

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

GUSTAVO FISCHBORN POHREN

CONTROLADOR DE FATOR DE POTÊNCIA APLICADO À INDÚSTRIA 4.0

São Leopoldo
2019

GUSTAVO FISCHBORN POHREN

CONTROLADOR DE FATOR DE POTÊNCIA APLICADO À INDÚSTRIA 4.0

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. Me. Eduardo Augusto Martins

São Leopoldo

2019

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradecimento a minha família, por todo apoio e compreensão durante a trajetória da graduação, que durante dificuldades nos estudos e alguns contratempos do cotidiano, não mediram esforços para ajudar e possibilitar meu sucesso.

Agradecimento aos amigos que fiz durante a graduação, onde juntos superamos desafios impostos em algumas disciplinas.

Ao Professor Lúcio Renê Prade, agradeço pelos ensinamentos na disciplina de Microcontroladores II, sendo dedicada e voltada ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Eduardo Augusto Martins, agradeço pela excelente orientação neste trabalho, além de conselhos, auxílios e ensinamentos durante a graduação.

RESUMO

Este projeto aborda o estudo e implementação de um controlador de Fator de Potência utilizando microcontrolador ESP32, que possui módulo de comunicação Wi-Fi integrado para conexão a um supervisório, sendo este o ambiente de desenvolvimento LabVIEW, para controle remoto e aquisição de dados, viabilizando a interface na automação voltada à tecnologia na indústria 4.0. Iniciado com o estudo das principais características necessárias ao desenvolvimento do projeto do controlador, variáveis elétricas a serem medidas e métodos para obtê-las com precisão, e com estas medidas, realizar o controle e correção do Fator de Potência, melhorando a qualidade de energia na instalação elétrica. Em uma última etapa são apresentados os resultados esperados na a implementação de um protótipo, que, a partir de medições de sinais elétricos, analisa as características pertinentes e conecta estágios de capacitores ao sistema elétrico de potência da planta, para corrigir o fator de potência para o valor desejado, respeitando os limites pré-estabelecidos, confirmando o correto funcionamento do dispositivo.

Palavras-chave: Industria. Potência. Qualidade. Microcontrolador. Supervisório.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Defasagem entre Tensão e Corrente	13
Figura 2 - Triângulo das Potências	15
Figura 3 – Diagrama de ligação controlador automático de FP	17
Figura 4 – Disposição Física dos pinos do Módulo ESP-WROOM-32	25
Figura 5 – Legenda dos sinais do Módulo ESP-WROOM-32.....	26
Figura 6 – Exemplo de rede utilizando TCP/IP.....	27
Figura 7 – Diagrama do Sistema	33
Figura 8 – Ligação Interna do Sensor de Corrente	34
Figura 9 – Sensor de Corrente de 20 A / 1,0 V não invasivo	35
Figura 10 – Ligação da medição de Corrente	36
Figura 11 – Ligação da medição de Tensão	37
Figura 12 – Tela do supervisorio em modo Automático	39
Figura 13 – Tela do supervisorio em modo Manual	40
Figura 14 – Fluxograma para acionamento manual via botões.....	41
Figura 15 – Fluxograma da lógica de programação	42
Figura 16 – Sequência lógica da programação das medições.....	43
Figura 17 – Sequência lógica da programação de cálculo de FP e correção	44
Figura 18 – Fluxograma de Rede Wi-Fi.....	45
Figura 19 – Fluxograma Código main	49
Figura 20 – Fluxograma Código Entradas e Saídas Digitais.....	50
Figura 21 – Fluxograma Código Timer	51
Figura 22 – Fluxograma Código ADC.....	52
Figura 23 – Fluxograma Código Cálculo	53
Figura 24 – Fluxograma Código Wi-Fi.....	54
Figura 25 – Tela ilustrativa do Sistema Supervisorio em modo Automático	55
Figura 26 – Tela ilustrativa do Sistema Supervisorio em modo Manual.....	55
Figura 27 – Medição do controlador com Resistência.....	57
Figura 28 – Medição do controlador com Resistência e Motor	59
Figura 29 – Medição do controlador com Resistência e Capacitor	61
Figura 30 – Medições em modo Automático	63
Figura 31 – Medições em modo Automático com um estágio de Capacitor	63
Figura 32 – Medição em modo Automático com dois estágios de Capacitores	64

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Frontal de Painel para Correção de Fator de Potência.....	18
Fotografia 2 - Interno de Painel para Correção de Fator de Potência.....	19
Fotografia 3 - Microcontrolador ESP-WROOM-32	34
Fotografia 4 - Módulo de Quatro Relés de Interface	38
Fotografia 5 - Fonte auxiliar 5 Vcc.....	38
Fotografia 6 - Medidor de Qualidade de Energia.....	46
Fotografia 7 – Montagem Física do Protótipo do controlador de Fator de Potência .	48
Fotografia 8 – Placa informativa do motor monofásico utilizado	56
Fotografia 9 – Modelo de capacitor utilizado	56
Fotografia 10 – Medições Analisador e Amperímetro com Resistência	58
Fotografia 11 – Medições Analisador e Amperímetro com Resistência e Motor.....	59
Fotografia 12 – Medições Analisador e Amperímetro com Resistência e Capacitor.	61

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Forma de onda medida com Resistência	58
Gráfico 2 - Forma de onda medida com Resistência e Motor	60
Gráfico 3 - Forma de onda medida com Resistência e Capacitores	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classe de Exatidão de TC para Erro de Corrente	21
Tabela 2 – Classe de Exatidão de TC para Erro de Fase	22
Tabela 3 – Classe de Exatidão de TP para Erro de Tensão e Fase	24
Tabela 4 – Medições elétricas verificadas	65

LISTA DE SIGLAS

ADC	Conversor Analógico Digital
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CLP	Controlador Lógico Programável
DAC	Conversor Digital Analógico
FP	Fator de Potência
GND	<i>Graduated Neutral Density</i>
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
IHM	Interface Homem Máquina
IP	<i>Internet Protocol</i>
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
LAN	<i>Local Area Network</i>
LED	Diodo Emissor de Luz
NBR	Norma Brasileira
OT	Tecnologia Operacional
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SCD	Sistema de Controle Distribuído
SCL	<i>Serial Clock Line</i>
SDA	<i>Serial Data Line</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
TC	Transformador de Corrente
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
TI	Tecnologia da Informação
TP	Transformador de Potencial
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1 Fator de Potência.....	13
2.1.1 Regulamento do Fator de Potência	15
2.1.2 Causas do Baixo Fator de Potência	16
2.1.3 Correção do Fator de Potência.....	16
2.2 Instrumentação	19
2.2.1 Medição de Corrente Elétrica	19
2.2.2 Medição de Tensão Elétrica	22
2.3 Microcontroladores	24
2.3.1 Microcontrolador ESP32®	24
2.4 Comunicação	26
2.4.1 Protocolo TCP/IP - UDP	26
2.4.2 Rede Wi-Fi.....	27
2.5 Automação em Processos Industriais.....	28
2.5.1 Sistemas de Controle	28
2.5.2 Sistemas Supervisórios	29
2.5.3 Indústria 4.0	30
3 TRABALHOS CORRELATOS	31
4 METODOLOGIA.....	33
4.1 Microcontrolador Aplicado	34
4.2 Medição de Corrente	34
4.3 Medição de Tensão.....	36
4.4 Relés de Interface	37
4.5 Interface do Controlador	38
4.5.1 Interface Remota – Supervisório	38
4.5.2 Interface Local	40
4.6 Configuração do Microcontrolador.....	41
4.6.1 Lógica de Programação.....	42
4.6.2 Configuração de Comunicação Wi-Fi.....	45
4.7 Validação e Testes.....	46

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	48
5.1 Montagem de <i>Hardware</i>	48
5.2 Configuração do controlador ESP32	49
5.2.1 Código Principal.....	49
5.2.2 Função de Entradas e Saídas Digitais	50
5.2.3 Função de Timer.....	51
5.2.4 Função de Entradas Analógicas.....	51
5.2.5 Função de Cálculo	52
5.2.6 Função de Comunicação Wi-Fi	53
5.3 Configuração do Sistema Supervisório	54
5.4 Testes.....	56
5.4.1 Carga Resistiva em Modo Manual.....	57
5.4.2 Carga Resistiva e Indutiva em Modo Manual	58
5.4.3 Carga Resistiva e Capacitiva em Modo Manual	60
5.4.4 Medição em Modo Automático	62
5.5 Validação	64
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

Em instalações elétricas, o fator de potência, que mede o aproveitamento de energia elétrica, é uma medida importante para a qualidade de suas características. Com um valor adequado é possível utilizar maior parte da potência gerada e diminuir as perdas na rede. (NISKIER, 2013).

Conforme Niskier (2013), as instalações industriais recebem uma especial atenção em função da representação de um elevado percentual de consumo de toda potência gerada, além de utilizar a maioria de suas cargas com características indutivas, alterando expressivamente o valor do fator de potência.

Em geral, muitas empresas recebem multas das concessionárias de energia elétrica devido ao baixo fator de potência, que sofre alteração pelas características de suas cargas. A concessionária aplica multa ao consumidor por estar sobrecarregando cabos e transformadores, também o aumento no desgaste de equipamentos de proteção e manobra, o aumento das perdas e quedas de tensão, isto devido às correntes exigidas por cargas reativas. (CREDER, 2016).

Além de receber multa por prejudicar a rede da concessionária, instalações com baixo fator de potência diminuem a eficiência de suas instalações elétricas. Com a correção, a sua instalação pode conduzir a correta energia para que foi dimensionada e diminuir o carregamento da rede de fornecimento. (NISKIER, 2013).

A correção do fator de potência pode ser realizada com o uso de técnicas variadas, mas pode ser destacado o melhoramento mediante a conexão de capacitores em instalações elétricas, que normalmente têm características indutivas por se utilizar equipamentos com bobinados como transformadores de potência e motores de indução. (CREDER, 2016).

Ainda Creder (2016), enfatiza a correção automática do fator de potência, onde podem ser utilizados controladores, que fazem medições de tensão e corrente e, a partir destas grandezas, definem valores do fator de potência. Caso necessário aciona estágios de capacitores para a corrigi-lo.

Uma tendência de automação e aquisição de dados na área fabril é a indústria 4.0, onde empresas possuem praticamente todo o controle de sua produção, sendo número de peças produzidas, peças com defeito, descarte, além de possibilitar a informação sobre medidas elétricas, consumo de energia de cada máquina ou setor. Esta interface é realizada em supervisórios, adquirindo as informações das variáveis

desejadas, possibilitando a leitura em tempo real ou em banco de dados. (SANTOS, 2018).

Uma das principais causas prejudiciais para a qualidade de energia é a diminuição excessiva do valor do fator de potência (FP), onde determinada característica da carga faz com que a onda de corrente seja defasada da onda de tensão, assim alterando o FP. (CREDER, 2016).

Na indústria são aplicados controladores de FP que apenas fazem sua função de corrigi-lo. Alguns possuem tipos de comunicação que utilizam tecnologia de redes via cabos, que por estar em meio a máquinas dos mais variados tipos, podem perder dados por interferências causadas por diversos dispositivos instalados nos ramais alimentadores.

O objetivo deste trabalho é compreender a estrutura técnica de medição, controle de componentes elétricos, microcontrolador e comunicação com equipamentos externos, realizar o estudo e a implementação de um controlador de fator de potência utilizando microcontrolador, com comunicação remota sem fios.

Com comunicação Wi-Fi possibilitar a conexão a um supervisor, para controle remoto do valor desejado de FP e aquisição de dados, dentre elas a tensão e a corrente, viabilizando a interface na automação voltada à tecnologia na indústria 4.0. Com estas características, confeccionar o controlador com custo acessível a indústrias de menor ou maior porte, eficiência e facilidade de acesso aos dados por ele medidos, permitindo o controle do acionamento de seccionadores de potência para inserção de capacitores na instalação desejada.

Este trabalho é organizado em seis capítulos, sendo eles a Introdução ao assunto em estudo, com seções como o Problema a ser proposto solução, do Objetivo a ser atingido e Organização do Trabalho, a Fundamentação Teórica e suas seções, o Referencial Teórico, a Metodologia e suas seções o Cronograma e as Considerações Finais.

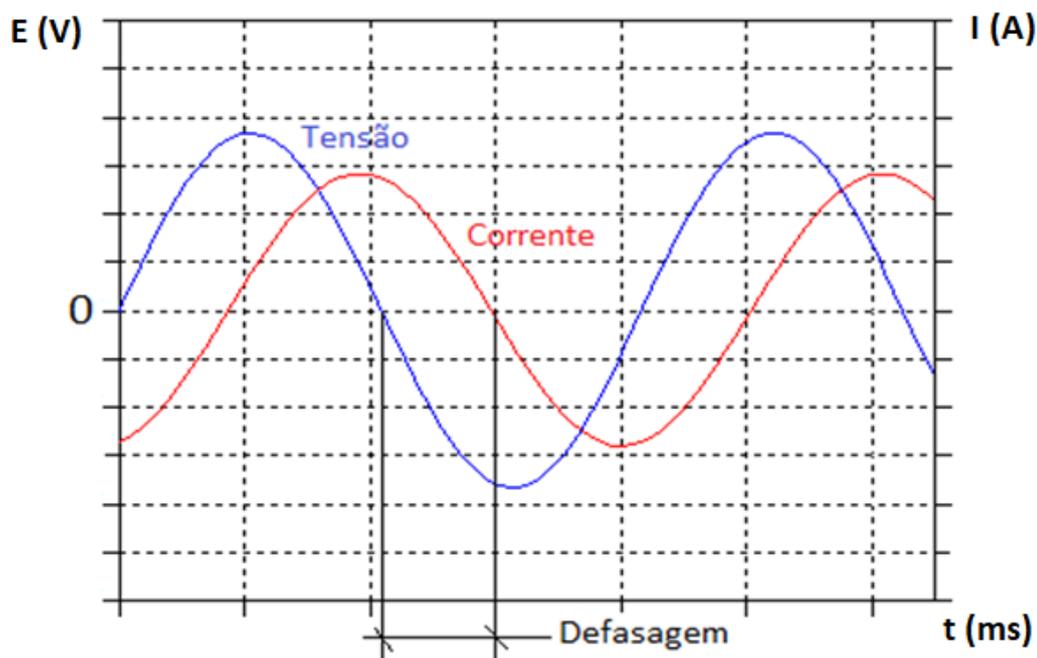
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária para o estudo e implementação do trabalho proposto, contendo pesquisa bibliográfica dos assuntos abordados, principalmente sobre o Fator de Potência sua correção.

2.1 Fator de Potência

Conforme Niskier (2013), em circuitos de corrente alternada, onde possuem apenas cargas resistivas, a tensão e a corrente possuem o mesmo ângulo de fase ($\Phi=0$), consumindo a máxima potência. Em circuitos que possuem cargas indutivas envolvidas, se observa o efeito de atraso da corrente em relação à tensão conforme Figura 1, alterando o ângulo de defasagem entre elas.

Figura 1 - Defasagem entre Tensão e Corrente



Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Creder (2016), fator de potência é o termo utilizado para expressar o cosseno do ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente, geralmente representado com valores entre 0 e 1 ou em termos percentuais de 0% a 100%.

Ainda, conforme Creder (2016), circuitos ditos indutivos são consumidores de energia reativa, com FP em atraso, já os circuitos chamados de capacitivos são fornecedores de energia reativa, com FP em avanço.

