

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

GABRIEL CHIELE

**PROTÓTIPO DE MEDIDOR ELETRÔNICO INTELIGENTE E DESENVOLVIMENTO
DE SUPERVISÓRIO PARA ACOMPANHAMENTO E CONSCIENTIZAÇÃO DO
CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA.**

**São Leopoldo
2019**

GABRIEL CHIELE

**PROTÓTIPO DE MEDIDOR ELETRÔNICO INTELIGENTE E DESENVOLVIMENTO
DE SUPERVISÓRIO PARA ACOMPANHAMENTO E CONSCIENTIZAÇÃO DO
CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica pelo curso de
Engenharia Elétrica da Universidade do
Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Orientador: Prof. Ms. João Olegário de Oliveira de Souza

São Leopoldo

2019

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto e desenvolvimento de um protótipo de medidor de energia e o desenvolvimento de um sistema supervisorio para acompanhamento e gestão do consumo em ambientes residenciais. O protótipo obtém as grandezas elétricas do sistema através de um sensor de tensão AC e um transformador de corrente não invasivo.

O processamento dos sinais é realizado por uma rotina de *firmware* desenvolvida em um microcontrolador que calcula as grandezas elétricas e consumo do sistema. Os resultados das medições são enviados pela rede Wi-Fi até um servidor local que possui um banco de dados e hospeda os arquivos do sistema supervisorio. O sistema supervisorio desenvolvido permite ao usuário do sistema acompanhar as grandezas elétricas e consumo instantâneo. A previsão do consumo no mês, consulta ao histórico de consumo e acompanhamento da qualidade de energia também são ferramentas implementadas no supervisorio.

O protótipo respondeu conforme as expectativas e foi capaz de medir as grandezas elétricas desejadas e o consumo das cargas. Sua validação ocorreu com um analisador de energia devidamente calibrado, onde três cargas foram medidas e a máxima incerteza de medição do protótipo em comparação ao analisador foi de 6%. O sistema supervisorio se mostrou completamente funcional e intuitivo, possibilitando que o usuário acompanhe as grandezas elétricas e o consumo facilmente. Com as ferramentas implementadas no supervisorio, o usuário é capaz de entender melhor o seu consumo, podendo acompanhar em tempo real o valor de sua fatura de energia, o que auxilia na conscientização do seu consumo e no planejamento de gastos.

Palavras-chave: Medidor Eletrônico Inteligente. SCADA. *Internet of Things*. Consumo de Energia Elétrica. Wi-Fi.

DEDICATÓRIA

Agradeço a meus pais, Maria Inês Lotti Chiele e Paulo Marcos Chiele, pelo amor e apoio incondicionais durante todos os anos de minha vida. Agradeço também à minha namorada, Samila Balbinot, pela compreensão, apoio e companheirismo durante toda a minha graduação. Agradeço também a todos os meus colegas de curso que participaram comigo nas disciplinas cursadas, mas principalmente a Carlos Vinícius Gobbato e Seldo Junior Pletsch, pelo apoio, auxílio e amizade demonstrado em todos esses anos. Por fim, mas não menos importante, agradeço a todos os professores que fizeram parte da minha graduação acadêmica, principalmente a João Olegário de Oliveira de Souza, pelo compartilhamento de seu conhecimento em todos esses anos e auxílio na realização deste trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sinal senoidal de tensão	14
Figura 2 - Potência em cargas resistivas.....	16
Figura 3 - Sinais de tensão e corrente em um circuito puramente capacitivo	17
Figura 4 - Sinais de tensão e corrente em um circuito puramente indutivo	17
Figura 5 - Triângulo das potências	19
Figura 6 - Faixas de classificação dos níveis de tensão	21
Figura 7 - Componentes de um instrumento de medição.....	24
Figura 8 - Circuito magnético criado no núcleo de um transformador	24
Figura 9 - Princípio de funcionamento do transformador.....	25
Figura 10 - Princípio de funcionamento de um transformador de corrente.....	26
Figura 11 - Circuito de malha fechada.....	27
Figura 12 - Discretização do sinal pontilhado.....	28
Figura 13 - Reconstrução de um sinal com diferentes taxas de amostragem	29
Figura 14 - Matriz de barramentos	33
Figura 15 - Kit NUCLEOF446-RE.....	34
Figura 16 - Topologia de rede infra-estruturada	36
Figura 17 - Componentes dos sistemas SCADA.....	39
Figura 18 - Circuito condicionador de tensão proposto	43
Figura 19 - Circuito condicionador de tensão proposto	44
Figura 20 - Circuito condicionador de tensão proposto	45
Figura 21 - Blocos do sistema proposto	46
Figura 22 - Circuito condicionador de corrente proposto.....	46
Figura 23 - Diagrama de blocos do dispositivo.....	48
Figura 24 - Conversor MFM-10-5.....	50
Figura 25 - Circuito de medição de tensão.....	52
Figura 26 - Ligação do circuito condicionador de tensão	52
Figura 27 - Circuito condicionador de tensão.....	53
Figura 28 - Sinal de saída do circuito condicionador de tensão	53
Figura 29 - Transformador de corrente SCT-013-100.....	54
Figura 30 - Diagrama esquemático SCT-013-100.....	54
Figura 31 - Circuito condicionador de corrente.....	55
Figura 32 - Sinal de saída simulado do circuito condicionador de corrente.....	56

Figura 33 - Ligação dos circuitos de medição no ADC do microcontrolador	57
Figura 34 - Configuração do <i>timer</i> do microcontrolador.	58
Figura 35 - Fluxograma do ADC.....	59
Figura 36 - Fluxograma do periférico DMA.....	60
Figura 37 - Fluxograma do <i>firmware</i> do microcontrolador.	61
Figura 38 - Firmware da comunicação UART.	63
Figura 39 - Pinos TX e RX do microcontrolador NUCLEOF446-RE.....	64
Figura 40 - Fluxograma do <i>firmware</i> do ESP32-DevKitC	65
Figura 41 - Ligação dos fios da comunicação UART entre microcontroladores.	66
Figura 42 - Painel de controle do servidor local XAMPP.	67
Figura 43 - Tabela criada no banco de dados.	67
Figura 44 - Fluxograma de funcionamento do supervisorio.....	69
Figura 45 - Login do sistema supervisorio.....	70
Figura 46 - Página inicial do sistema supervisorio.	71
Figura 47 - Menu de navegação do supervisorio.	71
Figura 48 - Página de consumo semanal	72
Figura 49 - Página de consumo anual.....	72
Figura 50 - Página de previsão/histórico do consumo.....	73
Figura 51 - Página qualidade de energia.....	73
Figura 52 - Interligação dos blocos do protótipo.....	74
Figura 53 - Circuito montado em placa padrão com o conversor MFM-10-5.....	75
Figura 54 - Circuito condicionador de corrente e regulador de 3,3 V	76
Figura 55 - Sinal de saída do circuito condicionador de tensão	77
Figura 56 - Sinal de saída do circuito condicionador de corrente.....	78
Figura 57 - Sinal de saída do circuito condicionador de corrente.....	78
Figura 58 - Resultados do processamento dos sinais pelo microcontrolador.....	79
Figura 59 - Resultados recebidos pelo ESP32.....	80
Figura 60 - Registros armazenados no banco de dados	81
Figura 61 - Protótipo montado na placa de montagem da caixa de proteção	82
Figura 62 - Funcionamento da tela principal do supervisorio	83
Figura 63 - Funcionamento da tela de consumo semana	84
Figura 64 - Funcionamento da tela de consumo anual	84
Figura 65 - Funcionamento da tela de previsão/histórico de consumo	85
Figura 66 - Funcionamento da tela de qualidade de energia	85

Figura 67 - Analisador de energia e protótipo durante a medição das cargas.	87
Figura 68 - Sinal de tensão obtidos com o analisador.....	89
Figura 69 - Sinal de tensão obtido com o protótipo.	89
Figura 70 - Sinal de corrente obtido com o analisador.	89
Figura 71 - Sinal de corrente obtido com o protótipo.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das faixas de tensão (380 V / 220 V).	22
Tabela 2 - Classificação das faixas de tensão (220 V / 127 V).	22
Tabela 3 - Características do Protótipo	49
Tabela 4 - Características do conversor MFM-10-5	51
Tabela 5 - Valores de tensão e corrente obtidos nos testes das três cargas.	88
Tabela 6 -Valores de potência e consumo obtidos nos testes das três cargas.	90
Tabela 7- Fator de Potência obtido com o analisador e com o protótipo.....	91

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	Conversor Analógico Digital
ANEEL	Agência Nacional de Engenharia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DMA	<i>Direct Memory Access</i> (Acesso Direto à Memória)
DRC	Índice de Duração Relativa da ultrapassagem da tensão Precária
DRC	Índice de Duração Relativa da ultrapassagem da tensão Crítica
DSP	<i>Digital Signal Processing</i> (Processamento digital de sinais)
FP	Fator de Potência
GND	Ground (Terra)
HTML	<i>Hypertext Markup Language</i> (Linguagem de marcação de hipertexto)
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i> (Protocolo de transferência de hipertexto)
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IHM	Interface Homem-Máquina
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
Mbps	<i>Megabit por segundo</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
PHP	<i>Hypertext Preprocessor</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i> (Valor Eficaz)
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i> (Unidade Terminal Remota)
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> (Supervisório de controle e aquisição de dados)
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
TC	Transformador de Corrente
TL	Tensão de Leitura
TP	Transformador de Potencial
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i> (Receptor/Transmissor Universal Assíncrono)
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	12
1.1.1 Objetivos Gerais.....	12
1.1.2 Objetivos Específicos	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 Corrente Alternada	14
2.2 Potência	15
2.2.1 Fator de Potência	19
2.3 Qualidade de Energia	20
2.4 Instrumentação	23
2.4.1 Transformadores	24
2.4.2 Divisor de tensão.....	26
2.5 Leitura e Processamento de Sinais	27
2.6 Microcontrolador	30
2.6.1 Conversor Analógico Digital (ADC)	30
2.6.2 Memória de Acesso Direto (DMA).....	31
2.6.3 Interrupções	33
2.6.4 Processador	33
2.6.5 NUCLEOF446-RE	34
2.6.6 ESP32	34
2.7 Wi-Fi	35
2.8 Servidor Local	36
2.8.1 Banco de Dados	37
2.8.2 JavaScript.....	37
2.8.3 PHP	38
2.9 Sistemas Supervisórios	38
2.9.1 Unidade Terminal Remota (RTU).....	39
2.9.2 Unidade Mestre	40
2.9.3 Interface Homem-Máquina (IHM)	41
2.9.4 Comunicação	41
3. TRABALHOS CORRELATOS	43
4. METODOLOGIA	48

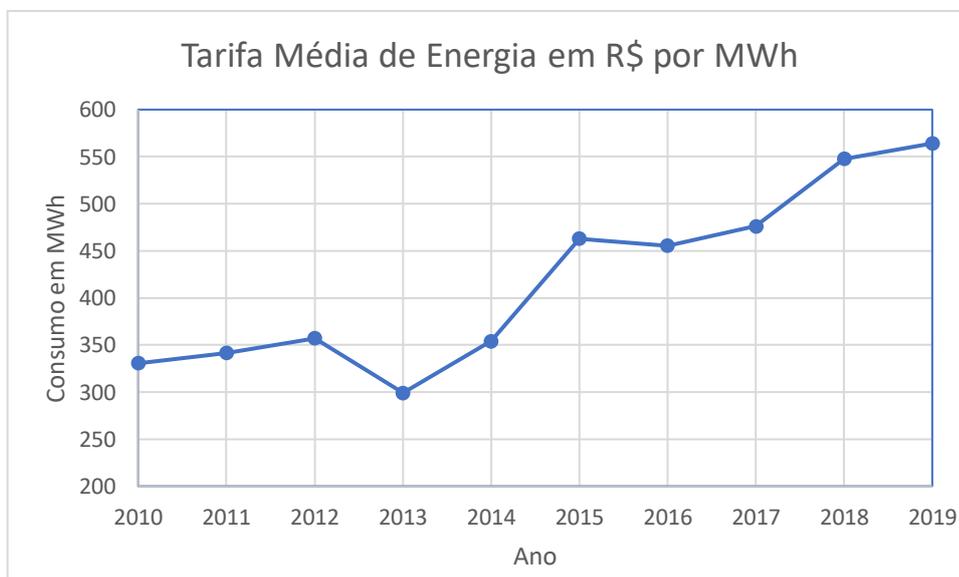
4.1 Alimentação	50
4.2 Instrumentação	51
4.2 Microcontroladores	56
4.2.1 NUCLEOF446-RE	57
4.2.2 ESP32-DevKitC	64
4.3 Servidor Local	66
4.3.1 Banco de Dados	67
4.4 Sistema Supervisório	68
4.5 Montagem do Protótipo	74
5. ANÁLISE DE RESULTADOS	75
5.1 Montagem dos Circuitos e Validação das Tensões de Alimentação	75
5.2 Validação dos Circuitos Condicionadores de Sinais	76
5.3 Validação do <i>Firmware</i> do microcontrolador NUCLEOF446-RE	79
5.4 Validação do <i>Firmware</i> do microcontrolador ESP32	80
5.5 Validação do Banco de Dados	80
5.5 Montagem do Protótipo	81
5.7 Validação do Sistema Supervisório	82
5.8 Validação do Protótipo com o Analisador PQ700	86
6. CONCLUSÃO E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	92
6.1 Conclusão	92
6.2 Propostas de Trabalhos Futuros	93
REFERÊNCIAS	94

1 INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia mundial trouxe inúmeros benefícios para sociedade e juntamente com a redução dos preços, o número de dispositivos eletrônicos cresceu exponencialmente, aumentando a conectividade entre dispositivos e também o consumo de energia mundial. Segundo a ANEEL (2019), no ano de 2018 o consumo energético do Brasil foi de 472,242 GWh, um aumento de 1,1% em relação ao ano de 2017, além disso, nos anos de 1995 até 2018 em apenas em 3 anos o Brasil registrou redução do consumo em comparação ao ano anterior.

As tarifas de energia também aumentaram com o passar dos anos, no ano de 2019 o brasileiro pagou em média R\$ 0,5641 por kWh consumido, um aumento de 70,5% em relação ao ano de 2010. (ANEEL, 2019). Os gastos com energia elétrica afetam a vida de toda a população, os usuários devem utilizar a energia elétrica com consciência, evitando desperdícios e gastos desnecessários. O Gráfico 1 ilustra a média da tarifa de energia do Brasil em MWh nos últimos anos.

Gráfico 1 – Média das tarifas de energia em MWh no Brasil



Fonte: Adaptado de ANEEL (2019).

As novas tecnologias proporcionaram a criação de redes de energia inteligentes (do inglês *Smart Grids*) que é a automatização das redes de energia elétrica atuais, permitindo uma maior eficiência e maior controle sobre os sistemas elétricos em geral. Medidores eletrônicos inteligentes são dispositivos fundamentais para uma maior automatização da rede elétrica, possibilitando uma série de funções

inovadoras que trazem benefícios tanto para a concessionária quanto para o consumidor final. (RGE, 2019).

Com a utilização de redes inteligentes os clientes das empresas de distribuição de energia poderão acompanhar o seu sistema elétrico em tempo real, possibilitando um acompanhamento mais minucioso do consumo e das grandezas elétricas. Os clientes também poderão acompanhar o gasto com energia no mês, o que auxilia na conscientização e controle do consumo de energia elétrica. Medidores inteligentes trazem inúmeros benefícios para as concessionárias, pois possibilitam que o acompanhamento e medição da rede ocorra de forma remota, possibilitando um maior conhecimento sobre o comportamento da rede, facilitando na identificação de ajustes e investimentos no sistema. (RGE, 2019).

A tecnologia da informação aliada as melhorias de processamento e miniaturização de componentes estão revolucionando os produtos. Produtos inteligentes permitem o desenvolvimento de novas funcionalidades que ultrapassam os conceitos tradicionais e com o aumento destes produtos surgiu o conceito de internet das coisas, que se popularizou com o termo em inglês *Internet of Things*. Com a conectividade de produtos inteligentes a confiabilidade de sistemas aumenta e cada vez mais as empresas estão repensando suas estratégias e a forma de como trabalham. (PORTER; HEPPELMANN, 2014).

Este trabalho visa unificar os conceitos de *Internet of Things* e *Smart Grid* para o desenvolvimento de um medidor de energia inteligente. Este dispositivo realiza a medição de grandezas elétricas e através da conexão com a internet, permite que o usuário final monitore os dados de sua rede elétrica, auxiliando na conscientização do consumo e maior clareza em relação a seus gastos com energia.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de um protótipo de medidor eletrônico inteligente que realiza a medição das grandezas elétricas de um sistema eletroeletrônico para que, através da comunicação Wi-Fi, salve os resultados destas medições em um banco de dados onde um sistema supervisor consiga acessar, disponibilizando ao usuário uma interface para acompanhamento das

grandezas elétricas, consumo energético instantâneo e registros de consumo dos últimos 12 meses.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) projetar circuitos que consigam realizar a medição de sinais de tensão e corrente, convertendo-os para sinais de menor amplitude possibilitando que um microcontrolador consiga realizar a leitura destas grandezas;
- b) desenvolver uma rotina de *firmware* que seja capaz de realizar a leitura dos sinais de tensão e corrente, processando estes sinais para calcular grandezas elétricas e consumo, além de enviar os resultados para um dispositivo com conexão Wi-Fi;
- c) desenvolver uma rotina de *firmware* que consiga ler os resultados das medições e salve estes registros em um banco de dados através da rede Wi-Fi;
- d) utilizar um servidor local para hospedar o banco de dados e os arquivos de programação do sistema supervisorio;
- e) criar um banco de dados para que seja possível salvar as grandezas elétricas e consumo;
- f) desenvolver uma interface gráfica para que o usuário consiga acompanhar o consumo instantâneo e registros passados;
- g) realizar a validação do protótipo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção será apresentado o embasamento teórico utilizando para o desenvolvimento do protótipo e do sistema supervisorio.

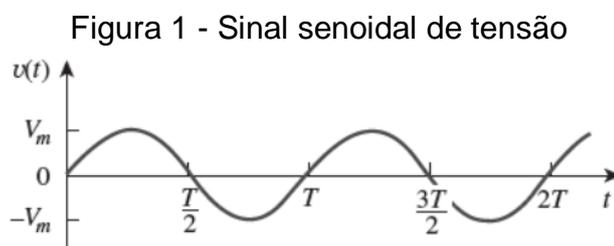
2.1 Corrente Alternada

A corrente alternada (CA) ou senoidal é um sinal que possui a forma da função seno ou cosseno, e assim como estas funções, este sinal varia sua amplitude em intervalos de tempo regulares, alternando entre valores positivos e negativos. A forma de onda mais comum na área da energia elétrica é a CA de 50 Hz ou 60 Hz. (ALEXANDRER; SADIKU, 2013).

O valor instantâneo da tensão em um sinal senoidal pode ser obtido com a equação (1).

$$v(t) = V_m \cdot \text{sen}(\omega t), \quad (1)$$

onde $v(t)$ é a tensão instantânea em volts [V], V_m é a amplitude da senoide em volts [V], ω é a frequência angular em radianos por segundo [RAD/s] e t é o tempo em segundos [s].



Fonte: ALEXANDRER; SADIKU. (2013, p.331)

Conforme ilustrado na Figura 1, o sinal senoidal se repete após um intervalo de tempo T , este intervalo de tempo é chamado de período da onda e pode ser representado matematicamente com a equação (2). (ALEXANDRER; SADIKU, 2013).

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad (2)$$

onde T é o período do sinal em segundos [s] e ω é a frequência angular em radianos por segundo [RAD/s].

O período de uma senoide é o tempo em segundos que o sinal leva para completar um ciclo, com o inverso deste valor se obtém a frequência do sinal, que é a

quantidade de ciclos completos por segundo. A frequência de um sinal senoidal pode ser calculada com a equação (3). (ALEXANDRER; SADIKU, 2013).

$$f = \frac{1}{T}, \quad (3)$$

onde f é a frequência do sinal em hertz [Hz] e T é o período do sinal em segundos [s].

A corrente instantânea em um sinal senoidal também pode ser calculada em função do tempo por meio da equação (4). (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

$$i(t) = I_m \cdot \text{sen}(\omega t), \quad (4)$$

onde $i(t)$ é a corrente instantânea em amperes [A], V_m é a amplitude da senoide em amperes [A], ω é a frequência angular em radianos por segundo [RAD/s] e t é o tempo em segundos [s].

A potência instantânea é obtida com o produto de tensão e corrente. Com esta grandeza é possível mensurar a quantidade de energia absorvida pela carga a qualquer instante. Com a equação (5) é possível obter o valor da potência instantânea de uma carga. (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

$$p(t) = v(t) \cdot i(t), \quad (5)$$

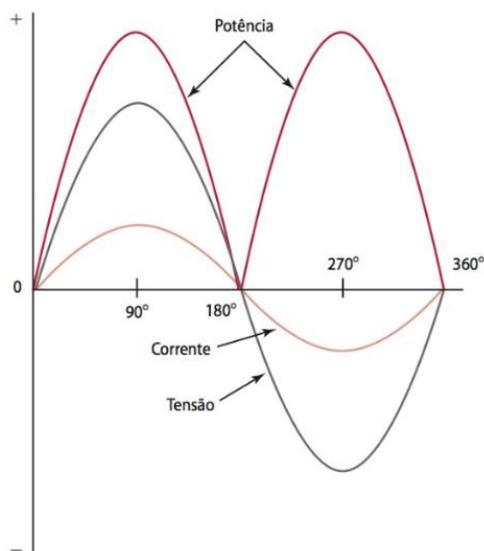
onde $p(t)$ é a potência instantânea em watts [W], $v(t)$ é a tensão instantânea em volts [V] e $i(t)$ é a corrente instantânea em amperes [A].

2.2 Potência

Quando uma carga resistiva é ligada a uma fonte CA a tensão e a corrente deste circuito estão em fase, o que significa que as ondas de tensão e corrente possuem o mesmo comportamento. (FOWLER, 2012).

Como a potência é o produto da tensão pela corrente, em circuitos elétricos CA com cargas resistivas é possível gerar a forma de onda da potência utilizando os valores de tensão e corrente instantâneos. Conforme ilustra a Figura 2, a potência elétrica de um circuito com carga puramente resistiva é sempre positiva, pois os valores de tensão e corrente sempre estão em fase. (FOWLER, 2012).

Figura 2 - Potência em cargas resistivas



Fonte: Fowler (2012, p. 234).

Para circuitos resistivos a equação (6) descreve a potência elétrica.

$$P = I \cdot V = I^2 \cdot R = \frac{V^2}{R}, \quad (6)$$

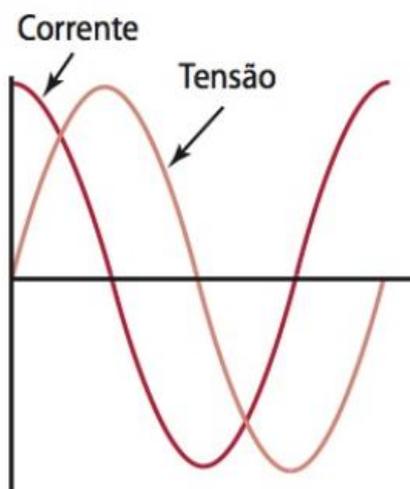
onde P é a potência elétrica em watts [W], I é a corrente elétrica em amperes [A], V é a tensão elétrica em volts [V] e R é a resistência em ohms [Ω].

Um circuito CA também pode ser constituído de cargas que não são puramente resistivas, quando circuitos possuem em sua construção capacitores ou indutores, estes circuitos passam a possuir uma reatância. (FOWLER, 2012).

A resistência e a reatância são grandezas que se opõem à circulação da corrente elétrica, a diferença entre elas é que em um circuito puramente resistivo não há defasagem do sinal de corrente em relação ao de tensão, e no circuito com reatância existe defasagem do sinal de corrente em relação ao sinal de tensão. A defasagem do sinal varia de acordo com o valor da reatância, quando um circuito possuir indutores ele terá reatância indutiva e quando um circuito possuir capacitores ele terá reatância capacitiva. (FOWLER, 2012).

Em um circuito puramente capacitivo a reatância faz com que a corrente fique adiantada 90° em relação a tensão, os sinais de tensão e corrente em um circuito puramente capacitivo são ilustrados na Figura 3. (FOWLER, 2012).

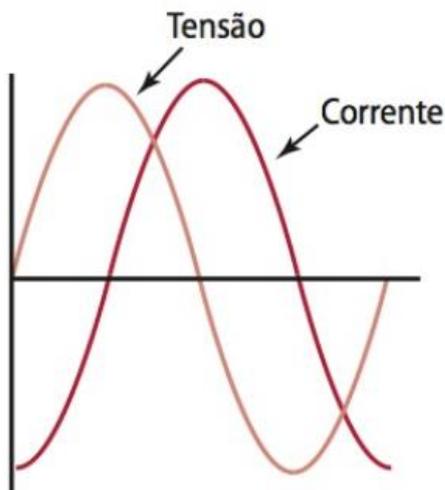
Figura 3 - Sinais de tensão e corrente em um circuito puramente capacitivo



Fonte: Fowler (2012, p. 235).

Em um circuito puramente indutivo a reatância faz com que a corrente fique atrasada 90° em relação a tensão, os sinais de tensão e corrente em um circuito puramente indutivo são ilustrados na Figura 4. (FOWLER, 2012).

Figura 4 - Sinais de tensão e corrente em um circuito puramente indutivo



Fonte: Fowler (2012, p. 235).

Um circuito também pode ter a combinação de resistência e reatância, o que diminui a defasagem entre tensão e corrente. Quanto maior a parcela da resistência em relação a reatância, mais próxima de zero será a defasagem entre os sinais. (FOWLER, 2012).

Em circuitos que possuem defasagem entre os sinais de tensão e corrente a sua potência não pode ser calculada com a equação (6). A defasagem faz com que a multiplicação dos sinais de tensão e corrente possa resultar em um valor negativo, o

que significa que a carga não está consumindo potência da fonte, mas sim devolvendo potência à esta fonte. (FOWLER, 2012).

A potência ativa é a parcela de potência que se transforma em trabalho, ela é a diferença entre a potência positiva e a potência negativa. Apenas circuitos resistivos consomem potência ativa, uma vez que toda a potência consumida pelo resistor é transformada em calor. Já em circuitos puramente indutivos ou capacitivos a potência ativa é zero, uma vez que toda a potência consumida pela reatância é devolvida para a fonte. (FOWLER, 2012).

A potência ativa P , é a potência em watts (W) entregue a uma carga durante um período de tempo, não podendo assumir valores negativos. (NAHVI, 2014). A potência ativa é definida pela equação (7).

$$P = V \cdot I \cdot \cos(\theta), \quad (7)$$

onde P é a potência ativa em watts [W], V é a tensão em volts [V], I é a corrente em amperes [A] e θ é a defasagem entre tensão e corrente em graus [°].

