_{pp} é o máximo valor da tensão de saída do sensor de corrente;

R_G é o resistor de ganho;

G é o ganho especificado para o amplificador, que pode ser definido por:

$$G = \frac{3,6 V}{565,68 mV} = 6,36$$

Desta forma fica definido o valor do resistor de ganho como:

$$R_G = \frac{49,4k}{6,36 - 1} = 9,21 k\Omega$$

Utilizando-se o resistor de precisão (tolerância de $\pm 1\%$) mais próximo, fica definido que será utilizado um resistor de 10 k Ω . Assim é necessário verificar o valor máximo de tensão através da manipulação das equações (20) e (21).

$$G = \frac{49,4 k\Omega}{10 k\Omega} + 1 = 5,94$$

$$V_{max} = 5,94 \cdot 565,68 mV = 3,36 V$$

Offset de Tensão: Nesta etapa foi projetado um circuito para realizar o *offset* de tensão, ou seja, realizar a inserção de um sinal de corrente contínua para aumentar o nível de tensão do menor valor a ser lido pelo ADC, tendo em vista que o sinal lido ser alternado e ter sua amplitude variando de $-V_p$ a $+V_p$, já que o valor máximo admissível pela entrada analógica do microcontrolador é de 3,6 V, o valor ideal de sinal CC somado ao sinal original é a metade, ou seja, 1,8 V. Para este fim são utilizados dois amplificadores operacionais, o primeiro com a função de subtrator de tensão, onde é adicionado um nível de tensão contínua ao sinal de saída do estágio anterior porém com todo o sinal invertido (negativo), e o segundo com a função de amplificador de ganho unitário que realiza a inversão do sinal, deixando-o totalmente positivo e variável de acordo com a amplitude do sinal de saída do sensor de corrente. Uma configuração típica do circuito a ser utilizado pode ser visto na Figura 7.

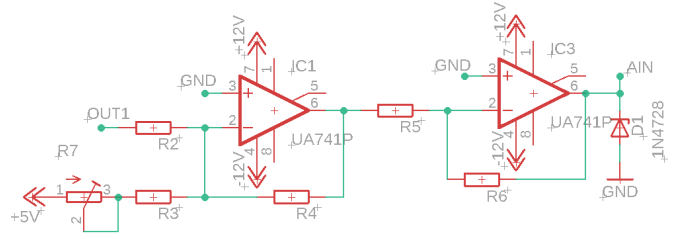


Figura 7: Circuito de offset de Tensão

Os valores dos resistores, que são obtidos pela aplicação das equações (22) e (23), a seguir, segundo [18], são apresentados na tabela IV e foram realizados de forma a garantir o valor de *offset* e a máxima amplitude do sinal de saída sigam os valores especificados anteriormente, como segurança é colocado o diodo zener (D1) de 3,6 V.

$$V_{A_o} = - \left(\frac{R_3}{R_4} \cdot V_{cc} + \frac{R_2}{R_4} \cdot V_{ca} \right) \quad (22)$$

$$V_{out} = - \left(\frac{R_5}{R_6} \cdot V_{A_o} \right) \quad (23)$$

Resistor	Valor Calculado[Ω]	Valor Utilizado [Ω]	Tolerância
R_1	9,21k	10k	$\pm 1\%$
R_2	4,7k	4,7k	$\pm 1\%$
R_3	13,06k	10k	$\pm 1\%$
R_4	4,7k	4,7k	$\pm 1\%$
R_5	47k	47k	$\pm 1\%$
R_6	47k	47k	$\pm 1\%$
R_7	10k	10k	$\pm 1\%$

Tabela IV: Resistores dos circuitos de amplificação e Offset de tensão

Nota: O valor de R_3 utilizado é inferior ao calculado devido a inserção do potenciômetro R_7 no circuito, para o ajuste fino no offset de tensão.

D. Sensor de Tensão e Circuito de Condicionamento

Para a definição do sensor de tensão a ser utilizado, começa-se determinando o valor máximo de tensão a ser medido, em se tratando de uma instalação de classe consumidora A4 de acordo com o Manual de Tarifação de Energia Elétrica [19], sendo necessário analisar o projeto elétrico do QGBT da SE e constatou-se que a tensão entre fases é de 380 V, ficando o valor da tensão de fase de 220 V eficazes.

1) *Sensor de Tensão*: Após a determinação do valor da tensão de fase a ser medido (amostrado) e após a devida análise das opções de sensores/transformadores possíveis, optou-se pelo uso de um sensor de tensão de 0 a 250 V (RMS), de tamanho reduzido, com o transformador integrado a placa e com o circuito de condicionamento integrado. Após a análise da folha de dados [20] do sensor foram obtidas as seguintes características:

- Modelo: ZMPT-101B
- Tensão de alimentação: 5 a 30 VDC;
- Faixa de Medição: 0 a 250 VAC;
- Corrente de entrada e saída: 2 mA;
- Linearidade: 0,2 %;
- Precisão: 1 %.

