

Analizador de Energia Monofásico com Registro de Eventos e Conexão com Banco de Dados

Leandro Milke Cavalheiro
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Luterana do Brasil (ULBRA)
ULBRA
Canoas/RS, Brasil
leandro.cavalheiro@rede.ulbra.br

Resumo – Este trabalho apresenta um sistema para o monitoramento do fornecimento de energia elétrica com o registro dos eventos e consumo em um banco de dados, com o uso do módulo ESP32 e do software WampServer. A visualização das informações é via browser e conexão em rede local pelo WIFI, com o registro dos máximos e mínimos em gráficos e dos eventos de anormalidade em uma lista contendo data e hora. O desenvolvimento seguiu pontos específicos que são propostos pelo procedimento de distribuição de energia elétrica (PRODIST) elaborados pela ANEEL. Para o tratamento dos sinais, foram aplicadas técnicas de programação em linguagem C, que serviram também para desenvolver algoritmos para determinar as grandezas elétricas e avaliar alguma não conformidade. Os testes foram realizados com cargas resistivas e indutivas e as medições foram correlacionadas com as características da carga analisada e comparadas com auxílio do multimetido da Altus PH3100. No desenvolvimento foi realizado o cálculo do erro teórico para determinar a classe do analisador de energia que depois foi comparado com os resultados obtidos durante a validação, que demonstrou a incerteza na medição de tensão dentro do esperado e corrente pouco acima quando medindo cargas baixas. Os testes comprovaram toda a funcionalidade e a eficiência que garante a confiabilidade do protótipo.

Palavras-chave - ESP32, WampServer, energia, Tensão, PRODIST.

I. INTRODUÇÃO

Os eventos de anormalidade no fornecimento de energia elétrica podem ocasionar grandes transtornos como mau funcionamento de equipamentos, prejuízo com paradas, com reparos e grupos geradores que ligam frequentemente sem ter ocorrido falta de energia. Em muitas ocasiões, a energia apresenta um comportamento oscilatório e aleatório em determinados momentos do dia, dificultando o diagnóstico e reparo pela empresa responsável pela distribuição.

Para assegurar o fornecimento e também a qualidade da energia elétrica, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) elaborou um conjunto de documentos que normatizam e padronizam os serviços relacionados com a distribuição de energia elétrica, chamado “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no sistema Elétrico Nacional (PRODIST)”. Os índices referentes à qualidade e confiabilidade do fornecimento de energia elétrica são calculados e disponibilizados pela própria concessionária, seguindo os procedimentos formulados conforme o módulo oito do PRODIST. Porém, para o consumidor fica difícil de realizar uma avaliação e registrar os eventos de inconformidade na tensão elétrica recebida de forma

pontual, para que possa comprovar a qualidade da energia elétrica recebida, assim como a sua continuidade.

Cabe ressaltar que, eventos anormais na tensão perceptíveis na carga tanto pode ser um problema no fornecimento como na instalação consumidora, como erro no dimensionamento dos condutores, carga com baixo fator de potência, corrente alta, entre outros.

Para facilitar o registro dos eventos anormais de tensão, que possam auxiliar no controle da qualidade do fornecimento, na manutenção da distribuição ou na instalação consumidora, o analisador de energia é uma ferramenta essencial e que resolve o problema da falta de informação encontrada na análise para se chegar a uma solução.

O desenvolvimento deste projeto está direcionado para suprir esta necessidade, em propor um analisador de energia de baixo custo que ficará instalado permanentemente no consumidor, disponibilizando as informações de forma clara. Como os registros de eventos anormais e dos máximos e mínimos permanecerão guardados em um banco de dados, o usuário poderá acompanhar a qualidade da energia elétrica e avaliar se o consumo está coerente com a instalação. A partir destes dados poderão ser tomadas providências para evitar aquecimento em condutores, atuação de disjuntores e quedas de tensão. Além disso, na ocorrência de algum distúrbio na energia elétrica, será possível entender os eventos com maior clareza e a partir destas informações se tomem precauções, para auxiliar na correção ou para cobrar alguma solução dos responsáveis.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

A. Qualidade da energia elétrica

A energia elétrica possibilita a manutenção dos serviços essenciais, funcionamento das indústrias, sistemas de comunicação, além de tantos outros importantes e inúmeros benefícios. Sendo assim, é extremamente importante o controle da qualidade de energia elétrica (QEE). A qualidade é questionada quando os consumidores percebem eventos anormais que implicam em diversos transtornos. Logo, uma definição para a QEE é a medida de quão bem a energia elétrica pode ser utilizada pelos consumidores, seguindo os indicadores que estão regulamentados pela ANEEL. Em relação à distribuição, é estabelecido no módulo oito do PRODIST que a qualidade percebida pelo consumidor deve ser avaliada a partir da qualidade do produto, qualidade do serviço e a qualidade do atendimento ao consumidor [1]. Cabe ressaltar que o mesmo módulo trata dos seguintes

fenômenos quando relacionado à qualidade do produto em regime permanente:

- Tensão em regime permanente
- Fator de potência
- Harmônicos
- Desequilíbrio de tensão
- Flutuação de tensão
- Variação de frequência

Em regime transitório são observadas as variações de tensão de curta duração (VTCD).

B. Tensão em regime permanente

A tensão em regime permanente é monitorada seguindo os índices de qualidade referentes aos limites adequado, precário e crítico, em relação ao afastamento da tensão nominal contratada, conforme a tabela I.

TABELA I. FAIXAS APLICADAS ÀS TENSÕES NOMINAIS INFERIORES A 1 kV

Nível de tensão	Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Nominal (TN)
Adequado	$0,92 \text{ TN} \leq \text{TL} \leq 1,05 \text{ TN}$
Precário	$0,87 \text{ TN} \leq \text{TL} < 0,92 \text{ TN}$ ou $1,05 \text{ TN} < \text{TL} \leq 1,06 \text{ TN}$
Crítico	$\text{TL} < 0,87 \text{ TN}$ ou $\text{TL} > 1,06 \text{ TN}$

Fonte: PRODIST-Módulo 8, revisão 11.

A conformidade de tensão elétrica está relacionada com a medição de tensão realizada em comparação com as faixas especificadas. Para a obtenção dos indicadores individuais referentes à duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e para tensão crítica (DRC), a ANEEL estipula um conjunto de 1008 leituras consecutivas dentro do intervalo de 10 minutos. Estes indicadores devem ficar guardados no mínimo durante cinco anos a fim de fiscalização [2].

Dentro do aceitável, o indicador DRP não pode ser superior a 3% e o DRC deve ficar abaixo de 0,5%. Caso os limites sejam ultrapassados, deve haver uma compensação ao consumidor pela distribuidora de energia.

C. Fator de Potência

O fator de potência (FP) é definido pela razão entre a potência ativa e a potência aparente do sistema. O valor está compreendido entre 0 e 1 e indica a defasagem entre a tensão e corrente elétrica. É um indicador de qualidade, pois mensura a eficiência com a qual a energia elétrica está sendo usada, ou seja, o quanto da energia elétrica que está sendo consumida de fato está sendo convertida em trabalho.