A potência reativa Q , é potência em volt-ampere reativo (VAr) que fica armazenada em indutores ou capacitores sendo devolvida para a fonte. O efeito líquido da potência reativa é nulo, porém ela auxilia na diminuição da qualidade de energia de sistemas elétricos. A potência reativa é definida pela equação (8). (NAHVI, 2014).

$$Q = V \cdot I \cdot \sin(\theta), \quad (8)$$

onde Q é a potência reativa em volt-ampere reativo [VAr], V é a tensão em volts [V], I é a corrente em ampères [A] e θ é a defasagem entre tensão e corrente em graus [°].

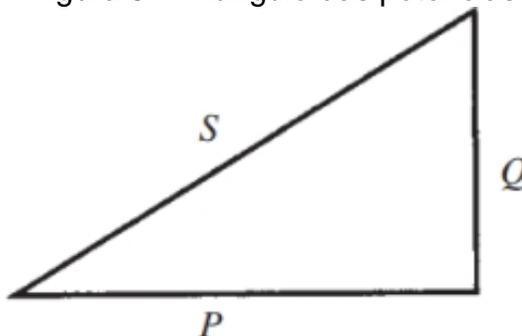
As componentes de potência ativa e reativa não podem ser somadas diretamente, pois possuem naturezas distintas, porém elas podem ser somadas vetorialmente obtendo a potência complexa. O módulo desta potência complexa é chamado de potência aparente que é expresso em volt-ampere (VA), definido pela equação (9). (NAHVI, 2014).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = V \cdot I, \quad (9)$$

onde S é a potência aparente em volt-ampere [VA], P é a potência ativa em watts [W] e Q é a potência reativa em volt-ampere reativo [VAr].

A Figura 5 ilustra as três grandezas escalares de potência representadas em um triângulo retângulo, onde S é o vetor da potência aparente, P é o vetor da potência ativa e Q é o vetor da potência reativa. (NAHVI, 2014).

Figura 5 - Triângulo das potências



Fonte: Nahvi (2014, p. 245).

2.2.1 Fator de Potência

O Fator de Potência (FP) é a razão entre potência ativa e potência aparente em um circuito elétrico. A equação (10) quantifica o fator de potência. (FOWLER, 2012).

$$FP = \frac{P}{S}, \quad (10)$$

onde FP é o fator de potência [adimensional], P é a potência ativa em watts [W] e S é a potência reativa em volt-ampere reativo [VAr].

O FP indica qual a porção de potência ativa que o circuito está consumindo, podendo variar de 0 (quando a potência ativa é nula) até 1 (quando a potência ativa é igual a potência aparente). Quando o circuito não possui defasagem entre tensão e corrente, o fator de potência é 1, e quando a defasagem entre os sinais é de 90° , o fator de potência é 0. (FOWLER, 2012).

De acordo com regulamentações vigentes no Brasil, em unidades consumidoras ou conexão entre distribuidoras que tenham tensão inferior a 230 kV, o fator de potência deve estar dentro dos limites de 0,92 e 1 indutivo ou entre 0,92 e 1 capacitivo. (PRODIST, 2017).

2.3 Qualidade de Energia

A qualidade da energia elétrica é aspecto importante em todas as partes do sistema elétrico de potência, e está diretamente ligada a qualquer alteração do padrão de energia gerada, podendo ser uma variação em amplitude, frequência, ruído e etc. No Brasil o sinal da rede elétrica deve manter seu formato senoidal com frequência constante de 60 Hz, uma vez que qualquer alteração que ocorra na onda pode ocasionar a falha ou redução de vida útil de equipamentos elétricos. (MARTINHO, 2013).

No que diz respeito à qualidade da energia em regime permanente ou transitório, o PRODIST (2018), estabelece valores limites para os seguintes fenômenos.

a) Permanente:

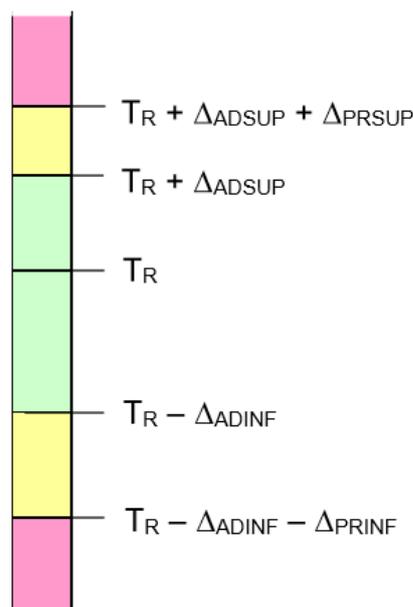
- i. tensão em regime permanente;
- ii. fator de potência;
- iii. harmônicos;
- iv. desequilíbrio de tensão;
- v. flutuação de tensão;
- vi. variação de frequência.

b) Transitório:

- i. variações de tensão de curta duração.

A tensão fornecida pela concessionária é classificada de acordo com faixas em torno de uma tensão de referência. Os valores da tensão são classificados dentro de três faixas: adequada, precária e crítica. A Figura 6 ilustra a classificação das faixas de tensão. (PRODIST, 2017).

Figura 6 - Faixas de classificação dos níveis de tensão



Fonte: PRODIST, (2018, p. 9).

De acordo com o PRODIST (2018), os valores da tensão de referência devem ser obtidos através da leitura de 1008 registros válidos, onde cada registro é o resultado da integralização das leituras realizadas em um período de 10 minutos.

Após a obtenção dos 1008 registros de leituras válidas, é possível calcular o índice de duração relativa da ultrapassagem da tensão precária (DRP), e da tensão crítica (DRC) por meio das equações (11) e (12). (PROSDIST, 2017).

$$DRP = \frac{nlp}{1008} * 100[\%], \quad (11)$$

onde DRP é o índice de duração relativa da ultrapassagem da tensão precária [%] e nlp é o número de leituras precárias.

$$DRC = \frac{nlc}{1008} * 100[\%], \quad (12)$$

onde DRC é o índice de duração relativa da ultrapassagem da tensão crítica [%] e nlc é o número de leituras críticas;

Os limites para estes indicadores são de 3% para o DRP , e de 0,5% para o DRC . Em caso destes limites serem ultrapassados, a concessionária de energia deve compensar os consumidores que estão ligados ao ponto de conexão onde a tensão não estiver adequada. (PRODIST, 2017).

De acordo com o PRODIST (2018), as faixas de tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (380 V/220 V) em regime permanente são classificadas como adequada, precária e crítica, de acordo com a tensão de leitura (TL), conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação das faixas de tensão (380 V / 220 V).

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399) / (202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL < 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403) / (191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403) / (TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: adaptado de PRODIST (2018).

Também de acordo com o PRODIST (2018), as faixas de tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (220 V/127 V) em regime permanente são classificadas como adequada, precária e crítica, de acordo com a tensão de leitura (TL), conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação das faixas de tensão (220 V / 127 V).

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233) / (110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$

Fonte: adaptado de PRODIST (2018).

Ainda de acordo com o PRODIST (2018), a frequência da rede deve permanecer em regime permanente dentro dos limites de 59,9 Hz e 60,1 Hz. Caso ocorra algum distúrbio, as instalações de geração deverão retornar para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz em no máximo 30 segundos, além disso, será necessário realizar o corte da distribuição se a frequência estiver nas seguintes faixas:

- a) Frequência superior a 66 Hz ou inferior a 56,5 Hz;
- b) Frequência superior a 62 Hz por mais de 30 segundos ou superior a 63,5 Hz por mais de 10 segundos;
- c) Frequência inferior a 58,5 Hz por mais de 10 segundos ou inferior a 57,5 Hz por mais de 5 segundos.

2.4 Instrumentação

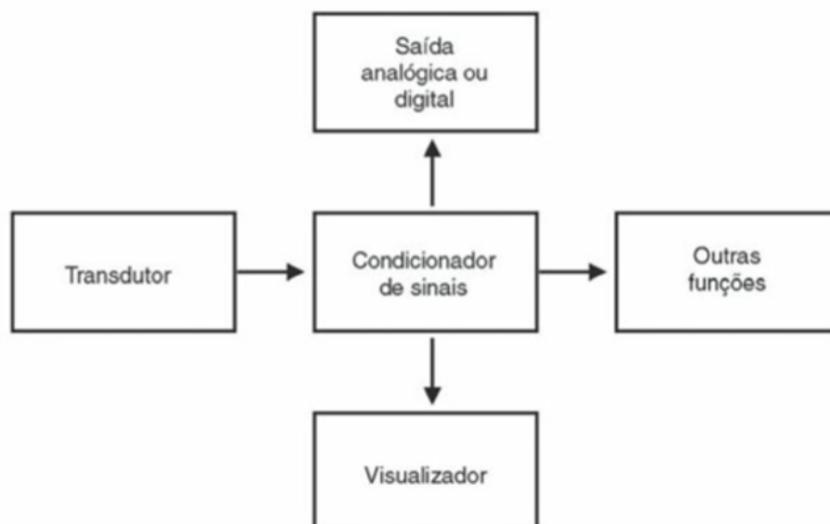
A instrumentação é a ciência que estuda a medição de grandezas em qualquer processo, ela é utilizada nas mais diversas áreas, podendo medir tanto grandezas físicas quanto elétricas. Os conceitos de instrumentação estão presentes nos mais diversos processos, em uma residência medindo a tensão elétrica, em uma hidrelétrica medindo a velocidade de uma turbina, em uma termelétrica medindo a pressão do vapor e etc. A possibilidade de realizar a quantificação das grandezas permite que seja possível determinar padrões, referenciar unidades e controlar os mais diversos processos. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010).

Sensores são dispositivos que utilizam os conceitos de transferência de energia para medirem grandezas, eles são capazes de captar variações de energia e convertê-las para um sinal de saída. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010).

Transdutores são dispositivos que realizam a conversão de energia convertendo o sinal de uma grandeza física em outra. São muito utilizados na instrumentação eletrônica, onde convertem sinais de grandezas físicas em grandezas elétricas, possibilitando que processos sejam controlados por sistemas eletrônicos. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010).

Circuitos condicionadores convertem os sinais de saída de sensores ou transdutores em sinais elétricos apropriados, para que instrumentos consigam realizar a medição destes sinais. Estes circuitos podem possuir em sua construção amplificadores, fontes de tensão, fontes de corrente, filtros, entre outros. Muitas vezes os circuitos condicionadores são tratados por dispositivos programáveis como microcontroladores, o que permite a criação de diversas funções para o controle de processos. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010).

Figura 7 - Componentes de um instrumento de medição

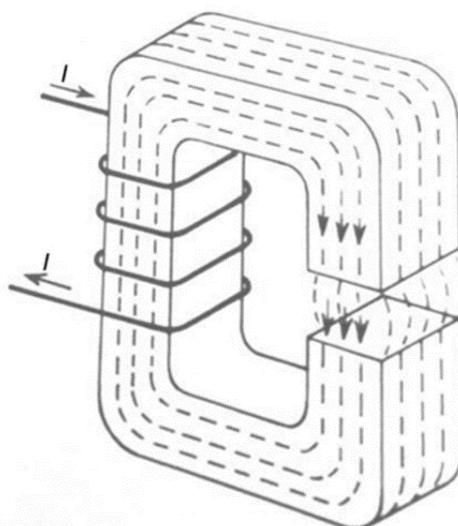


Fonte: Balbinot; Busamarelo (2010, p. 14).

2.4.1 Transformadores

Transformadores são circuitos que possuem um núcleo formado por um material magnético em formato geométrico e bobinas de material condutor que circundam o núcleo. Ao injetar corrente na bobina, um fluxo magnético é induzido em todo o núcleo do transformador, criando um circuito magnético que é ilustrado pela Figura 8. (RASHID, 2015).

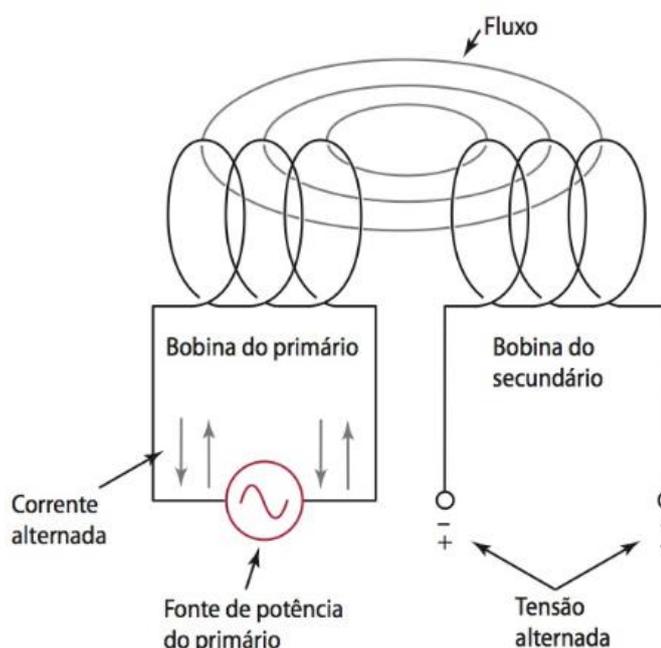
Figura 8 - Circuito magnético criado no núcleo de um transformador



Fonte: Adaptado de Rashid (2015)

Os transformadores transferem a energia de um circuito para outro através do campo magnético que é criado entre as bobinas. Devido a indutância mútua, quando uma corrente é aplicada no enrolamento primário ela cria um fluxo magnético no núcleo que se liga ao enrolamento secundário induzindo tensão no mesmo. O princípio de funcionamento de um transformador é ilustrado pela Figura 9. (RASHID, 2015).

Figura 9 - Princípio de funcionamento do transformador



Fonte: Fowler (2012, p. 412).

Em transformadores de potencial ou TP a tensão do enrolamento secundário está relacionada com a diferença do número de espiras entre o primário e secundário, podendo ser obtida pela equação (13). (RASHID, 2015).

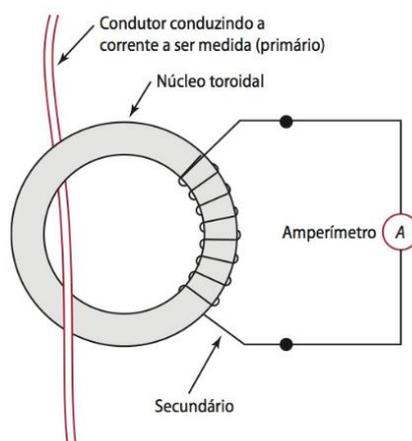
$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (13)$$

onde V_p é a tensão no enrolamento primário em volts [V], V_s é a tensão no enrolamento secundário em volts [V], N_p é o número de espiras do primário e N_s é o número de espiras do secundário.

Transformadores de potencial podem ser utilizados tanto para aumentar quanto rebaixar a tensão do primário, permitindo que eles sejam utilizados para amplificação ou atenuação de sinais, sem que o sinal do primário perca suas características.

O transformador de corrente ou TC é um transformador que possui núcleo toroidal e não possui em sua construção o enrolamento primário, apenas um ou mais enrolamentos secundários. Quando um condutor é inserido no núcleo do TC ele torna-se o enrolamento primário do transformador, induzindo corrente no enrolamento secundário e através da sua ação transformadora a corrente no secundário terá menor amplitude, porém será proporcional a corrente do condutor. Os componentes de um transformador de corrente são ilustrados na Figura 10. (FOWLER, 2012).

Figura 10 - Princípio de funcionamento de um transformador de corrente



Fonte: Fowler (2012, p. 412).

A corrente do secundário está relacionada com a diferença do número de espiras entre o primário e secundário, e como o primário dos TCs é formado pelo condutor cuja corrente deseja-se medir, a corrente no secundário pode ser obtida com a equação (12).

$$i_s = \frac{i_c}{N'} \quad (12)$$

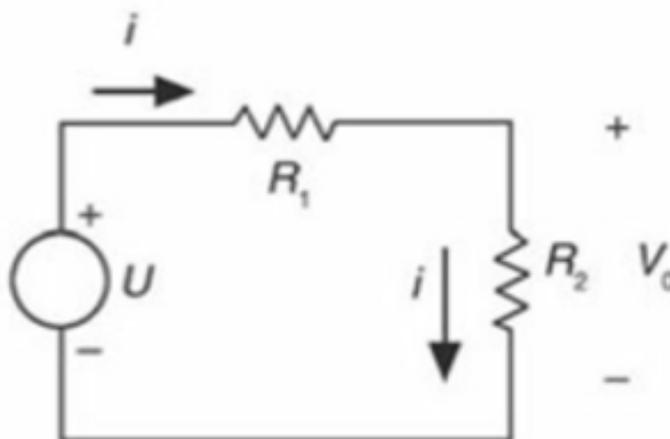
onde i_s é a corrente no secundário em amperes [A], i_c é a corrente no condutor em amperes [A] e N' é o número de espiras do TC.

2.4.2 Divisor de tensão

A lei de Kirchhoff das tensões estabelece que o somatório das quedas e elevações de tensão em um circuito de malha fechada deve ser zero. O divisor de tensão, como ilustrado na Figura 11, é um circuito que leva os conceitos da lei de Kirchhoff e pode ser utilizado na obtenção de um sinal de tensão com nível mais baixo

proporcional a um sinal de tensão com nível mais elevado. (BALBINOT, BRUSAMARELLO, 2010).

Figura 11 - Circuito de malha fechada



Fonte: Balbinot, Busamarelo (2010, p. 99).

A tensão V_0 do circuito ilustrado pela Figura 11 pode ser calculada com a equação do divisor de tensão utilizando a equação (13).

$$V_0 = U \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_1} \quad (13)$$

onde V_0 é a tensão no resistor R_2 em volts [V], U é a tensão da fonte em volts [V], R_1 é a resistência do resistor R_1 em ohms [Ω] e R_2 é a resistência do resistor R_2 em ohms [Ω].

2.5 Leitura e Processamento de Sinais

Sinal contínuo ou analógico é caracterizado pela variação contínua de sua grandeza em um determinado espaço de tempo, possuindo infinitos valores de amplitude no decorrer deste tempo. Um exemplo de sinal analógico é o sinal da tensão da rede elétrica, onde é possível obter uma amostra do sinal com amplitude diferente em cada instante de tempo. Sinais analógicos não podem ser processados digitalmente, pois possuem infinitos pontos com o decorrer do tempo. A manipulação digital de um sinal só pode ocorrer caso este sinal seja discretizado. (NALON, 2009).

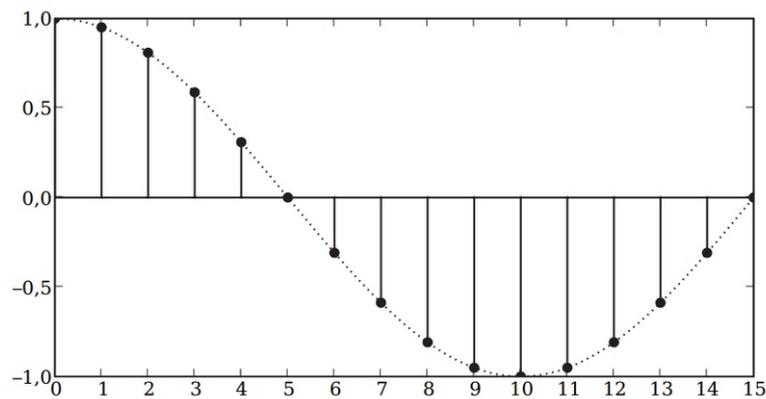
Sinais discretos possuem valores de amplitude apenas em valores específicos de seu domínio, o que faz com que o sinal possua um número finito de pontos podendo ser representado por uma sequência de números. Os pontos de um sinal analógico podem ser obtidos diretamente com a utilização da equação (14). (NALON, 2009).

$$x[n] = x_c(nT_a), \quad (14)$$

onde $x[n]$ é a amplitude da amostra discreta, x_c é a função contínua no tempo e T_a é o período de amostragem.

Um sinal discretizado deixa de ser infinito e passa a ter um número inteiro de amostras, possibilitando que um processador salve os valores destas amostras em vetores na sua memória e realize o processamento deste sinal. A representação gráfica de um sinal discreto e sua função contínua original é ilustrada pela Figura 12. (NALON, 2009).

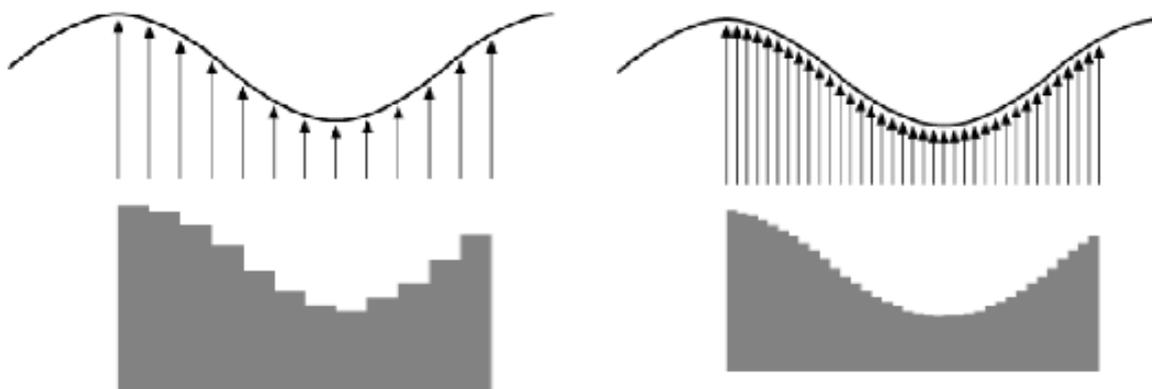
Figura 12 - Discretização do sinal pontilhado



Fonte: Nalon (2009, p. 6).

A discretização do sinal é também conhecida como amostragem, onde amostras deste sinal passam a ser obtidas em um intervalo específico de tempo chamado período de amostragem. A inversa do período de amostragem é conhecida como frequência ou taxa de amostragem. De acordo com o teorema de amostragem de Nyquist, para que seja possível recuperar um sinal, a taxa de amostragem deve ser pelo menos 2 vezes maior do que a frequência máxima deste sinal, pois com taxas de amostragem menores haverá distorção de aliasing e não será possível realizar a reconstrução deste sinal. O aumento da taxa de amostragem resulta em maior exatidão na reconstrução do sinal, conforme ilustra a Figura 13. (CATSOULIS, 2005).

Figura 13 - Reconstrução de um sinal com diferentes taxas de amostragem



Fonte: Catsoulis (p. 295).

Com a aquisição das amostras dos sinais elétricos de tensão e corrente, é possível processar digitalmente estes sinais e realizar cálculos para obtenção dos valores de tensão RMS (*Root Mean Square*), corrente RMS, potência ativa, potência reativa, potência aparente e consumo. (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

A tensão RMS pode ser obtida com o processamento digital do sinal por meio da equação (15). (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

$$V_{rms} = K_v \cdot \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{amostras} V(n)^2}{amostras}}, \quad (15)$$

onde V_{rms} é a tensão RMS em Volts [V], K_v é o fator de escala da tensão, $V(n)$ é a amostra n de tensão em Volts [V] e $amostras$ é o número total de amostras.

A corrente RMS pode ser obtida com o processamento digital do sinal por meio da equação (16). (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

$$I_{rms} = K_i \cdot \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{amostras} I(n)^2}{amostras}}, \quad (16)$$

onde I_{rms} é a corrente RMS em Ampères [A], K_i é o fator de escala da corrente, $I(n)$ é a amostra n de corrente em Ampères [A] e $amostras$ é o número total de amostras.

Novamente utilizando as amostras de tensão e corrente e realizando o processamento digital do sinal, é possível calcular as potências ativa, reativa e aparente. Para realizar estes cálculos as equações (17), (18) e (19) podem ser utilizadas. (TEXAS INSTRUMENTS, 2016).

Para o cálculo da potência ativa a equação (17) pode ser utilizada.

$$P = K_{ativa} \cdot \frac{\sum_{n=1}^{amostras} V(n) \cdot I(n)}{amostras}, \quad (17)$$

onde P é a potência ativa, K_{ativa} é o fator de escala da potência ativa, $V(n)$ é a amostra n de tensão, $I(n)$ é a amostra n de corrente, $amostras$ é o número de amostras.

Para o cálculo da potência aparente a equação (18) pode ser utilizada.

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms}, \quad (18)$$

onde S é a potência aparente em Volt-Ampère [VA], V_{rms} é a tensão RMS em Volts [V], I_{rms} é a corrente RMS em Ampères [A].

E para o cálculo da potência reativa a equação (19) pode ser utilizada.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (19)$$

onde Q é a potência reativa em Volt-Ampère reativo [VAR], S é a potência aparente em Volt-Ampère [VA], P é a potência ativa em Watts [W].

2.6 Microcontrolador

Microcontrolador é um circuito integrado que possui processador, memória e periféricos de entrada e saída interligados por barramentos. Microcontroladores podem ser programados e são muito utilizado na área de sistemas embarcados, além disso, eles possuem subsistemas que adicionam funcionalidades para o processador, permitindo o seu uso nas mais diversas aplicações. (CATSOULIS, 2005).

A programação que fica armazenada na memória de um microcontrolador sendo responsável por inicializar os periféricos e configurar o sistema para sua correta operação é conhecida como *firmware*. (CATSOULIS, 2005).

Neste capítulo serão apresentadas diversas funcionalidades de microcontroladores que serão utilizadas no desenvolvimento deste protótipo.

2.6.1 Conversor Analógico Digital (ADC)

Um dispositivo que consegue converter um valor de tensão de uma entrada analógica para um número digital é conhecido como conversor analógico digital (ADC). Existem diversas topologias de ADCs e cada uma converte o sinal de uma maneira diferente. (CATSOULIS, 2005).

O ADC integrador utiliza um oscilador com tensão controlada para produzir um *clock*, cuja frequência altera o valor de um contador que é proporcional a tensão que

está sendo medida. Este tipo de ADC não possui grande velocidade de conversão. (CATSOULIS, 2005).

O ADC de aproximações sucessivas utiliza um conversor digital analógico para criar uma tensão de referência que é comparada ao sinal analógico de tensão, gerando um valor digital incrementado até que a tensão de referência seja igual ao valor de tensão do sinal analógico. Quando os valores analógicos de tensão forem iguais, o valor digital será o resultado da conversão do sinal analógico. (CATSOULIS, 2005).

O *Flash* ADC utiliza diversos comparadores para realizar a comparação do sinal analógico de entrada com vários sinais de referência, conseguindo realizar a conversão do sinal em pouco tempo. É um sistema de conversão com maior complexidade, e geralmente possui menor resolução do que outras topologias. (CATSOULIS, 2005).

Os ADCs possuem dois atributos principais, *sample rate* e resolução, onde *sample rate* é o número de amostras analógicas por segundo que o ADC consegue converter para digital, e resolução é a exatidão na qual o resultado digital se aproxima da tensão analógica. A resolução de um ADC é dada em bits e quanto maior este valor alcançar, maior será o número de valores digitais que ADC consegue converter, o que melhora sua exatidão. (CATSOULIS, 2005).