Para evitar riscos ao microcontrolador, foi seguido o procedimento de ajuste do sensor, como é descrito a seguir:

- Os pinos de entrada do sensor foram conectados a um variador de tensão;
- O sensor foi energizado com 5 VDC;
- Os pinos de saída do sensor foram conectados a um osciloscópio Tektronix TPS-2024;
- Foi conectado um multímetro ET-2600 na saída do variac, para verificação do valor de tensão na saída do mesmo, e a tensão foi sendo elevada até 220 V;
- Foi ajustado o potenciômetro do sensor, até que a senóide mostrada no osciloscópio não apresentasse nenhuma distorção e o valor máximo de tensão medido ficasse abaixo de 3,3 V;

Após feitos os ajustes iniciais do sensor, os três sensores utilizados foram submetidos ao teste de linearidade, onde é verificado se o sensor possui uma resposta linear quando ocorre a variação de tensão na sua entrada AC. Os dados obtidos deste teste são apresentados na tabela V.

V_{in} [V]	Sensor 1		Sensor 2		Sensor 3	
	V_1 [mV]	$\frac{V_{in}}{V_1}$	V_2 [mV]	$\frac{V_{in}}{V_2}$	V_3 [mV]	$\frac{V_{in}}{V_3}$
50	91	549,45	86	581,39	90	555,55
100	180	555,55	175	571,43	180	555,55
150	272	551,47	264	568,18	274	547,44
200	362	552,49	354	564,97	366	546,45
220	399	551,38	388	567,01	402	547,26

Tabela V: Teste de Linearidade

Após a análise dos resultados obtidos no teste de linearidade, constatou-se a necessidade de utilizar ganhos diferentes na etapa de cálculo dos valores RMS, no microcontrolador STM32F, de acordo com o sensor utilizado, já que os mesmos

apresentam diferenças na razão entre o valor de entrada e o valor enviado ao ADC.

E. Indicação de Resultados e Arquivamento

Com a finalidade de proporcionar uma melhor experiência ao usuário foi desenvolvida uma interface homem-máquina (IHM), com as seguintes configurações:

- *Display* gráfico de 128x64 pixels;
- *Encoder* para navegação entre as telas, com botão;
- *Slot* para cartão SD, com regulador de nível de tensão de 5 V para 3,3 V;
- Sirene.

1) *Indicação de Resultados*: Para a apresentação dos resultados, estes foram separados em cinco telas, uma para cada fase, uma para os valores totais de potência e fator de potência e uma para a indicação dos valores de energia e demanda. Cada uma das telas possui a indicação de data e hora. Uma das telas pode ser observada na Figura 8.



Figura 8: Tela das Energias

2) *Banco de Dados*: O arquivamento dos dados se dá em intervalos de 1 minuto, ficando vinculado ao relógio de tempo real. Quando o cartão SD está inserido é criado um arquivo de texto (.txt), onde são arquivados os valores das variáveis:

- Potências ativa (P1, P2, P3 e PT);
- Potência reativa total (QT);
- Potência aparente total (ST);
- Fator de potência total (FPT);
- Energias ativas (Ea, Eat);
- Energia reativa (Er);
- Demanda (D).

Os valores salvos são acompanhados de data e hora para que seja possível a geração de um histórico de dados.

F. Prototipagem dos Circuitos

De forma a viabilizar a montagem do protótipo e após os testes dos circuitos em um matriz de contatos, foram desenvolvidas as placas de circuito impresso, no *software Eagle*, e gerados os arquivos para a confecção das placas. Houve a necessidade do desenvolvimento das seguintes placas:

- Circuito de condicionamento de corrente;
- Placa base para sensores, circuitos de condicionamento e microcontrolador;
- Placa de integração da IHM e caixa de acrílico.

De forma a proporcionar um aspecto modularizado ao protótipo e facilitar a manutenção do mesmo, foi montado um *layout*, apresentado na Figura 9.

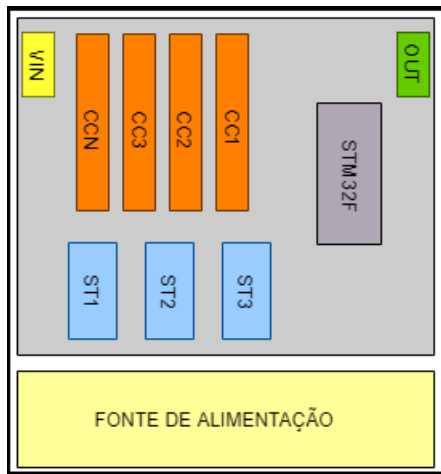


Figura 9: Layout do Protótipo

Onde:

- CC1, CC2, CC3 e CCN, são os circuitos de condicionamento de corrente;
- ST1, ST2 e ST3, são os sensores de tensão;
- Vin é a entrada de alimentação do circuito, de +12 V, -12 V, +5 V e GND;
- Out é a saída de alimentação e comunicação serial com o Arduino.