O ideal é que o fator de potência esteja o mais próximo possível de 1, sendo que o limite mínimo regulamentado pela ANEEL é de 0,92 [1]. Quando está em 1, significa que não há defasagem entre a tensão e corrente, sinalizando que toda a energia que está sendo consumida está realizando trabalho. Cargas resistivas tem este comportamento, porém é difícil ter em instalações somente cargas com essa característica, pois é normal a existência de motores, transformadores, reatores, dentre outros que provocam a diferença de fase entre a tensão e corrente elétrica.

Pode ser prejudicial para a instalação ou para algum equipamento quando o fator de potência está muito baixo, pois podem ocorrer quedas de tensão, aquecimento dos condutores e redução do aproveitamento da capacidade dos transformadores e dos grupos geradores.

Na ocorrência de um fator de potência baixo, é usual a aplicação de bancos de capacitores para correção. O que ocorre, é que o banco de capacitor gera uma carga reativa capacitiva que irá anular a carga reativa indutiva que normalmente é produzida nas instalações.

D. Flutuação de tensão

Como definido no módulo oito do PRODIST, a flutuação de tensão, também conhecido como flicker, é um fenômeno caracterizado pela variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz ou de pico da tensão instantânea. A flutuação de tensão provoca o efeito da cintilação luminosa que é verificado através da impressão visual e gera grande incômodo. Este efeito é um determinante da qualidade de tensão do sistema de distribuição, avaliado pela ANEEL, e leva em consideração a severidade de flutuação de curta duração e de longa duração.

E. Variações de tensão de curta duração

As variações de tensão de curta duração (VTCD), estão relacionadas com os afundamentos da tensão eficaz, elevações ou interrupções, durante um intervalo de tempo inferior a três minutos e são classificadas em variação momentânea e variação temporária de tensão. O que define estas variações é o tempo da duração do evento, sendo que a variação momentânea está limitada entre o período compreendido entre um ciclo elétrico até três segundos e a variação temporária na faixa superior a três segundos e inferior a três minutos.

Estas variações podem ser causadas em situações de falta, em picos elevados de corrente na energização de cargas elevadas ou por problema no circuito, como perda aleatória na continuidade, na conexão.

F. Analisador de energia

Analisadores de energia são ferramentas muito úteis para avaliar a qualidade da energia elétrica, pois possibilita visualizar os eventos de inconformidade e estudar as condições em que se manifestam, para encontrar a melhor solução para a correção.

Estes equipamentos são projetados para possuir uma boa precisão. Quando utilizados para análise da qualidade de energia elétrica na distribuição, a ANEEL normatiza a instrumentação e a metodologia de medição no PRODIST módulo 8. Entre os pontos a considerar tem-se:

- As medições devem ser feitas por equipamentos digitais, seguindo o princípio da amostragem digital;
- Instrumentos de medição classe A ou S, conforme norma vigente da IEC 61000-4-30;
- Para a medição de tensão em regime permanente, poderão ser utilizados instrumentos com precisão de até 1% da leitura e os valores eficazes podem ser calculados a partir de amostras coletadas em janelas sucessivas;

- Deve disponibilizar um histograma de tensão em regime permanente;
- Registrar a duração e amplitude dos eventos de variação de tensão de curta duração, indicando a data e hora de início de cada evento;
- O registro dos dados de medições amostrais, deve conter os valores máximo e mínimo das tensões de leitura.

No que se refere a norma IEC 61000-4-30, cabe ressaltar que a mesma estabelece que os instrumentos utilizados para medição dos parâmetros associados com a qualidade do produto, devem atender às classes A e S, sendo essas definidas como [3]:

- Medidor Classe A: São instrumentos utilizados em situações em que a precisão é extremamente importante, normalmente utilizado em questões judiciais. A incerteza de medição da amplitude não pode exceder $\pm 0,2\%$ da tensão de referência.
- Medidor Classe S: São usados normalmente em campanhas de medição para levantamento estatístico, em medições amostrais e para verificação inicial da procedência de reclamação em relação ao fornecimento da energia elétrica. A incerteza máxima não deve exceder a $\pm 1\%$ da tensão de referência.

G. WampServer

WampServer é um software livre para desenvolvimento no ambiente web no sistema windows, desenvolvido pela PHP Team [4]. O programa funciona como se fosse um servidor virtual e a nomenclatura WAMP deriva da combinação das iniciais Windows, Apache, MySQL e PHP (*Hypertext Preprocessor*). Durante a instalação, os três últimos softwares são instalados além da ferramenta PhpMyAdmin, que possibilita a interpretação de scripts local para a manipulação do banco de dados.

WAMP, como também é conhecido, é uma ótima ferramenta para os desenvolvedores de websites, pois permite a realização testes durante a fase de criação sem o uso da internet, através do localhost.

H. ESP32

O módulo ESP32 é produzido pela ESPRESSIF SYSTEMS, é um dispositivo prático e com muitos recursos para projetos com o conceito IoT (*Internet Of Things* ou internet das coisas). Possui o módulo Wifi integrado, além de um ótimo desempenho de processamento por possuir dois núcleos, conversores analógicos digitais de 12 bits e baixo consumo de energia [5]. Outro ponto a considerar, é a facilidade de programação por ser em linguagem C/C++, podendo ser utilizado o IDE Arduino (Ambiente de Desenvolvimento Integrado) do Arduino, que é um software livre.

III. METODOLOGIA

A etapa inicial do projeto foi o desenvolvimento da topologia do sistema, sendo o ponto de partida as características como a facilidade de instalação, robustez, comunicação sem fio, ser de fácil uso, com o monitoramento remoto não só em uma estação e com banco de dados. Diante dessas premissas, foi escolhida a

aplicação com o módulo ESP32 e software WampServer, seguindo com o dimensionamento do circuito condicionador e dos softwares. Para desenhar o circuito elétrico foi utilizado o software Proteus 8 versão de demonstração.

A. Circuito condicionador

O circuito condicionador foi dimensionado para atender as características do módulo ESP32 e do projeto, em relação à variação de tensão na entrada para a medição que deve ser de 0 V à 270 V RMS e a corrente de 5 A à 100 A RMS. A amostra de tensão é adquirida por um divisor resistivo dimensionado de modo que 1 V de pico na entrada corresponda à 0,8057 mV na entrada analógica do ESP32. Esse nível de tensão é da resolução do conversor analógico digital com a tensão de referência da própria alimentação de 3,3 V e com 12 bits.

Para calcular os resistores do divisor de tensão como se vê na figura 1 e assim determinar o resistor RB na equação (1), do qual será medida a tensão, foram escolhidos três resistores em série, sendo dois de 100 k Ω e um de 1 k Ω , definindo a resistência RA em 201 k Ω .