Por exemplo, um conversor de 12 bits consegue chegar a 4096 valores digitais e um conversor de 10 bits chega até a 2048 valores digitais. A equação (20), converte o número de bits no número de amostras digitais que o ADC consegue converter.

$$\text{Amostras digitais} = 2^n, \quad (20)$$

onde *Amostras digitais* é o número de valores digitais que o ADC consegue converter e *n* é o número de bits;

2.6.2 Memória de Acesso Direto (DMA)

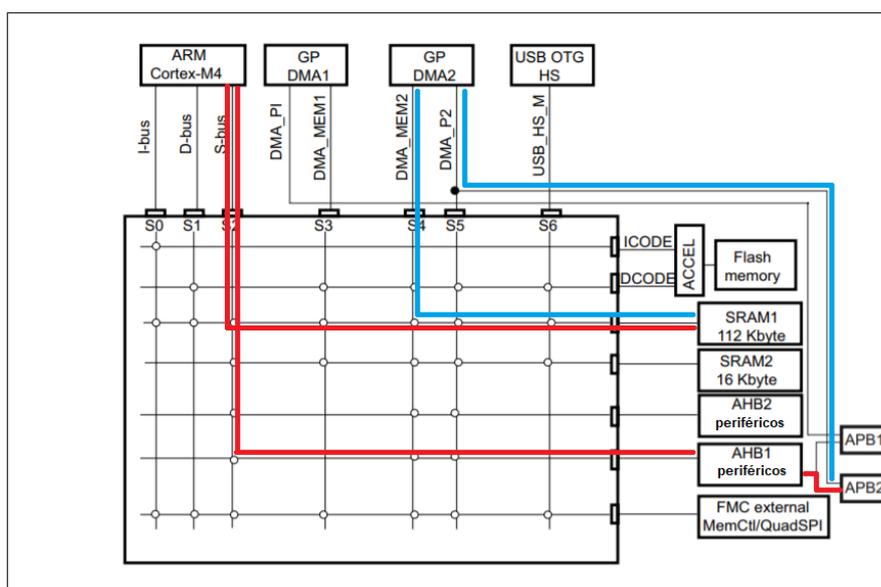
Memória de acesso direto (*direct memory access* ou DMA) é uma forma otimizada de realizar a transferência de dados entre seções da memória ou entre periféricos e a memória, sem a necessidade de envolvimento contínuo do processador, sendo muito utilizada em sistemas que necessitam uma alta taxa de transferência de dados. (CATSOULIS, 2005).

Para que um registro seja salvo na memória ou transferido de um local da memória é preciso que este registro acesse o destino onde ficará salvo, podendo ser realizado de duas maneiras. A primeira maneira é utilizando o processador que irá ler um *byte* de cada vez do registro, gerando diversas instruções para salvar este registro no local apropriado da memória. A segunda maneira é utilizando a DMA que possui conexão direta entre o canal de entrada e saída e a memória do dispositivo, o que permite que os dados sejam gravados na memória sem a necessidade de instruções para executar a transferência dos dados, tornando a transferência de dados muito mais rápida e sem interferir no processamento. (CATSOULIS, 2005).

A transferência de dados pela DMA apenas ocorre quando o controlador da DMA possui o endereço onde o registro deve ser salvo e o acesso ao barramento que leva ao periférico que possui o registro. Cada processador possui uma construção diferente, porém a forma mais simples de acessar o periférico que possui o registro é realizando uma requisição ao processador para acessar ao barramento, e quando esta requisição for atendida o controlador da DMA toma o controle do barramento realizando a transferência dos dados para a memória. (CATSOULIS, 2005).

A Figura 14 ilustra a transferência de um registro do periférico APB2 até a memória SRAM1. Em vermelho está o caminho para realizar a transferência do registro com a utilização do processador, onde é necessário que ele passe duas vezes pelo mesmo barramento, respeitando as instruções do processador de carregamento e gravação do registro. Em azul o caminho para realizar a transferência do registro pela DMA, onde um barramento interliga o APB2 até a DMA2 permitindo que os registros sejam salvos diretamente na memória SRAM1, sem a necessidade de instruções do processador.

Figura 14 - Matriz de barramentos



Fonte: Adaptado de ST (2018, p. 54).

2.6.3 Interrupções

Uma interrupção é um evento externo que faz com que o processador pare a execução do código corrente para executar outro trecho do código, diversos eventos externos podem causar uma interrupção, como a falha de um periférico ou o término de uma operação de entrada ou saída. (CATSOULIS, 2005).

As interrupções servem para que o processador não precise ficar verificando constantemente os dispositivos periféricos, e possa executar suas tarefas sem desperdiciar tempo desnecessário. Sempre que um periférico necessitar a atenção do processador ele gera uma interrupção que possui uma prioridade, interrupções com maiores prioridades sempre executem primeiro e podem parar a execução de uma interrupção de menor prioridade. (CATSOULIS, 2005).

Sempre que uma interrupção ocorre, o processador salva todos os dados da tarefa na qual ele está trabalhando antes de executar a interrupção, desta maneira o processo que estava ocorrendo não sofre nenhum prejuízo além do tempo de execução da interrupção. (CATSOULIS, 2005).

2.6.4 Processador

O Cortex-M4 é um processador desenvolvido para soluções flexíveis. O processador conta com um sistema de processamento digital de sinais eficiente,

diversas formas de controle, baixo custo e baixo consumo de energia. Algumas de suas características são: Armv7-M Harvard, um pipeline de 3 estágios, além de possuir a biblioteca CMSIS-DSP, que possui um conjunto de funções matemáticas e de processamento de sinal comuns, que são otimizadas para o processador Cortex-M4. (ARM, 2017).

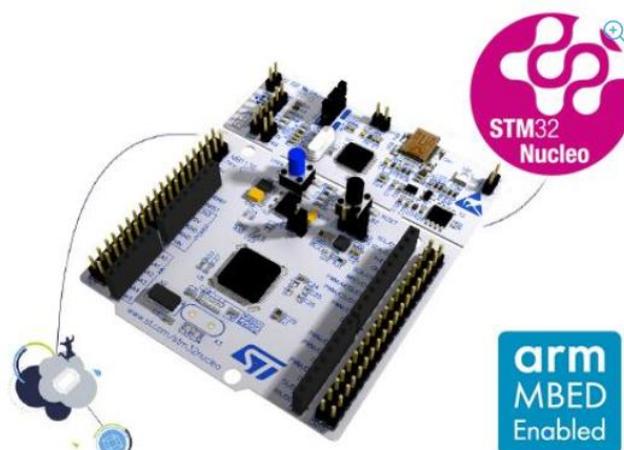
2.6.5 NUCLEOF446-RE

O NUCLEOF446-RE da *ST Microelectronics*® é um *kit* de desenvolvimento bastante flexível. Ele possui um processador ARM CORTEX-M4 possuindo todas as características citadas na seção 2.6.4. (ST, 2018).

Segundo a ST (2018), algumas das características deste *kit* são:

- a) Frequência de 84 MHz;
- b) Memória de programa de 512 kB;
- c) 16 canais ADC com resolução de 12 bits;
- d) Faixa de operação do conversor ADC de 0 V a 3,3 V;
- e) DMA (*direct memory access*);

Figura 15 - Kit NUCLEOF446-RE.



Fonte: ST (2018).

2.6.6 ESP32

O chip ESP32 da empresa Espressif® é um dispositivo que possui antena Wi-Fi integrada, desenvolvido para projetos de *internet of things* que necessitam um chip

de tamanho pequeno, com consumo eficiente e desempenho confiável. (ESPRESSIF, 2019).

O ESP32 possui inúmeros recursos e pode operar de forma independente ou como adaptador Wi-Fi de outro microcontrolador, utilizando as interfaces de comunicação SPI ou UART. O chip possui um alto desempenho e sua memória cache de alta velocidade otimiza o uso da memória do sistema. (ESPRESSIF, 2019).

O ESP32 possui um design bastante compacto mesmo já possuindo antena integrada, suportando o padrão 802.11 b/g/n para comunicação *ethernet*. (ESPRESSIF, 2019).

2.7 Wi-Fi

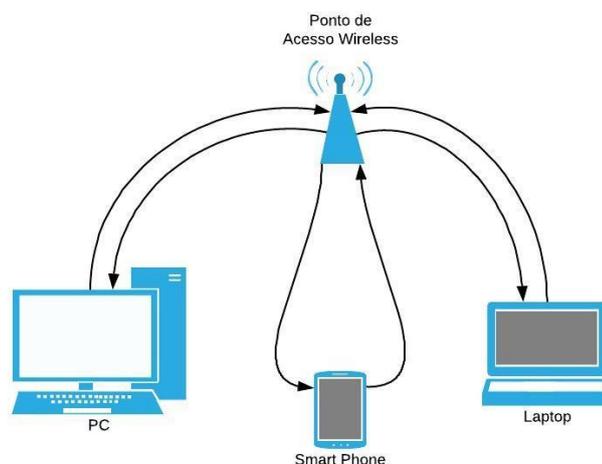
Em 1987 foi fundado o grupo IEEE 802.11 Wireless LAN para desenvolver a padronização das redes locais sem fio. Neste grupo foi desenvolvido o padrão de rede DS-SS IEEE 802.11b, que posteriormente foi chamado de Wi-Fi. (DIAS, 2016).

O IEEE 802.11b é um padrão de comunicação para redes sem fio que opera em faixas de frequência de 2,402 GHz até 2,483 GHz, e consegue transferir dados em uma taxa de 5,5 Mbps até 11 Mbps. Este padrão foi desenvolvido para operar em altas velocidades e curto alcance, realizando a conexão de smartphones, computadores, tablets e etc. Com o passar dos anos, novos padrões de comunicação foram desenvolvidos, aumentando a taxa de transferência de dados e o alcance das redes sem fio. (DIAS, 2016).

Existem duas topologias suportadas pela IEEE 802.11, são elas a infraestrutura, que é um grupo de dispositivos que estão no alcance de um ponto de acesso responsável por controlar a transmissão e recebimento de dados. E a Ad Hoc onde os dispositivos podem se comunicar entre si sem utilização de uma estação para realizar o controle. (DIAS, 2016).

A topologia de rede sem fio mais utilizada atualmente é a infra-estruturada, esta topologia possui um ou mais pontos de acesso que atuam como ponte entre a internet e a rede sem fio local. Sempre que um dispositivo se conecta à rede, ele fica associado a um ponto de acesso e é através deste ponto que este dispositivo se comunica com a rede externa. Para continuar conectado na rede sem fio o dispositivo não pode sair da área de alcance do ponto de acesso. (DIAS, 2016).

Figura 16 - Topologia de rede infra-estruturada



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.8 Servidor Local

A rede mundial de computadores possui um vasto grupo de servidores, que são computadores responsáveis apenas por fornecer informações quando estas são requeridas pelos navegadores de internet. Pode-se dizer que a *web* opera com o modelo cliente-servidor, onde os navegadores de internet são os clientes e os servidores são os computadores que fornecem as informações a estes navegadores. (SUEHRING; VALADE, 2013).

Quando um navegador acessa à uma página ele contata ao servidor para obter os arquivos necessário para fazer a construção desta página ao usuário. O servidor hospeda imagens, vídeos e os arquivos que contém a programação da página *web*, além disso, PHP e MySQL necessitam de um servidor *web* para enviar informações às páginas. Todas estas informações são enviadas por meio do protocolo *HyperText Transfer Protocol*, ou HTTP. (SUEHRING; VALADE, 2013).

Utilizando um computador doméstico é possível criar um servidor local que possui as mesmas características de um servidor *web*, o que permite que páginas sejam testadas sem a necessidade de estarem ativas para os usuários em geral. A única limitação deste servidor é que apenas dispositivos conectados na mesma rede do servidor possuem acesso, porém o servidor local possui todas as ferramentas necessárias para a criação e funcionamento de páginas *web*. (SUEHRING; VALADE, 2013).

O XAMPP é um programa gratuito que possui os principais servidores de código aberto do mercado, incluindo MySQL e Apache com suporte à diversas linguagens de programação. Com o XAMPP é possível criar um servidor web local que permite ao usuário o desenvolvimento de páginas web e o salvamento de registros em um banco de dados, simulando um servidor web real. (XAMPP, 2019).

2.81 Banco de Dados

Bancos de dados são amplamente utilizados em aplicações em que se necessita disponibilizar informações ao usuário, ou para salvar informações fornecidas pelo usuário. (SUEHRING; VALADE, 2013).

As informações de um banco de dados são salvas em uma ou mais tabelas, sendo sempre necessário criar o banco de dados para posteriormente criar tabelas e adicionar registros nelas. As tabelas que são criadas em bancos de dados possuem as mesmas características de qualquer tabela, onde cada linha representa os diversos registros, e cada coluna possui a informação referente a um registro. (SUEHRING; VALADE, 2013).

MySQL é um sistema de gerenciamento de banco de dados que utiliza a linguagem SQL, este sistema foi desenvolvido para responder rapidamente e utilizar pouca memória, sendo amplamente utilizado em páginas *web*. Para o funcionamento do MySQL é necessário um servidor que gerencia o sistema de banco de dados, onde é possível passar instruções para criação de novos bancos de dados e novas tabelas que serão alocadas em sua memória. Para adicionar, modificar ou excluir registros, também é necessário passar uma instrução com o que deve ser feito ao servidor. (SUEHRING; VALADE, 2013).

O servidor MySQL possibilita que diversos bancos de dados possam ser acessados ao mesmo tempo, o que possibilita que diversos usuários possuam diferentes tabelas em apenas um servidor. (SUEHRING; VALADE, 2013).

2.8.2 JavaScript

Javascript é uma linguagem de programação muito poderosa utilizada na automatização de tarefas por meio de *scripts* estruturados com tempo de execução especial. Atualmente a grande maioria de sites utiliza esta linguagem de programação

para que as páginas fiquem automatizadas, adicionando recursos para melhorar a experiência do usuário ao utilizar páginas da *web*. (SUEHRING; VALADE, 2013).

Os códigos programados em Javascript rodam no navegador que está acessando a uma página *web*, assim esta página consegue interagir com o usuário sem a necessidade de acessar todo o tempo ao servidor. Só há uma ressalva na utilização da linguagem Javascript, como ela roda em navegadores, sua funcionalidade pode estar comprometida quando versões muito antigas são utilizadas. (SUEHRING; VALADE, 2013).

2.8.3 PHP

PHP ou *Hypertext Preprocessor* é uma linguagem de programação de código aberto, amplamente utilizada para o desenvolvimento de páginas *web*. PHP é uma linguagem que pode ser embarcada na programação HTML (*Hypertext Markup Language*), permitindo que além da parte gráfica as páginas possuam funcionalidade. (SUEHRING; VALADE, 2013).

Diferentemente da linguagem Javascript, PHP roda no lado do servidor *web* e não no navegador do usuário que está acessando a página. A linguagem PHP é responsável por gerar o HTML que é requisitado pela página *web*, além disso, o PHP permite que certas funcionalidades sejam adicionadas aos scripts HTML, como por exemplo, obter informações de um banco de dados. (SUEHRING; VALADE, 2013).

2.9 Sistemas Supervisórios

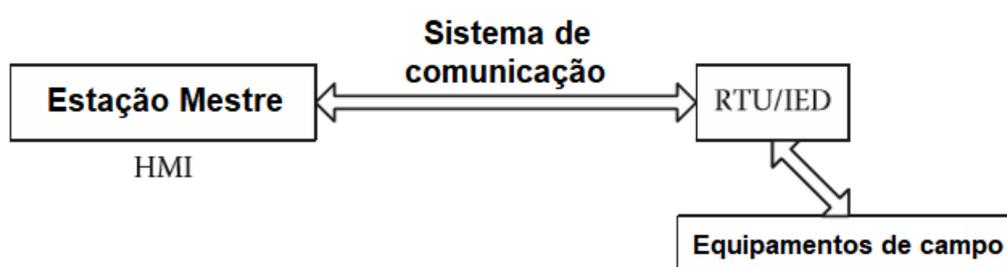
Sistemas de supervisão e controle (SCADA) são amplamente utilizados na área de automação aplicada para sistemas de energia, e cada vez mais novos produtos e serviços deste gênero estão sendo criados. Os sistemas SCADA são um grupo de dispositivos que realizam o monitoramento de processos e equipamentos, possibilitando que operadores acompanhem o processo remotamente, e muitas vezes possam interceder no processo por meio de um sistema supervisório operado de forma remota. (THOMAS; MCDONALD, 2015).

Os SCADAs devem ser capazes de coletar dados de equipamentos e realizar a conversão destes dados para transmiti-los a um servidor central, onde poderão ser tratados e disponibilizados em uma tela para o acompanhamento do usuário. O uso

de sistemas SCADA traz inúmeros benefícios, pois são capazes de aumentam a confiabilidade do sistema, diminuir os custos de operação e manutenção, reduzir erros humanos, possibilitar que decisões sejam tomadas em baixíssimo tempo e etc. (THOMAS; MCDONALD, 2015).

Para o funcionamento de um sistema SCADA são necessários ao menos quatro componentes. O primeiro é a estação de controle remoto (RTU), nela são realizadas coletas dos dados de equipamentos, para posteriormente serem enviadas à estação de controle. O segundo é a comunicação entre dispositivos, por meio dela os dados podem ser enviados da estação remota até a estação de controle e vice-versa. O terceiro componente é a estação de controle ou mestre que pode realizar a leitura, processamento e envio de dados, atuando como o cérebro dos sistemas SCADA. E o quarto componente é a interface homem-máquina (IHM), onde os dados são disponibilizados ao usuário, permitindo que o processo seja acompanhado e possibilitando a realização de iterações no processo. (THOMAS; MCDONALD, 2015).

Figura 17 - Componentes dos sistemas SCADA



Fonte: Adaptado de Thomas; Mcdonald (2015, p.6.)

2.9.1 Unidade Terminal Remota (RTU)

As unidades terminais remotas são os periféricos do sistema SCADA, são elas que realizam a leitura de dados de dispositivos como sensores, transdutores, atuadores, entre outros. Antigamente estas unidades eram apenas escravas da estação mestre, porém com o avanço na tecnologia, cada vez mais elas são equipadas com microcomputadores e equipamentos que otimizam suas funções. As RTUs podem coletar informações de equipamentos, enviar informações à unidade mestre, processar dados e receber comandos para interferir nos processos. (THOMAS; MCDONALD, 2015).

As RTUs possuem diversos componentes para realizarem suas tarefas de monitoramento e controle. Um deles é a comunicação com a rede do sistema que possibilita o envio das informações coletadas, o recebimento das informações da central de controle e a interpretação das mesmas. Outro componente da RTU é o seu sistema lógico, ele permite que diversas operações sejam realizadas sem a necessidade de comunicação com o mestre, permitindo que informações sejam processadas remotamente, otimizando o processo. A comunicação com dispositivos terminais também é componente das RTUs, por meio dela componentes eletrônicos podem se comunicar com a estação mestre, enviando dados físicos sem que elas estejam em ambientes hostis. (THOMAS; MCDONALD, 2015).

O funcionamento das RTUs também depende de uma fonte de alimentação, que pode ser tanto em corrente contínua quanto em corrente alternada, de acordo com o equipamento que está sendo usado. Com o aumento da tecnologia, as RTUs passaram a possuir sistemas de interface homem-máquina integrados, que mostram os valores das variáveis do processo, melhorando o entendimento do operador em relação ao processo que está sendo executado. (THOMAS; MCDONALD, 2015).

Os dispositivos eletrônicos inteligentes (IED) possuem um ou mais processadores que podem enviar ou receber informações de dispositivos externos, permitindo uma maior integração ao sistema, e possuindo maior gama de funções em relação a uma RTU comum. Esses sistemas são muito utilizados na área da automação e podem ser os sucessores das RTUs. (THOMAS; MCDONALD, 2015).

2.9.2 Unidade Mestre

A unidade mestre é responsável por todo o controle dos sistemas SCADA e pode ser composta por um ou mais computadores que atuam como servidores na execução de diferentes tarefas. A unidade mestre se comunica com as RTUs e IHMs, processa dados, salva registros e etc. Além da parte de *hardware* as unidades mestre possuem componentes de *software*. (THOMAS; MCDONALD, 2015).

Algumas das funções básicas desempenhadas pelo *software* da estação mestre são a aquisição de dados e controle de processos, a utilização de bancos de dados para salvar e gerenciar informações, a possibilidade de criar alarmes por meio de condições programáveis, a comunicação com a interface homem-máquina, entre outras. Os sistemas SCADA geralmente podem ser programáveis de acordo com as

necessidades do usuário, permitindo que o sistema seja adaptável com as funcionalidades necessárias para os processos. (THOMAS; MCDONALD, 2015).

2.9.3 Interface Homem-Máquina (IHM)

As interfaces homem-máquina são dispositivos que realizam a iteração entre os operadores e o sistema em geral. As IHMs permitem um acompanhamento e controle do sistema a partir das informações que são recebidas da estação mestre, auxiliando o operador em sua tomada de decisão. O principal objetivo da utilização destes dispositivos é a facilidade na operação, onde, com poucos comandos o operador consegue controlar o processo desejado. Para que seu funcionamento seja ainda mais efetivo, estes sistemas devem possuir telas intuitivas e eficientes, facilitando o entendimento do operador e aumentando seu rendimento. (THOMAS; MCDONALD, 2015).

O aumento na tecnologia proporcionou às IHMs melhores opções de *hardware* e *software*, aumentando a eficiência destes sistemas e tornando sua operação bastante amigável. Geralmente as IHMs são telas *touch-screen* ou computadores que possuem comunicação com a unidade mestre, possibilitando que o operador controle um processo que possui diversas etapas através de um único toque. (THOMAS; MCDONALD, 2015).

Os *softwares* das IHMs podem possuir diversas funcionalidades para aumentar a confiabilidade e trazer informações com maior clareza. Algumas delas são o controle de acesso para proteger o sistema de pessoas não autorizadas. *Softwares* com elevado nível de detalhamento trazendo mais clareza para as informações através de gráficos intuitivos. Histórico de informações das operações que podem auxiliar em operações futuras. Alarmes programáveis para alertar sobre falhas no processo, limites de grandezas ultrapassados, etapas do processo concluído e etc. (THOMAS; MCDONALD, 2015).

2.9.4 Comunicação

A comunicação é a espinha dorsal dos sistemas SCADA, por meio dela a unidade mestre consegue obter informações sobre os dispositivos de campo, possibilitando que o monitoramento e controle de equipamentos possa ser realizado

em tempo real e de forma remota. Os sinais que são lidos por sensores e chegam até as unidades terminais são convertidos para sinais digitais, e por meio da comunicação, os sinais digitais são enviados na forma binária para a unidade mestre, onde serão processados para obter os valores das grandezas físicas medidas. (THOMAS; MCDONALD, 2015).

Existem diversos requisitos que devem ser definidos para realizar a comunicação entre os dispositivos, é necessário escolher uma topologia de comunicação, um protocolo que fará o controle do envio e recebimento das informações, qual o tempo de resposta máximo que o sistema pode aguardar, qual a confiabilidade necessária da comunicação, quais dispositivos atendem aos requisitos, e etc. (THOMAS; MCDONALD, 2015).

Para a comunicação ocorrer, um dispositivo deve ser o remetente que envia a mensagem contendo a informação desejada até o destinatário. Este envio só ocorrerá se houver um protocolo responsável por regular a comunicação e um meio físico para ela ocorrer, podendo ser por cabos, ondas de rádio e etc. (THOMAS; MCDONALD, 2015).

Como a comunicação entre os dispositivos necessita de algum meio físico, é necessário que os dados digitais sejam convertidos para sinais digitais. A UART é um sistema de comunicação que utiliza dois fios para realizar a comunicação entre dispositivos. A UART codifica os dados seriais e adiciona bits de controle para enviar ao destinatário, e quando são recebidos, o destinatário decodifica estes dados seriais para obter o dado digital novamente. (THOMAS; MCDONALD, 2015).

O protocolo de comunicação define o formato na qual os dados devem estar para serem enviados de um dispositivo para outro. Cada protocolo possui uma série de regras únicas que devem ser respeitadas para que os dados não sejam perdidos durante o transporte. Essas regras adicionam componentes que serão acrescentados na mensagem antes do envio, como os endereços do remetente e destinatário, somas de checagem e etc. Um exemplo de protocolo de comunicação é o Wi-Fi, que utiliza ondas eletromagnéticas para realizar a comunicação de dois dispositivos em uma rede *wireless*. (THOMAS; MCDONALD, 2015).

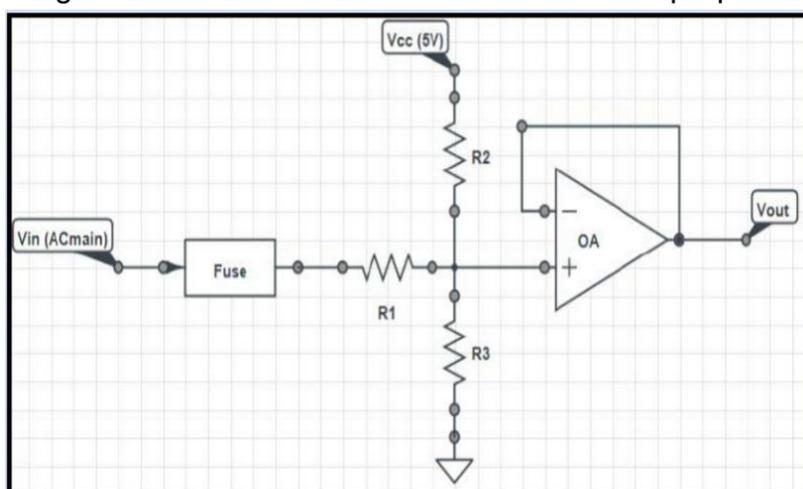
3. TRABALHOS CORRELATOS

Ahmed S. Musleh, Mahdi Debouza, Mohamed Farook (2017), em seu artigo científico trazem a proposta do desenvolvimento de uma tomada inteligente. Para a medição de corrente, os autores utilizaram o ACS712, que é um sensor de corrente capaz de medir tanto corrente alternada quanto corrente contínua e possui saída de tensão proporcional a corrente medida.

A faixa de tensão que a saída do ACS712 opera é de 0 V a 5 V. Em medidas de sinal alternado, a tensão na saída do sensor de corrente quando o sinal medido passa por zero é de 2,5 V. Segundo os autores, o ACS712 é um chip bastante preciso, porém os autores desenvolveram um circuito com um amplificador operacional para melhor a resolução do chip. (MUSLEH; DEBOUZA; FAROOK, 2017).

A medição de tensão foi realizada com um circuito desenvolvido pelos autores que possui um divisor de tensão e um *buffer*. Segundo os autores, o divisor de tensão é utilizado para gerar uma tensão de *offset*, e o *buffer* é utilizado para proteção do microcontrolador. Um fusível foi utilizado para a proteção de altas correntes oriundas da rede AC. O circuito condicionador de tensão é ilustrado na Figura 18. (MUSLEH; DEBOUZA; FAROOK, 2017).

Figura 18 - Circuito condicionador de tensão proposto



Fonte: Ahmed S. Musleh, Mahdi Debouza, Mohamed Farook (2017).