1) *Circuito de Condicionamento de Corrente*: Os circuitos de condicionamento de corrente projetados e apresentados nas Figuras 6 e 7, foram utilizados para a gerar os arquivos de manufatura assistida por computador (CAM) de confecção da placa apresentada na Figura 10.

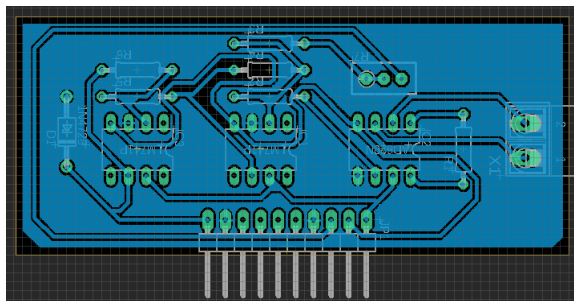


Figura 10: Placa do circuito de condicionamento de corrente

2) *Placa Base*: Para a instalação dos sensores de tensão, circuitos de condicionamento de corrente e microcontrolador (STM32F), foi projetada uma placa base para o sistema, destinada a fornecer a alimentação aos circuitos, direcionar as saídas dos sensores ao microcontrolador e dispor de pinos para alimentação e comunicação com o Arduino. A placa possui o *layout* apresentado na Figura 9, o resultado deste projeto é apresentado na Figura 11.

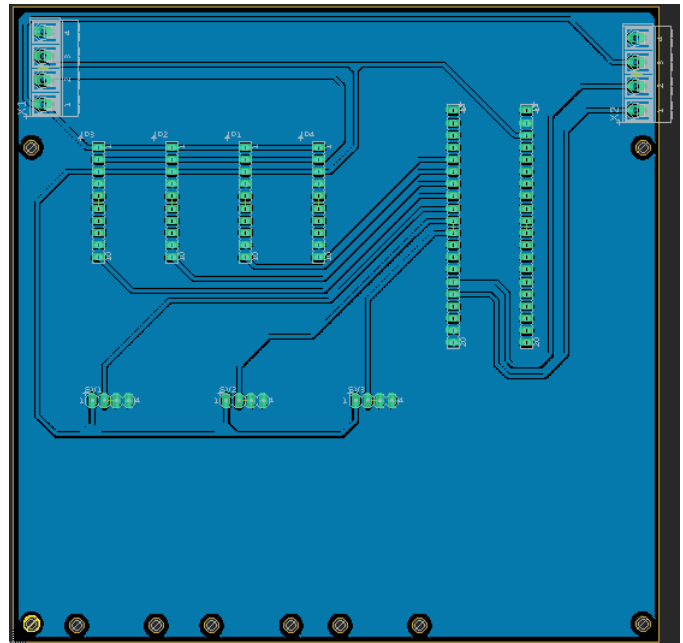


Figura 11: Placa Base

3) *Placa de integração da IHM*: Para realizar a integração entre a IHM, o Arduino Mega 2560 e o relógio de tempo real, com a alimentação e comunicação serial provenientes da placa base, foi projetada uma placa de integração que encaixasse sobre o Arduino e possui soquetes para os cabos *flat* de conexão da IHM. A Figura 12 apresenta o resultado deste projeto.

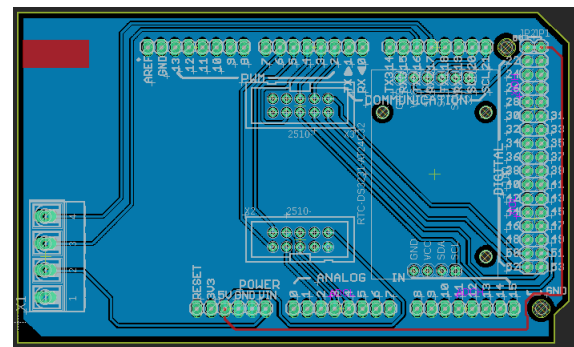


Figura 12: Placa Base

Após projetadas as placas no *Eagle*, foram exportados os arquivos para a confecção das mesmas em uma fresadora de placas marca LPKF, modelo S-63, concluída esta etapa foi feita a instalação e soldagem dos componentes, soquetes e conectores.

Com as placas devidamente montadas e testadas, as mesmas foram instaladas em um quadro de 350 mm de altura, por 250 mm de largura e 150 mm de profundidade, o protótipo montado pode ser visto na Figura 13, a fim de otimizar a instalação dos sensores de corrente e dos cabos para os sensores de tensão foi instalada uma placa de acrílico com

conectores banana fêmea na porta do quadro, como pode ser visto na Figura 14.