Creder (2016) também aborda o cálculo do valor do FP de um circuito envolve algumas variáveis, como a Tensão, Corrente, Potência Ativa, Potência Reativa, Potência Aparente e ângulo de defasagem. Podem ser expressas pelas equações (1) e (2):

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

$$FP = \cos \Phi = \frac{P}{S}, \quad (2)$$

onde:

- S = potência aparente;
- P = potência ativa;
- Q = potência reativa;
- $\cos \Phi$ = fator de potência;
- Φ = ângulo de fase.

Para circuitos monofásicos, as equações (3) e (4) definem as potências ativa e reativa:

$$P = E \cdot I \cdot \cos \Phi, \quad (3)$$

$$Q = E \cdot I \cdot \sin \Phi, \quad (4)$$

onde:

- E = tensão;
- I = corrente.

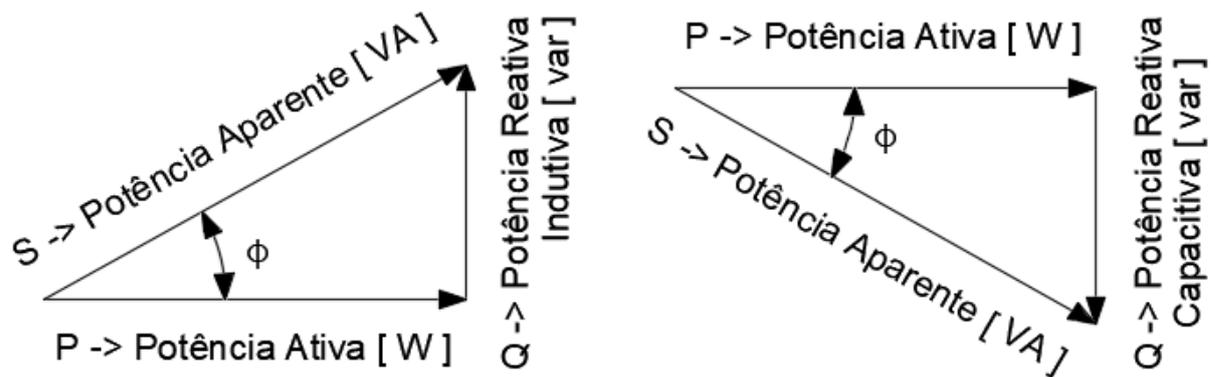
Para circuitos trifásicos, as equações (5) e (6) definem as potências ativa trifásica e reativa trifásica:

$$P = \sqrt{3} \cdot E \cdot I \cdot \cos \Phi, \quad (5)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot E \cdot I \cdot \sin \Phi. \quad (6)$$

As potências Aparente (S), Ativa (P) e Reativa (Q) podem ser relacionadas mediante ao triângulo das potências conforme Figura 2, onde se tem respectivamente a hipotenusa, cateto adjacente e cateto oposto. O FP é expresso como o cosseno do ângulo entre a potência aparente e potência ativa. (CREDER, 2016).

Figura 2 - Triângulo das Potências



Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de CREDER, 2016

2.1.1 Regulamento do Fator de Potência

O regulamento sobre o fornecimento de energia reativa e critérios de faturamento vigente é definido pela ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, na resolução nº 414/2010 de 9 de setembro de 2010, artigos 95, 96 e 97, onde estabelece o limite mínimo de referência do fator de potência de 0,92 na medição do consumidor, tanto indutivo quanto capacitivo, sendo que na constatação de valor medido abaixo do especificado é cobrado por energia reativa excedente. (CREDER, 2016).

Creder (2016), destaca que a ANEEL estabelece que a energia reativa indutiva deve ser medida ao longo das 24 horas do dia, já a energia reativa capacitiva, se a distribuidora realizar a medição, esta deverá ser feita durante 6 horas consecutivas entre 23h30 e 6h30, podendo variar o horário deste período dependendo de cada concessionária, neste caso a energia reativa indutiva deve ser medida apenas nas 18 horas restantes do dia.

2.1.2 Causas do Baixo Fator de Potência

Como Creder (2016) menciona, na análise de uma instalação, antes de investir na correção do fator de potência, é necessário identificar as possíveis causas dos reativos e assim ter uma correção ao menos parcial e diminuir o investimento aplicado.

Creder (2016) descreve que o nível de tensão acima do valor nominal tem influência negativa sobre o FP de instalações, pois a potência é proporcional ao quadrado da tensão, assim quanto maior o valor da tensão, maior a quantidade de reativos absorvido pela carga e menor será o fator de potência.

Motores de indução operando em vazio ou superdimensionados também contribuem para a alteração do FP, se estiverem com carga abaixo de 50% da nominal, o fator de potência diminui expressivamente. (CREDER, 2016). Por este motivo que é necessário realizar o correto dimensionamento de motores de indução para a carga necessária, assim evitando este efeito.

Ainda Creder (2016) menciona que o mesmo efeito pode ser observado em transformadores em vazio ou com pequenas cargas, muitas vezes superdimensionados, poderão consumir maior quantidade de reativos.

2.1.3 Correção do Fator de Potência

Na indústria podem ser aplicados alguns métodos para a correção do fator de potência, sendo o mais utilizado a instalação de bancos de capacitores em paralelo com a rede elétrica, devido ao menor custo de implantação e manutenção. Outra alternativa é o uso de motor síncrono operando superexcitado, por se tratar de motores de valor comercial elevado, deve-se analisar se aplicação é viável economicamente. (CREDER, 2016).

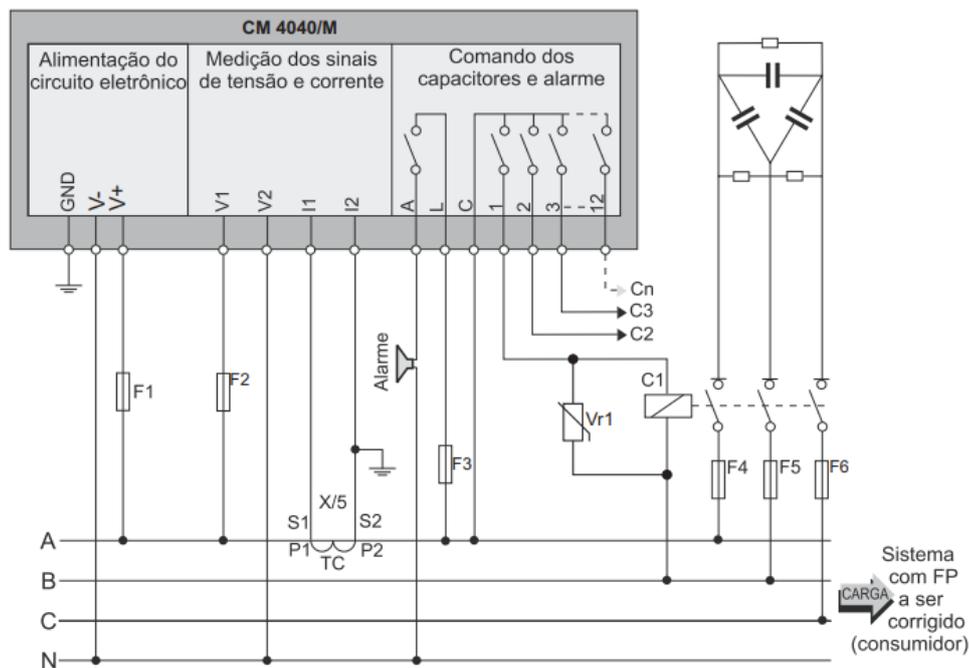
Em uma correção adequada do fator de potência, é necessário o fracionamento de bancos de capacitores em estágios, sendo acionados por controladores automáticos, que possibilitam o ajuste do valor desejado do FP. O chaveamento destes estágios é realizado por contadores, conectando os capacitores na instalação quando necessário e desconectados quando identificado que não há necessidade de fornecer reativos, principalmente em momentos de carga mínima. (CREDER, 2016).

Ainda Creder (2016), menciona que os controladores automáticos adquirem as informações de corrente mediante a transformadores de corrente, para as informações de tensão podem ser conectados diretamente na alimentação geral da instalação, em casos de bancos em alta tensão é necessário transformadores de potencial. Estes controladores possuem sensores eletrônicos que identificam tanto na tensão quanto na corrente a passagem por zero, assim identifica a defasagem entre elas para definir o valor do fator de potência. A medição trifásica é utilizada quando as cargas da instalação são desequilibradas, quando as cargas instaladas são equilibradas, pode-se realizar a medição em apenas uma das fases.

A Figura 3 ilustra um exemplo de ligação para a medição monofásica, utilizada para cargas trifásicas equilibradas, o controlador apresentado é produzido pelo fabricante Embrasul, onde no modelo CM 4040/M realiza apenas a medição em uma das fases.

Na Figura 3, em um sistema trifásico de fases A, B, C e Neutro, os componentes F1 a F6 representam fusíveis de proteção, TC o transformador de corrente, C1 o contator para seccionamento da célula capacitiva, sendo esta o conjunto de capacitores ligados em triângulo e Vr1 um varistor para proteção da bobina do contator.

Figura 3 – Diagrama de ligação controlador automático de FP



Fonte: ROSA 2009 - Embrasul

Segundo Creder (2016), os bancos de capacitores são geralmente instalados em painéis onde são alojadas as células capacitivas trifásicas, contadores para chaveamento, o controlador automático, disjuntores ou fusíveis, barramentos e cabos de ligações.

A Fotografia 1 apresenta a frontal de um painel de comando que aplica um controlador automático de 6 estágios, para uma potência reativa total de 81 kvar.

Fotografia 1 - Frontal de Painel para Correção de Fator de Potência



Fonte: Registrada pelo autor.

A Fotografia 2 apresenta a parte interna de um painel de comando que aplica um controlador automático de 6 estágios, para uma potência reativa total de 81 kvar, sendo 6 células capacitivas trifásicas de 13,5 kvar em 380 V, que possuem individualmente proteção por disjuntor e seccionamento por contator específico para esta aplicação.

Fotografia 2 - Interno de Painel para Correção de Fator de Potência



Fonte: Registrada pelo autor.

2.2 Instrumentação

A necessidade de transformadores para instrumentação se deve aos níveis de tensão e corrente da carga a ser medida, geralmente maiores do que o instrumento suporta, também por questão de segurança ao operador. (SIMONE, 2010).

Conforme Simone (2010), o enrolamento primário é conectado à rede que leva a energia para o circuito, por se tratar de enrolamentos que não são eletricamente conectados, a informação é transmitida para o enrolamento secundário apenas por acoplamento magnético.

2.2.1 Medição de Corrente Elétrica

O transformador de corrente é constituído pelo enrolamento primário e secundário, sendo que o primário é condutor de passagem da corrente para a carga, normalmente com poucas espiras e o enrolamento secundário com elevado número de espiras constituído de condutor relativamente fino, é conectado a um amperímetro ou circuito de um instrumento de medida. (SIMONE, 2010).

Segundo Simone (2010), desconsiderando a corrente de magnetização de um transformador de corrente (TC), pode-se relacionar às correntes do primário e secundário, conforme equação (7):

$$I_1 \cdot N_1 = I_2 \cdot N_2 , \quad (7)$$

Onde:

- I_1 = Corrente do enrolamento primário;
- N_1 = Número de espiras do enrolamento primário;
- I_2 = Corrente do enrolamento secundário;
- N_2 = Número de espiras do enrolamento secundário.

Por estes parâmetros do TC, pode ser adquirido a relação de transformação, o chamado k_i , conforme equação (8):

$$k_i = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} . \quad (8)$$

Conforme Simone (2010), em circuitos em que a classe de tensão for até 600 V, I_1 deve ser muito maior que I_2 ($I_1 \gg I_2$) e N_2 deve ser muito maior que N_1 ($N_2 \gg N_1$). Nos casos em que esta classe for maior do que 600 V, o TC pode ser utilizado basicamente para isolar eletricamente dois circuitos, assim podendo conter como característica as equações (9) e (10):

$$I_1 = I_2 , \quad (9)$$

$$N_1 = N_2 . \quad (10)$$

A forma mais utilizada de transformadores de corrente é a aplicação em que sua classe de isolamento seja de mesmo valor da tensão da carga. (SIMONE, 2010).

Conforme Simone (2010), se desconsiderar a corrente de magnetização de um TC, pode-se considerar a relação de transformação constante. Mas, devido às características dos materiais envolvidos fisicamente no TC, haverá erro na medição de corrente e erro de fase. Estes erros são denominados de imprecisões e devem estar dentro de uma faixa de valores determinando sua Classe de Exatidão, mediante a ensaio práticos conforme a Norma NBR 6821. A Classe de Exatidão deve ser

considerada e especificada dependendo de sua aplicação, sendo ela medição, proteção ou comando.

Ainda Simone (2010), o erro na medição de corrente é causado pela corrente de excitação, que se altera a corrente de carga medida, conforme equação (11):

$$I_{T1} = I_1 + I_0 , \quad (11)$$

Onde:

- I_{T1} = Corrente de carga;
- I_1 = Corrente de excitação.

Sendo que o erro de corrente pode ser determinado mediante a equação (12) ou (13):

$$e_i \% = \frac{I_1 - I_{T1}}{I_{T1}} \cdot 100\% , \quad (12)$$

$$e_i \% = \frac{k_i \cdot I_2 - I_{T1}}{I_{T1}} \cdot 100\% . \quad (13)$$

Transformadores de corrente são classificados em sua Classe de Exatidão conforme a Tabela 1 para Erro de Corrente e conforme a Tabela 2 para Erros de Fase, conforme norma DIN-VDE 0414.

Tabela 1 – Classe de Exatidão de TC para Erro de Corrente

Classe de Exatidão	Erros de Corrente (\pm) $e_1\%$						
	$2,0 \times I_n$	$1,2 \times I_n$	$1,0 \times I_n$	$0,5 \times I_n$	$0,2 \times I_n$	$0,1 \times I_n$	$0,05 \times I_n$
0,1		0,10	0,10		0,2	0,25	
0,2		0,20	0,20		0,35	0,50	
0,5		0,50	0,50		0,75	1,00	
1,0		1,00	1,00		1,50	2,00	
3,0			3,00	3,00			

Fonte: Adaptado de SIMONE, Gilio Aluisio (2010).

Segundo Simone (2010), assim como a corrente de excitação do TC causa erro de corrente, ela causa erro de fase devido a alteração na defasagem, denominado de

deslocamento angular obtido através do ângulo entre a corrente de carga e corrente que passa pelo enrolamento primário, medido em minutos.

Em transformadores de corrente convencionais a corrente de enrolamento secundário, normalmente possui valor padrão 5 A de fundo de escala. (SIMONE, 2010).

Tabela 2 – Classe de Exatidão de TC para Erro de Fase

Classe de Exatidão	Erros de Fase em minutos (\pm) δ_i						
	$2,0 \times I_n$	$1,2 \times I_n$	$1,0 \times I_n$	$0,5 \times I_n$	$0,2 \times I_n$	$0,1 \times I_n$	$0,05 \times I_n$
0,1		05	05		08	10	
0,2		10	10		15	20	
0,5		30	30		40	60	
1,0		60	60		80	120	
3,0							

Fonte: Adaptado de SIMONE, Gilio Aluisio (2010).

2.2.2 Medição de Tensão Elétrica

O transformador de potencial (TP) é similar a um pequeno transformador de potência, onde é constituído pelo enrolamento primário e secundário, sendo que o primário possui um elevado número de espiras, compatível com o nível de tensão da aplicação. O enrolamento secundário com menor número de espiras, deve ser dimensionado para tensão de operação do instrumento de medição. (SIMONE, 2010).

Um cuidado deve ser tomado na medição de tensão quando se necessita medir além da tensão, a fase do sinal, pois a tensão no secundário tem ângulo oposto ao ângulo da tensão do primário. (SIMONE, 2010).