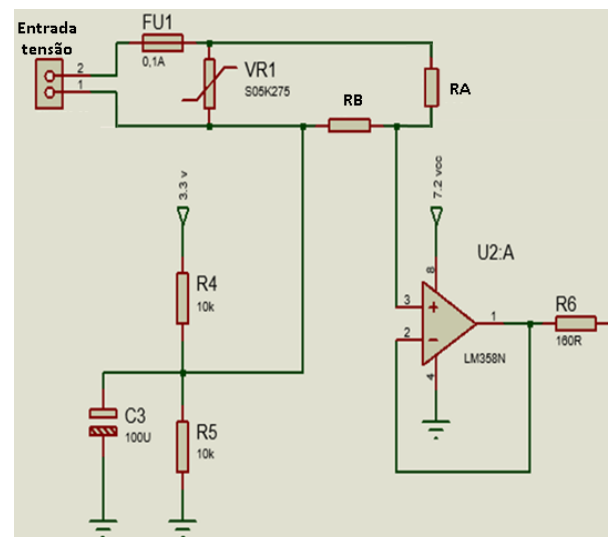


Fig. 1. Entrada da medição de tensão

$$\frac{RB}{RB+RA} = 0,8057 \text{ mV} \quad (1)$$

O valor encontrado para o resisitor RB foi de 162,07 Ω , mas foi utilizado um resistor com um valor comercial de 200 Ω para compensar alguma queda de tensão no circuito até a entrada analógica do ESP32.

Para que o sinal alternado de tensão possa ser amostrado durante o semiciclo positivo e negativo, foi adicionada uma tensão contínua de 1,65 V, porque o ESP32 não pode ler sinais com amplitude negativa. Dessa forma, o sinal amostrado varia de 0 V à 3,3 V [6].

O mesmo nível de tensão contínua é adicionado ao sinal da amostra de corrente. O transformador de corrente usado no projeto foi o YHDC SCT-013-000, não invasivo de 0 a 100 A RMS e que possui uma saída de corrente que pode variar de 0 a 50 mA RMS. Para obter um nível de tensão que possa ser amostrado, foi colocado um resistor em paralelo com o secundário do TC. Para calcular esse resistor, foi aplicada a equação (2) e considerada a

corrente de pico, a tensão máxima da entrada analógica e a tensão contínua adicionada ao sinal.

$$R = \frac{3,3 - 1,65}{50 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{2}} = 23,334 \, \Omega \quad (2)$$

Dessa forma, foi definido o resistor com o valor comercial de 22 Ω .

Para que a impedância da entrada analógica do ESP32 não interfira nos circuitos anteriores e para garantir um bom acoplamento de impedâncias, foi utilizado um buffer com amplificador operacional LM358. Esse componente pode trabalhar com uma tensão de alimentação simples de 3 a 32 V ou simétrica de 1,5 a 16 V e no circuito condicionador o LM358 foi alimentado com 7,2 V. Após o tratamento do casamento das impedâncias, o sinal amostrado passa por um filtro passa baixa, passivo de primeira ordem. Aplicação do filtro é para evitar sinais que possam prejudicar o tratamento do sinal amostrado pelo ESP32 e foi projetado para uma frequência de corte de 100 Hz. Foi definido um capacitor de 10 μ F para calcular o resistor R, como na equação (3), e com o resultado obtido foi definido o resistor com o valor comercial de 160 Ω .

$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 159,23 \, \Omega \quad (3)$$

O circuito condicionador possui proteção contra tensão alta na entrada da medição, através de um varistor para atuação com 275 V e com um fusível em série de 100 mA. Para proteger a entrada analógica do ESP32, foi utilizado o diodo zener 1N4728 de 3,3 V para limitar a amplitude do sinal. A figura 2 mostra o circuito completo da medição de tensão e na figura 3 o circuito da medição de corrente.

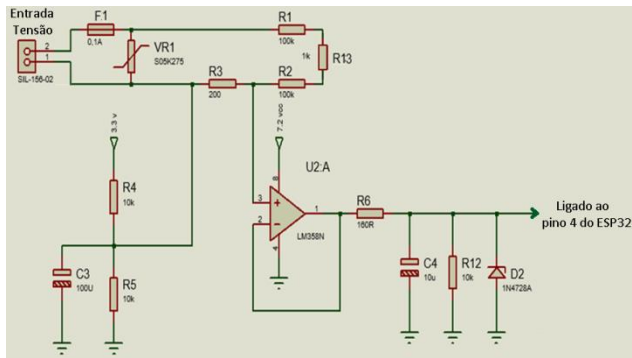


Fig. 2. Circuito da medição de tensão

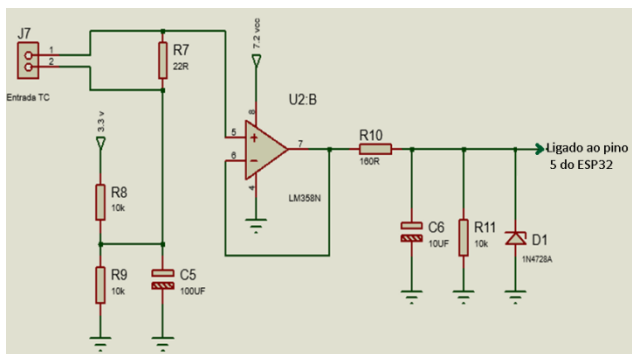


Fig. 3. Circuito da medição de corrente

B. Avaliação da defasagem entre as amostras de tensão e corrente

Para o cálculo da potência ativa (4), as grandezas amostradas de tensão e corrente, devem ser no mesmo instante de tempo:

$$P = \frac{1}{T} \int V(t) \cdot I(t) \cdot dt \quad (4)$$

Onde:

- P é a potência Ativa em watts (W);
- V(t) tensão instantânea em Volts (V);
- I(t) corrente instantânea em ampere (A);

No entanto, a leitura da entrada analógica do ESP32 é multiplexada, gerando uma diferença no instante entre as leituras das amostras de tensão e corrente. Essa defasagem gera um erro no cálculo da potência ativa. Para determinar a diferença angular entre as amostras, foi elaborado uma rotina no ESP32 para avaliar o tempo que o conversor analógico digital precisa para realizar a conversão, como se vê a seguir:

```
tempo = micros( );
amostras_tensao[i] = analogRead(tensao);
amostras_corrente[i] = analogRead(corrente);
tempo_Total_exec = micros( ) - tempo;
Serial.print("Tempo total de execução: ");
Serial.println(tempo_Total_exec);
```

Conforme o código apresentado foi observado que o tempo necessário para que sejam realizadas as duas conversões é de 20 μ s, sendo que a diferença de tempo entre as amostras é de 10 μ s. Diante disso, a defasagem angular foi calculada com a expressão (5) com base na rede elétrica com frequência de 60 Hz. Logo, o período para o sinal elétrico completar um ciclo é 16667 μ s.

$$\text{Defasagem} = \frac{10 \mu \cdot 360^\circ}{16667 \mu} = 0,2159^\circ \quad (5)$$

Cabe ressaltar que foi utilizada a configuração padrão do conversor analógico digital do ESP32. Com a defasagem calculada, foi possível estimar o erro no cálculo da potência ativa com o auxílio de uma planilha no Excel, simulando a amostragem do sinal com 360 amostras, tensão 220 V RMS, corrente 100 A RMS e em quatro situações onde foi considerado o fator de potência da instalação. A partir dos resultados apresentados na tabela II, é possível ver que o erro aumenta na medida em que o fator de potência da instalação diminui.