Figura 13: Protótipo



Figura 14: Visão Frontal do Protótipo

V. RESULTADOS

Visando dar confiabilidade ao protótipo é necessária a realização de testes, em bancada e em uma aplicação real, de forma a obter uma validação dos resultados obtidos, da mesma forma é extremamente importante realizar a análise de propagação de incertezas, verificando se as leituras estarão de acordo com a precisão estabelecida por norma.

A. Análise de Propagação de Incertezas na medição de corrente

Para a determinação das entradas a serem avaliadas para a análise propagação de incerteza, existe a necessidade de conhecimento da função que descreve a propriedade que está sendo medida, desta forma, a variável a ser considerada será a corrente medida, sendo avaliado o valor de tensão na entrada ADC do microcontrolador.

1) *Fontes de Incerteza:* Para a definição da incerteza associada a medição de corrente é necessário inicialmente identificar as fontes de incerteza na medição de corrente, que são:

- Garra de corrente, precisão $\pm 3\%$ da leitura + 5 dígitos [21];
 - Resistores do circuito de amplificação e condicionamento, 1%, de acordo com a tabela IV;
 - Resolução de 2 bits do Conversor Analógico-digital [16];
- 2) *Função:* Por meio da combinação entre as equações (19), (20), (22) e (23) é possível definir-se a função que representa a medição de corrente, como é possível observar nas equações (24) e (25).

$$V_{Lido} = f(V_{pp}, R_1, V_{out}, V_{A0}) \quad (24)$$

Onde:

V_{pp} é a tensão de saída da garra de corrente;

R_1 é o resistor de ganho do circuito de amplificação;

V_{out} é o valor de tensão na saída do circuito de condicionamento de corrente;

V_{A0} é o valor de tensão na saída da etapa de *offset* de tensão.

$$V_{Lido} = \frac{R_5}{R_6} \left[\frac{R_2}{R_4} \left(\frac{49,4k}{R_1} + 1 \right) V_{pp} \right] \quad (25)$$

Onde:

V_{pp} é a tensão de saída da garra de corrente;

R_1 é o resistor de ganho do circuito de amplificação;

R_2, R_4, R_5 e R_6 são os resistores do circuito de condicionamento de corrente, com seus valores apresentado na tabela IV.

Neste momento é preciso definir-se um valor de corrente a ser medido, ficando definido o valor de 100 A, para desta forma obter o valor medido. Primeiramente obtendo-se o valor de V_{pp} , como segue.

$$V_{pp} = 100 \cdot 2 \cdot \sqrt{2}$$

$$V_{pp} = 282,84 \text{ mV}$$

Calculando-se então o valor V_{Lido} .

$$V_{Lido} = \frac{47.000}{47.000} \cdot \left[\frac{4.700}{4.700} \cdot \left(\frac{49.400}{10.000} + 1 \right) \cdot 282,84 \right]$$

$$V_{Lido} = 1,68 \text{ V}$$

3) *Balanço de Incertezas:* O cálculo de balanço de incertezas é iniciado definindo-se a contribuição de cada uma das variáveis e o tipo de distribuição de cada fonte de incerteza. Tendo-se em vista não ser conhecida o tipo de distribuição, a considerada é a retangular. Devendo-se primeiramente definir a incerteza padrão de cada fonte, utilizando a equação (15).

Sendo, portanto, necessário determinar o valor da tolerância na medição de corrente, de acordo com o especificado anteriormente. por meio da equação (26);

$$s = V_{pp} \cdot 3\% + 5d \quad (26)$$

Tendo em vista a garra ter sido fabricada para uso em multímetros, e utilizada na escala de milivolts, cada dígito terá valor de 100 microvolts. Ficando o desvio padrão da garra de tensão da seguinte forma:

$$s = \left(282,84 \cdot \frac{3}{100} \right) + 0,5 \text{ mV}$$

$$s = 8,98 \text{ mV}$$

Na tabela VIII são apresentadas as incertezas para cada uma das fontes.

Fontes de Incerteza	Descrição	Valor	Dist.	Incerteza Padrão	NGL
X_i		x_i		u_{x_i}	
$u_{V_{pp}}$	V_{pp} da garra	282,84 mV $\pm 8,99$	Ret.	$\frac{8,99}{\sqrt{3}}$ 5,19 mV	∞
u_{R_1}	Resistor R_1	10.000 Ω ± 100	Ret.	$\frac{100}{\sqrt{3}}$ 57,73 Ω	∞
u_{R_2}	Resistor R_2	4.700 Ω ± 47	Ret.	$\frac{47}{\sqrt{3}}$ 27,14 Ω	∞
u_{R_4}	Resistor de R_4	4.700 Ω ± 47	Ret.	$\frac{47}{\sqrt{3}}$ 27,14 Ω	∞
u_{R_5}	Resistor de R_5	47.000 Ω ± 470	Ret.	$\frac{470}{\sqrt{3}}$ 271,35 Ω	∞
u_{R_6}	Resistor de R_6	47.000 Ω ± 470	Ret.	$\frac{470}{\sqrt{3}}$ 271,35 Ω	∞
$u_{Res_{ADC}}$	Resolução do ADC	4.096 bits ± 2	Ret.	$\frac{2}{\sqrt{3}}$ 2 bits	∞