Conforme Simone (2010), em transformadores de potencial a tensão do enrolamento secundário é padronizado por norma em 115 V.

Ainda Simone (2010), menciona para questão de segurança, um dos terminais do secundário do TC deve ser aterrado, juntamente com sua carcaça e núcleo magnético. Isto para proteção do operador ou equipamento de medição, em casos de fuga de corrente pela isolação.

Segundo Simone (2010), os instrumentos a serem conectados aos transformadores de potencial possuem elevada resistência, possibilitando uma condição próxima a um circuito aberto. Esta característica faz com que a queda de

tensão interna nos enrolamentos seja pequena, e o erro de medição do valor da tensão seja minimizado.

Assim como em um TC, os transformadores de potencial também possuem imprecisões na medição, sendo denominados de Erro de Fase e Erro de Tensão. A Classe de Exatidão neste caso, é definido na Norma NBR 6856, sendo valores padronizados de 0,3%, 0,6% e 1,2%, assim como as potencias para os instrumentos a serem conectados a estes TP's. (SIMONE, 2010).

Ainda Simone (2010), a relação de transformação e o Erro de Tensão pode ser expresso, conforme equações (14) e (15), respectivamente:

$$k_E = \frac{N_1}{N_2}, \quad (14)$$

$$e_E \% = \frac{(E_{2-lido} \cdot k_E) - E_{1-nominal aplicada}}{E_{1-nominal aplicada}} \cdot 100\%, \quad (15)$$

onde:

- k_E = Relação de transformação;
- N_1 = Número de espiras do enrolamento primário;
- N_2 = Número de espiras do enrolamento secundário;
- $E_{1-nominal aplicada}$ = Tensão do enrolamento primário;
- E_{2-lido} = Tensão medida no enrolamento secundário.

Conforme Simone (2010), o Erro de Fase, é definido a partir do ângulo entre a tensão primaria e secundaria, onde apresenta diferença de 180°. A medida deste erro é expressa em minutos.

Transformadores de potencial devem seguir valores limites padronizados para estes erros de medição, conforme norma DIN-VDE 0414, sendo apresentado estes valores para Classes de Exatidão na Tabela 3.

Tabela 3 – Classe de Exatidão de TP para Erro de Tensão e Fase

Classe de Exatidão	$(\pm) e_E \%$			$(\pm) \delta_E$ (minutos)		
	80%	100%	120%	80%	100%	120%
0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	05	05	05
0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	10	10	10
0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	20	20	20
1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	40	40	40
3,0%		3,0%				

Fonte: Adaptado de SIMONE, Gilio Aluisio (2010).

2.3 Microcontroladores

Um microcontrolador é um dispositivo programável que necessita de circuitos eletrônicos auxiliares para que possa operar, estes circuitos aplicados em suas entradas e saídas para condicionamento de sinais e outras adaptações. A programação é essencial para o funcionamento com microcontrolador, sendo realizada de forma específica para cada aplicação. (STEVAN JR, 2010).

2.3.1 Microcontrolador ESP32®

O microcontrolador ESP32® produzido pelo fabricante Espressif Systems®, possui incorporado sistema de comunicação Wi-Fi e Bluetooth, sendo projetado para melhor desempenho, versatilidade e confiabilidade em muitas aplicações, (ESPRESSIF, 2019).

Conforme Espressif (2019), o microcontrolador ESP-WROOM-32 possui as seguintes características:

- Processador *dual core* de 32 bits;
- *Clock* ajustável de 80 a 240 MHz;
- Faixa de temperatura recomendada para operação -40°C a 80°C;
- Alimentação de 5 Vcc através de conector micro USB (*Universal Serial Bus*);
- Nível lógico de 3,3 Vcc;
- Corrente máxima de 12 mA por pino;
- 16 Canais ADC (Conversor Analógico Digital), com resolução de 12 bits;
- 2 Canais DAC (Conversor Digital Analógico), com resolução de 8 bits;

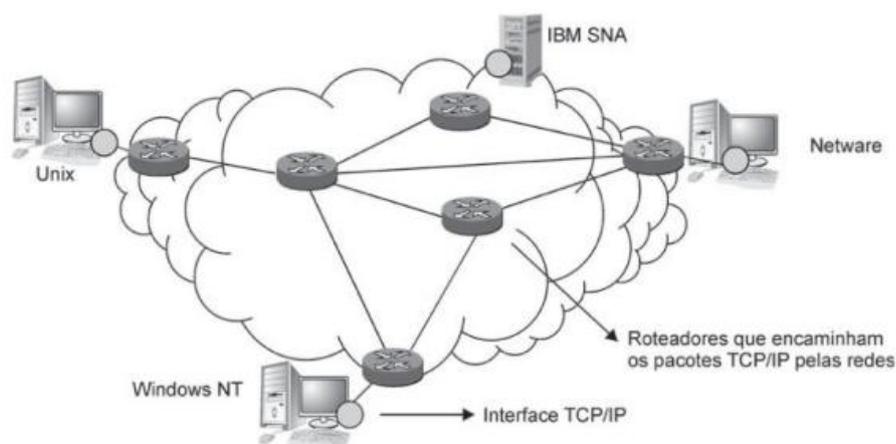
Segundo Souza (2010), a arquitetura TCP/IP contempla os conjuntos de programas que controlam a comunicação de dados entre os dispositivos, chamados de protocolos de comunicação.

Souza (2010), ainda cita que muitos equipamentos que são lançados no mercado já são desenvolvidos com o protocolo TCP/IP por ser um padrão mundial, padrão este que foi chamado de “Sistema Aberto”.

Também sendo um protocolo de transporte, o UDP não garante a integridade dos dados na transmissão, por não detectar a perda de pacotes, sua sequência e a confirmação de recebimento, sendo utilizado em aplicações sem atraso na transmissão. (SOUZA ,2010).

A Figura 6 apresenta uma rede com diferentes sistemas operacionais e dispositivos se comunicando entre si.

Figura 6 – Exemplo de rede utilizando TCP/IP



Fonte: SOUZA 2010

2.4.2 Rede Wi-Fi

Segundo Labiod (2007), a norma IEEE 802.11 define diversos padrões para o funcionamento de redes sem fio, dentre eles o IEEE 802.11b, onde utiliza o termo Wi-Fi em equipamentos para mencionar que o mesmo é certificado por este padrão.

O sistema Wi-Fi possui algumas limitações, onde pode-se destacar a uma baixa taxa de dados em relação a redes cabeadas, alcance de comunicação reduzido por obstáculos, qualidade de transmissão de dados prejudicada dependendo do ambiente, dentre outras. (LABIOD ,2007).

As chamadas WLANs, baseada nos padrões IEEE 802.11 possuem um grande mercado na área de redes locais (LAN), sendo uma solução prática para conexão em redes, com baixo custo de implementação, mobilidade e flexível. (LABIOD ,2007).

2.5 Automação em Processos Industriais

O surgimento de computadores nas últimas décadas modificou de maneira significativa o modo de produção de bens e serviços, não só em escritórios, mas em grande parte da indústria. Sendo possível a operação de um conjunto de máquinas centralizado em um computador, ao invés de ser preciso o operador se deslocar ao painel de operação de cada máquina. (ALVES, 2010).

Ainda Alves (2010), descreve que o conceito de automação industrial surgiu com a substituição de alguns instrumentos por microprocessadores que, assim como os computadores, são capazes de processar dados, tomar decisões e realizar tarefas automaticamente.

Conforme Alves (2010), para facilitar a interação entre os operadores e os computadores, foram criados o que se denominou de Interface Homem Máquina (IHM), que inicialmente possuíam capacidade de processamento de dados limitada, tanto gráfica quanto para armazenar dados.

2.5.1 Sistemas de Controle

Em processos industriais podem ser aplicados diversos tipos de controle e supervisão, dependendo da necessidade e a que melhor se adequa. Dentre estes sistemas de controle pode-se citar o Controlador Lógico Programável (CLP), empregado em controle de processos onde se tem variáveis discretas envolvidas, inicialmente centralizadas a um local, sendo que a evolução tecnológica possibilitou subsistemas remotos serem controlados por este CLP apenas por comunicação, reduzindo custos com fiação. (ALVES, 2010).

Para aplicações onde se tem muitas variáveis contínuas com um controle mais avançado é adotado Sistemas de Controle Distribuído (SCD), também aplicado a informações centralizadas a um local, neste caso os controladores se comunicam com estações de operação e servidores. (ALVES, 2010).

O autor também cita o Sistema de Controle e Aquisição de Dados (SCADA – inglês *Supervisory Control and Data Acquisition*), aplicado à supervisão de processos onde se tem variáveis contínuas e discretas, podendo ser destinado a vários equipamentos e máquinas, por exemplo.

2.5.2 Sistemas Supervisórios

Na automação industrial são encontrados uma grande variedade de programas de computadores disponíveis para supervisórios, aplicados a inúmeros sistemas operacionais. Quando aplicados Sistemas de controle e equipamentos de um mesmo fabricante, este é denominado sistema homogêneo, já os sistemas onde são combinados equipamentos e sistemas de controle de diferentes fabricantes, se denomina sistemas heterogêneos, chamados de sistema aberto. (ALVES, 2010).

Alves (2010) também aborda em que os programas de supervisão IHM ou SCADA, são configurados de forma a executar as funções de sistemas de controle distribuídos, onde pode-se dividir em gerência do sistema, configuração e visualização.

A função de gerência organiza as aplicações configuradas no sistema, definindo diretórios, buscando programas que serão executados juntamente nesta aplicação. Como se trata de gerência do sistema, normalmente é aplicado segurança de acesso ao sistema com definição de senhas. (ALVES, 2010).

A configuração do sistema é dedicada a construção do sistema de supervisão e controle, sendo composto por editor gráfico que permite a construção de telas gráficas para uma determinada aplicação, definição de variáveis, alarmes, histórico de dados, emissor de relatórios, funções lógicas, cálculos matemáticos, diagnósticos e estado das variáveis. (ALVES, 2010).

Ainda conforme Alves (2010), a função visualização é destinada ao operador, onde realiza a supervisão de uma planta industrial através de uma ou mais tela gráficas, podendo alterar variáveis de equipamentos, controlar dispositivos, alarmes em geral, visualizar gráficos gerados pela variação de grandezas do processo envolvido e emitir relatórios a partir de um histórico armazenado.

2.5.3 Industria 4.0

Segundo Santos (2018), o expressivo fato de centralizar os dados na área industrial, sendo eles, dados de pessoas, processos, sistemas, entre outros, sendo estes capazes de formar a indústria inteligente e meios de inovação industrial, isto se denomina de Industria 4.0, a chamada quarta revolução industrial.

Ainda o autor menciona que o princípio da indústria 4.0 é a transferência parcial da autonomia dos sistemas, para sistema e máquinas cibernéticas, proporcionando o sistema de informações em banco de dados e em tempo real, baseado no mapeamento das informações de ciclo de vida dos produtos e seus valores. O modelo de indústria 4.0 não se aplica apenas ao meio de fabricação, mas também em informações de produto, fornecedores, matéria prima, serviços, logística, além de proporcionar a obtenção de dados do produto em tempo real sendo utilizado no cliente.

Conforme Santos (2018), mesmo que o modelo de indústria 4.0 é usado apenas para a manufatura, o conceito está indo além, sendo aplicado no transporte, na logística, prédios inteligentes, na área de mineração, gás, petróleo, saúde ou qualquer aplicação que possa incluir inteligência.

A Internet das Coisas (IoT) é a interação entre a Tecnologia da Informação (TI) e a Tecnologia da Operação (OT), esta interação é quem proporciona e torna possível a indústria 4.0, sem ela não há transformação industrial. Além de IoT, a indústria 4.0 tem expressiva contribuição da Tecnologia da Comunicação (CT), onde envolve a troca de dados de todos os elementos envolvidos. (SANTOS, 2018).

O autor também chama a atenção de que muitos veem a indústria 4.0 como uma continuação da terceira revolução industrial, mas seus impactos da automação contínua apresentam claras mudanças no trabalho e na sociedade.

3 TRABALHOS CORRELATOS

Este capítulo aborda trabalhos relacionados ao projeto proposto do controlador de Fator de Potência. Alguns destes trabalhos contém técnicas que podem ser aplicadas e outros que adotam técnicas diferentes que levam ao mesmo resultado.

Cesario Junior (2014), apresenta que os microcontroladores operam em 3,3 V ou 5,0 V, onde é necessário a utilização de um circuito auxiliar para condicionamento do sinal para a medição. Com o uso de transformador de potencial, por exemplo, na medição de tensão é necessário readequar o valor de tensão para possibilitar a leitura pelo ADC do microcontrolador.

Pacheco (2016), realiza as medições de tensão de igual forma a partir de transformador de potencial e, ao invés de utilizar divisor de tensão para o condicionamento do sinal para o microcontrolador, aplica circuito atenuador de sinal, onde se faz o uso de amplificadores operacionais. Já para a medição de corrente não utiliza transformador de corrente e sim um sensor ACS712-30 em série com a carga e utiliza circuito atenuador para o condicionamento do sinal.

Estas duas técnicas de medição se comprovam eficientes, podendo ser implementadas no dispositivo proposto, sendo utilizado o método de divisor de tensão. Com finalidade de isolar o circuito de medida, optou-se pela técnica que se utiliza de transformadores de corrente e transformadores de potencial, conforme abordado nos itens 4.2 e 4.3.

José de Paula (2013), apresenta um método de definição da defasagem da forma de onda da corrente em relação à tensão, com o intuito de calcular o valor do fator de potência. Este método utiliza a técnica de identificar a passagem por “0 V” na medição do sinal de tensão e a passagem por “0 V” no sinal proveniente da medição de corrente, possuindo o tempo decorrido, é possível calcular o valor do fator de potência. Esta técnica pode ser aplicada no projeto, sendo que o microcontrolador proposto não atende a resolução necessária na medição, onde método se faz eficiente para detectar se o Fator de Potência é indutivo ou capacitivo.

Borges (2013), utiliza o método de cálculo das potências Ativa e Aparente para obter o valor de Fator de Potência, através dos valores de tensão e corrente, sendo valores eficazes e instantâneos. O uso de cálculo para obter o valor de FP pode ser implementado no protótipo, sendo necessário da validação da eficácia deste método.

O método de José de Paula (2013) mostra eficácia por se tratar de medições em pontos da forma de onda, definindo a defasagem por tempo medido, podendo ser aplicado este método no protótipo do controlador de FP proposto, como também o método de Borges (2013).

Branquinho (2005), aborda a análise de faixas de frequência que determinam se há necessidade licenciamento de operação pela ANATEL, onde identifica que para a utilização da rede Wi-Fi no padrão 802.11 não exige licenciamento de operação. Visto este estudo, a comunicação Wi-Fi proposta para aplicação no protótipo do controlador de FP não possui exigências de companhia reguladora para sua operação.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo, apresentam-se os materiais e métodos propostos para a implementação do controlador de Fator de Potência, utilizando um microcontrolador ESP32 para possibilitar a manipulação das grandezas medidas, sendo estas a tensão e a corrente do circuito a ser aplicado.