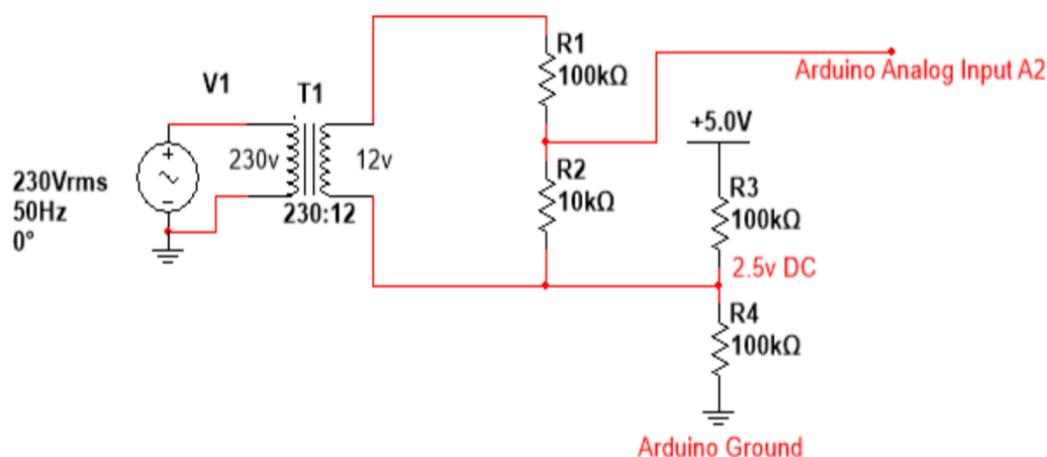
Os autores utilizaram o microcontrolador ATMEGA32 para o processamento dos sinais de tensão e corrente. Para que os dados pudessem ser visualizados pelos usuários, os autores desenvolveram um aplicativo com comunicação ZigBee que era alimentado pelos registros do microcontrolador. Os autores não calcularam a incerteza

encontrada nas medições, apenas concluíram que buscaram o melhor resultado possível e que o sistema funcionou conforme o esperado. (MUSLEH; DEBOUZA; FAROOK, 2017).

Yasin Kabir, Yusuf Mohammad Mohsin, Mohammad Monirujjaman Khan (2017), em seu artigo científico trazem a proposta de um controlador de fator de potência automatizado.

O controle do banco de capacitores foi realizado com a programação do microcontrolador Arduino UNO. Para a medição de tensão, os autores desenvolveram um circuito para rebaixar o sinal de 230 V e adicionar uma tensão de offset para gerar um sinal que o ADC do microcontrolador pudesse ler. O circuito condicionador de tensão é ilustrado pela Figura 19. (KABIR; MOHSIN; KHAN, 2017).

Figura 19 - Circuito condicionador de tensão proposto

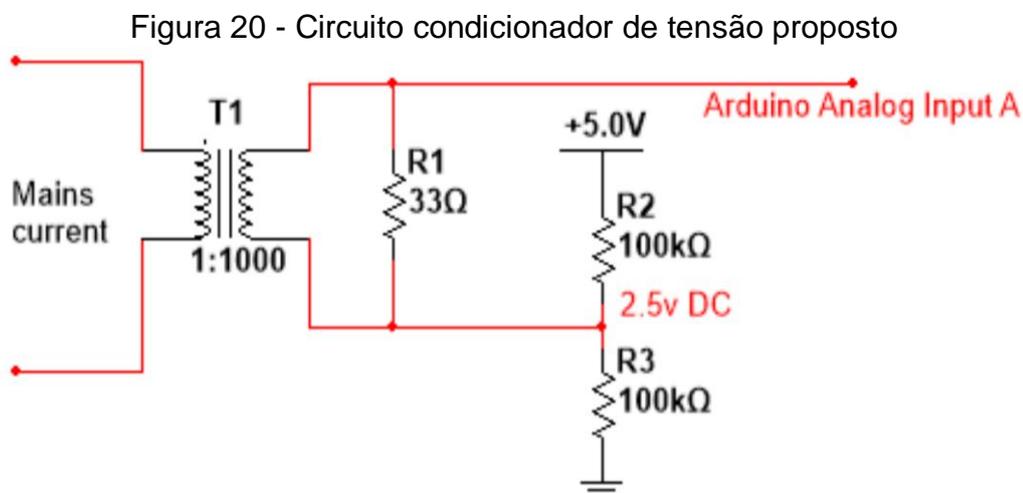


Fonte: Yasin Kabir, Yusuf Mohammad Mohsin, Mohammad Monirujjaman Khan (2017).

Neste circuito os autores utilizaram um transformador de potencial para rebaixar o sinal de 230 V CA em um sinal 12 V CA. Como o ADC do microcontrolador lê apenas sinais de tensão na faixa de 0 V até 5 V, os autores utilizaram um divisor de tensão para rebaixar a tensão da saída do transformador em 10 vezes ficando com um sinal de 1,2V. Os autores também necessitaram aplicar um offset de 2,5 V CC para que o sinal excursionasse apenas por valores positivos de tensão. (KABIR; MOHSIN; KHAN, 2017).

Na medição de corrente também é necessário respeitar a faixa de tensão de leitura do ADC. Para medir a corrente, os autores utilizaram um transformador de corrente. Foi necessário desenvolver um circuito para converter o sinal de corrente da saída do TC para um sinal de tensão que o ADC consiga ler. Os autores utilizaram um

resistor para transformar o sinal da saída, e novamente aplicaram um offset de 2,5 V CC para que o sinal excursions apenas por valores positivos de tensão. O circuito condicionador de corrente é ilustrado pela Figura 20. (KABIR; MOHSIN; KHAN, 2017).

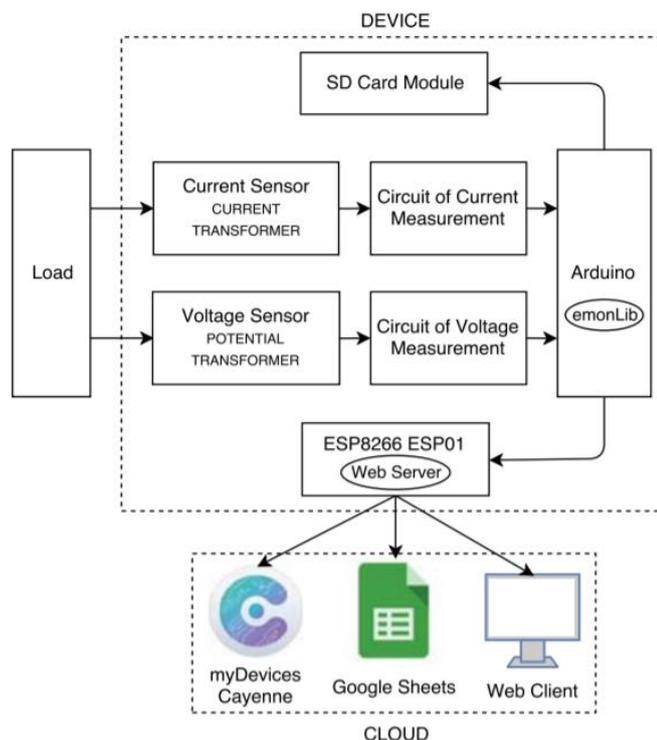


Fonte: Yasin Kabir, Yusuf Mohammad Mohsin, Mohammad Monirujjaman Khan (2017).

Os autores não calcularam qual a incerteza encontrada nas medições, apenas concluíram que o sistema pode ser utilizado em indústrias e sistemas de distribuição de energia, aumentando a estabilidade e eficiência do sistema e reduzindo encargos nas contas de energia.

Hugo Tavares, Bruno Prado, Kalil Bispo, Daniel Dantas (2018), em seu artigo científico trazem a proposta de um medidor de energia não invasivo inteligente. Em seu trabalho, os autores realizaram a medição de um sistema trifásico com a utilização de transformadores de corrente e transformadores de potencial. Os registros são processados pelo microcontrolador Arduino e os autores utilizaram o ESP8266 para enviar os dados via Wi-Fi para plataformas na nuvem. Os blocos do sistema proposto pelos autores são ilustrados na Figura 21.

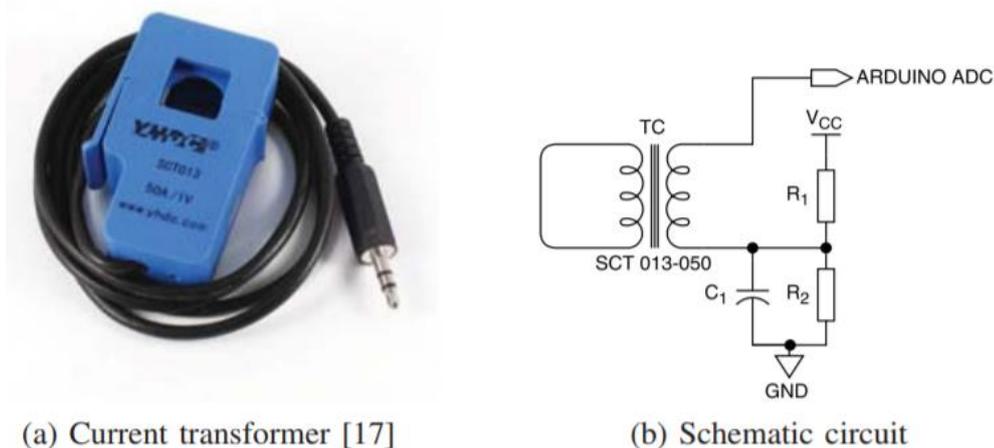
Figura 21 - Blocos do sistema proposto



Fonte: Hugo Tavares, Bruno Prado, Kalil Bispo, Daniel Dantas (2018).

Na medição de corrente os autores utilizaram o transformador de corrente SCT-013-050 que pode ler correntes de até 50 A, e possui saída de tensão proporcional que pode chegar a até 1 V na saída. Como o microcontrolador utilizado é o Arduino e seu ADC lê apenas sinais de tensão na faixa de 0 V até 5 V, foi necessário um circuito condicionador de corrente que é ilustrado pela Figura 22. (TAVARES; PRADO; BISPO; DANTAS, 2018).

Figura 22 - Circuito condicionador de corrente proposto



(a) Current transformer [17]

(b) Schematic circuit

Fonte: Hugo Tavares, Bruno Prado, Kalil Bispo, Daniel Dantas (2018)

Neste circuito os autores utilizam um divisor de tensão para gerar um offset de 2,5 V CC e assim o sinal que chega ao ADC do microcontrolador excursionará entre 1,5V e 3,5 V. A medição de tensão foi realizada com um transformador de potencial e um circuito condicionador. (TAVARES; PRADO; BISPO; DANTAS, 2018)

A comunicação do Arduino com a rede foi realizada pelo ESP8266. Ele é responsável por enviar os registros obtidos do Arduino para uma página HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*). Além disso, os autores desenvolveram um aplicativo para o acompanhamento do sistema, utilizando o protocolo de comunicação MQTT (*Message Queue Telemetry Transport*). Segundo os autores, o MQTT é um protocolo de mensagens bastante simples, desenvolvido para pequenos dispositivos e ideal para ser utilizado em projetos de IoT. (TAVARES; PRADO; BISPO; DANTAS, 2018).

Os autores validaram o protótipo com o teste de 10 cargas distintas e compararam os resultados com o do medidor PZEM-002, encontrando uma incerteza de 5,8% na medição da potência instantânea. (TAVARES; PRADO; BISPO; DANTAS, 2018).

Vladimir Mitroviü, Milan Mijalkoviü (2017), em seu artigo científico trazem a proposta de *data logger* para analisadores de energia, este artigo é a continuação de um analisador de energia desenvolvido pelos autores utilizando a placa STM32. A comunicação da placa STM32 com o ESP8266 é através da interface periférica serial. Os autores desenvolveram um servidor na plataforma Linux que se comunicava com os protocolos HTTP e MQTT. Este servidor também possuía um banco de dados para salvar os registros coletados. (MITROVIC; MIJALKOVIC, 2017).

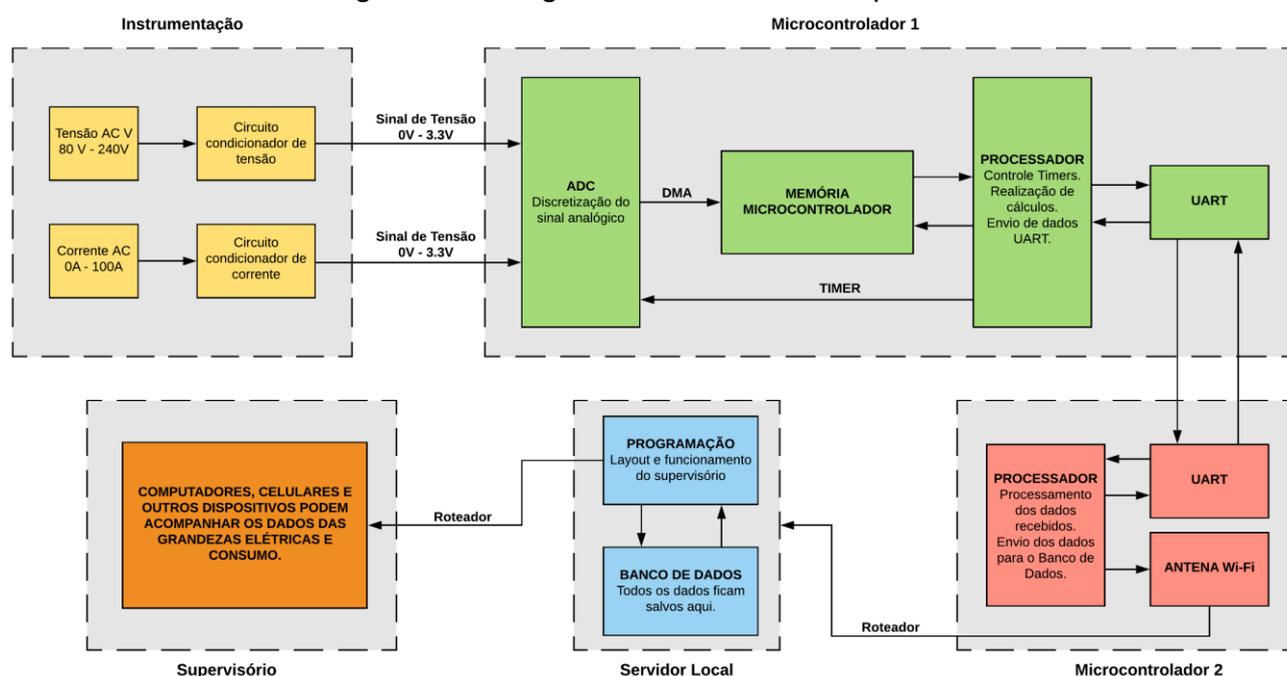
Os autores também utilizaram a plataforma Blynk para desenvolvimento de um aplicativo. Esta plataforma permite a criação de um painel de controle gráfico para que o usuário consiga monitorar o seu sistema com os sistemas operacionais iOS e Android. (MITROVIC; MIJALKOVIC, 2017).

Os autores não compararam o resultado das medições com outro medidor, porém concluíram que o sistema atingiu seu objetivo, sendo capaz de medir, armazenar e apresentar os registros de forma online com uma arquitetura robusta e de fácil manutenção. (MITROVIC; MIJALKOVIC, 2017).

4. METODOLOGIA

Nesta seção será demonstrado o levantamento de requisitos, as técnicas utilizadas, e quais componentes foram escolhidos para a construção deste protótipo. A Figura 23 ilustra o funcionamento do protótipo subdividido nos seguintes blocos: Instrumentação, Microcontrolador 1, Microcontrolador 2, Servidor Local e Supervisório.

Figura 23 - Diagrama de blocos do dispositivo



Fonte: Elaborado pelo autor.

O bloco de instrumentação é responsável por realizar a leitura dos sinais de tensão e corrente da rede elétrica, convertendo-os para sinais onde o ADC do microcontrolador consiga operar. O circuito condicionador de tensão é responsável por rebaixar o sinal de tensão da rede elétrica para um sinal que possua o mesmo comportamento, porém com menor amplitude e apenas valores positivos de tensão. O circuito condicionador de corrente converte o sinal do transformador de corrente para um sinal de tensão que possua apenas valores positivos e não ultrapasse os limites do ADC do microcontrolador.

No bloco microcontrolador 1 são realizadas as leituras dos sinais de tensão e corrente pelo ADC do microcontrolador, estes dados são salvos na memória para que o processador consiga acessá-los e realizar os cálculos das grandezas elétricas e consumo de energia.

Após a realização de todos os cálculos das grandezas medidas pelo microcontrolador 1, é necessário que o microcontrolador se conecte à internet para enviar os resultados para um banco de dados, onde o supervisor pode acessá-los e disponibilizar para o usuário do sistema.

O microcontrolador 1 não possui em sua construção componentes que permitam que ele se conecte à internet, por este motivo, é necessário que o microcontrolador 2 seja utilizado, pois em sua construção ele possui uma antena Wi-Fi integrada permitindo que ele se conecte na mesma rede que o servidor local.

Como dois microcontroladores são utilizados na construção deste protótipo, é necessário que eles consigam se comunicar entre si. A comunicação UART foi escolhida permitindo que os resultados sejam enviados para o microcontrolador 2 após o processamento dos sinais no microcontrolador 1. Antes do envio, os resultados são concatenados em uma *string*, sendo necessário que o microcontrolador 2 processe essa *string* separando cada grandeza antes de salvá-las em um registro no banco de dados.

No servidor local estão hospedados o banco de dados e os arquivos da programação do supervisor. O supervisor possui interface HTML e as linguagens PHP e Javascript são utilizadas para obter os dados do banco e atualizar os valores na tela. O supervisor pode ser visualizado por qualquer dispositivo conectado na mesma rede do servidor local.

A Tabela 3 demonstra as características utilizadas para o dimensionamento dos circuitos do protótipo.

Tabela 3 - Características do Protótipo

Descrição	Faixa de Medição	Unidade
Tensão RMS	80 - 240	V
Corrente RMS	0 - 100	A
Frequência	60	Hz
Potência Aparente	0 - 22000	VA
Potência Ativa	0 - 22000	W
Potência Reativa	0 - 22000	VAr
Fator de Potência	0 - 1	-
Número de Fases	1	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 4 demonstra as características do conversor MFM-10-5.

Tabela 4 - Características do conversor MFM-10-5

Descrição	Valor	Unidade
Modelo	MFM-10-5	-
Tensão AC de Entrada	80 - 263	V
Corrente Máxima	0,3	A
Tensão DC de Saída	5	V
Potência de Saída	10	W

Fonte: Adaptado de MW (2018).

Para realizar a alimentação dos componentes do protótipo, a fonte MFM-10-5 alimenta os microcontroladores e também um circuito regulador de tensão que gera um sinal fixo de 3,3 V, utilizado como referência para as entradas analógicas do microcontrolador. O regulador de tensão faz com que o sinal de referência se torne menos suscetível a variações do sinal de entrada ou ruído, melhorando a referência do ADC.

Como o protótipo deve realizar a leitura de sinais alternados, é necessário projetar nos circuitos uma forma de gerar um sinal de tensão com metade do valor de referência. Para isso, um divisor de tensão é dimensionado e seu sinal de saída é utilizado como *offset* para que o sinal alternado excursions apenas em valores positivos de tensão. Com um sinal de referência de 3,3 V e um sinal de *offset* de 1,65 V é possível alimentar os circuitos das entradas analógicas sem que eles excursionem fora da faixa de operação do ADC.

4.2 Instrumentação

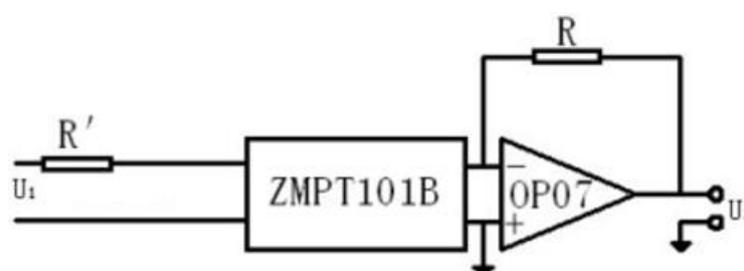
No dimensionamento dos circuitos de instrumentação deve ser levado em consideração a tensão em que o ADC do microcontrolador escolhido consegue operar. O sinal do circuito de instrumentação deve sempre ficar dentro das tensões especificadas pelo fabricante do microcontrolador, assim o ADC não sofre danos e não ocorrem perdas na leitura dos sinais. Conforme a seção 2.6.5, a faixa de tensão em que o ADC do *kit* NUCLEOF446-RE consegue operar é de 0 V até 3,3 V.

O protótipo realiza a leitura de tensão alternada na faixa de 80 V até 240 V abrangendo os valores de tensão mais comuns utilizados domesticamente em todo o mundo. Para isso, é necessário desenvolver um circuito que converte o sinal alternado

em um sinal contínuo, mantendo as características do sinal original, porém com uma amplitude que esteja dentro dos limites do ADC.

A leitura de tensão é realizada por um circuito comercial já montado em uma placa. Este circuito possui um resistor que atenua o sinal da entrada para alimentar um transformador de corrente, que possui a corrente limitada em 2 mA e uma relação de espiras de 1000:1000. No secundário do transformador há um amplificador operacional que dá ganho e inverte o sinal de saída para que ele fique em fase com o sinal da entrada. O circuito equivalente deste componente é ilustrado pela Figura 25.

Figura 25 - Circuito de medição de tensão



Fonte: adaptado de Interplus Industry.

Este circuito de medição de tensão também possui em sua construção um circuito de *offset*, que faz com que o sinal de saída excursione apenas em valores positivos de tensão. O circuito condicionador de tensão deve ser alimentado com a tensão máxima de saída desejada, que neste caso é de 3,3 V, respeitando os limites do ADC do microcontrolador. O esquema de alimentação do *kit* de medição é ilustrado pela Figura 26.

Figura 26 - Ligação do circuito condicionador de tensão



Fonte: Elaborado pelo autor.

O pino de saída deve ser conectado ao conversor analógico do microcontrolador para que seja possível reconstruir o sinal da entrada. Segundo o

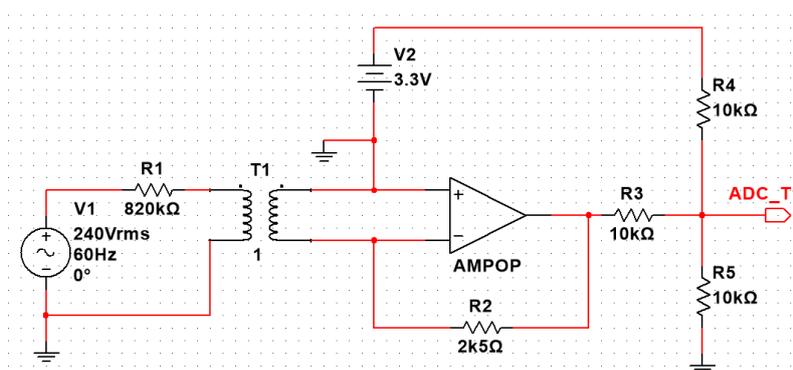
fabricante deste circuito, a função de transferência do circuito é a demonstrada na equação (21).

$$V_{saída} = \frac{V_{entrada} \cdot R}{R'}, \quad (21)$$

onde $V_{saída}$ é a tensão de saída do circuito condicionador de tensão [V], $V_{entrada}$ é a tensão de entrada do circuito condicionador de tensão [V], R' é o resistor de atenuação do sinal de entrada [Ω] e R é o resistor do amplificador inversor [Ω].

Com o circuito e a função de transferência obtidos do *datasheet* do fabricante, é possível simular o circuito para verificar o seu funcionamento e analisar o comportamento do sinal de saída, garantindo que ele não ultrapasse os limites de operação do ADC. A Figura 27 ilustra a simulação do circuito condicionador de tensão.

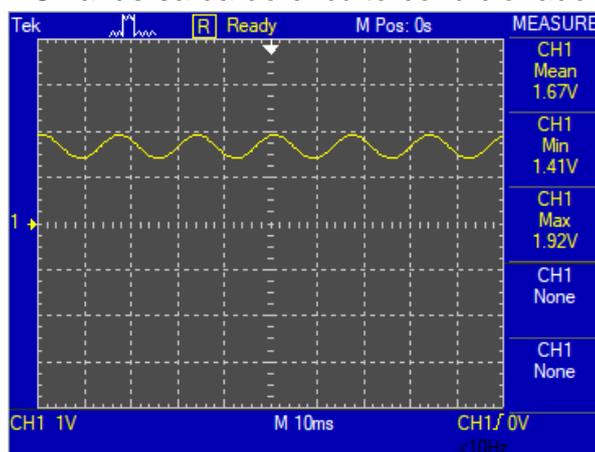
Figura 27 - Circuito condicionador de tensão



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através da simulação do circuito condicionador de tensão foi possível simular o sinal de saída que é ilustrado pela Figura 28.

Figura 28 - Sinal de saída do circuito condicionador de tensão



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme ilustra a Figura 28, a tensão máxima do sinal de saída do circuito condicionador de tensão é de 1,92 V, e a tensão mínima do sinal é de 1,41 V. Como o sensor de tensão utilizado já possui um circuito que gera um sinal de tensão de *offset*, o sinal de saída do circuito condicionador de tensão possui como tensão média 1,67 V e excursiona apenas em valores positivos de tensão, ficando dentro dos limites de operação do ADC do microcontrolador.

Para realizar a medição de corrente foi escolhido o transformador de corrente STC-013. Por ser um equipamento de medição não invasivo, o SCT-013 permite que a medição de correntes seja realizada sem a necessidade de abertura do circuito, fazendo com que a sua instalação seja bastante prática e fácil. Este transformador de corrente consegue medir correntes de até 100 A, e como sua relação de espiras é de 1:2000, a corrente em seu secundário pode chegar a até 50 mA. O transformador de corrente SCT-013-100 é ilustrado na Figura 29.

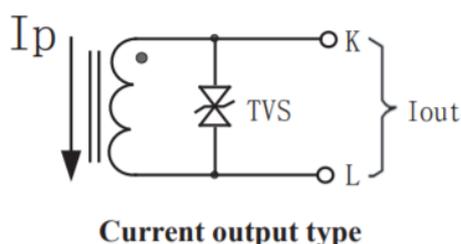
Figura 29 - Transformador de corrente SCT-013-100



Fonte: Elaborado pelo autor.

O diagrama esquemático do TC é ilustrado na Figura 30.