Tabela VI: Fontes de Incerteza Consideradas

4) *Combinação de Incertezas:* Para a obtenção do valor da incerteza combinada é realizada a combinação das incertezas e seus coeficientes de sensibilidade, como mostra a equação (16).

Os resultados desta análise são apresentados na tabela VII.

Fonte de Incerteza X_i	Incerteza Padrão u_{x_i}	Coef. de Sensibilidade C_i	Coef. de Variância $u_{x_i}^2 \times C_i^2$
V_{pp}	5,19 mV	5,94	$950,40 \cdot 10^{-6} \text{ V}^2$
R_1	57,73 Ω	$-139,72 \cdot 10^{-6} \text{ V}/\Omega$	$65,06 \cdot 10^{-6} \text{ V}^2$
R_2	27,14 Ω	$357,46 \cdot 10^{-6} \text{ V}/\Omega$	$94,12 \cdot 10^{-6} \text{ V}^2$
R_4	27,14 Ω	$-357,46 \cdot 10^{-6} \text{ V}/\Omega$	$94,12 \cdot 10^{-6} \text{ V}^2$
R_5	271,35 Ω	$35,75 \cdot 10^{-6} \text{ V}/\Omega$	$94,08 \cdot 10^{-6} \text{ V}^2$
R_6	271,35 Ω	$-35,76 \cdot 10^{-6} \text{ V}/\Omega$	$94,08 \cdot 10^{-6} \text{ V}^2$
Res_{ADC}	2 bits	$1,61 \cdot 10^{-3} \text{ V}$	$2,60 \cdot 10^{-6} \text{ V}^2$

Tabela VII: Combinação de Incertezas

Com os dados apresentados na tabela VII é possível determinar incerteza combinada, utilizando a equação (16).

$$u_c = \sqrt{1,39 \cdot 10^{-3}} = 0,0373 \text{ V}$$

5) *Incerteza Expandida:* Para a determinação da incerteza expandida é necessário identificar-se o número efetivo de graus de liberdade (NGL), que por todas as fontes de incerteza serem do tipo B, possuem $NGL = \infty$, ficando $K=2$, de acordo com a tabela T, para um intervalo de 95% de confiança. Ficando a incerteza expandida determinada pela equação (17).

$$U = 2 \times 0,0373 = 0,0747 \text{ V}$$

6) *Resultado Final da Medição de corrente:* A representação final do resultado da medição, segundo [15], deve seguir um padrão de representação, com o valor medido com no máximo dois algarismos significativos acompanhado pela incerteza, como segue para o valor estipulado de corrente de 100 A, a leitura de tensão no ADC será:

$$V_{Lido} = 1,68 \pm 0,075 \text{ V}$$

Ao ser observado o resultado da análise de propagação de incertezas, fica evidente a contribuição que a medição de corrente tem para que o sistema esteja fora da precisão especificada por norma, já que esta análise resulta em um erro de aproximadamente 4,45%.

7) *Erro Geral:* Após a realização de propagação de incertezas para a tensão e conhecendo-se a precisão do sensor de tensão, o erro geral para a medição de uma corrente de 100 A, com uma tensão de fase de 220 V, fica assim determinado:

Fonte de Erro	Descrição	Valor	Erro
U_i	Corrente da garra	100 A	$\pm 4,45 \%$
U_V	Sensor de Tensão	220 V	$\pm 1 \%$

Tabela VIII: Fontes de Erro

B. Testes

Os testes realizados para a validação do protótipo foram divididos em duas etapas: uma etapa de testes em bancada e outra etapa do protótipo instalado dentro da subestação realizando a aquisição dos dados nas instalações do Campus Farroupilha.

1) *Testes em Bancada*: Os testes em bancada foram realizados no laboratório de acionamentos e máquinas elétricas, sala 217, que dispõe de três cargas trifásicas, uma resistiva, uma indutiva e uma capacitiva, foram ainda utilizados os seguintes equipamentos:

- Analisador de energia modelo RE-6000, marca Embrasul, com garras de corrente modelo EB100/RE6 ajustadas para faixa de 0-10 A;
- Bancada trifásica Minipa SD-2100 e cargas trifásicas modelos: M-2110B, M-2111B e M-2112B;

A bancada de teste montada pode ser observada na Figura 15.