TABELA II. CÁLCULO DO ERRO

FP	Cálculos com planilha no Excel		
	Potência ativa (W)	Potência ativa com defasagem da amostragem (W)	Erro %
1,0	22010,450	22010,300	0,0007
0,8	17612,970	17562,880	0,284
0,5	11015,480	10943,600	0,652
0,3	6617,641	6537,763	1,207

C. Arquitetura do software para o ESP32

A plataforma ESP32 é o centro do projeto, pois através do seu software são tratadas as amostras de tensão e corrente. Realiza o cálculo do valor médio quadrático dessas grandezas, cálculo da potência ativa, potência aparente, FP e consumo de energia elétrica. Verifica se ocorreu algum evento como tensão alta ou baixa, corrente e carga alta, e na ocorrência registra no banco de dados, comunicando com o servidor virtual. Também fornece as medições quando houver um cliente conectado, no caso uma pessoa que esteja utilizando o software supervisor através de algum dispositivo como um computador ou um celular. A cada hora, registra também os máximos e mínimos das grandezas medidas neste período, e como no hardware não há um relógio externo para ser usado para controlar o horário, o sincronismo é feito com o servidor toda vez que o ESP32 é ligado e também atualizado com a resposta do servidor quando registra os máximos e mínimos no banco de dados.

Para aquisição dos valores de tensão e corrente, são realizadas 360 leituras para captura de cada sinal, dentro da janela de corresponde a um ciclo do sinal elétrico, com o período de 16667µs. Como o tempo necessário para execução dos conversores analógicos digitais é de 10µs e para que o tempo total da execução das capturas coincida com o período do sinal elétrico, foi necessário adicionar um retardo. Para definir este retardo, foi utilizado o algoritmo a seguir [7]:

```
tempo = micros( );
for (i = 0; i < amostras; i++){
    amostras_tensao[i] = analogRead(tensao);
    amostras_corrente[i] = analogRead(corrente);
    // delayMicroseconds(tempo_Ajuste);
}
tempo_Total_exec = micros( ) - tempo;
tempo_medio = (float)tempo_Total_exec / amostras;
tempo_Ajuste =(float)(16666/amostras)-tempo_medio;
Serial.print("Retardo para o ajuste: ");
Serial.println(tempo_Ajuste);
```

Pelo canal serial da IDE Arduino foi possível observar o resultado, com o tempo total das 360 amostras realizadas. Logo, o retardo foi ajustado com 26 µs e assim o tempo para execução das amostras coincidiu com o período do ciclo do sinal elétrico. A justificativa para o uso do retardo ao invés de acrescentar mais amostras, é para não ocupar mais memória do ESP32 com vetores longos e 360 é mais do que o necessário para realizar o tratamento do sinal.

O próximo passo para o tratamento do sinal foi à remoção da componente contínua adicionada ao sinal no circuito condicionador. Para a remoção, cada valor amostrado e armazenado no vetor de tensão e de corrente, foi subtraído da média realizada entre todos os valores do mesmo vetor [7]. Desta forma, os valores amostrados retornam ao valor antes do acréscimo da tensão contínua.

Após o tratamento do sinal, é realizado o cálculo das grandezas elétricas, partindo com a determinação da potência ativa.

$$P = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V(i) \cdot I(i) \right) \cdot Kp \quad (6)$$

Onde:

- $V(i)$ é o vetor com os valores amostrados do sinal da tensão;
- $I(i)$ é o vetor com os valores amostrados do sinal da corrente;
- Kp constante de correção obtida no processo de calibração.

Para o cálculo da tensão eficaz e corrente eficaz, foi utilizada a expressão (7) e usado o vetor e a constante de correção (Kc) correspondente à grandeza específica, determinada no processo de calibração.

$$\text{Valor}_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)^2} \cdot Kc \quad (7)$$

Sendo:

- n é o número de amostras, 360;
- x_i é o valor amostrado e convertido pelo canal analógico digital;
- Kc constante de correção.

Os valores calculados da potência ativa, tensão e corrente eficazes, são armazenados em um vetor para cada grandeza, com 60 posições. O tamanho do vetor foi escolhido para que sejam feitas a obtenção de amostras de 60 ciclos do sinal elétrico, com o tempo total de execução em torno de 1s. Este procedimento é necessário para avaliar a correlação dos valores calculados e foi estipulado um intervalo de confiança de +/- 5% em torno da média. Todo valor que esteja fora desse intervalo, é substituído pela média. Após o tratamento dos valores nos vetores, é calculada a nova média e armazenada nas variáveis correspondentes como V_{rms} , I_{rms} e P_{media} .

Com os valores ajustados, é calculada a potência aparente:

$$S = V_{\text{rms}} \cdot I_{\text{rms}} \quad (8)$$

Para o fator de potência, foi aplicada a expressão (9).

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

O valor da energia elétrica consumida (kWh) é determinado em (10) e armazenado em uma variável acumuladora. Para controlador o intervalo de tempo em que será determinado o consumo de energia, foi utilizada a função de temporização `micros()` para realizar uma compensação no tempo, pois a coleta das amostras de 60 ciclos não coincide exatamente em 1s. O que foi feito basicamente é contar o intervalo de tempo entre as execuções da rotina para calcular a energia com auxílio de uma variável (`tempAnt`) que irá guardar o instante do tempo da função `micros()` na execução do cálculo anterior.

$$\text{kWh} = \frac{P}{1000 \cdot 3600} \cdot \frac{\text{micros}() - \text{tempAnt}}{1 \cdot 10^{-6}} \quad (10)$$

Importante ressaltar que o valor da energia é acumulativo dentro de uma hora, ou seja, quando for

registrado os máximos e mínimos no banco de dados, também será registrada a energia consumida nesse período, após a variável será zerada para registrar o consumo na próxima hora. O consumo de energia total será tratado pelo software supervisor.

O fluxo do programa segue com a verificação de algum evento de anormalidade. Os parâmetros para verificação da conformidade da energia elétrica e para controlar a carga, sinalizar quando excede algum limite, são definidos pelo usuário no software supervisor. Estes parâmetros ficam salvos no banco de dados e assim que o ESP32 é energizado, carrega esses valores em variáveis usadas para comparação com os valores lidos. Essa análise é realizada a cada um segundo e quando é confirmada alguma inconformidade, o ESP32 envia ao servidor virtual o evento para que seja salvo no banco de dados, com a data e hora. Da mesma forma ocorre quando a situação retorna ao normal, sendo registrado o fim do evento com a data e hora. Os parâmetros para análise podem ser alterados a qualquer instante pelo usuário, que será salvo no banco de dados e atualizado no mesmo instante no ESP32. Como mencionado antes, os registros de máximos e mínimos são salvos no banco de dados a cada hora fechada, sendo 01:00, 02:00 e assim por diante até as 24:00, totalizando 24 registros dentro de um dia. Estes registros são para tensão, corrente, potência ativa, potência aparente e consumo de energia. Quando o ESP32 é ligado e conectado à rede, além de buscar os parâmetros conforme já visto, solicita também ao servidor a hora para sincronizar. O que será tratado pelo ESP32 serão os minutos, pois a cada 60 minutos que entrará na rotina para registrar os valores.