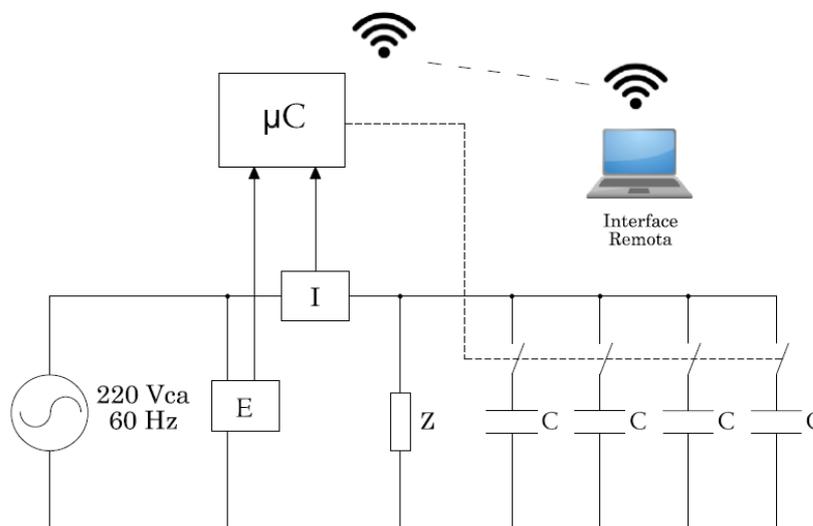
Realizar estas medições através de transformador de potencial e transformador de corrente, sendo conectados indiretamente as entradas analógicas do microcontrolador. Após a medição, com lógica de programação, calcular as potências ativa e aparente com o intuito de calcular o Fator de Potência e reativos.

Como o cálculo das potências resulta sempre no valor positivo de reativo, definir se o FP está indutivo ou capacitivo a partir do cruzamento por zero, tanto na tensão quanto na corrente. Caso esteja abaixo do ajuste do FP desejado, conectar capacitores à rede a fim de corrigir para um valor adequado.

Após manipulação dos dados, enviar as informações via comunicação Wi-Fi para um dispositivo móvel, neste por sua vez provido de software supervisor para a interface com o operador.

A Figura 7 ilustra o diagrama elétrico do sistema, contemplando alimentação da carga representada pelo Z, a medição de tensão pelo E, a medição de corrente pelo I, medições realizadas pelo microcontrolador μC , acionamento de capacitores C através do microcontrolador e comunicação com a interface remota.

Figura 7 – Diagrama do Sistema



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.1 Microcontrolador Aplicado

O microcontrolador selecionado para o dispositivo utiliza o módulo ESP-WROOM-32. Duas de suas entradas analógica (ADC) são conectadas as medições de tensão e corrente, quatro saídas digitais para o acionamento de reles de interface, quatro entradas digitais para botões. A Comunicação com a interface remota é feita via Wi-Fi por sua antena integrada. O microcontrolador pode ser visualizado na Fotografia 3.

Fotografia 3 - Microcontrolador ESP-WROOM-32

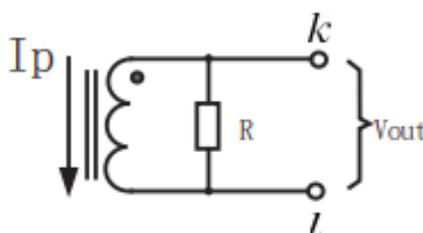


Fonte: Registrada pelo Autor

4.2 Medição de Corrente

Na aplicação em estudo, por se tratar de um microcontrolador o instrumento de medição e por trabalhar com valores de tensão e corrente relativamente baixos, o transformador de corrente escolhido possui em resistor internamente, conforme Figura 8, assim possibilitando um valor de tensão em sua saída, por esta característica é denominado sensor de corrente. (YHDC, 2015).

Figura 8 – Ligação Interna do Sensor de Corrente



Fonte: YHDC 2015

Este sensor é do modelo SCT013-020 de relação de transformação 20 A / 1,0 V do fabricante YHDC, sendo a corrente primária de 0 A a 20 A, máxima de 50 A e saída com valores de tensão de 0 V a 1,0 V, possui linearidade de 0,2%, precisão de 1,0% e faixa de frequência de 50 Hz a 1 kHz. Uma vantagem deste modelo é sua forma construtiva não invasiva, facilitando sua instalação. Possui tensão de isolamento de 3 kV e núcleo constituído de Ferrite. O TC escolhido é representado na Figura 9.

Figura 9 – Sensor de Corrente de 20 A / 1,0 V não invasivo

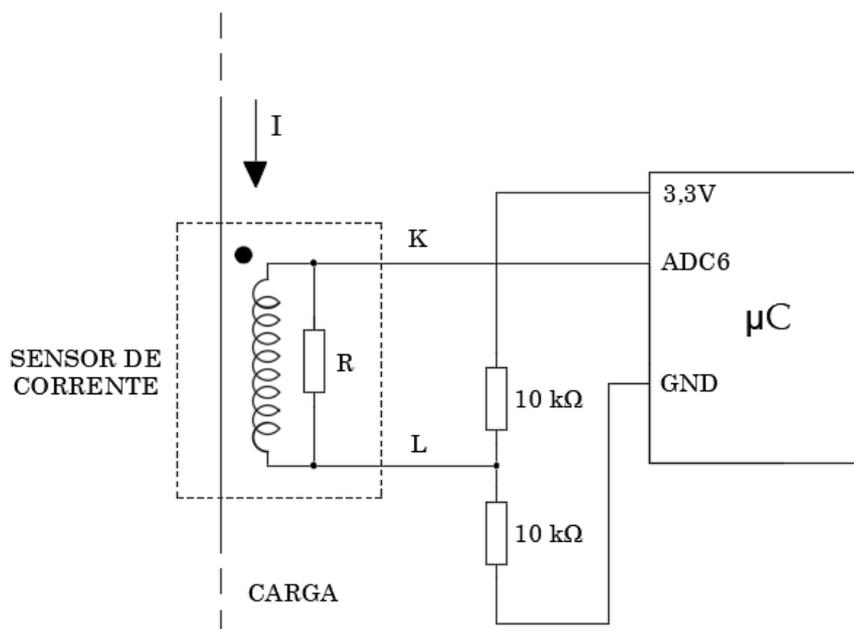


Fonte: YHDC 2015.

Como o a entrada analógica do microcontrolador trabalha de 0 V a 3,3 V e o sinal de tensão na saída do sensor de corrente é de 0 V a 1,0 V eficaz, sendo 1,4 V de pico em tensão alternada, é preciso utilizar um *offset* para que não haja tensão negativa no ADC do microcontrolador. Assim utilizando um divisor de tensão a partir da tensão de 3,3 V fornecida pelo microcontrolador, desta forma possuindo um “0 V virtual” em 1,65 V, obtendo a medição do sinal do sensor de corrente de 0,25 V a 3,05 V.

Utilizado resistores de 10 k Ω no divisor de tensão para obter a metade da tensão fornecida pelo microcontrolador e possuir uma corrente baixa. O circuito da medição de corrente é ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Ligação da medição de Corrente



Fonte: Elaborado pelo Autor

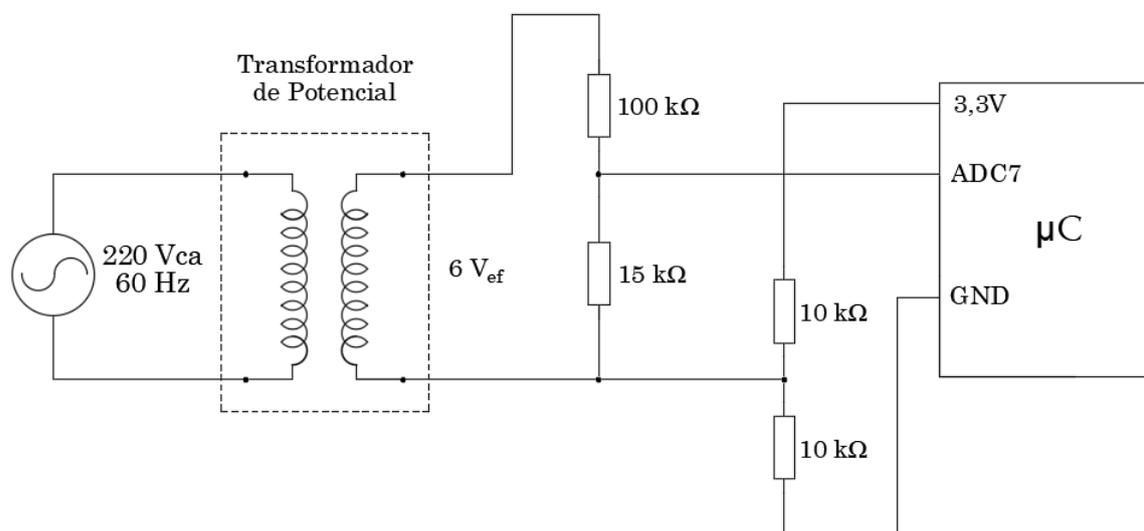
4.3 Medição de Tensão

Pela necessidade de possuir tensão baixa a nível do microcontrolador, o TP escolhido possui tensão primária de 220 V e secundária de 6 V, sendo um transformador de potencial convencional, não sendo específico para medição.

Além de rebaixar a tensão para 6 V eficaz, sendo 8,48 V de pico, é preciso readequar a tensão, utilizando um divisor de tensão, para possuir tensão de 1,0 V como sinal para o ADC, considerando este valor pelo fato de que a tensão da rede pode estar um pouco acima do valor nominal de 220 V eficaz.

Assim como na medição de corrente, na medição de tensão também é necessário um circuito auxiliar para possibilitar a medição no ADC do microcontrolador. Da mesma forma utilizando um divisor de tensão a partir da tensão de 3,3 V fornecida pelo microcontrolador, possuindo um "0 V virtual" em 1,65 V, obtendo a medição do sinal de tensão de 0,65 V a 2,65 V. O circuito da medição de tensão é ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Ligação da medição de Tensão



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.4 Relés de Interface

Para que sejam conectados capacitores na rede de alimentação da carga através do microcontrolador, utiliza-se relés de interface, que possibilitam o acionamento de contadores para a manobra dos capacitores, pois não é possível fazer isto diretamente pelas saídas do microcontrolador por operarem em 3,3 Vcc.

Com o intuito de possibilitar o acionamento de quatro conjuntos (estágios) de capacitores através do microcontrolador, foi escolhido relés de interface, sendo um módulo de quatro relés alimentados em 5,0 Vcc, com transistores já incorporados possibilita o acionamento dos relés diretamente pelas saídas digitais de 3,3 Vcc do microcontrolador. Além disso, o módulo possui LED (Diodo Emissor de Luz) de sinalização por relé.

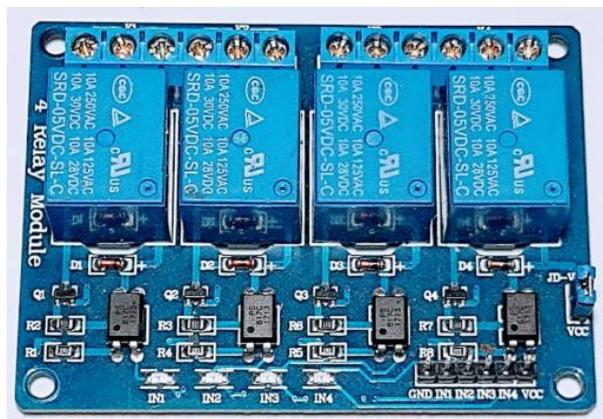
Os relés contidos neste módulo permitem controlar cargas em 220 Vca e corrente de 10 A. O módulo de relés escolhido é representado na Fotografia 4.

Nas conexões dos relés com o microcontrolador, o relé 1 conectado à porta GPIO19, o relé 2 conectado à porta GPIO18, o relé 3 conectado à porta GPIO17 e o relé 4 conectado à porta GPIO16, configuradas como portas de saídas digitais.

Para possibilitar a alimentação de 5 Vcc dos relés, é preciso utilizar uma fonte auxiliar, pois o microcontrolador ESP32 opera em apenas 3,3 Vcc. A Fotografia 5

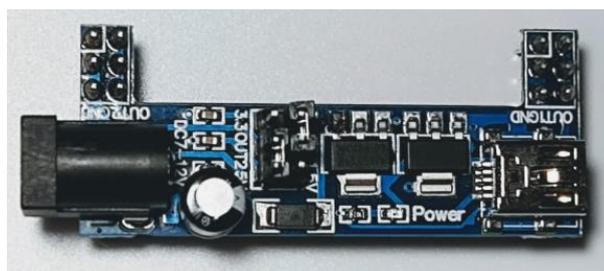
ilustra a fonte auxiliar utilizada, que possui duas saídas de tensão que poder ser selecionadas de 3,3 Vcc e 5 Vcc através de *jumpers*.

Fotografia 4 - Módulo de Quatro Relés de Interface



Fonte: Registrada pelo Autor

Fotografia 5 - Fonte auxiliar 5 Vcc



Fonte: Registrada pelo Autor

4.5 Interface do Controlador

Possibilitando a visualização de dados e configuração dos parâmetros do controlador, através de interface remota sendo feita via sistema supervisorio acessado em dispositivo móvel. Como interface local, apenas acionamento dos estágios de capacitores através de botões, sendo que deve ser selecionado modo manual na interface remota.

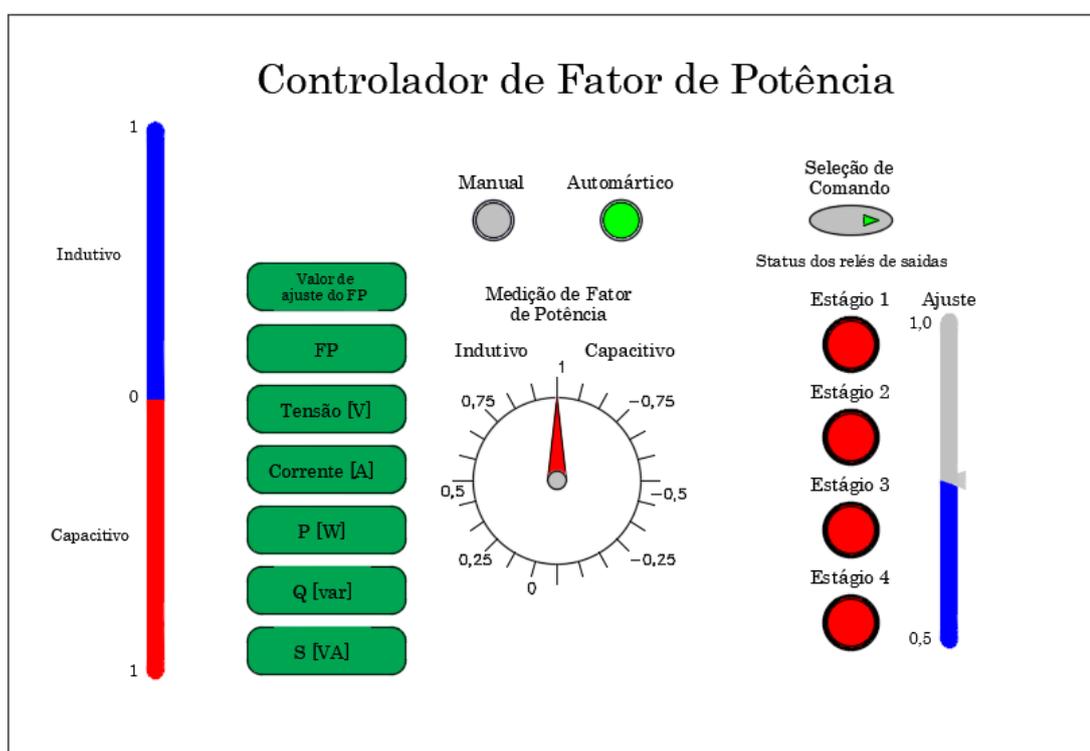
4.5.1 Interface Remota – Supervisorio

A interface remota do controlador de FP é realizada através de supervisorio, desenvolvido a partir do ambiente de desenvolvimento LabVIEW, assim possibilitando a aplicação do controlador em ambiente da indústria 4.0.