Figura 15: Bancada de Testes

As cargas foram conectadas em estrela e para facilitar a análise dos resultados foi seguida uma sequência de acionamento das chaves de seleção das cargas, tendo em vista possuírem 5 posições, além da posição desligada, que realizam o acréscimo de 1/5 da potência total de cada carga, 1300 W para a resistiva e 1300 var para as cargas indutiva e capacitiva.

Nota:

- Nas tabelas com os resultados dos testes, X e XI, a seguir, as colunas correspondentes as combinações de carga referem-se às posições da chaves das carga, na seguinte sequência, resistiva, indutiva e capacitiva.

- Os testes foram iniciados com a carga resistiva na posição 2 devido a ineficiência das garras de corrente do protótipo para valores inferiores a 1 A;
- De forma a facilitar a compreensão dos dados, a tabela IX apresenta as combinações de carga utilizadas nos testes em bancada. Onde são apresentadas as potências teóricas para cada combinação informada.

Combinação	Potências Teóricas		
	Resistiva [W]	Reativa indutiva [var]	Reativa Capacitiva [var]
200	520	0	0
311	780	260	260
322	780	520	520
432	1040	780	520
533	1300	780	780
553	1300	1300	780

Tabela IX: Combinações de Carga

Grand.	Combinações de carga (R-L-C)					
	200	311	322	432	533	553
V_1 [V]	218,27	218,24	217,93	218,37	218,32	217,53
I_1 [A]	2,27	3,50	3,59	5,12	5,87	7,09
P_1 [kW]	0,45	0,72	0,69	0,98	1,15	1,28
FP_1	0,95	0,96	0,92	0,85	0,96	0,84
V_2 [V]	218,64	219,58	220,50	218,12	219,90	219,25
I_2 [A]	2,36	3,31	3,45	4,88	5,68	5,73
P_2 [kW]	0,47	0,68	0,75	0,98	1,16	1,15
FP_2	0,95	0,94	0,94	0,92	0,96	0,89
V_3 [V]	217,80	217,80	216,22	217,64	218,65	218,23
I_3 [A]	2,46	3,28	3,04	4,63	5,60	6,32
P_3 [kW]	0,44	0,69	0,62	0,92	1,18	1,22
FP_3	0,94	0,94	0,93	0,87	0,93	0,83

Tabela X: Resultados das medições no Protótipo

Grandezas	Combinações de carga (R-L-C)					
	200	311	322	432	533	553
V_1 [V]	218,00	218,03	218,40	218,35	218,05	216,39
I_1 [A]	2,13	3,27	3,45	5,01	5,71	6,83
P_1 [kW]	0,46	0,71	0,73	1,00	1,22	1,27
FP_1	1,00	1,00	0,97	0,91	0,98	0,86
V_2 [V]	218,78	219,68	219,95	218,22	219,60	219,20
I_2 [A]	2,11	3,22	3,25	4,44	5,39	5,94
P_2 [kW]	0,47	0,71	0,71	0,95	1,18	1,19
FP_2	1,00	1,00	0,99	0,98	1,00	0,92
V_3 [V]	217,95	216,70	216,42	217,69	218,22	217,75
I_3 [A]	2,11	3,28	3,34	4,73	5,73	6,61
P_3 [kW]	0,46	0,71	0,72	1,00	1,24	1,28
FP_3	1,00	1,00	0,99	0,96	1,00	0,89

Tabela XI: Resultados das medições no Analisador

Após a conclusão desta etapa de testes, e tendo-se observado que a corrente medida ainda ser baixa, dentro da faixa de medição das garras de corrente, foi necessário a realização de outro teste, porém nesta etapa com as cargas conectadas em paralelo a apenas uma fase, fase 1, ficando com uma potência ativa aproximada de 3900 W. Os resultados destas medições são apresentados na tabela XII.

Grandezas	Combinações de carga (R-L-C)					
	500		550		555	
	Prot.	Analís.	Prot.	Analís.	Prot.	Analís.
V_1 [V]	206,96	207,20	203,41	203,20	205,27	204,75
I_1 [A]	14,74	15,30	22,36	22,67	15,94	16,42
P_1 [kW]	2,99	3,16	3,36	3,26	3,15	3,34
FP_1	0,98	1,00	0,74	0,71	0,97	1,00

Tabela XII: Resultados das medições na Fase 1

Ainda durante a etapa de testes em bancada, foram capturadas as janelas de amostras de tensão e corrente da fase 1 adquirida pelo ADC, estes dados foram inseridos em uma planilha, possibilitando a visualização da forma de onda adquirida. Os gráficos plotados podem ser observados nas Figuras 16 e 17. Os valores apresentados nos gráficos são referentes a leitura do ADC, tendo sua faixa limitada de 0 a 4096.