Caso o módulo seja ligado, como exemplo às 17:50, serão registrados os máximos e mínimos às 18:00 com os valores avaliados dentro de 10 minutos. Após o registro o servidor responde ao ESP32 com a confirmação e a hora para que seja sincronizado novamente. Esta nova sincronização é necessária para evitar atrasos. O ESP32 controla o tempo para o registro através da rotina para aquisição das amostras de tensão e corrente que são realizadas em uma janela fixa de 60 ciclos, correspondendo ao tempo de 1 segundo. São usadas duas variáveis, sendo uma incrementada após a execução da rotina citada e quando chegar ao valor de 60, é inicializada com zero e incrementado o valor da variável responsável por contar os minutos.

D. Cálculo do erro teórico

Uma etapa importante do desenvolvimento do projeto é a estimativa do erro relacionado com o cálculo da tensão eficaz, corrente eficaz e da potência ativa. Para mensurar este erro teórico, foi considerada a tolerância dos resistores, incerteza do TC, defasagem angular entre as amostras de tensão e corrente como tratado anteriormente e o erro pela variação do sinal convertido pelo canal analógico digital. Para realizar a coleta do sinal de tensão, foram utilizados resistor com precisão de 1%. Como já descrito, o divisor de tensão possui uma resistência equivalente RA de 201 kΩ em série com o resistor de medição RB de 200 Ω. Foi utilizado o método da incerteza combinada para avaliar a variação desse circuito, chegando à conclusão que a resistência equivalente será 201 k +/- 1414,2489 Ω e o resistor de medição 200 +/- 2,0 Ω. Com esses dados, foi possível avaliar as situações extremas com o uso da equação (11). Para facilitar o entendimento, foi

utilizado o termo Vf como a tensão de entrada e Vm para referir a tensão medida para realizar a amostragem do sinal.

$$\frac{V_m}{V_f} = \frac{R_B}{R_B + R_A} \quad (11)$$

Foram consideradas as seguintes situações e aplicada à equação (11):

- $R_A = 201 \text{ k} + 1414,2489 = 202414,2489 \Omega$

$$R_B = 200 - 2 = 198 \Omega$$

$$\frac{V_m}{V_f} = 0,9772 \times 10^{-3}$$

- $R_A = 201 \text{ k} - 1414,2489 = 199585,7511 \Omega$

$$R_B = 200 + 2 = 202 \Omega$$

$$\frac{V_m}{V_f} = 1,0111 \times 10^{-3}$$

- Considerando os valores nominais:

$$\frac{V_m}{V_f} = 0,995 \times 10^{-3}$$

Portanto, foi escolhida a maior variação para calcular o possível erro produzido pelo circuito condicionador em relação à entrada de tensão, conforme demonstrado em (12).

$$\text{Erro} = \frac{1,011 \cdot 10^{-3} - 0,995 \cdot 10^{-3}}{0,995 \cdot 10^{-3}} \cdot 100 = 1,618\% \quad (12)$$

Para avaliar a variação no valor da conversão realizada pelo canal analógico digital, foi estabilizada uma tensão contínua de uma bateria de 1,52 V na entrada do ESP32. Esta tensão foi medida com um alicate amperímetro digital Minipa modelo ET-3201, com precisão de 0,5% para medição de tensão contínua. Esta tensão foi deixada por uma hora na entrada do conversor, com nenhum outro circuito para consumir a energia da mesma. Após 1 hora foi realizada uma nova medição que comprovou a mesma tensão, sem variação. Foi elaborado um algoritmo para que o ESP32 realizasse continuamente a conversão nesse período, com o acompanhamento pelo canal serial da IDE Arduino. Dessa forma, foi possível ver que a conversão permaneceu normalmente com um valor de 1720 e com variações em torno de +/- 1, chegando ao máximo em 1722 e no mínimo em 1719. Diante dessa informação, foi possível calcular o erro provável com essa variação, conforme em (13).

$$\text{Erro} = \frac{1722 - 1720}{1720} \cdot 100 = 0,1163\% \quad (13)$$

Para calcular o erro teórico foi considerada a fórmula utilizada para estimar a incerteza provável de um medidor de energia, conforme o módulo cinco do PRODIST, de acordo com a expressão (14).

$$e\% = \sqrt{M^2 + TC^2 + TP^2} + 0,05 \quad (14)$$

Sendo:

- e% é a incerteza do medidor;

- M é o erro do medidor e aqui foi considerado o erro da defasagem entre as leituras de tensão e corrente com o FP da instalação em 0,5 e agregado com o erro da variação da conversão analógica digital;
- TC é a incerteza do transformador de corrente, que foi considerado 1% conforme a ficha técnica do sensor;
- TP é a incerteza do transformador de potencial. Como não será usado um TP, essa incerteza foi substituída pela que foi calculada no divisor resistivo na entrada de medição.
- 0,05 é o erro imposto pelo cabo do TP. Foi mantido, considerando os fios que ligam o analisador até o ponto de medição.

Logo, foram substituídas as variáveis em (14) pelos erros calculados, conforme demonstrado em (15).

$$e\% = \sqrt{0,662^2 + 1^2 + 1,618^2} + 0,05 = 2,06\% \quad (15)$$

É importante salientar que foram consideradas as piores situações e sem um tratamento para correção. Diante desse cenário, o analisador se aproxima da comparação com um medidor de energia classe A, que possui um erro percentual máximo de $\pm 2\%$ [18].

E. Desenvolvimento do software supervisor

Para o desenvolvimento do software supervisor foi utilizada a linguagem de marcação de hipertexto (HTML) [8], linguagem PHP [9], Javascript [10] para parte funcional e CSS (*Cascading Style Sheets*), para auxiliar na formatação do estilo das páginas. Foram criadas quatro páginas que ficarão hospedadas no servidor virtual, junto com mais sete arquivos para manipulação das informações, conexão com o banco de dados e com o ESP32.

O software disponibiliza ao usuário informações como a medição da tensão eficaz, corrente eficaz, potência aparente, potência ativa e o consumo de energia, remotamente, conforme demonstrado na figura 4.



Fig. 4. Tela de medições

Estas informações são atualizadas automaticamente quando o usuário estiver na tela de medições. As atualizações ocorrem porque essa página tem na configuração a atualização automática a cada 5 segundos. Com isso, toda vez que a página é carregada é enviada uma solicitação ao ESP32 para conexão. Quando a conexão é realizada, o módulo responde para a página um conjunto de informações que contém as medições. Caso a conexão não seja realizada, quando não houver uma resposta do

módulo, a página informa que há um erro de conexão e os valores das grandezas ficam com um valor indeterminado. Além da tela das medições, o usuário pode acessar as outras três telas pelo menu localizado na parte superior da página, que contém o acesso ao histórico das medições com o registros dos máximos e mínimos, o registro do eventos ocorridos e a última para configurar as proteções.

Na tela do histórico, poderá ser escolhida a data e a grandeza para avaliação. A informação aparece em forma de um histograma com 24 registros no máximo, que corresponde a um dia e a forma como é armazenada a informação, a cada hora inteira. A escala do gráfico se ajusta conforme o valor mínimo e máximo. É possível visualizar os máximos e mínimos da tensão, da potência aparente e da potência ativa, corrente máxima e a energia elétrica consumida durante o dia, podendo ver o consumo a cada hora separadamente. Quando não há registro na data escolhida, a área do gráfico fica em branco, com a informação de que não há registro. Para que tudo isso aconteça, foi elaborado um script em PHP para carregar as informações do banco de dados e para desenhar o gráfico [12]. A figura 5 mostra um exemplo de uma pesquisa no histórico.