Figura 30 - Diagrama esquemático SCT-013-100



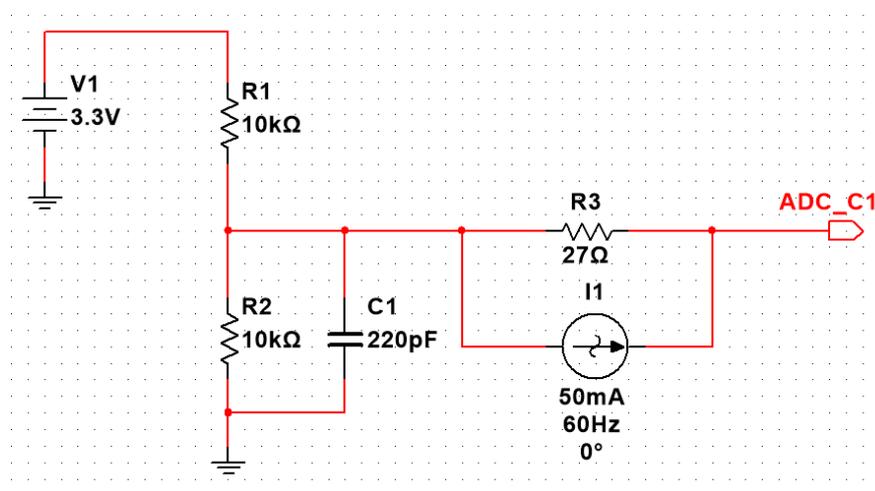
Fonte: YHDC

Devido a sua construção o TC gera um atraso de 4° na leitura do sinal de corrente, o que pode ocasionar erros de leitura, e para que isso não ocorra, o sinal de tensão deve ser compensado que a leitura dos sinais de tensão e corrente ocorram sem defasagem alguma.

Como a saída do TC é um sinal de corrente, e conforme a seção 2.6.5, o ADC do microcontrolador consegue realizar a leitura apenas de sinais de tensão, é necessário desenvolver um circuito para converter o sinal de corrente em um sinal de tensão. Também é necessário projetar um circuito que gere uma tensão de *offset* para ser adicionada ao sinal de saída do TC, fazendo com que ele excursionsse apenas em valores positivos de tensão.

Conforme ilustra a Figura 30, o SCT-013 não possui nenhum tipo de circuito condicionador de sinal, sendo possível simular o seu funcionamento com uma fonte de corrente. A Figura 31 ilustra o projeto desenvolvido para simular o circuito condicionador de corrente.

Figura 31 - Circuito condicionador de corrente



Fonte: Elaborado pelo autor.

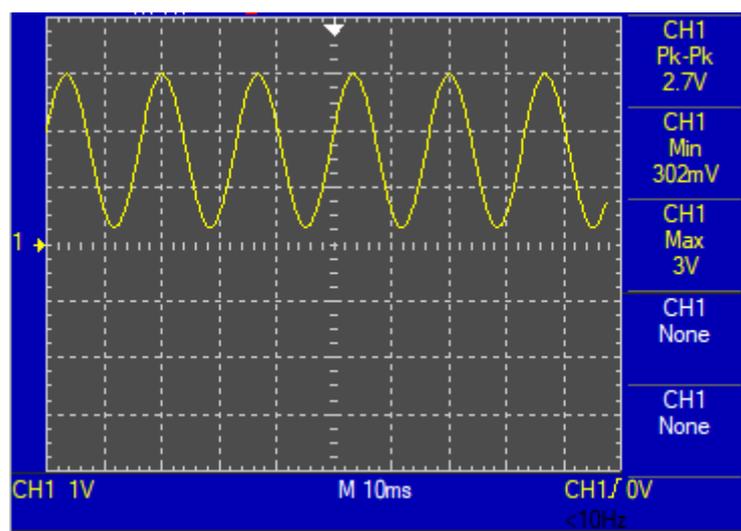
No primeiro estágio composto pela fonte V1, pelos resistores R1, R2 e pelo capacitor C1, adiciona 1,65V de tensão contínua deslocando positivamente o sinal de tensão. O capacitor C1 atua como filtro do sinal de entrada eliminando ruídos. Utilizando o conceito da equação (12), é possível calcular o valor máximo de tensão no primeiro estágio do circuito.

$$V_{c1} = \frac{V1 \cdot R2}{R1 + R2} + V_0 = \frac{3,3 V \cdot 10 k\Omega}{10 k\Omega + 10 k\Omega} = 1,65 V$$

No segundo estágio o resistor R3 atua como shunt convertendo o sinal de corrente para um sinal de tensão que é adicionado ao valor de tensão do primeiro estágio do circuito. Utilizando a lei de Ohm, é possível calcular a máxima tensão de saída do circuito condicionador de corrente.

$$V_{adc_{c1}} = I1_{pfonte} \cdot R3 + 1,65V = 50 \text{ mA} \cdot 27 \Omega + 1,65V = 1,35V + 1,65V = 3 \text{ V}$$

Figura 32 - Sinal de saída simulado do circuito condicionador de corrente



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme ilustra a Figura 32, o sinal de saída do circuito condicionador de corrente possui valor mínimo de 302 mV e valor máximo de 3 V, ficando dentro da faixa de tensão em que opera o ADC do microcontrolador.

4.2 Microcontroladores

O protótipo tem em sua construção dois microcontroladores, um é responsável por realizar a leitura dos sinais de tensão e corrente, processar estes sinais e realizar os cálculos das grandezas elétricas. O outro microcontrolador deve se comunicar com o primeiro para obter o resultado das grandezas elétricas e se comunicar com a rede local para salvar os registros em um banco de dados.

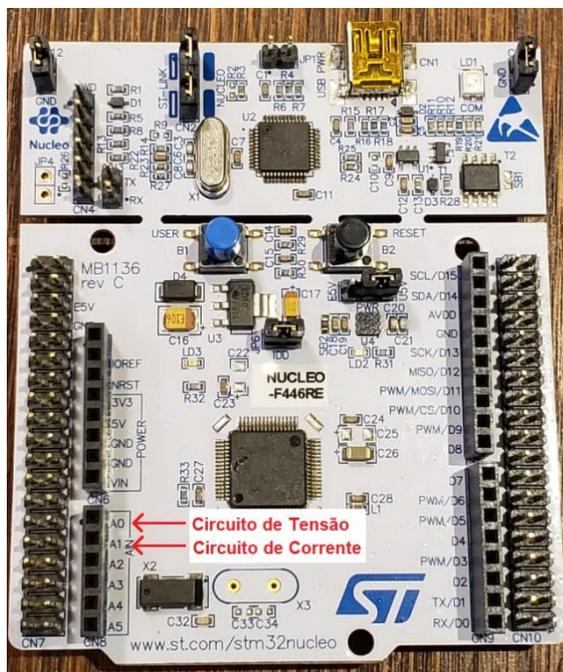
O microcontrolador que processa os sinais deve possuir um conversor analógico digital com alta resolução e frequência de operação elevada, para que a leitura dos sinais ocorra com uma *sample rate* alta. Com essas características é possível reconstruir o sinal e realizar o processamento para obtenção das grandezas elétricas.

O microcontrolador responsável por salvar os resultados das grandezas elétricas em um banco de dados deve possuir uma antena Wi-Fi, assim será possível que ele se conecte à rede e envie os registros para o banco de dados. Também é necessário que os microcontroladores se comuniquem através de algum protocolo de comunicação, assim o microcontrolador que possui conexão à internet consegue obter os resultados do microcontrolador que realiza os cálculos.

4.2.1 NUCLEOF446-RE

O *kit* NUCLEOF446-RE foi escolhido para realizar a leitura dos sinais dos circuitos condicionadores de tensão e corrente, conforme a seção 2.6.5 este *kit* possui um ADC com resolução de 12 bits, permitindo que ele reconheça variações de tensão a cada $800 \mu\text{V}$. Os circuitos condicionadores de tensão e corrente são ligados respectivamente nos canais 0 e 1 do ADC1 do microcontrolador, conforme ilustra a Figura 33.

Figura 33 - Ligação dos circuitos de medição no ADC do microcontrolador

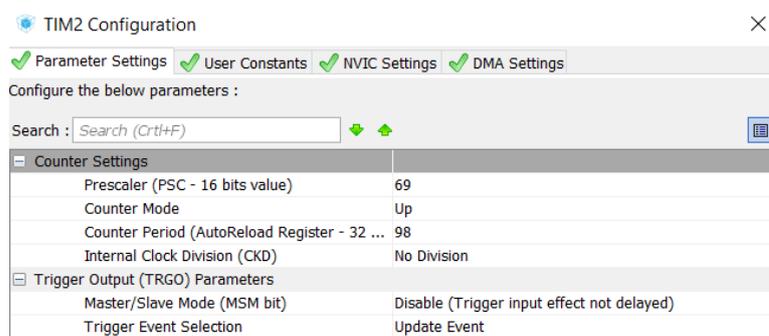


Fonte: Elaborado pelo autor.

O ADC deve obter as amostras de tensão e corrente com uma diferença de tempo muito pequena, só assim é possível calcular com exatidão a potência ativa e potência aparente. Também é necessária uma taxa de amostragem fixa para realizar o cálculo da frequência.

Visando estes requisitos um *timer* interno do microcontrolador foi utilizado para gerar interrupções com frequência fixa de 12120 Hz. O timer gera 202 interrupções a cada ciclo de 60Hz, e em cada interrupção são obtidas amostras dos sinais de tensão e corrente. A Figura 34 ilustra a configuração realizada no timer do microcontrolador.

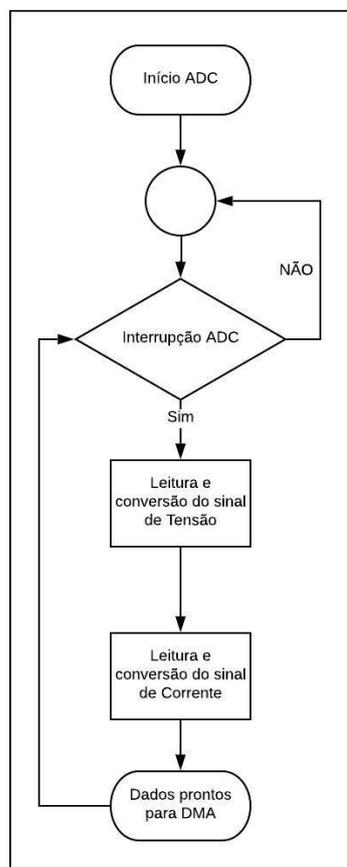
Figura 34 - Configuração do *timer* do microcontrolador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os circuitos de instrumentação conectados ao ADC do microcontrolador e a *sample rate* do temporizador configurada, pode-se realizar a programação do *firmware* do ADC. O ADC deve aguardar até que uma interrupção do temporizador ocorra para converter os sinais de tensão e corrente. Após o término da conversão, a DMA deve acessar os resultados e enviá-los a memória do microcontrolador. O fluxograma do funcionamento do ADC é ilustrado na Figura 35.

Figura 35 - Fluxograma do ADC.

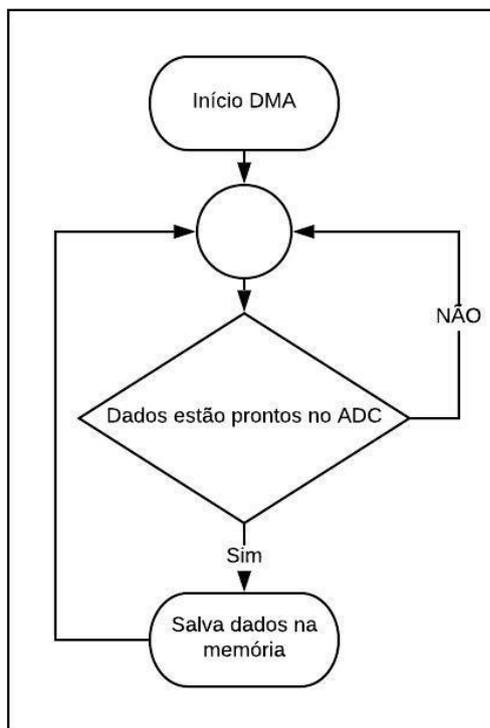


Fonte: Elaborado pelo autor.

Além da leitura dos sinais de tensão e corrente, o microcontrolador também deve realizar todo o processamento destes sinais para obter os resultados dos cálculos das grandezas elétricas e consumo. Como a *sample rate* das medições é bastante elevada, é necessário que os resultados do ADC sejam salvos na memória enquanto o microcontrolador realiza os cálculos para que nenhum registro seja sobrescrito. O processador deve sempre terminar os cálculos de um vetor de registros antes do preenchimento total de outro vetor, para isso, ele não pode ser interrompido pelo ADC enquanto realiza os cálculos.

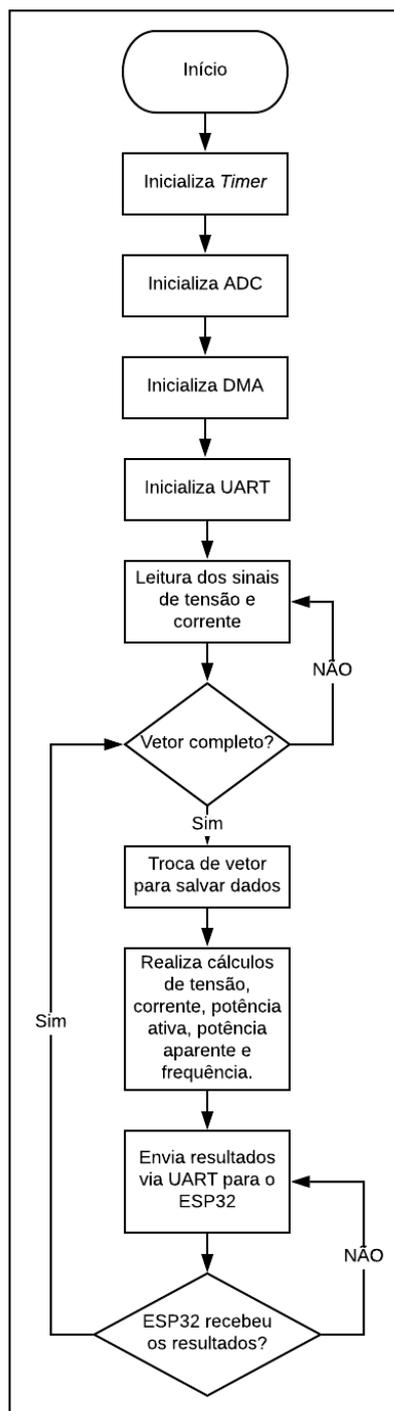
No microcontrolador NUCLEOF446-RE o periférico da DMA interliga através do *hardware* o ADC1 com a memória, possibilitando que os registros sejam salvos na memória sem a necessidade de interromper o processador. O *firmware* deste periférico foi projetado conforme o fluxograma ilustrado pela Figura 36.

Figura 36 - Fluxograma do periférico DMA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O *firmware* principal do microcontrolador é responsável por realizar todo o processamento digital dos valores das medições e transformar estes valores nas grandezas físicas medidas. Em seu funcionamento ele utiliza todos os periféricos acima citados para obter os valores das medições e salvá-los na memória. A Figura 37 ilustra o fluxograma de funcionamento do *firmware*.

Figura 37 - Fluxograma do *firmware* do microcontrolador.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após inicializar todos os periféricos necessários, o microcontrolador começa a ler os sinais de tensão e corrente salvando-os em três vetores. Cada vetor será alimentado com os valores de uma grandeza e suas posições serão preenchidas com as equações (21), (22) e (23).

$$tensao[i] = (ADC[0] - 2048)^2 + tensao[i - 1] \quad (21)$$

onde $tensao[i]$ é a posição atual do vetor de tensão, $ADC[0]$ é o último valor de tensão obtido pelo ADC e $tensao[i - 1]$ é a última posição preenchida do vetor de tensão.

$$corrente[i] = (ADC[1] - 2048)^2 + corrente[i - 1] \quad (22)$$

onde $corrente[i]$ é a posição atual do vetor de corrente, $ADC[1]$ é o último valor de corrente obtido pelo ADC e $corrente[i - 1]$ é a última posição preenchida do vetor de corrente.

$$ativa[i] = (ADC[0] - 2048) + (ADC[1] - 2048) + ativa[i - 1] \quad (23)$$

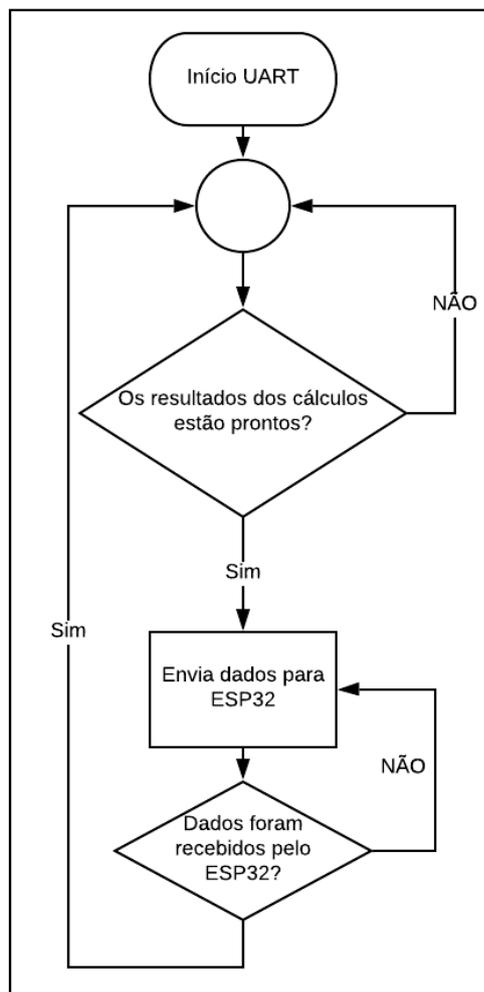
onde $ativa[i]$ é a posição atual do vetor de potência ativa, $ADC[0]$ é o último valor de tensão obtido pelo ADC, $ADC[1]$ é o último valor de corrente obtido pelo ADC e $ativa[i - 1]$ é a última posição preenchida do vetor de potência ativa.

Como estes vetores são preenchidos com resultados de um conversor com resolução de 12 bits, é necessário que em cada amostra seja retirado o valor digital de 2048, assim o nível DC que foi adicionado ao sinal para não excursionar em valores negativos é totalmente retirado e o sinal alternado pode ser reconstruído pelo microcontrolador. Também é essencial que ocorra a compensação na leitura do sinal de tensão, assim não haverá defasagem entre as leituras dos sinais de tensão e corrente.

Quando os vetores totalizarem 12210 registros, os cálculos de tensão RMS, corrente RMS, frequência, potência aparente, potência ativa e consumo podem ser realizados. Estas grandezas serão calculadas com as equações (15), (16), (17), (18), e (19), que serão alimentadas pelos valores que estão carregados nos vetores de tensão, corrente e potência. Nas equações acima citadas há uma constante multiplicadora que deve ser calculada através dos ganhos dos circuitos condicionadores de sinal.

Após o processamento destes sinais, os cálculos são finalizados e devem ser enviados através da comunicação UART para o microcontrolador que realiza o envio destes resultados ao banco de dados. A Figura 38 ilustra o fluxograma de funcionamento da comunicação UART.

Figura 38 - Firmware da comunicação UART.

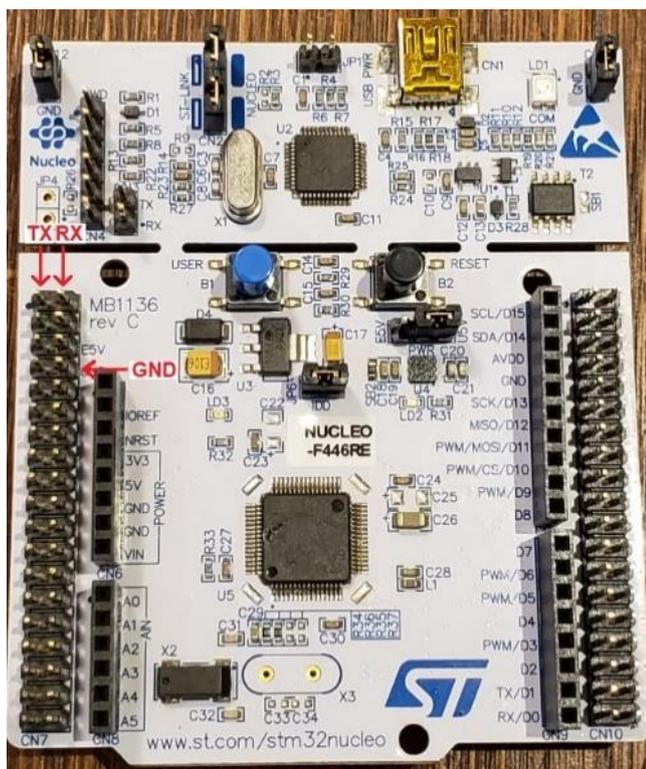


Fonte: Elaborado pelo autor.

O protocolo de comunicação UART envia os resultados dos cálculos do microcontrolador NUCLEO para o ESP32. Ao receber os resultados o ESP32 envia uma confirmação de recebimento para o NUCLEO e aguarda que novos resultados sejam enviados.

A comunicação UART entre os microcontroladores ocorre através de três fios, TX que envia as informações para o outro microcontrolador, RX que recebe as informações do outro microcontrolador e GND que realiza a equipotencialização dos microcontroladores. A Figura 39 ilustra os conectores utilizados no microcontrolador NUCLEO.

Figura 39 - Pinos TX e RX do microcontrolador NUCLEOF446-RE.

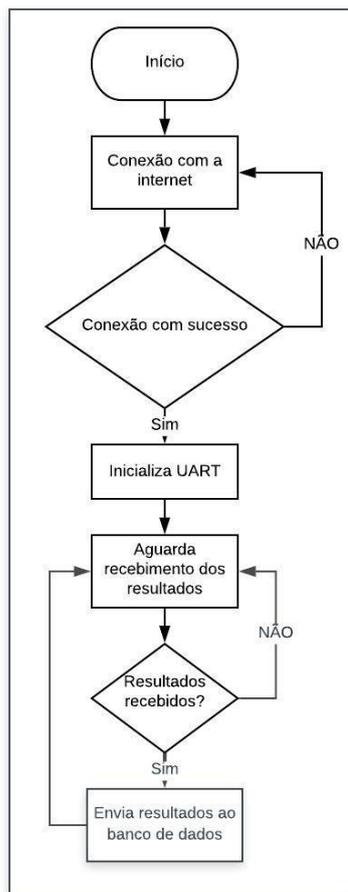


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2 ESP32-DevKitC

Com o crescimento de dispositivos baseado em *internet of things*, cada vez mais dispositivos físicos estarão conectados ao mundo virtual. Levando isso em consideração juntamente com a facilidade de obtenção dos registros em qualquer dispositivo, a forma de comunicação escolhida para envio dos dados é através da Wi-Fi, assim dispositivos poderão se conectar ao equipamento sem utilizar fios, desde que estejam conectados na mesma rede do equipamento.

O *kit* ESP32-DevKitC é responsável por receber os resultados do *kit* NUCLEOF446-RE e enviá-los para o banco de dados. Em sua construção este microcontrolador possui uma antena integrada que possui conectividade com os protocolos 802.11b/g/n, também possui dois canais de comunicação UART e sua frequência de operação é de 80 MHz. O fluxograma do *firmware* desenvolvido para o ESP32 é ilustrado pela Figura 40.

Figura 40 - Fluxograma do *firmware* do ESP32-DevKitC

Fonte: Elaborado pelo autor.

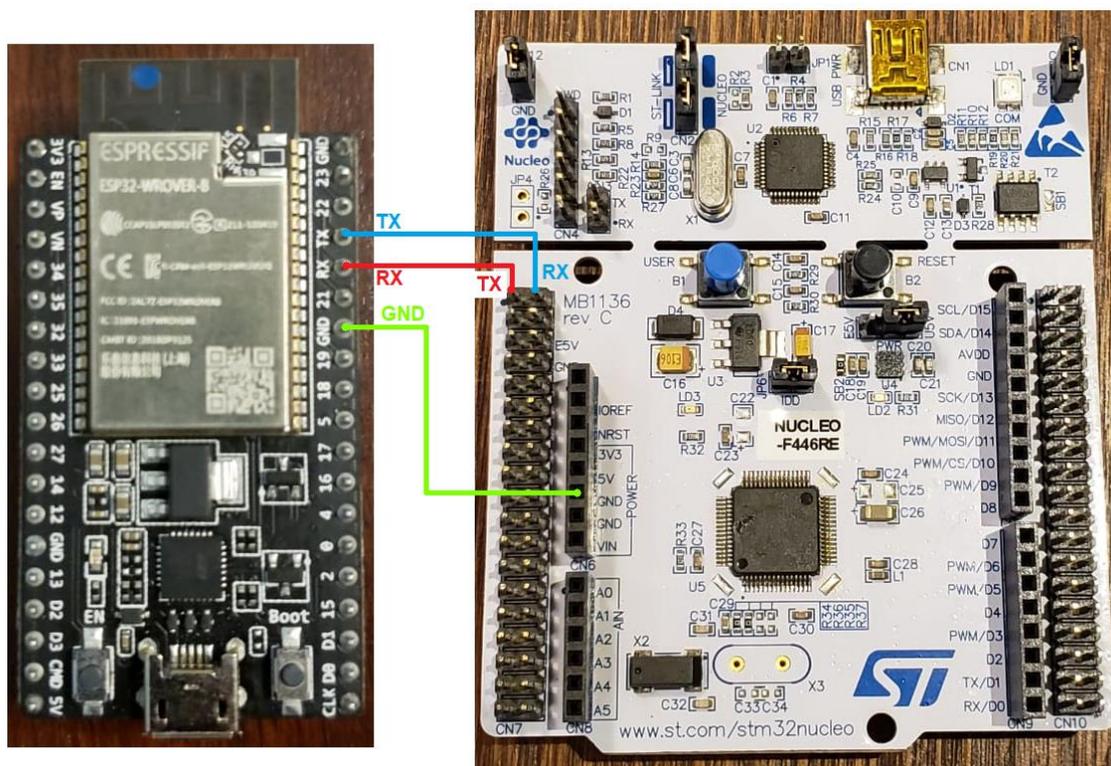
Após a inicialização o ESP32 realiza a conexão na rede Wi-Fi cujo nome e senha foram colocados no *firmware*. Com a conexão ativa, o ESP32 aguarda o recebimento das informações através do protocolo UART. Ao receber todas as informações o ESP32 envia um caractere como resposta ao NUCLEOF446-RE, indicando que todas as informações foram recebidas corretamente.

Os resultados são recebidos em uma *string* que possui as grandezas concatenadas com um separador decimal entre elas, sendo necessário processar a *string* e realizar a separação do resultado de cada grandeza antes do envio ao banco de dados.

Após a separação das variáveis, o ESP32 acessa uma página web que está hospedada dentro do servidor local, enviando como parâmetro os resultados que foram retirados da *string*. Esta página possui um código na linguagem PHP que salva os parâmetros enviados em um registro no banco de dados.

Os microcontroladores NUCLEOF446-RE e ESP32 são interligados através dos pinos de comunicação UART e GND. Esta ligação é ilustrada pela Figura 41.

Figura 41 - Ligação dos fios da comunicação UART entre microcontroladores.