A tela principal do supervisor sendo o modo de operação automática, permite a visualização de tensão eficaz, corrente eficaz, Fator de Potência medido, Fator de Potência desejado, Potência Ativa, Potência Reativa, Potência Aparente, *status* dos relés de saída, indicação do modo de operação manual ou automático (automático neste caso), diagrama indicando FP indutivo ou capacitivo.

Conforme a Figura 12, onde ilustra a tela principal do supervisor, o sistema permite a escolha do valor de FP desejado através de barra de ajuste de 0,5 a 1,0 indutivo.

Figura 12 – Tela do supervisor em modo Automático

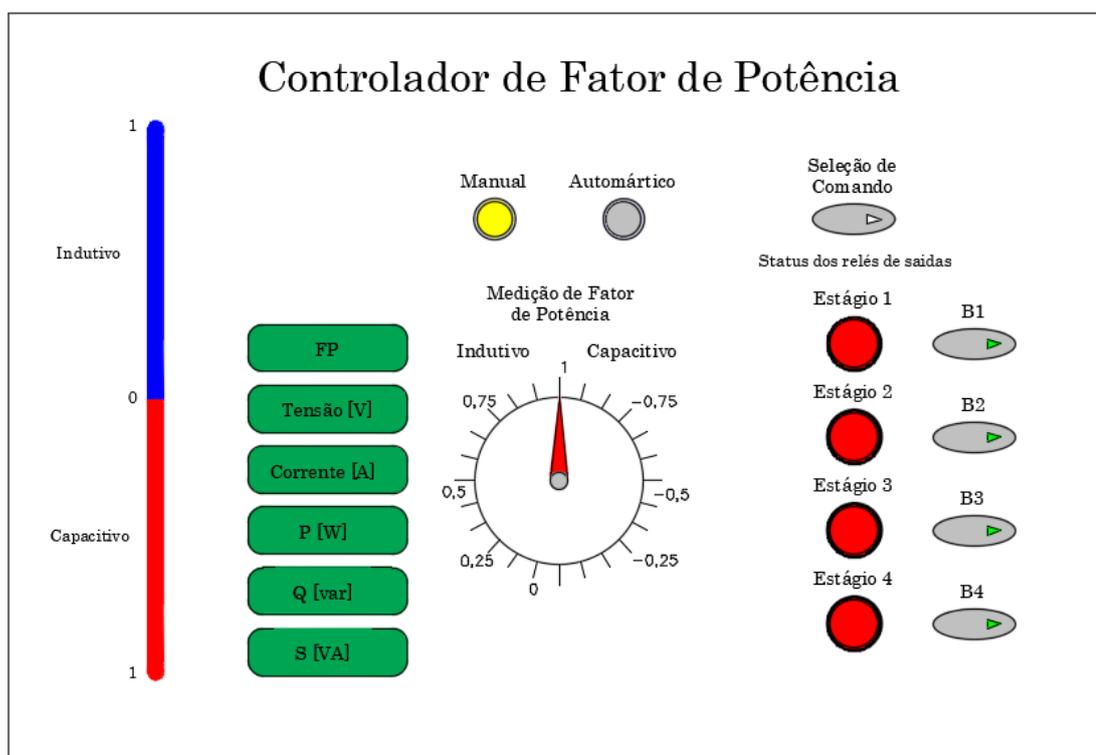


Fonte: Elaborado pelo Autor

Caso desejado, ao clicar sobre o botão de “seleção de comando”, é realizada a troca do modo de operação de automático para manual, deixando a barra de ajuste do valor de FP desejado oculto, assim como o indicador numérico do valor de ajuste, conforme a Figura 13, pois não se aplica a esta operação.

A Figura 13 mostra a tela do supervisor em modo de operação manual, neste modo os estágios apenas são acionados ao clicar sobre os botões respectivos para cada estágio, sendo que na Figura 13 está representado os quatro estágios como ligados.

Figura 13 – Tela do supervisor em modo Manual



Fonte: Elaborado pelo Autor

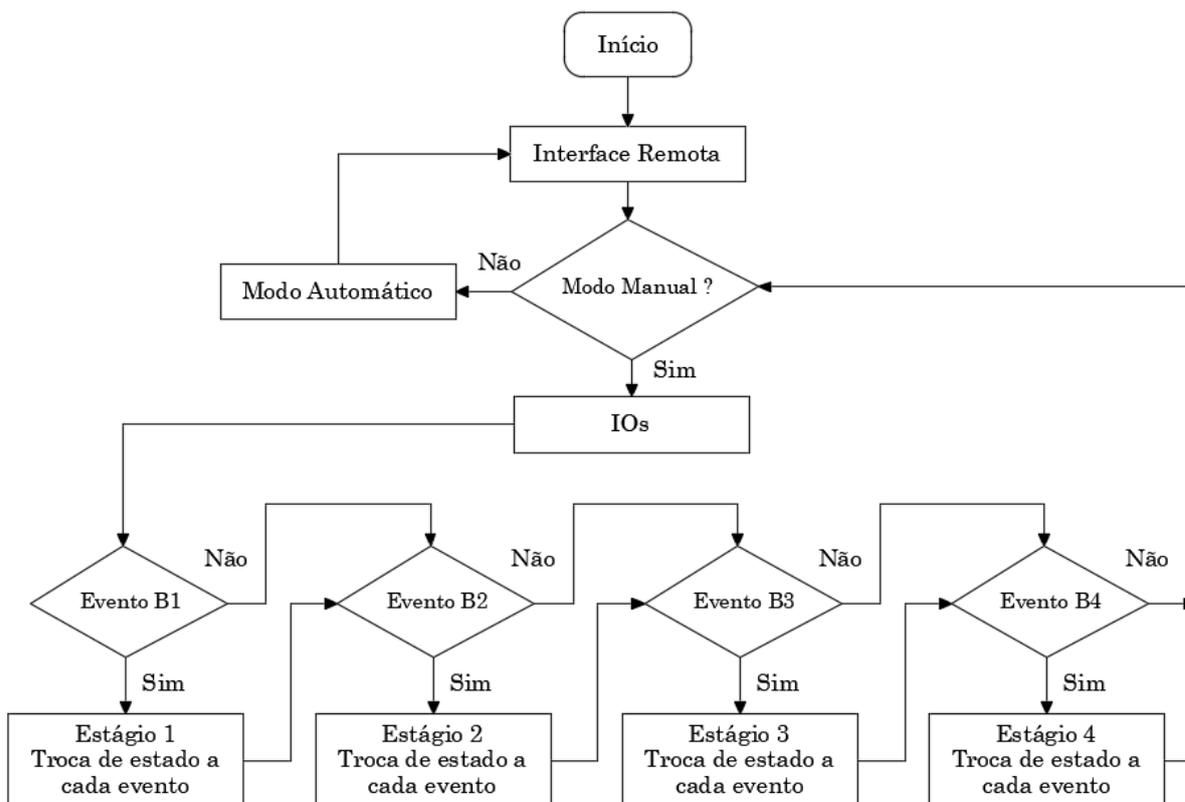
4.5.2 Interface Local

Como interface local, apenas quando selecionado modo manual na interface remota, o acionamento dos estágios de capacitores pode ser realizado através de botões.

A interface possui quatro botões de operação, o botão 1 (configurado na entrada digital GPIO25) quando pressionado aciona o primeiro estágio de capacitores, o botão 2 (GPIO26) quando pressionado aciona o segundo estágio de capacitores, o botão 3 (GPIO32) quando pressionado aciona o terceiro estágio de capacitores e, por fim, o botão 4 (GPIO33) quando pressionado aciona o quarto estágio de capacitores. Neste modo de operação, o ajuste pré-estabelecido não é respeitado.

O fluxograma ilustrado na Figura 14, mostra acionamento local realizado via botões.

Figura 14 – Fluxograma para acionamento manual via botões



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.6 Configuração do Microcontrolador

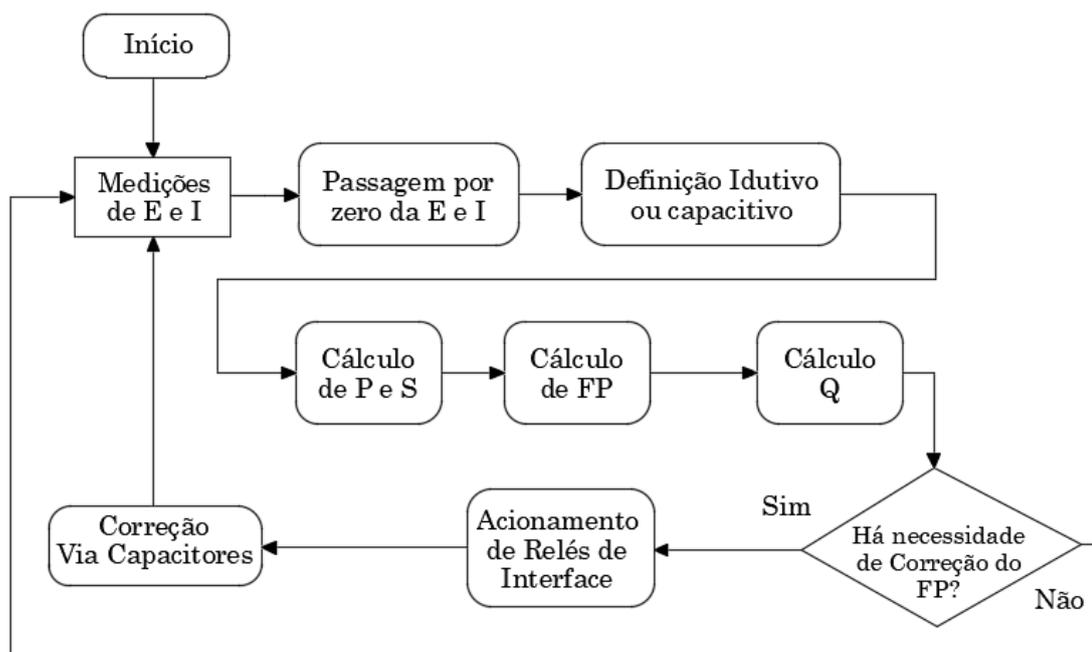
O microcontrolador é configurado através de linguagem de programação C, onde pode ser criado inúmeras funções lógicas, seu funcionamento é definido mediante a programação das funções necessárias para as medições de tensão, corrente e manipulação dos valores medidos, onde a partir destes obter as demais grandezas essenciais ao controlador de FP.

Além das medições realizadas através das entradas analógicas, também deve ser configurado quais portas são entradas digitais, quais são saídas digitais e quais as configurações definidas para comunicação via Wi-Fi, para enviar e receber dados do sistema supervisorio.

4.6.1 Lógica de Programação

A lógica de programação implementada para o sistema de correção de FP segue o fluxograma ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Fluxograma da lógica de programação



Fonte: Elaborado pelo Autor

A porta GPIO35, configurada como ADC para medir o sinal proveniente da medição de tensão, fornece ao microcontrolador um valor referente a sua resolução, que é 12 bits, sendo 4096 quando o ADC estiver lendo 3,3 V. Para obter o valor correto da medição é necessário realizar uma conversão, já sendo considerado o cálculo para obtenção do “zero virtual”, conforme equação (16):

$$E_{ADC} = \frac{(E_{Medido_{ADC}} - 2048) \cdot 3,3}{4096}, \quad (16)$$

onde:

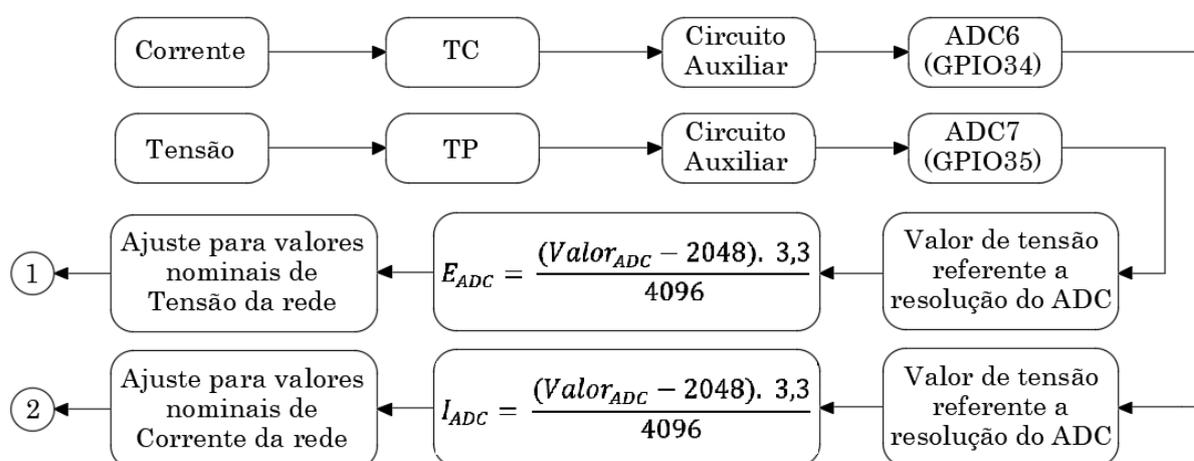
- E_{ADC} = Valor de tensão no ADC já corrigido para valor real;
- $E_{Medido_{ADC}}$ = Valor de tensão no ADC (em bits).

Além disso, é necessário considerar a relação de transformação do TP utilizado e dos divisores de tensão no circuito auxiliar da medição de tensão.

De igual forma, a porta GPIO34, configurada como ADC para mediar o sinal proveniente da medição de corrente, fornece ao microcontrolador um valor referente a sua resolução. Para obter o valor correto da medição de corrente a partir de um valor de tensão, é necessário realizar uma conversão, conforme equação 16, além de considerar a relação de transformação do sensor de corrente utilizado e os divisores de tensão no circuito auxiliar da medição de corrente.

A sequência lógica da programação das medições de tensão e corrente é ilustrada na Figura 16, onde indica saídas para a próxima etapa da programação.

Figura 16 – Sequência lógica da programação das medições



Fonte: Elaborado pelo Autor

Realizado a leitura dos valores instantâneos de amostras por ciclo e armazenadas em vetor, um para tensão e outro para a corrente, sendo considerados alguns ciclos para obter valores eficazes estáveis.

Em virtude das alterações nos ângulos de defasagem causadas pelas características do TP e do TC, é necessário acrescentar 180° no ângulo de defasagem da tensão, em termos de tempo considerar 8,33 ms, já para o ângulo da corrente é preciso definir o erro de fase do TC para ser considerado na lógica de programação.

A partir do preenchimento deste vetor é realizado o cálculo de tensão eficaz, corrente eficaz, potência ativa e potência aparente, assim possibilitando o cálculo e definição do valor do Fator de Potência, a partir da equação (2), apresentada no item 2.1.