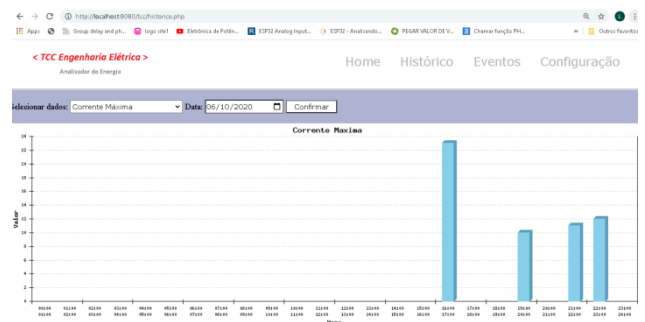


Fig. 5. Tela do histórico das medições

Para visualizar o registro dos eventos, basta acessar o menu eventos que a página é carregada. Nessa página, o usuário pode escolher a data e após confirmar a seleção. A caixa para seleção da data e a tecla “Buscar” estão dentro de um Form (formulário em HTML), que passa a data para uma variável em PHP. Com isso, o script feito em PHP busca no banco de dados todos os eventos que ocorreram na data escolhida. Esses registros são apresentados na forma de uma tabela como se vê na figura 6, que mostra o evento, a data e hora em que ocorreu. Essa tabela é montada através de um script apresentado com HTML e PHP.

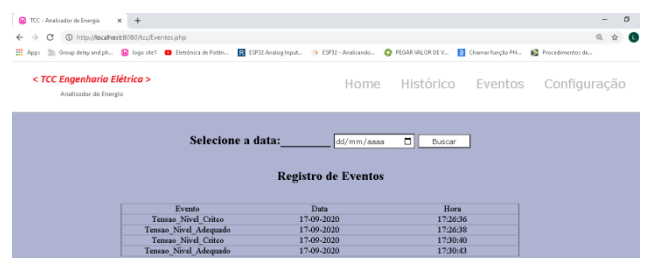


Fig. 6. Tela do histórico de eventos

O menu “Configuração”, quando acessado, carrega a página que contém os parâmetros que estão salvos no

banco de dados e os campos disponíveis para os novos valores. Esses parâmetros são os limites que o ESP32 usa para comparar as medições e avaliar a ocorrência de alguma inconformidade. Da mesma forma que nas páginas anteriores, o script é uma mescla do HTML e PHP, com algumas linhas em Javascript. Logo que o menu é acessado, uma rotina em PHP acessa o banco de dados para carregar os valores dos parâmetros que já foram definidos anteriormente [13]. As caixas de texto para inserir os valores são disponibilizadas por meio de um formulário em HTML, que passa os valores para as variáveis em PHP através do método POST, ou seja, a passagem das informações para as variáveis são internas e não visíveis nas URLs, diferente do método GET, que é outra possível configuração de um formulário em HTML. Quando for pressionada a tecla salvar, uma função escrita em Javascript é acionada, para substituir os valores no banco de dados e informar ao ESP32 sobre a atualização dos parâmetros. Assim que o módulo recebe a informação para atualização, o mesmo conecta ao servidor e acessa um arquivo escrito em PHP para solicitar os novos dados. Este arquivo envia uma resposta ao ESP32 em forma de string (conjunto de caracteres) e com caracteres definidos para separar os valores, que servirão também para validar a informação. Esse método é uma forma de conferir se a mensagem está correta. Esse mesmo arquivo é acessado quando o ESP32 é energizado e é necessário para carregar os limites para avaliar as medições. A figura 7 mostra a tela com os parâmetros de configuração.



Fig. 7. Tela do histórico de eventos

O software foi todo desenvolvido com o programa *Sublime Text*, que é um software multiplataforma de edição de texto, gratuito e que se destaca pela simplicidade e facilidade de uso. No desenvolvimento do supervisor é importante citar que as principais rotinas foram desenvolvidas em PHP, para trabalhar com o banco de dados MySQL. Essas rotinas tem a função de atualizar, pesquisar ou para acrescentar alguma informação no banco de dados. Outra função importante é a manipulação dos registros pesquisados no banco de dados para desenhar o gráfico, como visto na tela do histórico. O Javascript foi usado para o tratamento dos eventos relacionados com o click em um botão, dentro de um formulário no script em HTML, fazendo com que a troca de informações entre variáveis, rotinas e periféricos sigam um fluxo organizado.

Como as quatro páginas possuem um estilo padrão, foi criada uma folha de estilo única escrita em código CSS, que é uma linguagem usada para formatar um documento web. Dentro desse arquivo, foram definidas as cores, tamanhos e posições dos diversos componentes das páginas. Foram criadas classes para a conexão e identificação de cada componente ao seu estilo de formatação no arquivo escrito em CSS.

A troca de informações entre o servidor e o ESP32 ocorre sempre com uma string, com formato diferente conforme o fluxo. Quando o servidor está respondendo alguma informação para o módulo, a string possui no primeiro caractere a letra “a” e a separação dos valores seguem com as letras do alfabeto em ordem crescente, conforme é mostrado na figura 8, onde o “x” representa um valor qualquer para ser tratado.

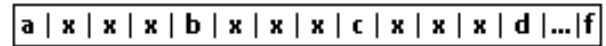


Fig. 8. Mensagem enviada ao ESP32

“Quando o fluxo ocorre do ESP32 para o servidor, a mensagem contém o caractere “.” para a separação das informações. Esses dados são formatados em uma string que será enviada ao servidor virtual como resposta a uma conexão.

F. Calibração

Para que as medições expressem o valor real a ser mensurado, após o tratamento dos sinais, os valores amostrados de tensão e corrente são multiplicados por uma constante de correção. Para as constantes, o cálculo do valor leva em consideração a relação do divisor resistivo para a constante de correção da tensão e a relação do transformador de corrente e do resistor shunt para a constante de correção da corrente. Como visto anteriormente, o circuito condicionador estabelece teoricamente uma relação de 1 V na entrada da medição de tensão para 0,994 mV na entrada analógica do ESP32.

Como a resolução do conversor analógico digital é 0,8057 mV e definido que esse valor corresponderá a 1 V, a constante de correção de tensão (CCT) parte com um valor inicial definido em expressão (16).

$$CCT = \frac{0,8057 \cdot 10^{-3}}{0,994 \cdot 10^{-3}} = 0,8105 \quad (16)$$

Após, foram realizadas diversas medições e para comparação foi utilizado o multimedidor da Altus modelo PH3100, com as seguintes especificações de interesse para análise:

- Classe de medição 0,2 para tensão e corrente;
- Classe de medição 0,5 para potência ativa e aparente;
- Classe de medição 0,5 para consumo de energia.

Logo, foram realizadas 4 medições e montada a tabela III. Cabe ressaltar que, cada valor preenchido é de uma medição realizada por um período em torno de 1 minuto e depois calculada a média entre os valores amostrados.