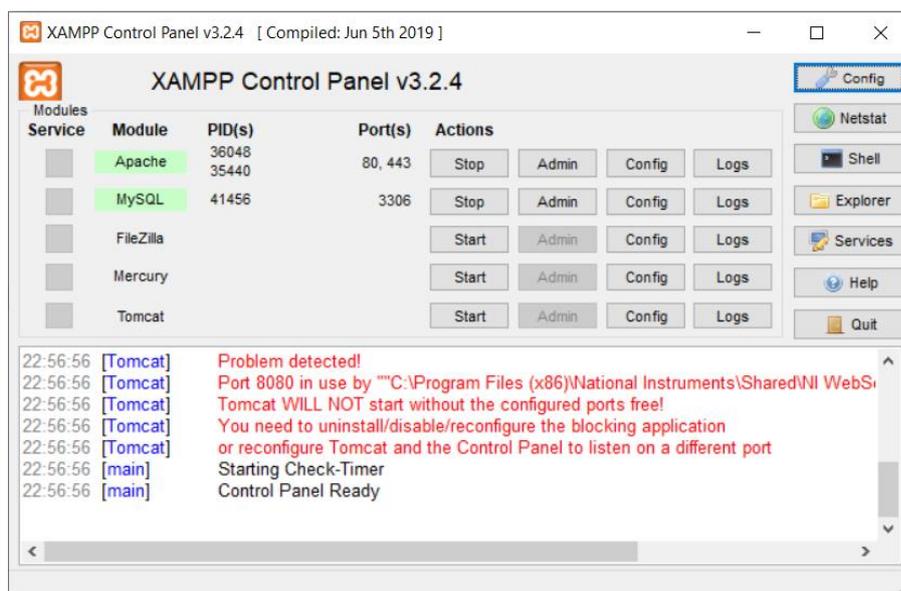


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Servidor Local

O servidor local hospeda todas as ferramentas e arquivos necessários para o funcionamento do supervisor, nele está instalado o PHP que é o responsável por acessar ao banco de dados e também está instalado o MySQL que é um sistema de gerenciamento de banco de dados. O XAMPP é o servidor local escolhido para hospedar todos os arquivos do supervisor, nele ficam alocados os arquivos de acesso ao banco de dados, os arquivos de geração da parte gráfica e toda a programação de alto nível necessária para o funcionamento do supervisor. A Figura 42 ilustra o painel de controle do servidor local no qual o projeto foi desenvolvido.

Figura 42 - Painel de controle do servidor local XAMPP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.1 Banco de Dados

Com o gerenciador MySQL foi possível criar um banco de dados para receber os resultados das medições realizadas pelo protótipo, para isso, uma tabela foi criada neste banco de dados contendo campos para todas as grandezas medidas. A Figura 43 ilustra a tabela criada no banco de dados.

Figura 43 - Tabela criada no banco de dados.

#	Nome	Tipo	Agrupamento (Collation)	Atributos	Nulo	Predefinido	Comentários	Extra	Ações
1	ID	int(11)			Não	Nenhum		AUTO_INCREMENT	Muda Elimina Mais
2	TensaoRMS	float			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
3	CorrenteRMS	float			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
4	PotenciaAparente	float			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
5	PotenciaAtiva	float			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
6	Frequencia	int(2)			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
7	ConsumoInst	float			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
8	DataHora	timestamp			Não	current_timestamp()		ON UPDATE CURRENT_TIMESTAMP()	Muda Elimina Mais

Fonte: Elaborada pelo autor.

A tabela criada possui 9 colunas que registram os resultados dos cálculos realizados pelo microcontrolador. A coluna ID é uma coluna auxiliar que salva um número inteiro incrementado a cada novo registro inserido na tabela. As colunas TensaoRMS, CorrenteRMS, PotenciaAparente, PotenciaAtiva e Frequência armazenam os resultados das respectivas grandezas que foram mensuradas pelo microcontrolador, e a coluna ConsumoInst registra o consumo instantâneo da carga.

Na coluna DataHora ficam salvas a data e hora que o registro foi salvo no banco de dados.

O banco de dados funciona como memória de armazenamento em massa do medidor, onde é possível armazenar todos os registros de um ano completo de medições e acessá-los quando necessário. O banco de dados também permite que operações matemáticas sejam realizadas em suas consultas, permitindo que alguns cálculos sejam realizados ao mesmo tempo que os registros são consultados no banco.

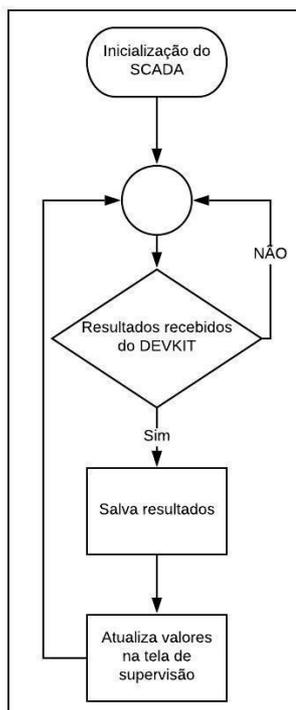
Os registros salvos na tabela do banco de dados podem ser acessados por qualquer dispositivo que tenha acesso ao servidor local e possua a senha de acesso, podendo ser acessados a qualquer momento, inclusive com consultas retroativas dos registros. Os registros só serão apagados caso sejam excluídos por algum usuário que tenha permissão.

4.4 Sistema Supervisório

Como todo sistema SCADA este supervisório possui uma unidade terminal remota, uma unidade mestre, um sistema de comunicação, e uma IHM. Neste caso, o protótipo de medição é a unidade terminal remota, o servidor local é a unidade mestre, a comunicação é a rede Wi-Fi, e a IHM é o supervisório desenvolvido.

A unidade remota lê os sinais de tensão e corrente, processa estas leituras, realiza os cálculos necessários e envia os resultados através da comunicação Wi-Fi para a unidade mestre salvar no banco de dados. Com os registros salvos, o supervisório pode acessá-los, possibilitando que os usuários do sistema vejam as grandezas elétricas medidas pelo protótipo e o consulte registros anteriores. O fluxograma do *software* que atualiza a tela do supervisório é ilustrado na Figura 44.

Figura 44 - Fluxograma de funcionamento do supervisório.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a inicialização, a unidade mestre aguarda que o ESP32 faça a transferência dos dados do microcontrolador para a rede, para isso, o ESP32 acessa um arquivo PHP e passa como parâmetro os valores das grandezas elétricas e consumo. Este arquivo possui acesso ao banco de dados e nele existem as instruções necessárias para criar um registro na tabela onde o supervisório tem acesso.

A tela principal do sistema supervisório mostra as grandezas elétricas instantâneas e o consumo. Para atualizar as grandezas elétricas instantâneas, o supervisório possui uma rotina que é processada a cada 1 segundo, executando um arquivo PHP que consulta no banco de dados o último registro salvo e atualiza a tela com as grandezas deste registro.

A atualização do consumo também funciona da mesma maneira, porém a rotina é processada a cada 5 minutos, executando um arquivo PHP que consulta no banco de dados o somatório do consumo a cada 10 minutos, atualizando os campos e gráfico.

As outras telas do supervisório também funcionam com a iteração entre arquivos em PHP, JavaScript e o banco de dados. A única diferença é que ao acessá-las apenas uma única consulta é realizada, retornando os dados necessário para alimentar os gráficos e campos da tela. Na tela de histórico de consumo é possível

informar datas de início e fim para consultar o histórico do consumo entre as datas informadas.

O sistema supervisorio foi projetado para ser acessado por computadores, tablets e celulares, dependendo do dispositivo, o supervisorio pode alterar sua forma de exibição, mas suas funcionalidades operam em qualquer dispositivo. Ao acessar o sistema supervisorio, o usuário encontra uma tela de login, onde deve colocar seus dados de usuário e senha. A Figura 45 ilustra a tela de login do supervisorio.

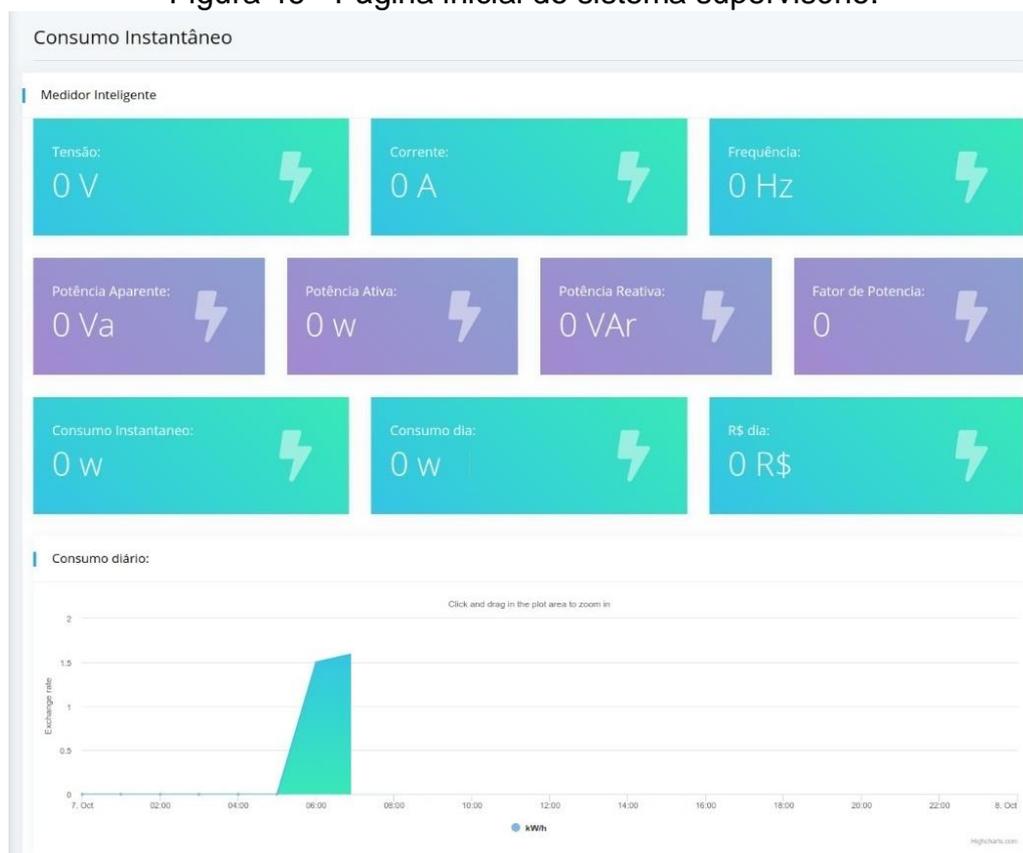
Figura 45 - Login do sistema supervisorio.

A imagem mostra a interface de login do sistema supervisorio. À esquerda, há um fundo verde com um ícone branco de uma fechadura. À direita, o título "Supervisorio" está no topo. Abaixo dele, há dois campos de entrada: "Usuário" e "Senha". Abaixo dos campos, há um botão azul com o texto "Login".

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após realizar o login, o usuário do sistema visualiza a tela ilustrada na Figura 46. Esta tela possui campos que indicam os valores das grandezas elétricas em tempo real, campos que indicam o consumo e um gráfico com o somatório total do consumo do dia, atualizado a cada 10 minutos.

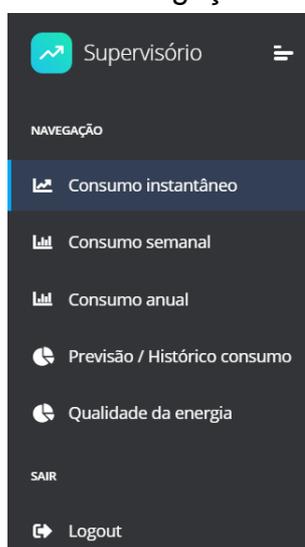
Figura 46 - Página inicial do sistema supervisorio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para acessar às outras telas, um menu de navegação intuitivo foi criado. Através deste menu, o usuário pode acessar as telas de consumo semanal, consumo anual, previsão/histórico de consumo e qualidade de energia. O menu do sistema supervisorio é ilustrado na Figura 47.

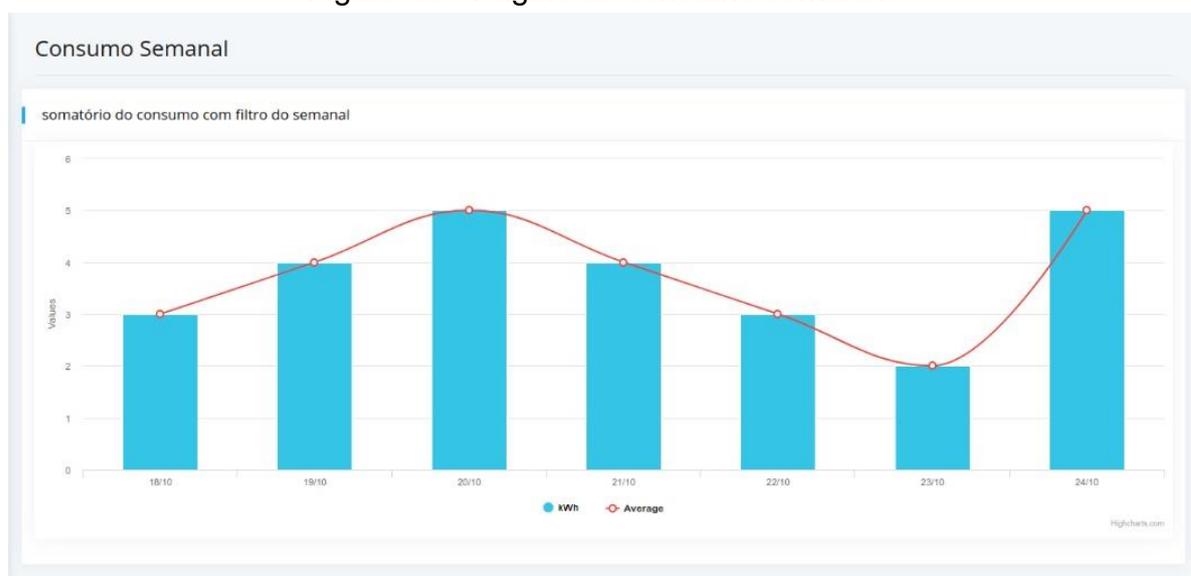
Figura 47 - Menu de navegação do supervisorio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na página do consumo semanal, o usuário pode visualizar os registros de consumo dos últimos 7 dias. Os registros são apresentados na forma de um gráfico de barras que demonstra quantos kWh foram consumidos em cada dia da última semana. A página do consumo semanal é ilustrada pela Figura 48.

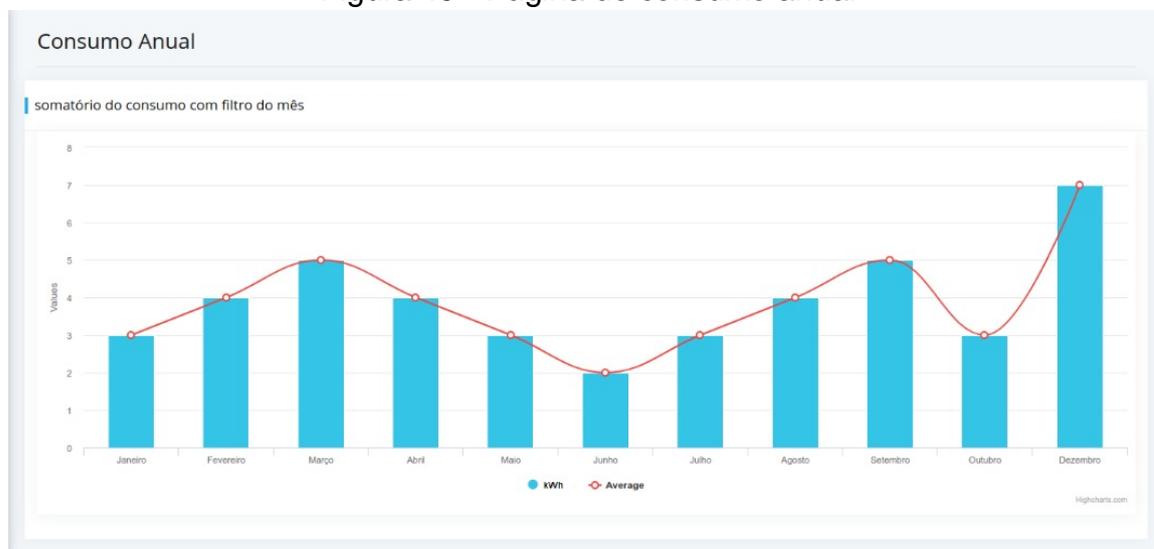
Figura 48 - Página de consumo semanal



Fonte: Elaborado pelo autor.

O usuário também pode visualizar os registros do consumo dos últimos 12 meses. Os registros são apresentados na forma de um gráfico de barras que demonstra quantos kWh foram consumidos em cada um dos últimos 12 meses. A página do consumo anual é ilustrada pela Figura 49.

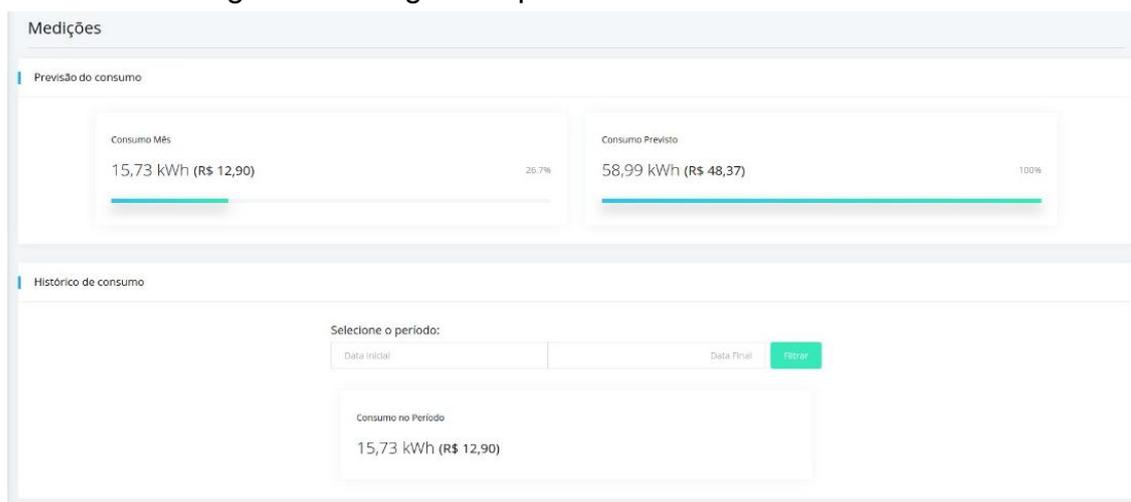
Figura 49 - Página de consumo anual



Fonte: Elaborado pelo autor.

O supervisor também possui uma tela que realiza o cálculo da estimativa de consumo do mês através do consumo já registrado, mostrando o consumo em kWh e também já convertido em reais. Nesta tela também é possível visualizar o consumo de um período de tempo desejado, informando as datas inicial e final do período. A página de previsão/histórico do consumo é ilustrada pela Figura 50.

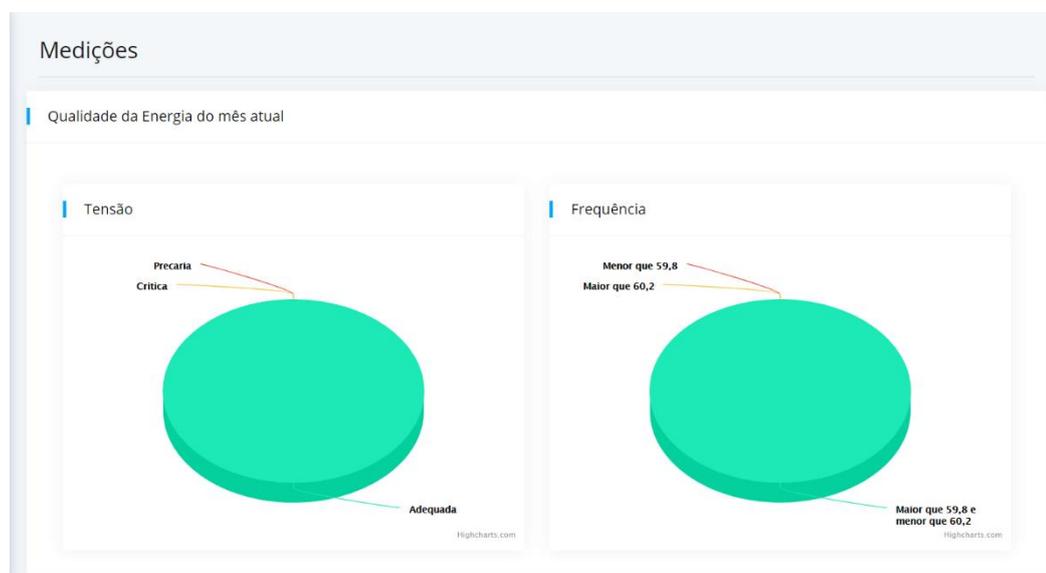
Figura 50 - Página de previsão/histórico do consumo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tela de qualidade de energia, o usuário pode acompanhar a qualidade da tensão fornecida pela concessionária e se a frequência do sinal está na faixa adequada. Ao clicar no gráfico de tensão é possível visualizar os índices de DRP e DRC. A Figura 51 ilustra a página de qualidade de energia.

Figura 51 - Página qualidade de energia

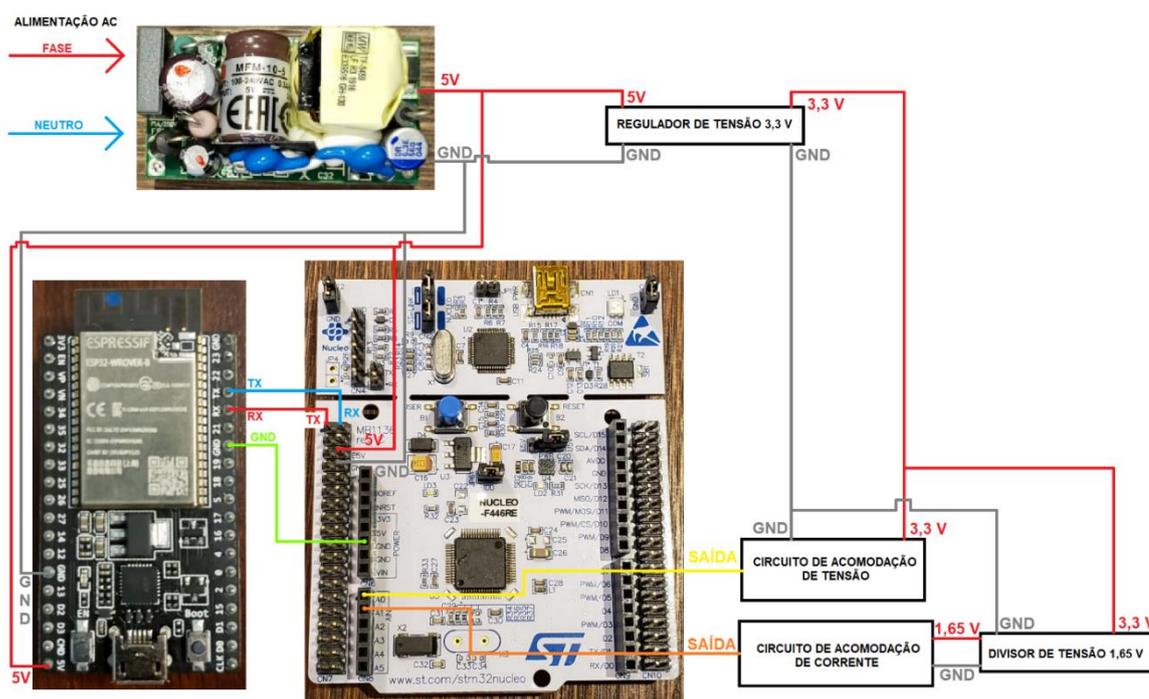


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Montagem do Protótipo

Após realizar o desenvolvimento de cada circuito eletrônico é possível juntá-los para que sejam montados em placas padrão, tornando os circuitos menos suscetíveis a maus contatos, melhorando a fixação dos componentes e a aparência do protótipo. A Figura 52 ilustra a ligação de cada bloco de circuitos do protótipo.

Figura 52 - Interligação dos blocos do protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados da validação do *hardware*, *firmware* e *software*, além dos resultados da validação do protótipo com o analisador de energia PowerNET PQ-700.

5.1 Montagem dos Circuitos e Validação das Tensões de Alimentação

Com os circuitos definidos após a simulação foi possível montá-los em uma placa padrão, garantido que os componentes fiquem firmemente fixados na montagem do protótipo. Utilizando as ferramentas necessárias, os componentes foram soldados manualmente com estanho em placas padrão, respeitando os locais definidos no projeto dos circuitos. Além disso, conectores foram instalados para facilitar a conexão entre os circuitos e periféricos.

A Figura 53 ilustra a montagem em placa padrão do conversor MFM-10-5, este circuito é responsável por alimentar os microcontroladores e o regulador de tensão, que gera um sinal contínuo de 3,3 V para alimentar os circuitos condicionadores de tensão e corrente.

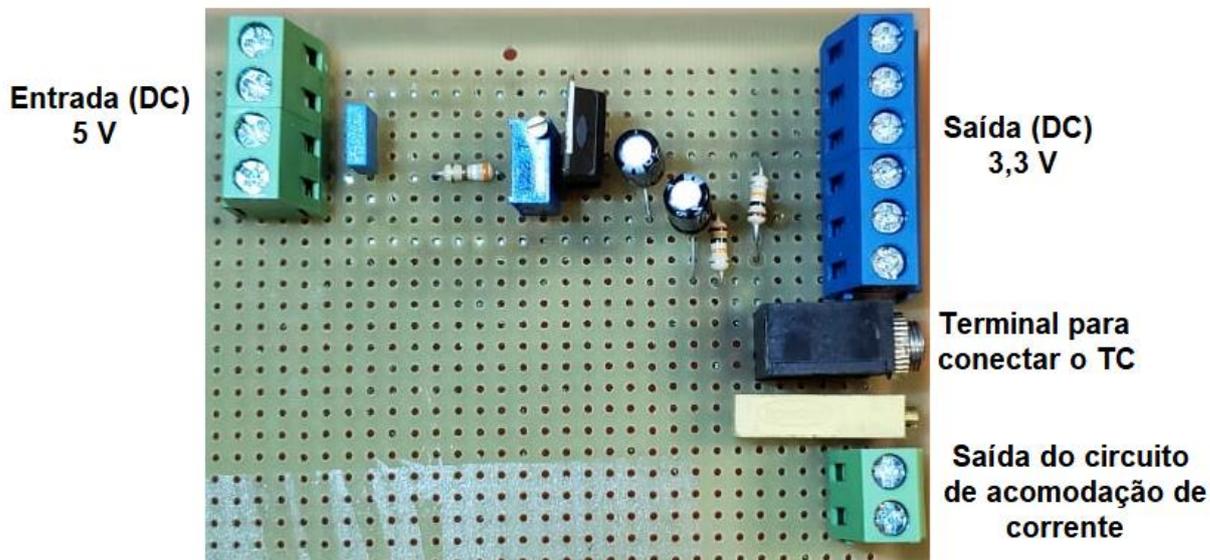
Figura 53 - Circuito montado em placa padrão com o conversor MFM-10-5



Fonte: Elabora pelo autor.