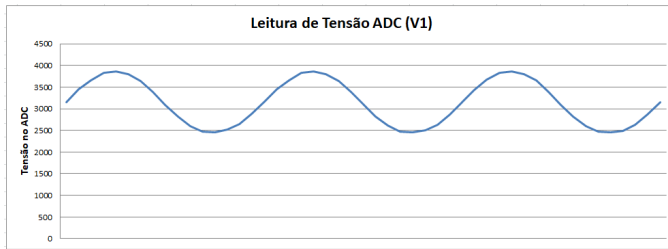


Figura 16: Gráfico da Tensão V_1 no ADC

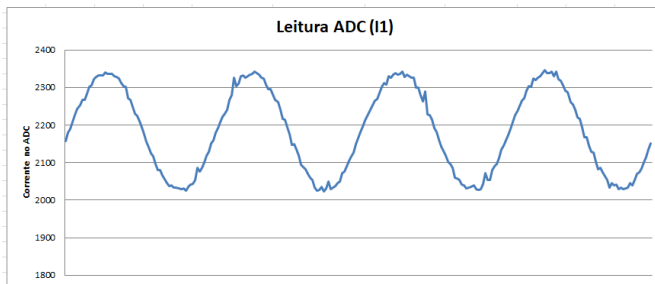


Figura 17: Gráfico da Corrente $I_1 = 15$ A no ADC

Por meio da análise dos gráficos é possível constatar que a leitura dos dados de tensão se apresenta em uma forma bastante confiável e reproduz o esperado, porém a leitura de corrente apresenta-se um tanto quanto distorcida, podendo ser ocasionada pela ampla faixa de leitura especificada para o sistema (0 a 200 A).

Foram realizados testes alterando o intervalo de aquisição de dados, porém esta alteração impactou na capacidade de processamento do microcontrolador, tendo em vista que ao se manter a quantidade de amostras reduzia a quantidade de ciclos amostrados, e ao se aumentar a quantidade de amostras era atingido o limite de memória do processador. Desta forma foi mantido o intervalo de amostragem original, 1,04 ms. Os resultados destes testes não foram significativos.

C. Discussão dos resultados

Ao serem analisados os dados obtidos nos testes práticos, pode-se constatar que, para o pior caso, a medição trifásica realizada com a chave de seleção das cargas na posição 553, ou seja, as cargas resistiva e indutiva em carga máxima e a carga capacitiva na posição 3, foi observado um erro máximo na medição de corrente, ao se comparar com o analisador de energia, de 4,38% na fase 3, a fase 1 e a fase 2, apresentaram erro de 3,8% e 3,5%, respectivamente, este erro é refletido na medição de potência ativa, tendo em vista que a mesma é calculada tomando como parâmetro a corrente instantânea. O erro na medição de tensão não é considerado significativo em nenhuma das fases, ficando abaixo de 1,0%. Ao serem analisados os testes com correntes mais altas estes erros continuam a existir, porém com valores percentuais menores, ficando abaixo de 3% na ultima medição com carga total apenas na fase 1.

D. Instalação na Subestação

Para a realização do teste do equipamento dentro da instalação, este foi instalado dentro do QGBT, como pode ser visto na Figura 18, conectado aos pontos de aquisição de tensão e as garras foram instaladas nas fases 1, 2 e 3 do circuito de alimentação do Bloco 1.



Figura 18: Instalação no QGBT

Após a instalação do protótipo, não houve tempo hábil para a análise dos dados adquiridos, apenas a verificação da

eficácia do mesmo na aquisição dos dados e arquivamento em cartão, tendo em vista não ter sido feita esta constatação até o momento.

VI. CONCLUSÃO

A. Considerações Finais

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de grandezas elétricas, com o objetivo de monitorar as grandezas elétricas das instalações do Campus Farroupilha do IFRS, possibilitando sua instalação dentro do QGBT da subestação, realizando a aquisição dos sinais de tensão e corrente de três fases e do neutro, utilizando um microcontrolador STM32F para o tratamento das amostras e cálculo das grandezas de interesse, e um microcontrolador Arduino Mega 2560, para a indicação e arquivamento dos resultados. Os sinais de tensão e corrente foram capturados por meio do uso de sensores disponíveis no mercado. Foram desenvolvidos os circuitos de condicionamento de corrente, de integração entre os sensores e o STM32F, bem como a comunicação entre os microcontroladores. O protótipo foi desenvolvido de forma a ter mobilidade, facilidade de manutenção e capacidade de expansão.

Com o protótipo montado, foram realizados testes em bancada para a verificação dos resultados, após alguns ajustes e comparação dos dados obtidos com um instrumento de precisão confirmada, foi possível concluir que o equipamento é funcional, apresentando erro na medição (incerteza) de acordo com o verificado matematicamente, aproximadamente de 4,45%. A principal fonte de erro na medição foi identificada como sendo a medição de corrente, devido ao fato das garras (sensores) utilizadas possuírem uma faixa de leitura muito ampla e com precisão limitada.