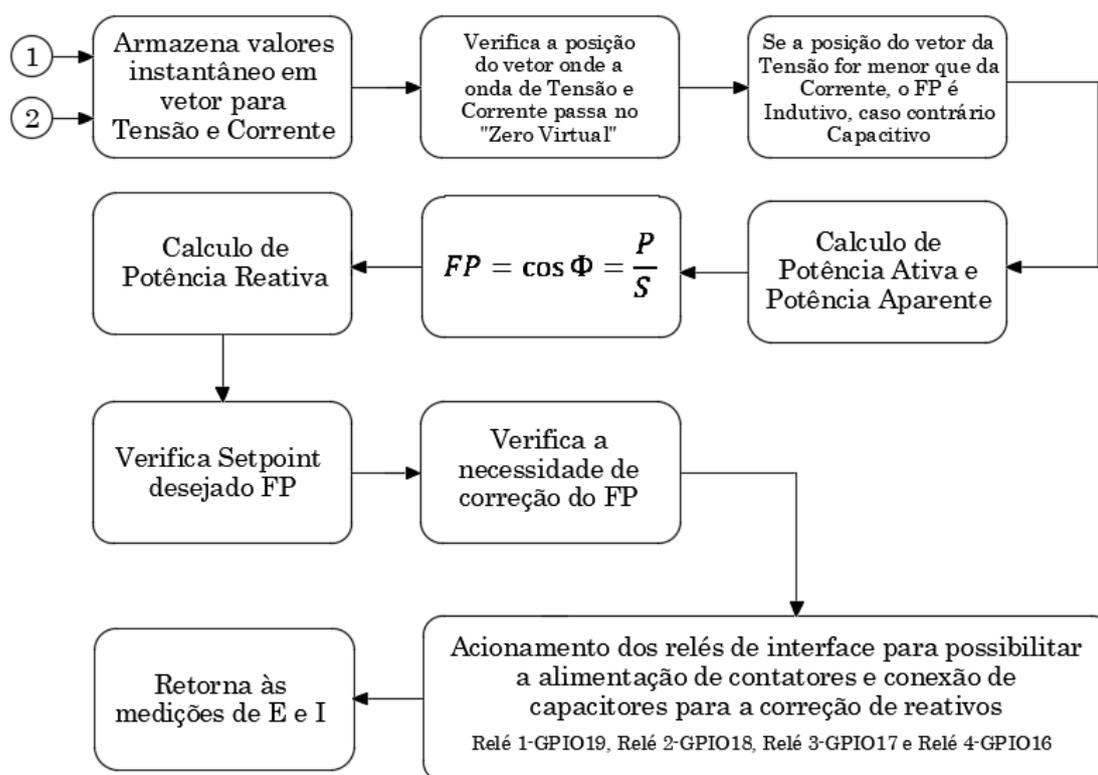
Além deste cálculo, é identificado as posições dos vetores em que a forma de onda de tensão e corrente passam pelo “zero virtual”.

Se a posição em que a tensão passa por zero seja menor que a posição da corrente, identifica que a potência reativa é indutiva e o FP indutivo, caso contrário a potência reativa é capacitiva e FP capacitivo. Em casos em que as posições dos vetores são iguais, significa que as formas de onda estão em fase.

Posteriormente, definido estes valores, corrigir o valor de FP considerando a potência reativa necessária para a correção, esta realizada pela conexão de capacitores ao circuito de força envolvido, através de relés de interface que são conectados nas portas GPIO19, GPIO18, GPIO17 e GPIO16, configuradas como saídas digitais. Quando há a necessidade de corrigir o FP, a saída GPIO19 permanece em nível lógico 1 acionando o relé, e assim sucessivamente para os demais relés.

A sequência lógica da programação para o cálculo de FP e correção é ilustrada na Figura 17.

Figura 17 – Sequência lógica da programação de cálculo de FP e correção



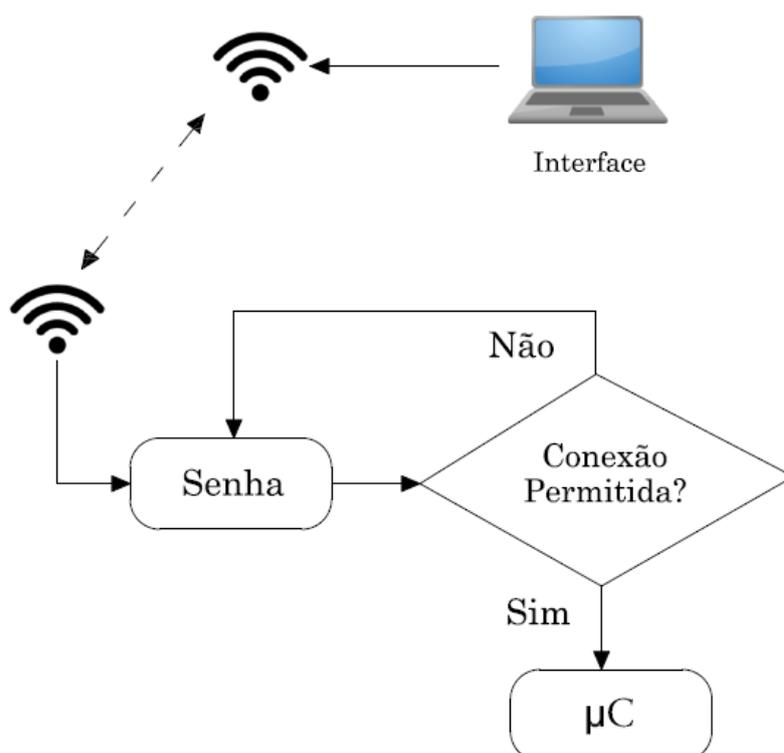
Fonte: Elaborado pelo Autor

4.6.2 Configuração de Comunicação Wi-Fi

Para uma comunicação em rede local, do controlador de FP para um computador próximo ao local de instalação, o controlador deve ser configurado de tal forma a possuir um código IP, um nome adotado do ponto de acesso na rede Wi-Fi, assim como uma senha permitir o acesso, limitando a conexão por questões de segurança.

Para a operação e leitura no sistema supervisorio, deve primeiramente realizar a conexão com a rede configurada no microcontrolador aplicado e após abrir o *software* desenvolvido especificamente para este protótipo. A forma de configuração da comunicação Wi-Fi do controlador é representa na Figura 18.

Figura 18 – Fluxograma de Rede Wi-Fi



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.7 Validação e Testes

Com a finalidade de validar o correto funcionamento do controlador de fator de potência em estudo, é necessário realizar a comparação das medições de tensão e corrente mediante a ensaios de laboratório com equipamentos aferidos. O adequado é utilizar um medidor de qualidade de energia conforme Fotografia 6, que disponibiliza todas as grandezas elétricas envolvidas no controlador de FP.

Fotografia 6 - Medidor de Qualidade de Energia



Fonte: Registrada pelo Autor

Além das medições, deve ser validado a correção do fator de potência, onde se realiza ensaios com carga resistiva, indutiva e capacitiva, observando os diferentes comportamentos do fator de potência conforme as características da carga aplicada.

Primeiramente em modo manual as medições com carga resistiva, apresentando apenas potência ativa no controlador e FP próximo do unitário.

Como carga indutiva com pequena parcela resistiva, testes realizados com motor de indução monofásico, sendo importante no caso do motor, a medição com carga mecânica nominal sobre o eixo, por proporcionar o real fator de potência da

máquina. Também realizado testes sobre carga resistiva e indutiva, com o intuito de possuir uma carga mista. Em todos os casos, os quatro estágios de capacitores acrescidos um de cada vez com o intuito de observar alteração do fator de potência.

Após validação das medições, observar o correto funcionamento do modo automático, sendo que o controlador identifica a quantidade de estágios que deve conectar à rede para a correção do FP, através de *setpoint* de ajuste desejado.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Conforme proposto, o protótipo do controlador de fator de potência, confeccionado seguindo as descrições de materiais necessários, programação do controlador utilizado e desenvolvimento de sistema supervisorio dedicado para esta aplicação, neste capítulo são apresentados os resultados e análise das etapas realizadas.

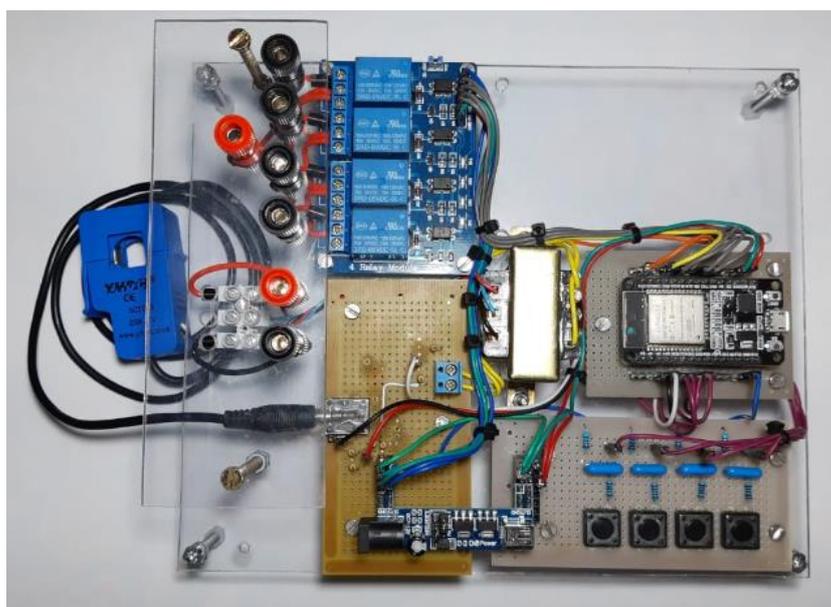
5.1 Montagem de *Hardware*

Os materiais e circuitos utilizados estão conforme descrito no capítulo 4, itens 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5.2. Sendo a montagem do protótipo realizada sobre base acrílica, com o objetivo de manter sólida a estrutura de fixação de todos os componentes envolvidos, controlador ESP32, placa confeccionada para os quatro botões, placa confeccionada para circuitos auxiliares das medições, fonte auxiliar, placa de relés de interface e TP para medição de tensão, assim como bornes para facilitar os testes.

Com o intuito de melhorar a resolução na medição de corrente, ao instalar o TC no circuito a ser medido, se utilizou de duas voltas em seu interior, corrigindo os valores medidos digitalmente.

O Protótipo do controlador de FP é apresentado na Fotografia 7.

Fotografia 7 – Montagem Física do Protótipo do controlador de Fator de Potência



Fonte: Registrada pelo Autor

5.2 Configuração do controlador ESP32

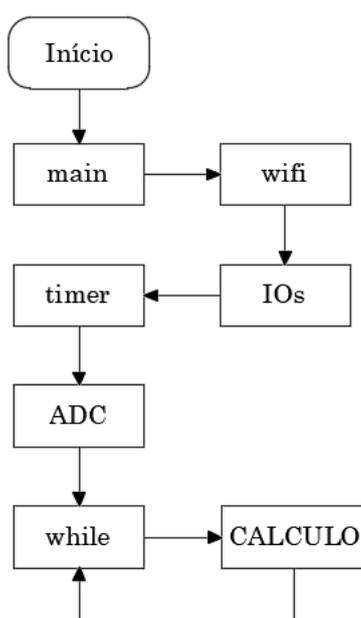
A configuração do controlador ESP32 utilizado é realizada em linguagem de programação C, utilizando o ambiente de programação Microsoft Visual Studio Code para a escrita do código, sendo que para compilar, gravar no controlador e visualizar por monitor serial, é utilizado o ESP-IDF-*Command-Prompt* específico do fabricante do controlador (*Espressif*).

5.2.1 Código Principal

O código principal inicia a função “IOs” para entradas e saídas digitais, sendo os botões por interrupção, inicia a função “timer” que executa uma *task* paralelamente que por sua vez é responsável pela taxa de amostragem da função “ADC”, onde é obtido as medidas de tensão e corrente, inicia a função “wifi” que executa uma *task* para a comunicação externa (função executada de forma independente das demais). Além de iniciar as funções descritas, o código principal executa em *looping* a função de “CALCULO”, que recebe as informações de medição e executa alguns cálculos e tratamento dos dados para envio ao sistema supervisor.

Na Figura 19 é ilustrado sequência lógicas da programação desenvolvida no código principal.

Figura 19 – Fluxograma Código main



Fonte: Elaborado pelo Autor

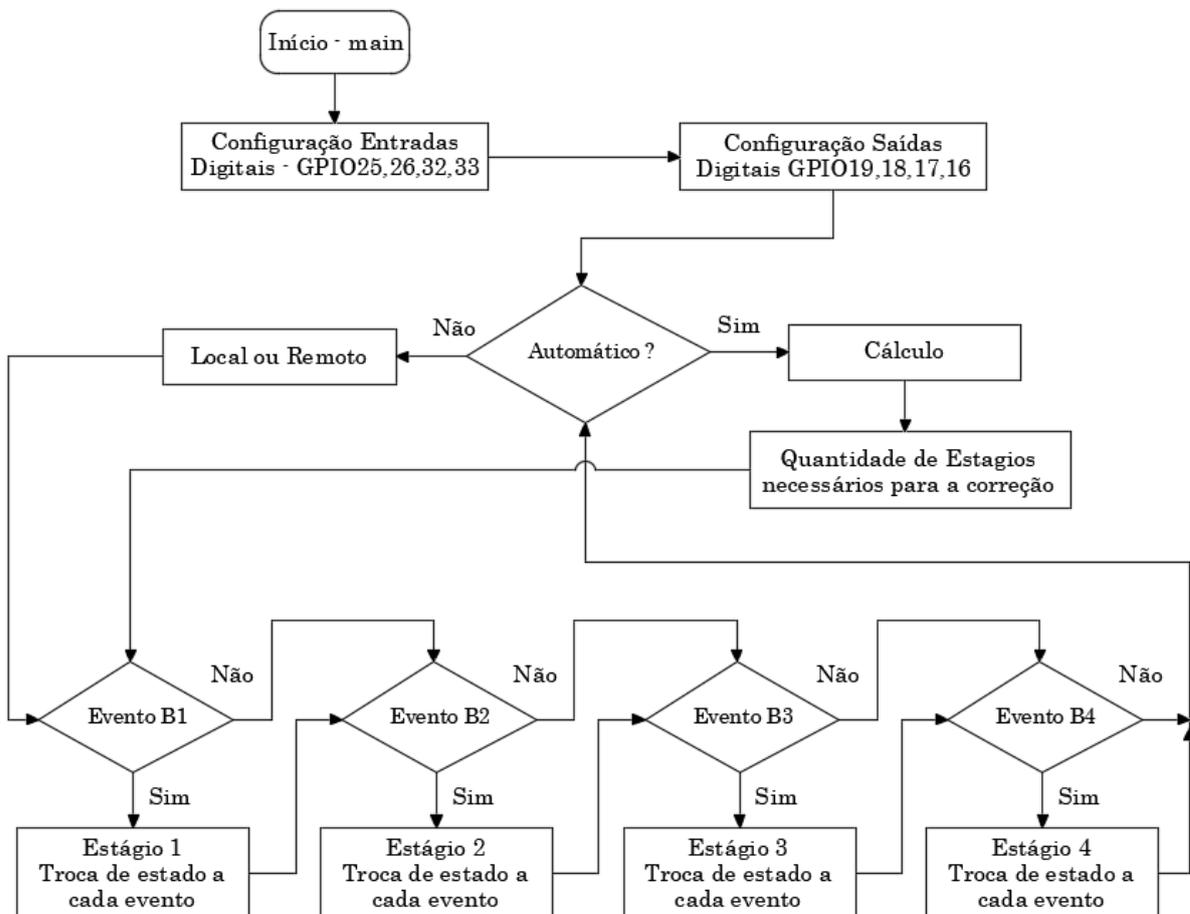
5.2.2 Função de Entradas e Saídas Digitais

Na função de entradas e saídas digitais, com o nome de “IOs”, é configurado as portas de entradas e saídas digitais, sendo as entradas por interrupção.

Como entradas configuradas as portas GPIO25, GPIO26, GPIO32 e GPIO33, para os quatro botões, já como saídas digitais, configurado as portas GPIO19, GPIO18, GPIO17 e GPIO16, estas sendo destinadas ao acionamento dos relés de interface.