O circuito com o regulador de tensão e o circuito condicionador de corrente também foram montados em placa padrão. Conforme ilustra a Figura 54, os circuitos de alimentação receberam em sua construção conectores para facilitar a conexão com outros circuitos e o circuito condicionador de corrente recebeu um conector P2 fêmea para realizar a conexão com o transformador de corrente.

Figura 54 - Circuito condicionador de corrente e regulador de 3,3 V



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os circuitos montados foi possível alimentá-los e verificar se os sinais de tensão estão conforme o esperado. A validação dos circuitos demonstrou que todas as tensões ficaram iguais ou muito próximas dos valores esperados, validando o funcionamento dos circuitos de alimentação do protótipo. Isso garante que os microcontroladores e os circuitos condicionadores de sinais sejam alimentados conforme as simulações que foram realizadas previamente.

5.2 Validação dos Circuitos Condicionadores de Sinais

Com a validação dos circuitos de alimentação do protótipo foi possível realizar testes nos circuitos condicionadores de sinais por meio de estímulos com sinais de tensão e corrente. Primeiramente foram realizados testes no circuito condicionador de tensão que foi devidamente alimentado e o sinal de sua saída foi visualizado com o auxílio de um osciloscópio. A Figura 55 ilustra o sinal de saída do circuito condicionador de tensão ao injetar em sua entrada um sinal de aproximadamente 220 V.

Figura 55 - Sinal de saída do circuito condicionador de tensão



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar que o sinal de saída do circuito condicionador de tensão ficou com 1,71 V de média e excursiona entre 1,4 V e 2 V, ficando dentro dos limites aceitos pelo ADC do microcontrolador. A frequência do sinal de saída ficou muito próxima de 60 Hz, o que é muito importante para medição da própria frequência e para o cálculo das potências.

O circuito condicionador de corrente também foi validado, para isso o transformador de corrente foi excitado com correntes de amplitudes diferentes e o sinal da saída foi obtido com o auxílio do osciloscópio. As cargas utilizadas para o levantamento do sinal de saída do circuito condicionador de corrente foram de 18,5 Ω e 8,5 Ω , que ao serem alimentadas por um sinal de tensão RMS de 220 V, consomem respectivamente 11,89 A e 25,88 A.

A Figura 56 ilustra o sinal de saída do circuito condicionador de corrente ao realizar a medição da corrente consumida pela carga de 18,5 Ω . O sinal de saída teve como valor médio de tensão 1,71 V e excursionou entre 1,52 V e 1,88 V. O comportamento do circuito condicionador de tensão ficou dentro dos limites de leitura do ADC do microcontrolador, ficando muito próximo do esperado, conforme a simulação realizada na seção da metodologia.

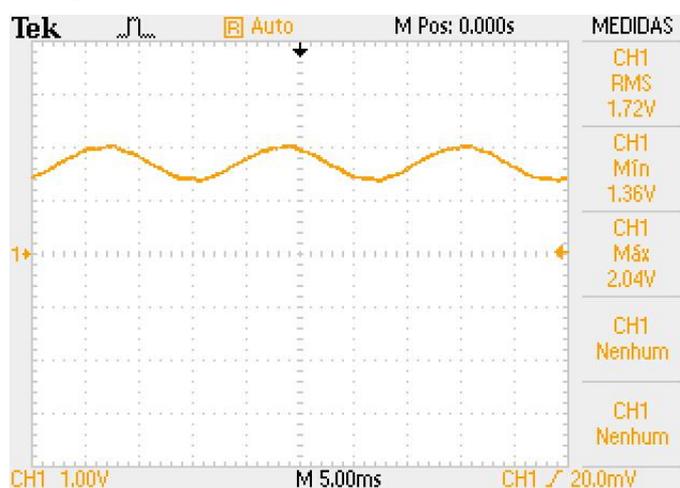
Figura 56 - Sinal de saída do circuito condicionador de corrente



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 57 ilustra o sinal de saída do circuito condicionador de corrente ao realizar a medição da corrente consumida pela carga de $8,5 \Omega$. O sinal de saída teve como valor médio de tensão 1,71 V e excursionou entre 1,52 V e 1,88 V. Novamente o comportamento do circuito condicionador de tensão ficou dentro dos limites de leitura do ADC do microcontrolador, ficando muito próximo do esperado, conforme a simulação realizada anteriormente.

Figura 57 - Sinal de saída do circuito condicionador de corrente



Fonte: Elaborado pelo autor.

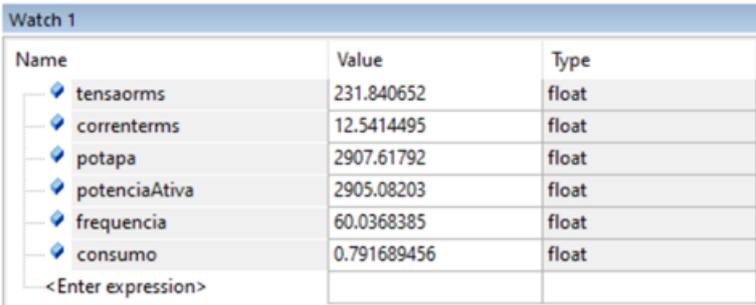
Em todos os testes de validação realizados com os circuitos condicionador de sinal, a resposta obtida foi conforme a esperada, com o sinal de saída ficando dentro dos limites de operação do ADC do microcontrolador e respondendo conforme os resultados das simulações.

5.3 Validação do *Firmware* do microcontrolador NUCLEOF446-RE

Após a validação dos circuitos condicionadores foi possível ligá-los ao microcontrolador e verificar o funcionamento do *firmware* desenvolvido. A ligação dos circuitos foi realizada conforme a Figura 33, com o circuito condicionador de tensão ligado no canal 0 do ADC1 e o circuito condicionador de corrente foi ligado no canal 1 do ADC1.

Os testes de funcionamento do *firmware* desenvolvido foram realizados com a carga de 18,5 Ω , que foi alimentada com a tensão da rede. O transformador de corrente foi instalado no cabo que alimenta a carga e a entrada do circuito condicionador de tensão também foi alimentada pela tensão da rede. Com o protótipo devidamente alimentado e os circuitos condicionadores ligados ao microcontrolador, o *firmware* começou a medir os sinais e retornou os resultados que são ilustrados pela Figura 58.

Figura 58 - Resultados do processamento dos sinais pelo microcontrolador



Name	Value	Type
tensaorms	231.840652	float
correnterms	12.5414495	float
potapa	2907.61792	float
potenciaAtiva	2905.08203	float
frequencia	60.0368385	float
consumo	0.791689456	float
<Enter expression>		

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os resultados ficaram muito próximos do esperado no teste com a carga de 18,5 Ω . Como a tensão estava um pouco elevada a corrente medida foi de 12,54 A. A potência aparente medida foi de 2907,61 VA, e por se tratar de uma carga resistiva, o valor da potência ativa ficou muito próximo da potência aparente. A frequência ficou muito próxima dos 60 Hz esperados da rede doméstica, e o consumo ficou de acordo com a potência instantânea.

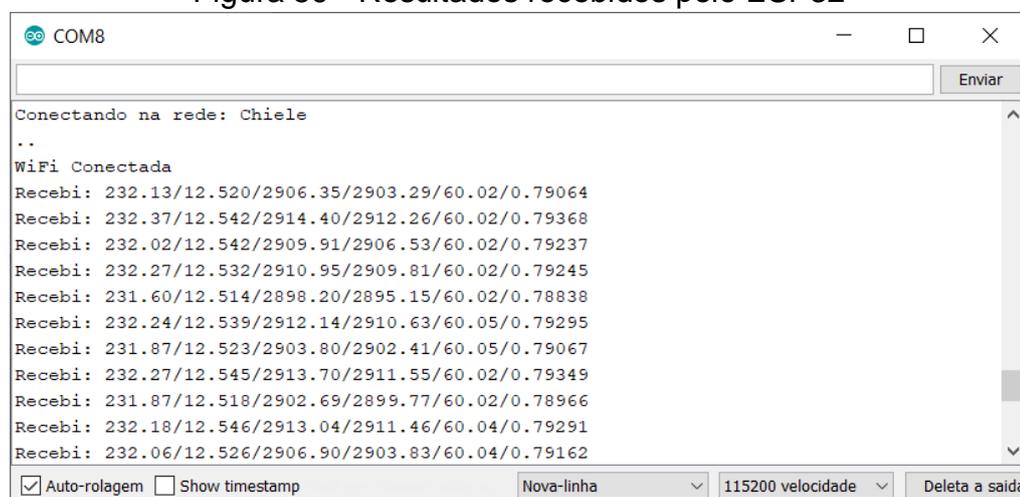
A validação do *firmware* com a utilização da carga de 18,5 Ω foi bastante satisfatória, os sinais puderam ser reconstruídos corretamente pelo microcontrolador e os resultados do processamento destes sinais ficaram muito próximos dos valores esperados.

5.4 Validação do *Firmware* do microcontrolador ESP32

O microcontrolador NUCLEO-F446RE realizou os cálculos das grandezas elétricas e consumo, e ao finalizar, ele enviou os resultados através da comunicação UART para o microcontrolador ESP32.

Ao se conectar na rede Wi-Fi configurada, o ESP32 aguardou até que os resultados fossem recebidos pela comunicação UART e mostrou na tela os registros recebidos. A Figura 59 ilustra a formatação na qual chegam os resultados através da UART para o ESP32.

Figura 59 - Resultados recebidos pelo ESP32



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esses resultados foram processados para que ocorresse a separação de cada grandeza antes do envio ao banco de dados. Como os resultados recebidos foram alocados em uma *string* na memória do ESP32, foi possível separar as grandezas com a utilização de funções das bibliotecas da linguagem C, fazendo com que as grandezas fiquem prontas para o envio ao banco. Com a confirmação da conexão do ESP32 à internet e o recebimento dos dados, foi possível validar o funcionamento do firmware desenvolvido para o ESP32.

5.5 Validação do Banco de Dados

Após o processamento dos resultados pelo microcontrolador ESP32, ele se conectou ao servidor local, executando um arquivo PHP que enviou os resultados ao

banco de dados. A tabela utilizada para armazenar os registros das medições é ilustrada na Figura 43.

Foi possível validar o armazenamento dos registros no banco de dados com os resultados recebidos do ESP32. A Figura 60 ilustra os registros armazenados no banco de dados após o processamento das grandezas pelo ESP32.

Figura 60 - Registros armazenados no banco de dados

			id	tensao	corrente	potaparente	potativa	frequencia	consumo	data_hora	
<input type="checkbox"/>				1	226.93	12.385	2810.54	2810.93	60.1	0.78081	2019-10-20 10:12:02
<input type="checkbox"/>				2	226.61	12.369	2802.85	2801.18	60.1	0.7781	2019-10-20 10:12:03
<input type="checkbox"/>				3	226.52	12.377	2803.7	2801.16	60.54	0.7781	2019-10-20 10:12:04
<input type="checkbox"/>				4	226.81	12.393	2811.01	2809.67	60.54	0.78046	2019-10-20 10:12:05
<input type="checkbox"/>				5	227.19	12.412	2819.95	2819.04	60.26	0.78307	2019-10-20 10:12:06
<input type="checkbox"/>				6	226.95	12.403	2814.86	2814.01	60.26	0.78167	2019-10-20 10:12:07
<input type="checkbox"/>				7	226.74	12.389	2808.96	2808.29	60.4	0.78008	2019-10-20 10:12:08
<input type="checkbox"/>				8	226.86	12.398	2812.57	2811.88	60.4	0.78108	2019-10-20 10:12:09
<input type="checkbox"/>				9	227.25	12.416	2821.57	2820.49	60.27	0.78347	2019-10-20 10:12:10
<input type="checkbox"/>				10	227.06	12.409	2817.61	2815.49	60.27	0.78208	2019-10-20 10:12:11

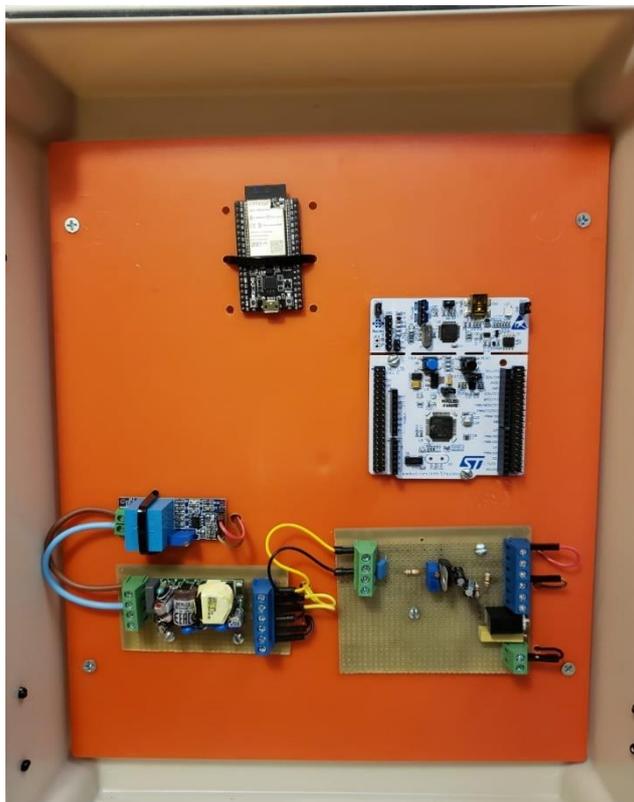
Fonte: Elaborado pelo autor.

As grandezas foram salvas corretamente em suas respectivas colunas sem nenhuma perda. Com os registros salvos no banco de dados foi possível validar mais uma etapa do funcionamento do protótipo, garantindo que os resultados do processamento dos microcontroladores sejam salvos para consultas.

5.5 Montagem do Protótipo

Após a validação dos circuitos condicionadores de sinais e da validação das rotinas de *firmware* desenvolvidas, os componentes do protótipo foram alocados em uma caixa plástica para uma melhor organização e proteção dos componentes. A fiação dos circuitos ficou alocada embaixo da placa de montagem, evitando desconexões indesejadas. A montagem final do protótipo pode ser visualizada na Figura 61.

Figura 61 - Protótipo montado na placa de montagem da caixa de proteção

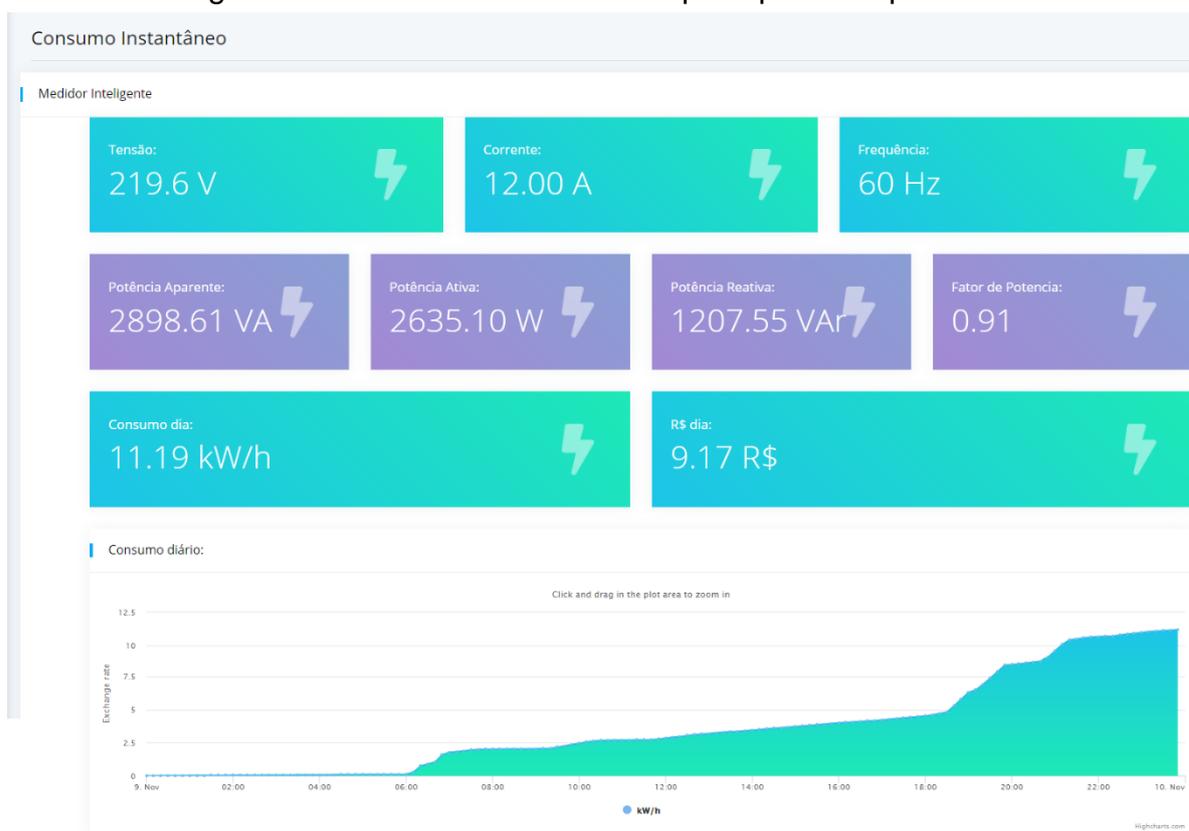


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.7 Validação do Sistema Supervisório

Para validar o sistema supervisório, registros fictícios foram criados no banco de dados simulando o consumo de uma residência, a validação da tela principal ocorreu com a criação de 144 registros que simulam as grandezas elétricas e o consumo de uma residência a cada 10 minutos. Com os registros criados, é possível visualizar na Figura 62 a geração do gráfico com o somatório do consumo, além de verificar que os campos também foram alimentados com as grandezas elétricas do último registro.

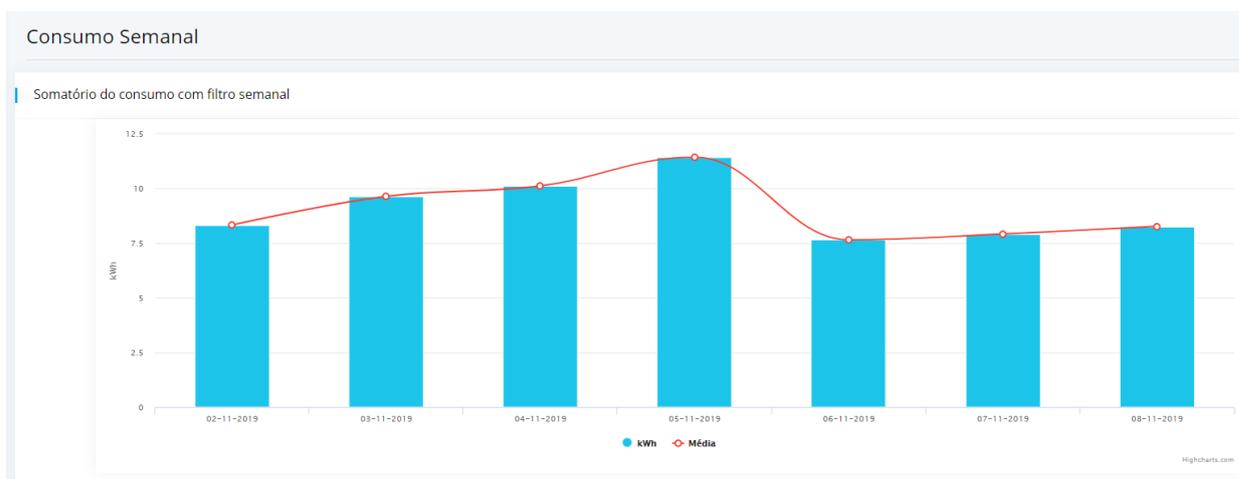
Figura 62 - Funcionamento da tela principal do supervisor



Fonte: Elaborado pelo autor.

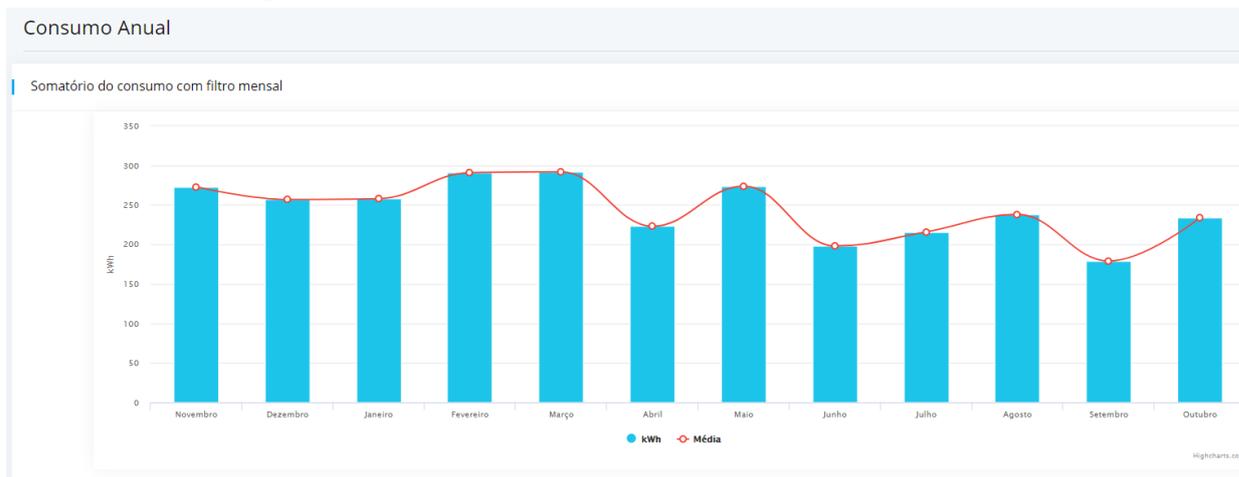
As telas de consumo semanal e consumo mensal também receberam registros fictícios simulando o consumo de uma residência. Para isso foram criados 19 registros que simulam os 12 meses do ano e uma semana completa, alimentando os gráficos de consumo anual e consumo semanal. Os resultados obtidos com a criação dos registros fictícios são ilustrados pelas Figuras 63 e 64, onde é possível visualizar a variação do consumo com os gráficos que apresentam os valores do histórico do consumo anual e histórico do consumo dos últimos 7 dias.

Figura 63 - Funcionamento da tela de consumo semana



Fonte: Elaborado pelo autor.

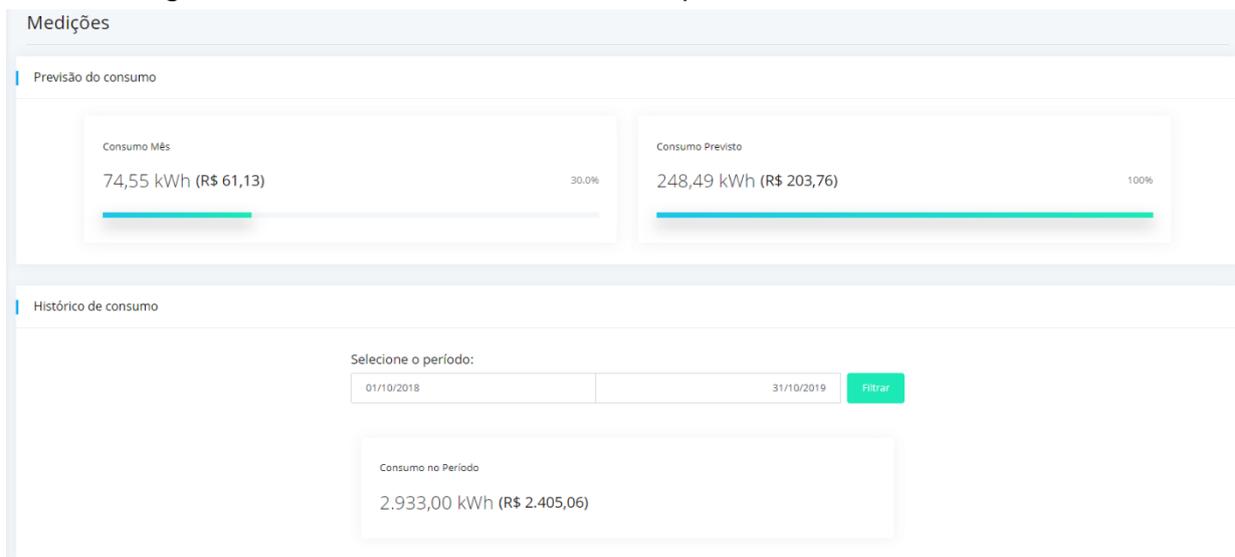
Figura 64 - Funcionamento da tela de consumo anual



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os registros criados no banco de dados também foi possível testar o funcionamento das telas de previsão/histórico do consumo. Conforme ilustra a Figura 65, é possível visualizar que o consumo nos primeiros 10 dias do mês foi de 74,55 kWh (R\$ 61,13) e a previsão de consumo até o final do mês foi de 248,49 kWh (R\$ 203,76). O histórico de consumo também foi testado e como parâmetro de tempo foi passado o intervalo dos últimos 12 meses. O valor retornado pelo supervisor foi de 2933 kWh, que foi o mesmo resultado encontrado no gráfico anual de consumo.

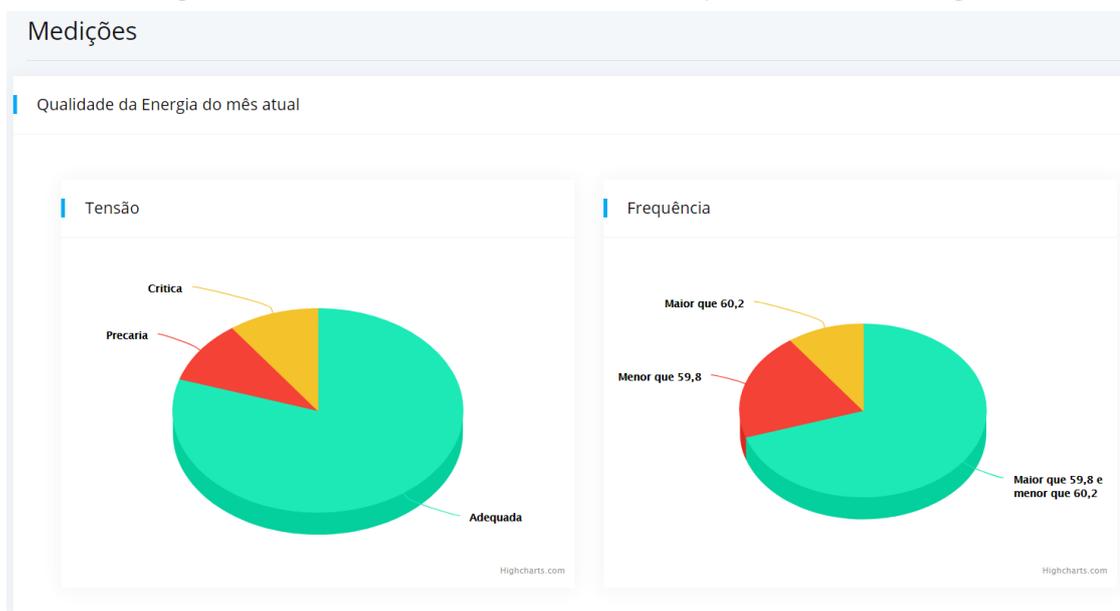
Figura 65 - Funcionamento da tela de previsão/histórico de consumo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Alguns registros precisaram ser criados para a validação da tela de qualidade de energia e novamente foram escolhidos valores fictícios. Para verificar se o gráfico de tensão funciona corretamente foram gerados 8 registros com valores de tensão dentro do limite adequado, 1 registro dentro do limite precário e 1 registro dentro do limite crítico. Esses registros também alimentaram o gráfico de frequência, que apresentou 7 registros dentro do limite de 50,8 Hz até 60,2 Hz, 2 registros abaixo de 50,8 Hz e 1 registro acima de 60,2 Hz. A Figura 66 ilustra os resultados obtidos com a geração destes registros fictícios.