TABELA III. MEDIÇÃO DE TENSÃO

Medição de tensão		
	Protótipo (V)	Multimedidor PH3100 (V)
1	160,14	125,8
2	159,92	125,8
3	160,18	125,9
4	160,22	125,9

Com esses dados, foi possível corrigir o valor de CCT, conforme equação (17).

$$CCT = \frac{125,850}{160,115} \cdot 0,811 = 0,637 \quad (17)$$

Para realizar a calibração da leitura de corrente, foi considerada a relação do TC e o resistor de onde será lida a tensão no canal analógico. O TC possui uma relação de 2000 e o resistor shunt uma resistência de 22 Ω . Logo, para cada 1 A medido, na entrada analógica do ESP32 terá uma tensão (V_c), conforme demonstrado na equação (18).

$$V_c = \frac{1}{2000} \cdot 22 = 0,011 \text{ V} \quad (18)$$

No projeto foi definido que a cada 1A haveria um incremento no bit menos significativo do sinal convertido pelo canal analógico digital. Assim, a constante de correção da corrente (CCC) é obtida conforme expressão (19).

$$CCC = \frac{0,8057 \cdot 10^{-3}}{0,011} = 0,0732 \quad (19)$$

Para realizar a calibração, foi utilizado o multimetido PH3100 e como carga um aquecedor de 1200W. Com os valores obtidos foi elaborada a tabela IV e aplicado o mesmo método usado para avaliar a leitura de tensão.

TABELA IV . MEDIÇÃO DE CORRENTE

Medição de corrente		
	Protótipo (A)	Multimedidor PH3100 (A)
1	6,64	10,22
2	6,94	10,21
3	6,71	10,21
4	6,53	10,22

Portanto, a constante da correção da leitura de corrente passa por ajuste como se vê em (20).

$$CCC = \frac{10,220}{6,705} \cdot 0,073 = 0,116 \quad (20)$$

O processo de calibração prepara o protótipo para a realização dos testes com carga variada, para determinar a incerteza do analisador de energia desenvolvido.

G. Configuração da conexão

Como o analisador desenvolvido não possui um display e teclado, foi desenvolvido um software em C# para realizar a configuração dos parâmetros para conexão na rede Wi-Fi, como se observa na figura 9 [15]. O software deve ser usado apenas para configurar na primeira aplicação ou na necessidade de alterar algum parâmetro da rede, pois esta configuração ficará salva na memória interna do ESP32. Toda vez que o analisador é ligado, o mesmo carrega essa configuração no início da sua rotina e após conecta na rede.

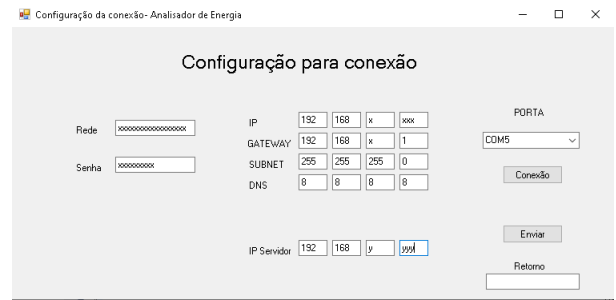


Fig. 9. Imagem do software para configuração da rede no ESP32

H. Montagem do protótipo

A figura 10 mostra o protótipo pronto, com o circuito condicionador, fonte 12 V com regulador de tensão, conjunto com quatro baterias em série de 1,5 V e o ESP32. Em relação ao custo para o desenvolvimento, o valor final ficou em R\$ 283,00. Em comparação com que há no mercado, o valor mais baixo encontrado é do medidor Dmi T50t, trifásico e com acesso remoto, medindo correntes até 100 A com o mesmo TC utilizado no projeto. O valor desse medidor é R\$ 1390,00. Para comparação justa, o protótipo deve ser modificado para realizar medição trifásica, o que aumentaria o custo, finalizando com o valor aproximado de R\$ 450,00.



Fig. 10. Imagem do protótipo

IV. RESULTADOS

Para obtenção dos resultados e validação do protótipo, foi utilizado o multimetido da Altus PH3100 como instrumento de medição de referência. Para coletar as amostras com a finalidade de avaliar a incerteza de medição de tensão, corrente e potência ativa, foi realizado um teste com duração de 3 horas e utilizado como cargas o aquecedor de 1200 W, uma batedeira de 400 W e uma furadeira de 500 W. Durante o teste a carga era variada, alternando o momento de funcionamento de cada equipamento para obter diferentes fatores de potência.

Com base nos dados avaliados de forma experimental, foi elaborada a tabela V com as medições onde o erro relativo foi maior em comparação a uma medição específica realizada pelo medidor de referência, com dez amostras consecutivas em um período curto. Diante dos

dados obtidos e com auxílio do Excel, foram calculados o erro sistemático (tendência) e o erro aleatório (repetitividade) considerando 95% probabilidade [16].

Com estas informações, é possível observar que existe a probabilidade de 95% do erro aleatório da leitura de tensão estar dentro de uma faixa simétrica de $\pm 0,55$ V, assim como na leitura de corrente estar em $\pm 0,14$ A e na leitura de potência ativa em $\pm 0,01$ kW.

TABELA V. ERRO ALEATÓRIO E SISTEMÁTICO

Amostras	Medições		
	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência Ativa [kW]
1	126,02	11,86	0,80
2	126,06	11,76	0,80
3	125,65	11,83	0,79
4	125,83	11,72	0,80
5	125,47	11,74	0,80
6	125,49	11,89	0,80
7	126,01	11,71	0,79
8	126,07	11,76	0,79
9	125,95	11,73	0,80
10	126,09	11,83	0,80
Medição de referência	125,60	11,80	0,79
Desvio padrão	0,24	0,06	0,01
Tendência	0,26	-0,02	0,01
Repetitividade	0,55	0,14	0,01

Para determinar a incerteza combinada referida à medição de tensão e corrente, foi considerada a resolução da leitura fornecida pelo software supervisor, a classe de medição do multimetido PH3100 e do seu TC, como se vê na tabela VI [17].

TABELA VI. CÁLCULO DAS INCERTEZAS PARA TENSÃO E CORRENTE

Fontes de incertezas	Medição de tensão			
	Valor	Tipo de distribuição	Divisor	Incerteza
Repetitividade	0,55	Normal	1	0,55
Resolução do mostrador	0,01	Retangular	3,464	0,0029
Multimetido	0,63	Normal	2	0,32
Incerteza combinada				0,64
Fontes de incertezas	Medição de corrente			
	Valor	Tipo de distribuição	Divisor	Incerteza
Repetitividade	0,14	Normal	1	0,14
Resolução do mostrador	0,01	Retangular	3,464	0,0029
TC	0,21	Retangular	3,464	0,06
Multimetido	0,21	Retangular	3,464	0,06
Incerteza combinada				0,16

Logo, observa-se que a incerteza inferida na leitura de tensão é 0,51% e na leitura de corrente 1,35%. Pondera-se aqui que, o erro na leitura de corrente é maior em correntes

baixas conforme a curva disponibilizada pelo fabricante do TC utilizado no protótipo, podendo chegar em 5% para correntes inferiores a 5A, limite este inferior atribuído na característica do projeto. Para determinar o erro global do protótipo em relação à medição do consumo de energia, foram consideradas as incertezas antes citadas e o erro proporcionado pela defasagem no processo de amostragem conforme a tabela II com FP 0,8. Foi escolhido este valor porque nos testes o menor fator de potência foi 0,83. Também foram usadas as incertezas do TC e da ponte resistiva na entrada de medição da tensão, logo aplicada à equação (21):

$$E\% = \sqrt{0,28^2 + 1^2 + 1,62^2 + 0,51^2 + 1,35^2} = 2,41\% \quad (21)$$

Contudo, durante este período de teste e a cada hora, foi comparada a leitura do consumo de energia elétrica entre o protótipo e o multimetido, como se observa os resultados na tabela VII.