Nesta função também são implementadas condições para os acionamentos das saídas, pois depende de acionamento externo pelo supervisor, acionamento por necessidade de correção do FP e em casos de variação do modo de operação, sendo manual ou automático. Na Figura 20 é ilustrado sequência lógicas da programação desenvolvida para Entradas e Saídas Digitais.

Figura 20 – Fluxograma Código Entradas e Saídas Digitais



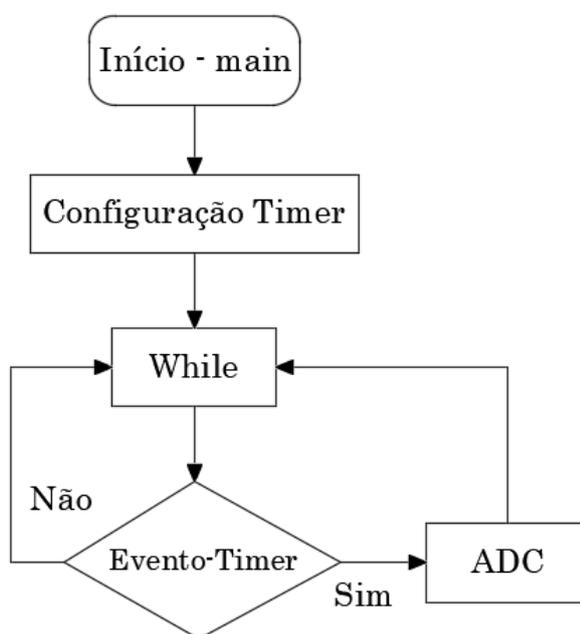
Fonte: Elaborado pelo Autor

5.2.3 Função de Timer

Na função de Timer, com nome de “timer” é implementada exclusiva para a taxa de amostragem das entradas analógicas, onde executa a função de “ADC” sempre que houver um evento de timer, configurado para 92,59 μ s, para 180 amostras por ciclo.

Na Figura 21 é ilustrado sequência lógicas da programação desenvolvida para timer.

Figura 21 – Fluxograma Código Timer



Fonte: Elaborado pelo Autor

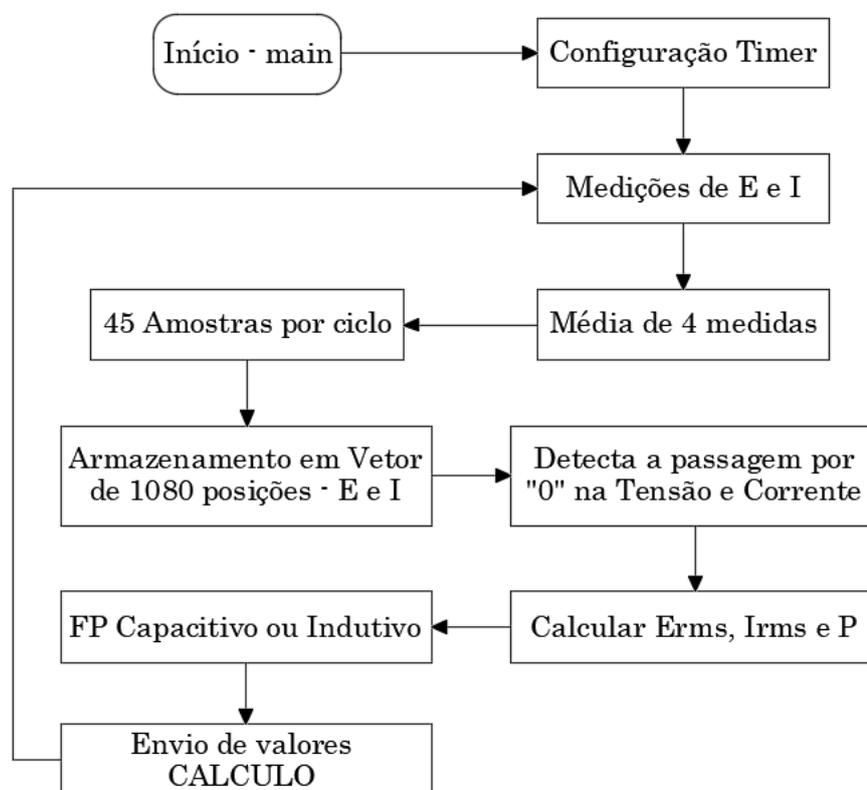
5.2.4 Função de Entradas Analógicas

Na função de Entradas Analógicas, com o nome de “ADC” é implementado a amostragem de tensão e corrente, onde realiza média de 4 valores medidos, assim resultando em 45 amostras por ciclo. Estas medias das amostras armazenadas em vetores de 1080 posições, utilizando 24 ciclos para manter os valores eficazes calculados com melhor estabilidade.

Nesta função, após os vetores de tensão e corrente preenchidos, são obtidos os valores de tensão eficaz, corrente eficaz e potência ativa, assim como a verificação da passagem por zero de tensão e corrente. Posteriormente envia os dados para a função de cálculo.

Na Figura 22 é ilustrado sequência lógica da programação desenvolvida para as entradas analógicas (ADC).

Figura 22 – Fluxograma Código ADC



Fonte: Elaborado pelo Autor

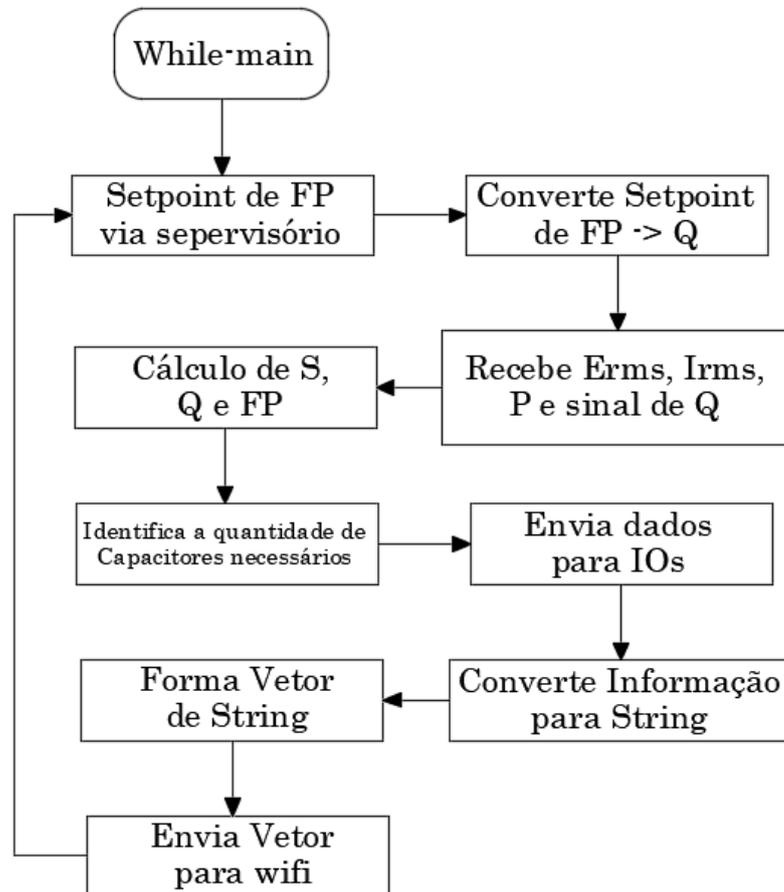
5.2.5 Função de Cálculo

Na função de cálculo, com nome de "CÁLCULO" é implementado os cálculos das demais variáveis envolvidas, como potência aparente, potência reativa e o fator de potência, o valor de reativo necessário que deve ser acrescentado no caso do modo automático, onde recebe um valor de *setpoint* de FP desejado, assim como as condições para ligar e desligar os relés que controlam estágios de capacitores para a correção.

Após realizar os cálculos, as informações a serem enviadas para o sistema supervisor, são convertidas para *strings*, sendo estas informações dos valores de tensão eficaz, corrente eficaz, potência aparente, potência ativa, potência reativa, *setpoint* de reativo desejado e status dos quatro relés de interface. Estas informações são armazenadas em um único vetor de *string* e enviado para a função de Wi-Fi.

Na Figura 23 é ilustrado sequência lógicas da programação desenvolvida para o cálculo.

Figura 23 – Fluxograma Código Cálculo



Fonte: Elaborado pelo Autor

5.2.6 Função de Comunicação Wi-Fi

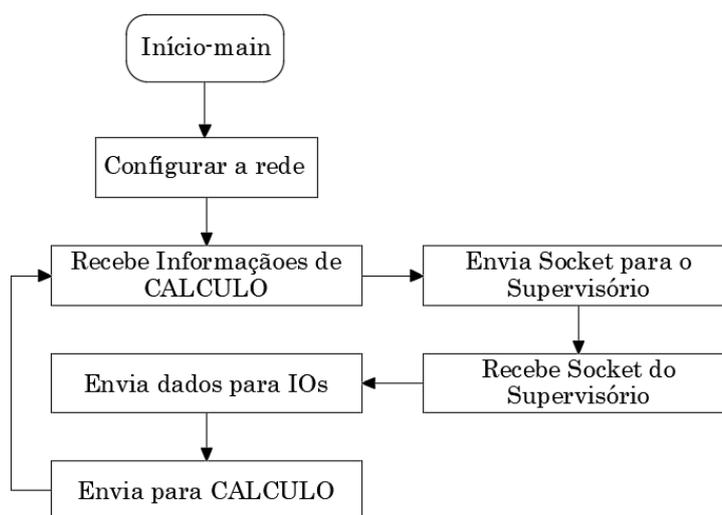
Para a comunicação Wi-Fi, optou-se em utilizar o protocolo UDP, pois se trata de comunicação local e sem necessidade de confirmação de recebimento dos dados, apenas envio sequencial.

Na função de Wi-fi, é configurado o nome para acesso a rede local como "ESP_GUSTAVO", senha de acesso como "02561376" e endereço IP liberado para acesso ao controlador o 192.168.4.2, este sendo o IP do computador portátil a se conectar. Além disso, configuradas portas para possibilitar a comunicação com o sistema supervisório, sendo porta 8007 para enviar e porta 8005 para receber.

Esta função recebe as informações provenientes da função “CALCULO”, através de um vetor de *string* e envia para o sistema supervisorio através de socket UDP. Nesta função também é realizado o recebimento das informações provenientes do supervisorio e direciona para a função “CÁLCULO”.

Na Figura 24 é ilustrado sequência lógicas da programação desenvolvida para a comunicação Wi-Fi.

Figura 24 – Fluxograma Código Wi-Fi



Fonte: Elaborado pelo Autor

5.3 Configuração do Sistema Supervisorio

O sistema supervisorio desenvolvido a partir do *Software* LabVIEW, implementado com o intuito de receber informações e apresentá-las na tela de um computador portátil, assim como enviar comandos de ligar e desligar saídas digitais do controlador e valores desejados para o controle do Fator de Potência.

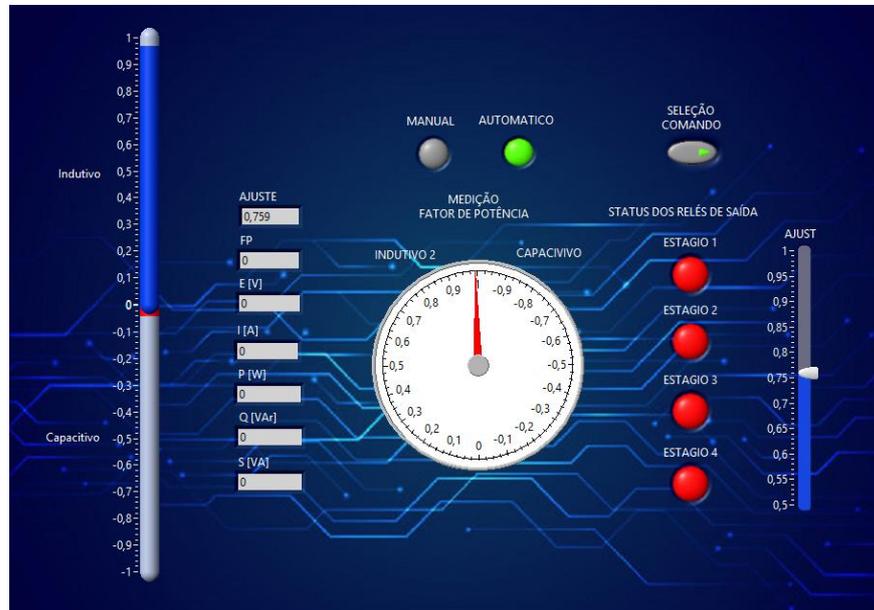
O supervisorio é configurado em três funções de programação, onde uma delas destinada a receber os dados do controlador através de UDP, outra para indicação dos valores e efetuar comandos e a terceira para o envio das informações do supervisorio para o controlador também através de UDP.

Nesta configuração é definido as portas para receber e enviar os dados, sendo a porta 8007 para receber e porta 8005 para enviar, também configurado o IP de destino dos dados, 192.168.4.1, este o IP do controlador.

A Figura 25 apresenta a tela ilustrativa em modo Automático do sistema supervisorio desenvolvido para o controlador de Fator de Potência em estudo para o

ambiente de indústria 4.0, indicando o valor medido do FP indutivo ou capacitivo no mostrador galvanômetro no centro da tela e na barra gráfica a esquerda.

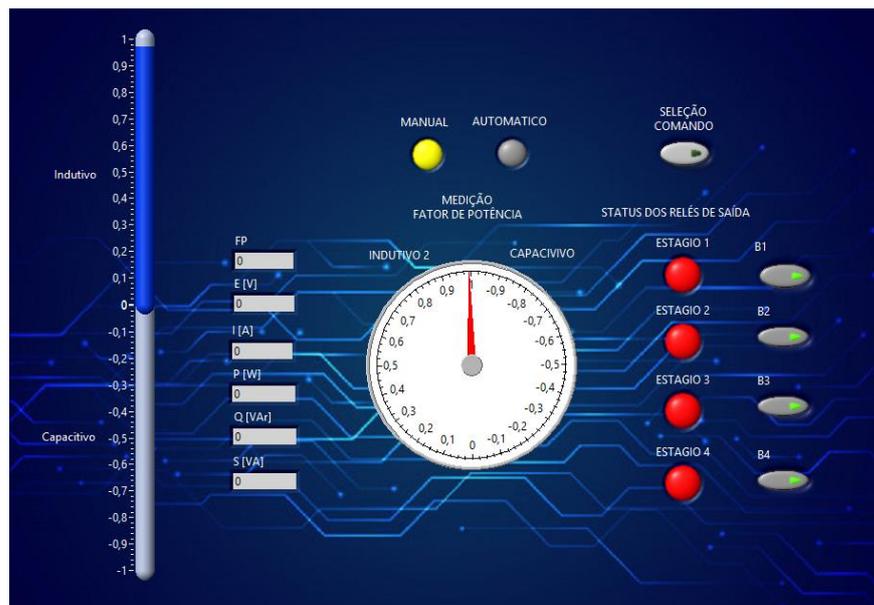
Figura 25 – Tela ilustrativa do Sistema Supervisório em modo Automático



Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 26 apresenta a tela ilustrativa em modo Manual do sistema supervisório desenvolvido para o controlador de Fator de Potência.

Figura 26 – Tela ilustrativa do Sistema Supervisório em modo Manual



Fonte: Elaborado pelo Autor

5.4 Testes

Em um primeiro momento, realizados testes com sistema supervisórios em modo manual para a verificação das medições, conforme a variação das cargas aplicadas.