A mobilidade e expansibilidade do equipamento atendem às expectativas iniciais, porém para que seja possível atender aos requisitos de precisão é necessário uma análise mais profunda das possibilidades de sensores a serem utilizados, tendo em vista a ampla faixa de valores de corrente a ser medida, existindo a necessidade de medir também correntes mais baixas que 1 A, faixa de medição em que o valor medido é muito próximo de zero.

B. Trabalhos Futuros

A medição de corrente foi a etapa do trabalho que apresentou menor precisão na medição. Desta forma uma melhoria no equipamento seria a utilização de garras (sensores de corrente) com uma faixa de medição mais restrita, até 200 A, e mais precisos, já que a garra utilizada possui uma faixa de medição de 0 a 600 A.

Por fim, sugere-se a implementação do envio dos dados arquivados para um banco de dados *online* utilizando algum protocolo de comunicação sem fio, desde que seja disponibilizada rede no local de instalação do equipamento, com a possibilidade da utilização destes dados em uma plataforma, indicando os dados históricos de consumo de energia.

REFERÊNCIAS

- [1] E. Empresa de Pesquisa Energética, “Anuário estatístico de energia elétrica 2018–ano base 2017,” *Rio de Janeiro: EPE*, 2018.
- [2] M. d. N. N. Santos *et al.*, “Monitoração e análise de grandezas da qualidade da energia elétrica em processos industriais utilizando instrumentação virtual,” Master’s thesis, Universidade Federal do Pará, 2011.
- [3] A. A. Biagioni *et al.*, “Desenvolvimento de sistema para aquisição e acesso remoto a medidas elétricas por meio de dispositivos. móveis e internet,”
- [4] R. N. Rodrigues, J. V. de Souza, J. K. Zatta, and M. d. S. Godinho, “A large energy monitoring system applied to the federal institute of santa catarina,” in *Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), 2015 CHILEAN Conference on*, pp. 673–678, IEEE, 2015.
- [5] P. Yadav and L. Saini, “Three phase power metering using maxq3183,” in *2017 Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE)*, pp. 286–290, IEEE, 2017.
- [6] L. D. O. Arenas, G. A. e Melo, and C. A. Canesin, “Fpga-based power meter implementation for three-phase three-wire and four-wire power systems, according to iec 1459-2010 standard,” in *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, pp. 1–6, Ieee, 2017.
- [7] WEG, “Manual mmmw02,” Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h24/h50/WEG-manual-MMW02-pt.pdf>, Acesso em 14 de maio de 2019.
- [8] EMBRASUL, “Manual re6081,” Disponível em: <http://www.embrasul.com.br/manuais/RE6081hr.pdf>, Acesso em 26 de outubro de 2018.
- [9] S. M. Deckmann and J. A. Pomilio, “Avaliação da qualidade da energia elétrica,” *Campinas: UNICAMP*, 2017.
- [10] ANEEL, “Qualidade de energia elétrica no sistema elétrico nacional–produt: Módulo 8 - - vol. 5,” *Revisão*, 2018.
- [11] R. L. Boylestad and J. L. do Nascimento, *Introdução à análise de circuitos*. Pearson Educación, 2004.
- [12] J. A. Pomilio, “Pré-reguladores de fator de potência,” *Publicação FEE*, vol. 3, p. 95, 1997.
- [13] A. Balbinot and V. J. Brussamarello, *Instrumentação e Fundamentos de Medidas. Vol. 1*. Grupo Gen-LTC, 2010.
- [14] A. Vallecillo, C. Morcillo, and P. Orue, “Expressing measurement uncertainty in software models,” in *2016 10th International Conference on the Quality of Information and Communications Technology (QUATIC)*, pp. 15–24, IEEE, 2016.
- [15] A. de dados de medição Guia, “para a expressão de incerteza de medição–gum 2008,” *Tradução da*, vol. 1, 2008.
- [16] S. Microelectronics, “Stm32 product information, software and datasheets,” Disponível em: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>, Acesso em 2 de outubro de 2018.
- [17] ANALOG-DEVICES, “Ad620 datasheet,” Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ad620.pdf>, Acesso em 5 de outubro de 2018.
- [18] R. L. Boylestad and L. Nashelsky, *Dispositivos eletrônicos*. Person Education do Brasil Ltda, 2004.
- [19] J. GUEDES, *Manual da Tarificação de Energia Elétrica*. Rio de janeiro–RJ: PROCEL EDIFICA, 2011.
- [20] G. L. S. Technologies, “Zmpt101b datasheet,” Disponível em: <https://makemyproduct.in>, Acesso em 5 de março de 2019.
- [21] MINIPA, *Manual de Instruções - Garra de Corrente AC - CA-601*, 2015.