TABELA VII. COMPARAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA

Leitura	Medição de tensão		
	Protótipo [kWh]	PH3100 [kWh]	Erro relativo [%]
1	0,65	0,65	0,0
2	0,8	0,8	0,0
3	3,05	3,06	-0,33

V. CONCLUSÃO

Este trabalho demonstra o desenvolvimento de um sistema para monitoramento das grandezas elétricas e da qualidade da energia, objetivando a comparação com analisadores de qualidade de energia Classe S e medidores de consumo de energia classe A [18]. Logo, se observa nos resultados os valores próximos do esperado, sendo a incerteza para a leitura de tensão inferior a 1% e referida na medição de corrente superior a 1% na leitura com correntes próximas a 10 A. Durante os testes foi observado que a incerteza na leitura de corrente diminuiu consideravelmente quando a carga aumenta, chegando ao nível inferior a 1% com corrente acima de 15 A.

Com análise das medições realizadas durante os testes, foi comprovado que o protótipo é capaz de detectar os eventos de anormalidade na energia e registrar no banco de dados para que o usuário tenha informações claras e suficientes para realizar um estudo através do software supervisor. Dessa forma, resolve o problema da falta de informação para diagnóstico inicial de anomalias perceptíveis na carga, seguindo o que foi apontado como um dos objetivos deste trabalho.

Em relação ao custo para o desenvolvimento, o valor ficou muito abaixo do que há de oferta no mercado, demonstrando que o projeto é viável.

Com a validação e comprovação da eficiência, além de monitorar a qualidade da energia elétrica fornecida pela concessionária ou de qualquer outra fonte de energia alternada, o protótipo pode ser aplicado para monitoramento específico de uma carga ou parte do circuito para controle do consumo de energia, como exemplo em uma linha de produção em consumidores com

demanda contratada. Com as informações disponibilizadas pelo protótipo o usuário poderá planejar o uso da carga em um momento produtivo.

Outra aplicação com uma configuração simples, é o uso de um notebook com o software WampServer instalado, onde ficará hospedado o software supervisorio, e um celular para rotear o sinal Wi-Fi para disponibilizar a interação entre o analisador e o supervisorio. Desta forma, pode ser usado como ferramenta de campo para diagnóstico de falhas, como atuação de relés de proteção a princípio indevidamente, alta temperatura em grupos geradores a diesel por sobrecarga, aquecimento de condutores, quedas de tensão na carga, entre outros. Além do propósito da análise de falhas, o protótipo poderá ser usado para dimensionamento de fontes de energia alternada, como exemplo um grupo gerador a diesel ou painel solar. Importante ressaltar que o protótipo deve ficar monitorando em um período mínimo de 1 hora, dependendo do perfil do consumo, para registrar os máximos e mínimos atingidos pelas medições, assim o usuário terá informações suficientes para realizar uma análise.

Este desenvolvimento abre possibilidades para melhorias em trabalhos futuros, pode ser seguido visando à implementação de uma rotina no software supervisorio para acrescentar mais analisadores no monitoramento remoto. No analisador, poderá ser acrescentado um display e teclado, para ter acesso às medições de forma direta e para configurar a conexão na rede Wi-Fi. Outra melhoria está relacionada com a diminuição do erro na medição de corrente, que pode ser tratado com o uso um TC com incerteza menor.

VI. AGRADECIMENTOS

Ao professor Marcio Gil Faccin com a sua importante contribuição na orientação na primeira parte do desenvolvimento deste projeto, à professora Miriam N. Cáceres Villamayor na continuidade e à instituição ULBRA Canoas/RS, por ceder o multimedidor PH3100 para a realização dos testes.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional Disponível em <www.aneel.gov.br/prodist>. Acessado em 11 de abril de 2020.
- [2] Qualidade do produto. Disponível em <www.aneel.gov.br/qualidade-do-produto>. Acessado em 30 de maio de 2020 .
- [3] Definição dos procedimentos de medição – Relatório técnico 3/8. Disponível em <www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/>. Acessado em 30 de maio de 2020 .
- [4] DEVMEDIA, Instalação do WampServer. Disponível em <https://www.devmedia.com.br/instalacao-do-wampserver/25871>. Acessado em 4 de março de 2020.
- [5] Espressif, Datasheet ESP32 Series. Disponível em <www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>. Acessado em 11 de abril de 2020.
- [6] J. L. G. Brito, “Sistema para monitoramento de consumo de energia elétrica particular, em tempo real e não invasivo utilizando a tecnologia Arduino”. Universidade Estadual de Londrina, 2016.
- [7] J. A. O. Figueiredo, “Aquisição de grandezas elétricas”. Universidade de Passo Fundo, 2016.

- [8] W3SCHOOLS, HTML introdução. Disponível em <https://www.w3schools.com/html/html_intro.asp>. Acessado em 17 de abril de 2020.
- [9] PHP, Manual do PHP. Disponível em <www.php.net/manual/pt_BR/index.php>. Acessado em 14 de maio de 2020.
- [10] W3SCHOOLS, JavaScript Functions. Disponível em <https://www.w3schools.com/js/js_functions.asp>. Acessado em 30 de maio de 2020.
- [11] W3SCHOOLS, Introdução ao SQL. Disponível em <www.w3schools.com/sql/sql_intro.asp>. Acessado em 18 de abril de 2020.
- [12] DEVMEDIA, Primeiros passos no MySQL. Disponível em <https://www.devmedia.com.br/primeiros-passos-no-mysql/28438>. Acessado em 18 de abril de 2020.
- [13] DEVMEDIA, PHP e MySQL: conectando e exibindo dados de forma rápida. Disponível em <https://www.devmedia.com.br/php-e-mysql-conectando-e-exibindo-dados-de-forma-rapida-dica/28526>. Acessado em 21 de abril de 2020.
- [14] YHDC, Split core current transformer SCT-013. Disponível em <https://www.rhydolabz.com/documents/Specification%20of%20%20SCT013.pdf>. Acessado em 11 de março de 2020.
- [15] EMBARCADOS, Comunicação Serial com C# e Arduino – Parte 1. Disponível em <https://www.embarcados.com.br/comunicacao-serial-c-arduino-parte-1/>. Acessado em 2 de novembro de 2020.
- [16] P. Cabral, “Erros e Incertezas nas Medições”. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2004.
- [17] A. A. Gonçalves, “Metrologia Parte I”. Laboratório de Metrologia e Automação, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- [18] INMETRO, Regulamento Técnico Metrológico (RTM), portaria 587 de 2012.