Figura 66 - Funcionamento da tela de qualidade de energia



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a criação dos registros fictícios foi possível validar o funcionamento de todas as funções do sistema supervisor, todos os resultados ficaram conforme o esperado, retornando os valores das grandezas elétricas e consumo corretamente de acordo com os registros criados.

5.8 Validação do Protótipo com o Analisador PQ700

Para validar o funcionamento do protótipo quanto a medição das grandezas elétricas, um analisador de energia devidamente calibrado foi utilizado para medir as mesmas grandezas do protótipo, e ao final das medições os resultados foram comparados e as incertezas de cada medida foram calculadas.

O analisador utilizado para realizar a medição das grandezas elétricas é o PQ-700 da fabricante IMS. Este analisador está em conformidade com o PRODIST 8, e é capaz de medir grandezas elétricas tanto em sistemas monofásicos quanto em sistemas trifásicos.

Os testes foram realizados com cargas resistivas e uma carga mista. As cargas foram alimentadas por uma tomada que também alimentou as ponteiros de prova do analisador e o circuito condicionador de tensão do protótipo. A corrente da carga foi medida pelo analisador através de uma bobina de Rogowski que envolveu o condutor que alimentava a carga, neste condutor também foi envolvido o transformador de corrente que foi ligado ao circuito condicionador de corrente do protótipo.

O analisador foi programado para salvar registros em sua memória interna a cada 5 segundos de medição, esses registros foram salvos em um arquivo que contém os dados das grandezas elétricas medidas e puderam ser visualizados com o auxílio do programa PowerMagager desktop, da mesma fabricante do analisador.

Os resultados das medições do protótipo foram salvos no banco de dados em uma tabela que foi criada especificamente para estas validações. Após as medições, os registros do banco de dados foram exportados para um arquivo com a extensão .CSV para visualização e cálculo dos resultados no *software* Excel.

A validação do protótipo foi realizada com três cargas distintas, duas resistivas que ficaram ligadas durante períodos de aproximadamente 1 hora e 40 minutos e uma carga mista que ficou ligada durante o período de aproximadamente 1 hora. A Figura 67 ilustra o analisador de energia e o protótipo durante a medição das cargas.

Figura 67 - Analisador de energia e protótipo durante a medição das cargas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A primeira carga que foi testada possuía apenas elementos resistivos de aproximadamente $18,5 \Omega$. A potência desta carga deve ficar próxima de 2616 W com uma corrente de aproximadamente $11,9 \text{ A}$, quando alimentada por tensão eficaz de 220 V . A segunda carga também era constituída apenas por elementos resistivos formando uma carga de aproximadamente $34,5 \Omega$. A potência da segunda carga deve ficar próxima de 1403 W com uma corrente de aproximadamente $6,38 \text{ A}$, quando alimentada por tensão eficaz de 220 V . A terceira carga possuía elementos resistivos e indutivos e sua potência aparente deve ficar próxima de 750 W com uma corrente de aproximadamente $3,41 \text{ A}$, quando alimentada por tensão eficaz de 220 V .

Após a realização das medições nas três cargas, os valores das grandezas elétricas do analisador de energia e do protótipo foram obtidos para que sejam comparados. Foram coletados do protótipo no final dos testes 5903 amostras de medição da primeira carga, 6420 amostras de medição da segunda carga e 4032 amostras de medição da terceira carga. Com as amostras coletadas foi possível calcular a média dos valores de tensão e corrente e calcular o desvio padrão entre as leituras. Os resultados são demonstrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de tensão e corrente obtidos nos testes das três cargas.

Carga	Analisador PQ-700				Protótipo			
	Média de	Desvio	Média de	Desvio	Média de	Desvio	Média de	Desvio
	Valores	Padrão	Valores	Padrão	Valores	Padrão	Valores	Padrão
	Tensão	Tensão	Corrente	Corrente	Tensão	Tensão	Corrente	Corrente
	RMS	RMS	RMS	RMS	RMS	RMS	RMS	RMS
Resistores (18,5 Ω)	228,949 V	2,683	12,445 A	0,131	227,021 V	2,065	12,629 A	0,138
Resistores (34,5 Ω)	234,530 V	1,482	6,775 A	0,041	233,534 V	0,987	6,942 A	0,041
Motor	234,532 V	1,099	3,342 A	0,011	232,851 V	0,831	3,468 A	0,011

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a obtenção das amostras de tensão e corrente do analisador e do protótipo, foi possível comparar as grandezas e verificar qual a incerteza de medição em cada grandeza. Na primeira carga de resistores, a diferença na média dos valores de tensão do analisador e do protótipo foi de 1,928 V, resultando em uma incerteza de aproximadamente 1% entre as medidas. A diferença na média de valores de corrente da primeira carga foi de 0,184 A, resultando em uma incerteza de aproximadamente 1,5% entre as medidas.

Na segunda carga de resistores, a diferença na média dos valores de tensão do analisador e do protótipo foi de 0,996 V, resultando em uma incerteza de aproximadamente 0,5% entre as medidas. A diferença na média de valores de corrente da segunda carga foi de 0,168 A, resultando em uma incerteza de aproximadamente 2,5% entre as medidas.

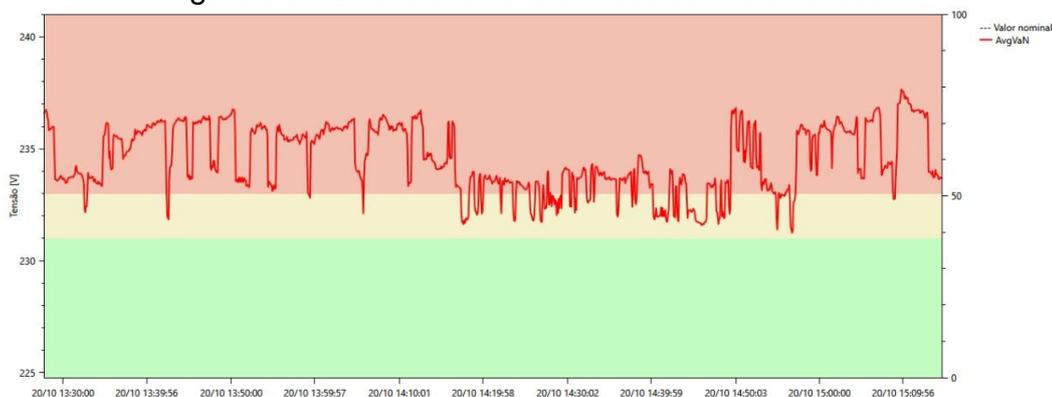
Na medição da carga com elementos resistivos e indutivos, a diferença entre a média dos valores de tensão foi de 1,681 V, resultando em uma incerteza de aproximadamente 1% entre as medidas. A diferença na média de valores de corrente da carga mista foi de 0,126 A, resultando em uma incerteza de aproximadamente 4% entre as medidas.

Os valores do desvio padrão entre as medições de tensão e corrente do analisador e do protótipo ficaram muito próximos, o que significa que em ambos os casos a variação entre os sinais foi praticamente a mesma.

As Figuras 68, 69, 70 e 71 ilustram os sinais de tensão e corrente obtidos com o analisador de energia e com o protótipo na medição da carga resistiva de 34,5 Ω . É possível observar que o comportamento dos sinais medidos foi muito parecido, e em todos os gráficos foi possível acompanhar as variações que ocorreram na rede

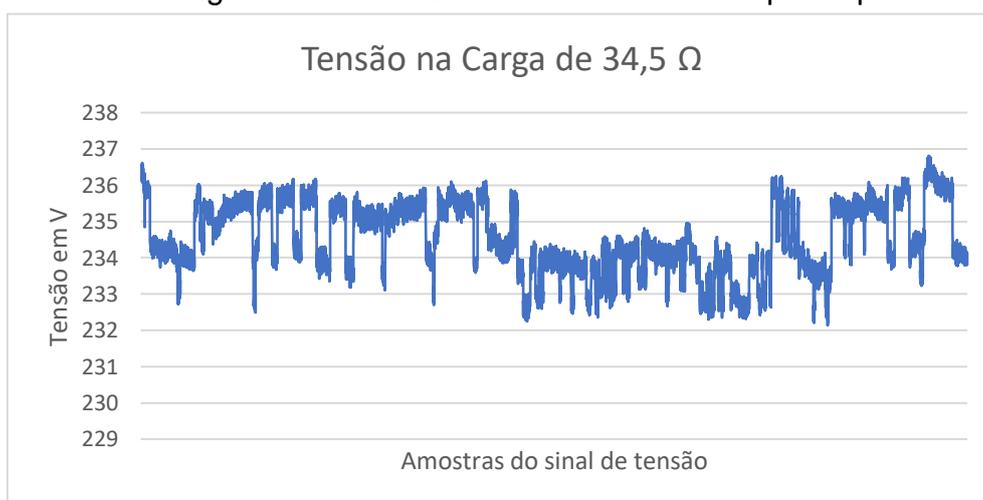
durante a medição. Os gráficos obtidos com o analisador estão com as grandezas acumuladas a cada 5 segundos, e os gráficos obtidos com o protótipo estão com as grandezas acumuladas a cada 1 segundo.

Figura 68 - Sinal de tensão obtidos com o analisador.



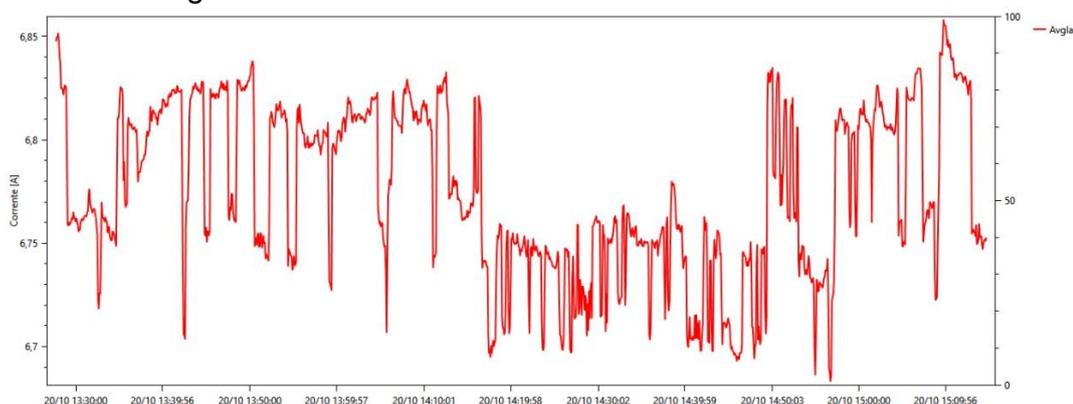
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 69 - Sinal de tensão obtido com o protótipo.



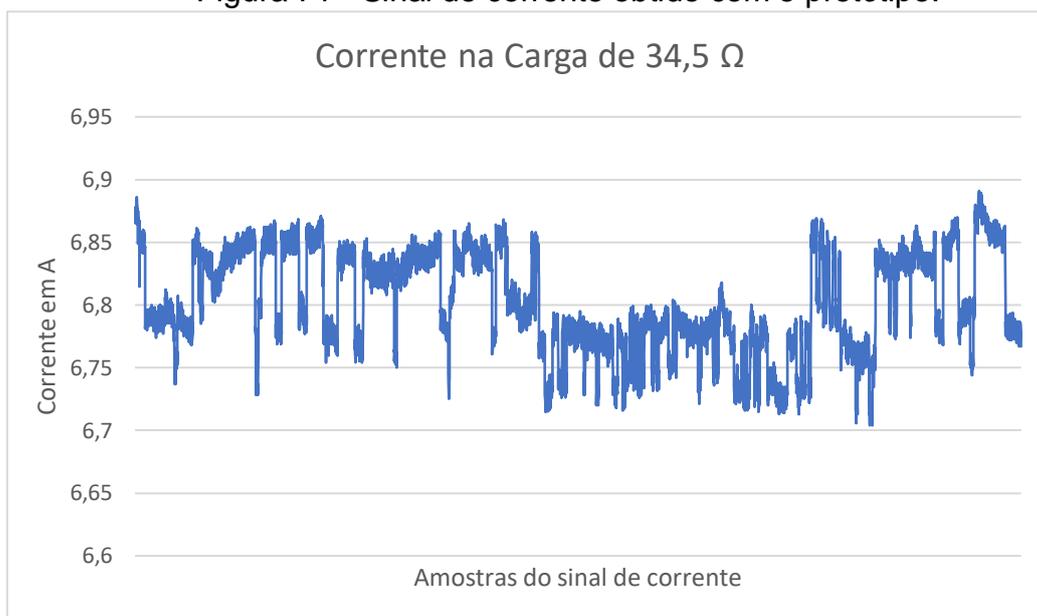
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 70 - Sinal de corrente obtido com o analisador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 71 - Sinal de corrente obtido com o protótipo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além dos dados de tensão e corrente, os valores de potência elétrica e consumo também foram mensurados nos testes anteriores. Os dados de potência aparente, potência ativa e consumo foram obtidos do analisador de energia e do protótipo podendo ser visualizados na Tabela 6.

Tabela 6 -Valores de potência e consumo obtidos nos testes das três cargas.

Carga	Analisador PQ-700					Protótipo				
	Média dos valores	Desvio Padrão	Média dos valores	Desvio Padrão	Consumo	Média dos valores	Desvio Padrão	Média dos valores	Desvio Padrão	Consumo
	Potência Aparente	Potência Aparente	Potência Ativa	Potência Ativa		Potência Aparente	Potência Aparente	Potência Ativa	Potência Ativa	
Resistores (18,5 Ω)	2849,71 VA	63,38	2849,62 W	63,37	4,72 kWh	2867,10 VA	56,78	2865,93 W	57,53	4,77 kWh
Resistores (34,5 Ω)	1588,93 VA	19,56	1588,87 W	19,56	2,83 kWh	1621,29 VA	16,20	1620,42 W	16,62	2,88 kWh
Motor	783,86VA	7,01	595,21 W	5,06	0,67 kWh	807,58 VA	4,94	611,70 W	5,77	0,70 kWh

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a obtenção das amostras de potência aparente, potência ativa e consumo do analisador e do protótipo, foi possível comparar as grandezas e verificar qual a incerteza de medição em cada grandeza.

Na primeira carga de resistores, a diferença na média dos valores de potência aparente do protótipo e do analisador ficou em 17,39 VA, resultando em uma incerteza de aproximadamente 1% entre as grandezas. A diferença na média dos valores de potência ativa na carga foi de 16,30 W, resultando em uma incerteza de aproximadamente 1% entre as grandezas. A variação entre os valores de consumo

na carga de $18,5 \Omega$ foi de 0,05 kWh, resultando em uma incerteza de aproximadamente 1,5% entre as medições.

Na segunda carga de resistores, a diferença na média dos valores de potência aparente do protótipo e do analisador ficou em 32,36 VA, resultando em uma incerteza de aproximadamente 2% entre as grandezas. A diferença na média dos valores de potência ativa na carga foi de 31,55 W, resultando em uma incerteza de aproximadamente 2% entre as grandezas. A variação entre os valores de consumo na carga de $18,5 \Omega$ foi de 0,05 kWh, resultando em uma incerteza de aproximadamente 1,5% entre as medições.

Na carga mista composta por elementos resistivos e indutivos, a diferença na média dos valores de potência aparente do protótipo e do analisador ficou em 23,72 VA, resultando em uma incerteza de 3% entre as grandezas. A diferença na média dos valores de potência ativa na carga mista foi de 16,49 W, resultando em uma incerteza de aproximadamente 2% entre as grandezas. A variação entre os valores de consumo na carga mista foi de 0,04 kWh, o que resultou em uma incerteza de aproximadamente 5% entre as medições do analisador e do protótipo.

Com os valores de potência da carga mista foi possível comparar o fator de potência obtido com o analisador e com o protótipo. Os valores do fator de potência medidos podem ser visualizados na tabela 7, onde a diferença entre o analisador e o protótipo foi de aproximadamente 0,013, resultando em uma diferença de aproximadamente 2%.

Tabela 7- Fator de Potência obtido com o analisador e com o protótipo.

Carga	Analisador PQ-700 Fator de Potência	Protótipo Fator de Potência
Motor	0,761	0,748

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar com a comparação entre os resultados obtidos que não houveram grandes divergências entre os resultados das grandezas mensuradas pelo analisador e pelo protótipo. Os resultados obtidos com essa validação se mostraram bastante satisfatórios, comprovando o funcionamento do protótipo e atingindo o objetivo deste trabalho.

6. CONCLUSÃO E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusão

Com a análise dos resultados obtidos nas etapas de validação do protótipo, conclui-se que a construção e funcionamento do protótipo estão de acordo com os objetivos levantados para este trabalho. Na etapa de fundamentação teórica foi possível encontrar soluções para o desenvolvimento de todas as etapas do medidor inteligente, desde o *hardware* até o desenvolvimento das rotinas de *firmware* e *software*.

Durante o desenvolvimento deste trabalho foi possível desenvolver circuitos de alimentação e instrumentação para o protótipo, que juntamente com as rotinas de *firmware* desenvolvido, possibilitaram a medição de sinais de tensão, corrente, potências e consumo. A utilização de um microcontrolador com antena Wi-Fi integrada possibilitou que os resultados fossem enviados através da internet, e a comunicação UART utilizada entre os microcontroladores funcionou corretamente.

A utilização de um servidor local possibilitou a integração entre o protótipo e o sistema SCADA desenvolvido. No servidor local os resultados da medição do protótipo puderam ser salvos em um banco de dados, que atuou como memória de massa do sistema salvando os registros para consultas futuras. Também no servidor local ficaram hospedados os arquivos de funcionamento do supervisório, que podem ser acessados por usuários que estejam conectados na mesma rede do servidor local.

Além da comunicação Wi-Fi, o desenvolvimento de um sistema SCADA trouxe o conceito de medidor inteligente para este trabalho. No sistema de supervisão o usuário consegue acompanhar as grandezas elétricas em tempo real, visualizar o consumo dos últimos 12 meses, verificar a qualidade de energia entregue pela concessionária, acompanhar o seu consumo atual e a previsão de consumo no mês, ajudando ao usuário do sistema no planejamento e conscientização do consumo e gastos do mês.

Todas as etapas deste trabalho foram testadas e apresentaram resultados satisfatórios, os circuitos desenvolvidos apresentaram os resultados esperados, as rotinas de *firmware* e comunicação entre os microcontroladores funcionaram corretamente, o banco de dados conseguiu salvar as grandezas medidas e o sistema SCADA possibilitou um acesso bastante intuitivo a todas essas informações. A

validação das medições do protótipo ocorreu com um analisador de energia e pode ser considerada satisfatória, onde pequenas divergências foram encontradas nas medições, mas não representaram grande impacto nos resultados.

Conclui-se que os objetivos deste trabalho foram atingidos, o conceito de medidor inteligente pode ser implementando neste protótipo possibilitando que os usuários acompanhem os registros em tempo real das grandezas elétricas e acompanhem a previsão de consumo do mês. Essas informações que podem ser visualizadas no supervisor possibilitam que o usuário final tenha um maior entendimento sobre o consumo de sua residência e que além da conscientização em relação ao consumo, ele possa melhorar o planejamento de seus gastos.

6.2 Propostas de Trabalhos Futuros

Algumas oportunidades de melhoria e trabalhos futuros podem ser aplicadas para este protótipo. Como proposta de melhorias a este trabalho, sugere-se o desenvolvimento de um sistema capaz de medir as grandezas elétricas em um sistema trifásico de energia, que juntamente com a utilização de sensores com maior capacidade de medição, este conceito também pode ser implementado para o ambiente industrial.

Outra proposta de melhoria a este trabalho é a hospedagem do banco de dados e dos arquivos *web* em um servidor *web*, onde os usuários do sistema consigam acompanhar o seu funcionamento sem necessariamente estarem conectados na mesma rede Wi-Fi do protótipo.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de um sistema que possa controlar a rede elétrica através das medições instantâneas, possibilitando o desligamento do sistema ou compensação em casos de subtensão, sobretensão e frequências fora da faixa aceitável. Neste sistema também podem ser programados avisos por meio de mensagens via celular e e-mail, que alertam o usuário quanto ao consumo e qualidade de energia.

Outra proposta de trabalho futuro é o desenvolvimento de um analisador de energia inteligente, que além de mensurar as grandezas elétricas de um medidor de energia, consiga mensurar as harmônicas do sistema no qual ele está realizando a medição, salvando estes registros em uma memória de massa.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **ANEEL**: Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição. 2019. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita>>. Acesso em: 24 ago. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **PRODIST**: módulo 8 – qualidade de energia elétrica. 10. ed. Brasília, 2018. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9>. Acesso em: 18 jun. 2019.

ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. 5. ed. Porto Alegre : AMGH, 2013.

ARM. **ARM Cortex processors**. Londres: Arm, 2017. Disponível em: <<https://developer.arm.com/ip-products/processors/cortex-m/cortex-m4> > Acesso em: 18 jul. 2019.

BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner J. **Instrumentação e fundamentos de medidas, v.1**. 2. ed. Rio de Janeiro : LTC, 2011. Livro eletrônico.

BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner J. **Instrumentação e fundamentos de medidas, v.2**. 2. ed. Rio de Janeiro : LTC, 2011. Livro eletrônico.

BOYER, Stuart A. **SCADA**: supervisory control and data acquisition. 4. ed. Estados Unidos : ISA - International Society of Automation, 2010. 27 jul. 2019.

CATSOULIS, John. **Designing Embedded Hardware, Second Edition**. 2. ed. Estados Unidos : O'Reilly Media, Inc, 2005.

DIAS, Renata Rampim de Freitas. **Internet das coisas sem mistérios**: uma nova inteligência para os negócios. São Paulo : Netpress Books, 2016.

ESPRESSIF. **ESP32 SERIES** datasheet. 3.2. ed. 2019. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2019.

FOWLER, Richard. **Fundamentos de eletricidade, V.1:** corrente contínua e magnetismo. 7. ed. Porto Alegre : AMGH, 2012. Livro eletrônico.

FOWLER, Richard. **Fundamentos de eletricidade, V.2:** corrente alternada e instrumentos de medição. 7. ed. Porto Alegre : AMGH, 2012. Livro eletrônico.

INTERPLUS INDUSTRY. **ZMPT101B**. Disponível em: <http://www.interplus-industry.fr/index.php?option=com_content&view=article&id=52&Itemid=173&lang=en>. Acessado em: 21 ago. 2019.

KABIR, Yasin; MOHSIN, Yusuf Mohammad; KHAN, Mohammad Monirujjaman. **Automated Power Factor Correction and Energy Monitoring System**. 2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT). fev. 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8117969>>. Acessado em: 02. jul. 2019.

MARTINHO, Edson. **Distúrbios da energia elétrica**. 3. ed. rev. São Paulo : Érica, 2013. Livro eletrônico.

MW. **MFM-10 series**. Taiwan : MW, jan. 2018. Disponível em: <<https://www.meanwell.com/webapp/product/search.aspx?prod=MFM-10>>. Acessado em: 12. jun. 2019.

MITROVIC, Vladimir; MIJALKOVIC, Milan. **Power quality data logger with internet access**. 2017 International Symposium on Power Electronics (Ee). out. 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8171702>>. Acessado em: 04. jun. 2019.

MUSLEH, Ahmed S.; DEBOUZA, Mahdi; FAROOK, Mohamed. **Design and Implementation of Smart Plug**: An Internet of Things (IoT) Approach. 2017 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA). nov. 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8252033>>. Acessado em: 05 jul. 2019.

NAHVI, Mahmood. **Circuitos elétricos**. 5. ed. Porto Alegre : Bookman, 2014. Livro eletrônico.

NALON, José Alexandre. **Introdução ao Processamento Digital de Sinais**. Rio de Janeiro : LTC, 2009. Livro eletrônico.

PORTER, Michael E.; HEPPELMANN, James E. How Smart, Connected Products Are Transforming Competition. **Harward Business Review**, nov. 2014. Disponível em: <<https://hbr.org/2014/11/how-smart-connected-products-are-transforming-competition>>. Acesso em: 21 jun. 2019.

RASHID, Muhammad. H. **Electric Renewable Energy Systems**. Estados Unidos : Elsevier, 2015.

RIO GRANDE ENERGIA (RGE). **RGE**: Smart Grid o que é? 2019. Disponível em: <<https://www.rge-rs.com.br/energias-sustentaveis/sites-tematicos/smart-grid/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 24 ago. 2019.

ST. **RM0390 Reference manual**: STM32F446xx advanced Arm®-based 32-bit MCUs. 4 ed. rev. ST: fev. 2018. Disponível em: <https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/4d/ed/bc/89/b5/70/40/dc/DM00135183.pdf/files/DM00135183.pdf/jcr:content/translations/en.DM00135183.pdf>. Acesso em: 09 jul. 2019.

SUEHRING, Steve; VALADE, Janet. **PHP, MySQL, JavaScript & HTML5 All in-One For Dummies**. Nova Jersey : John Wiley & Sons, Inc, 2013.

TAVARES, Hugo; PRADO, Bruno; BISPO, Kalil; DANTAS, Daniel. **A Non-intrusive Approach for Smart Power Meter**. 2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). jul. 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=8471960>>. Acessado em: 03 jul. 2019.

TEXAS INSTRUMENTS. **Multi-phase Power Quality Measurement With Isolated Shunt Sensors**. 2016. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ug/tidubo7a/tidubo7a.pdf>>. Acesso em: 04 mai. 2019.

THOMAS, Mini S.; MCDONALD, John D. **Power System SCADA and Smart Grids**. Nova Iorque : CRC Press, 2015.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE DIABETES (SBD). Tipos de diabetes. São Paulo, [2015?]. Disponível em: . Acesso em: 09 fev. 2015.

XAMPP. **XAMPP: Sobre**, [S.l., 2019]. Disponível em: <https://www.apachefriends.org/pt_br/about.html> Acesso em: 08 dez. 2019.

YHDC. **SCT-013** datasheet. Disponível em: < https://www.mcielectronics.cl/website_MCI/static/documents/Datasheet_SCT013.pdf >. Acesso em: 08 jul. 2019.