Utilizado como carga resistiva um forno de 650 W, conforme etiqueta do fabricante, como carga indutiva um motor monofásico de 1/2 CV e quatro capacitores de 10 μ F resultando em 182 var cada. As características do motor são apresentadas na Fotografia 8 e o modelo dos capacitores na Fotografia 9.

Fotografia 8 – Placa informativa do motor monofásico utilizado



Fonte: Registrada pelo Autor

Fotografia 9 – Modelo de capacitor utilizado



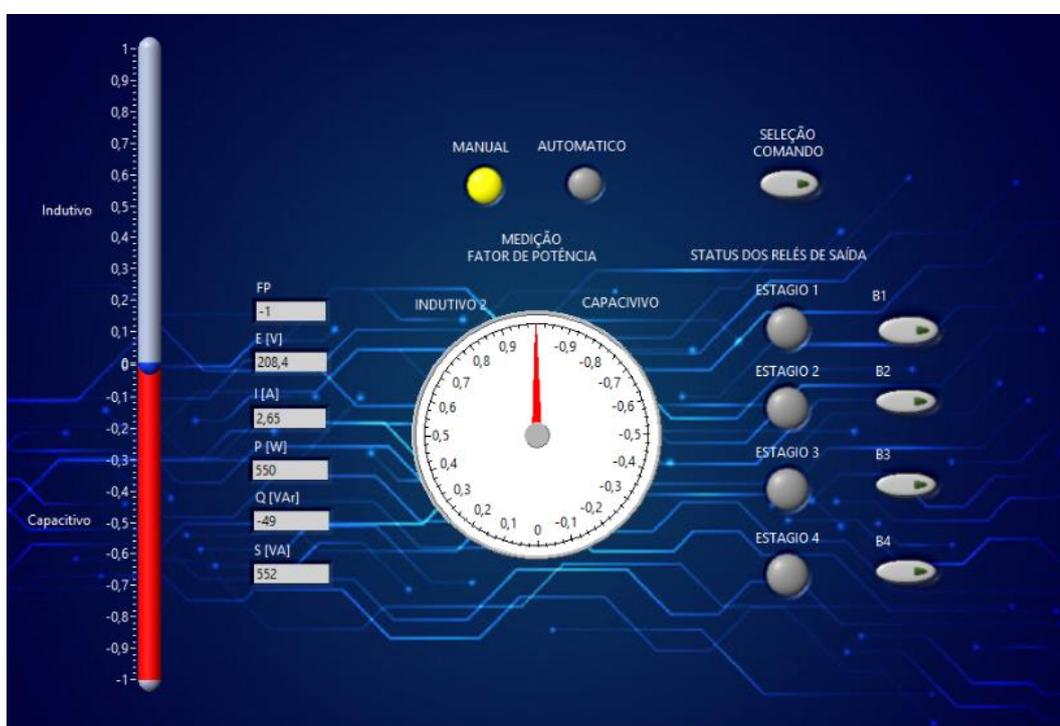
Fonte: Registrada pelo Autor

5.4.1 Carga Resistiva em Modo Manual

Com o objetivo de verificar a medição de tensão e corrente nos mesmos instantes, as duas ondas em fase, realizou-se os testes sobre carga resistiva, utilizando o forno de 650 W.

Através do supervisor, conforme Figura 27, realizado as medições de FP unitário, tensão de 208,4 V, corrente de 2,65 A, potência ativa de 550 W, potência reativa de -49 var e potência aparente de 552 VA.

Figura 27 – Medição do controlador com Resistência



Fonte: Elaborado pelo Autor

Através do medidor de qualidade de energia proposto para a validação (FLUKE) e amperímetro, conforme Fotografia 10, realizado as medições de FP unitário, tensão de 217,6 V e corrente de 2,8 A.

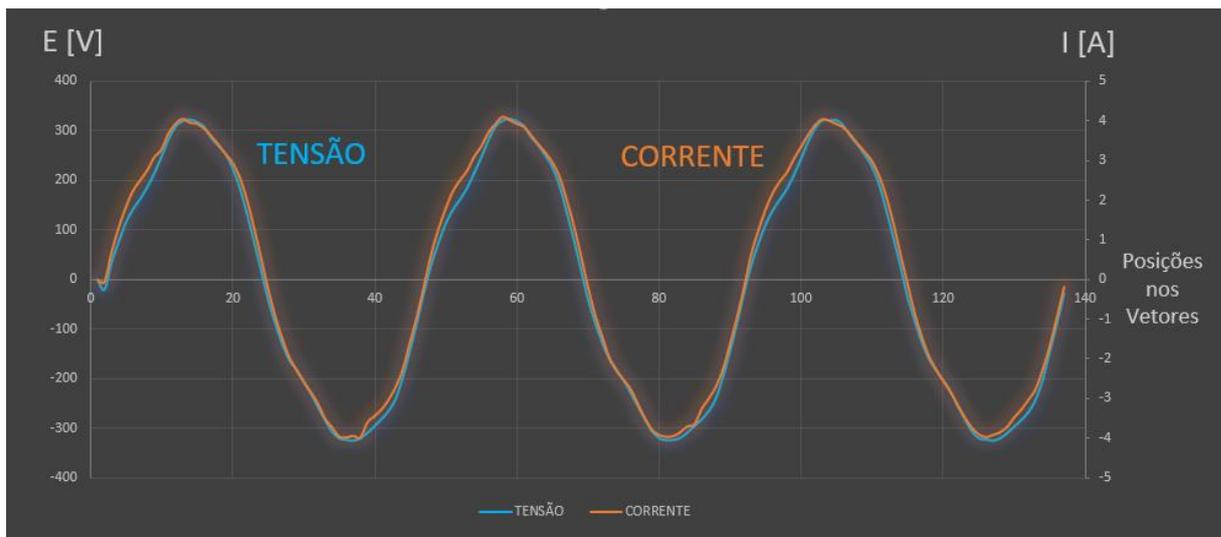
O Gráfico 1 apresenta as formas de onda de tensão e corrente medidas sobre a carga resistiva, resultando em tensão e corrente em fase, assim identificando que as medições coincidem com a defasagem esperada, sem a necessidade de ajuste. Nos Gráficos de medições, a partir dos dados pelo monitor serial do controlador e plotado em Software Excel, a escala dos valores de corrente está alterada para possibilitar a visualização.

Fotografia 10 – Medições Analisador e Amperímetro com Resistência



Fonte: Registrada pelo Autor

Gráfico 1 - Forma de onda medida com Resistência



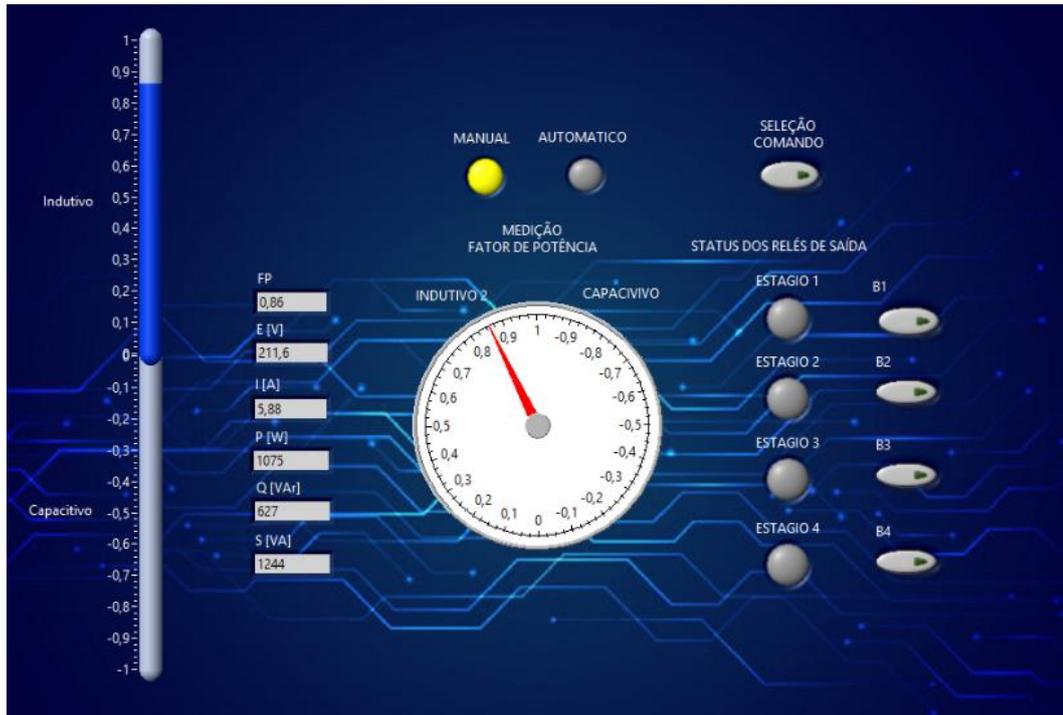
Fonte: Elaborado pelo Autor

5.4.2 Carga Resistiva e Indutiva em Modo Manual

Com o objetivo de verificar a medição de tensão e corrente defasadas e Fator de Potência Indutivo, corrente atrasada em relação a tensão, realizou-se os testes sobre carga resistiva e indutiva, utilizando o forno de 650 W e motor monofásico de 1/2 CV.

Através do supervisor, conforme Figura 28, realizado as medições de FP de 0,86 indutivo, tensão de 211,6 V, corrente de 5,88 A, potência ativa de 1075 W, potência reativa de 627 var e potência aparente de 1244 VA.

Figura 28 – Medição do controlador com Resistência e Motor



Fonte: Elaborado pelo Autor

Através do medidor de qualidade de energia e amperímetro, conforme Fotografia 11, realizado as medições de ângulo de -33 , FP de $0,838$ indutivo, tensão de $212,0$ V e corrente de $5,9$ A.

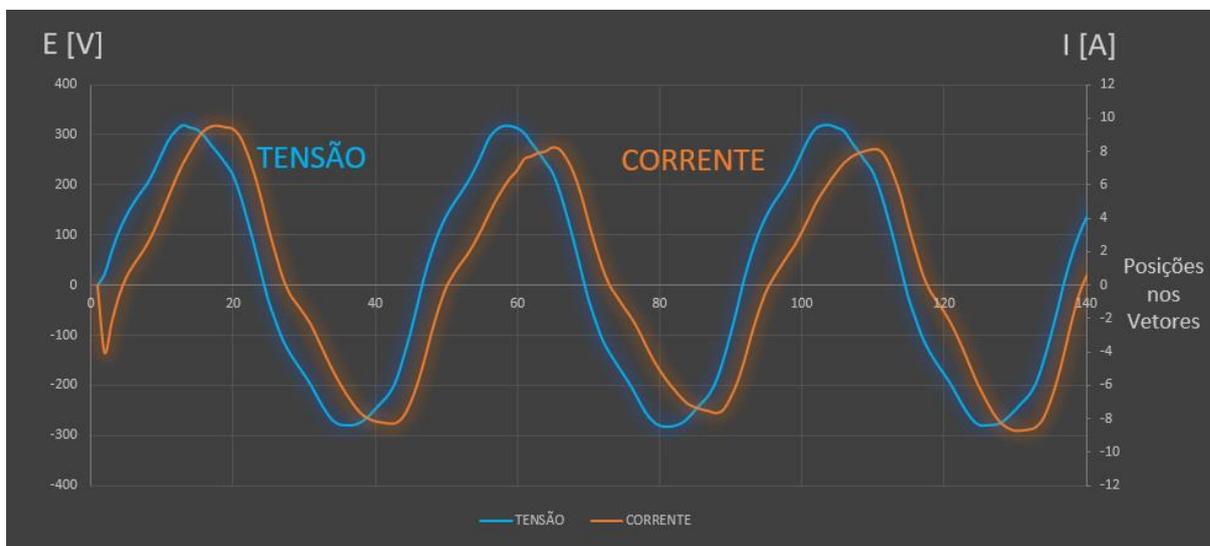
Fotografia 11 – Medições Analisador e Amperímetro com Resistência e Motor



Fonte: Registrada pelo Autor

O Gráfico 2 apresenta as formas de onda de tensão e corrente medidas sobre a carga resistiva e indutiva, resultando em tensão e corrente defasadas, assim identificando a corrente atrasada em relação a tensão.

Gráfico 2 - Forma de onda medida com Resistência e Motor



Fonte: Elaborado pelo Autor

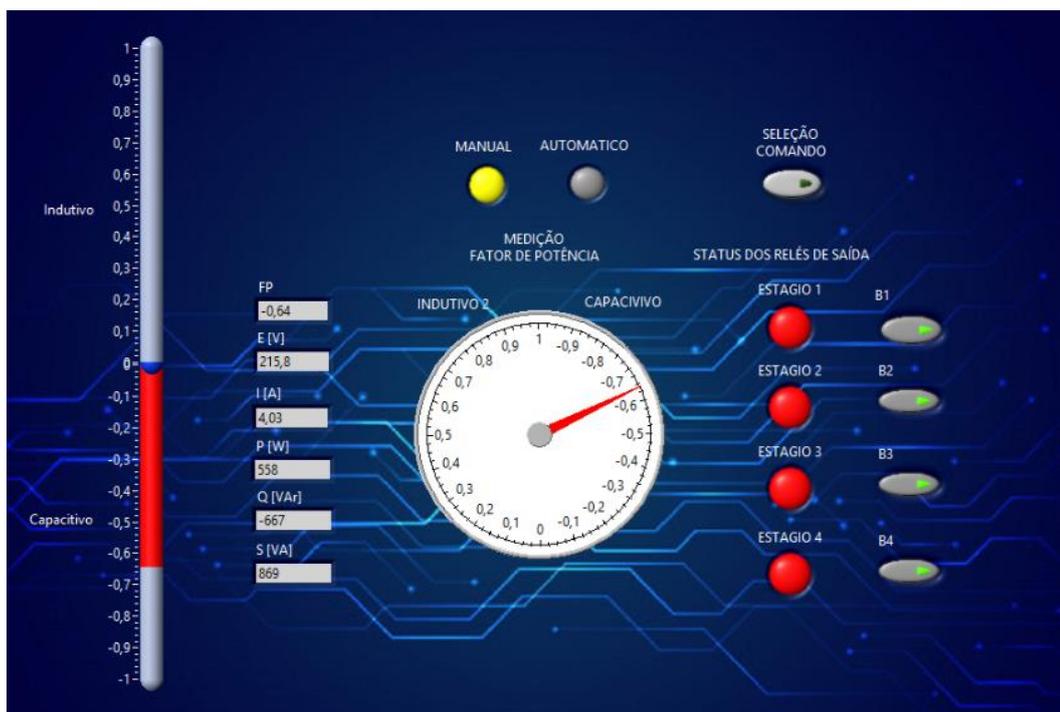
5.4.3 Carga Resistiva e Capacitiva em Modo Manual

Com o objetivo de verificar a medição de tensão e corrente defasadas e Fator de Potência Capacitivo, corrente adiantada em relação a tensão, realizou-se os testes sobre carga resistiva e capacitiva, utilizando o forno de 650 W e quatro capacitores de 10 μF .

Através do supervisor, conforme Figura 29, realizado as medições de FP de 0,64 capacitivo, tensão de 215,8 V, corrente de 4,03 A, potência ativa de 558 W, potência reativa de -667 var e potência aparente de 869 VA.

Através do medidor de qualidade de energia e amperímetro, conforme Fotografia 12, realizado as medições de ângulo de 46, FP de 0,69 capacitivo, tensão de 214,6 V e corrente de 4,0 A.

Figura 29 – Medição do controlador com Resistência e Capacitor



Fonte: Elaborado pelo Autor

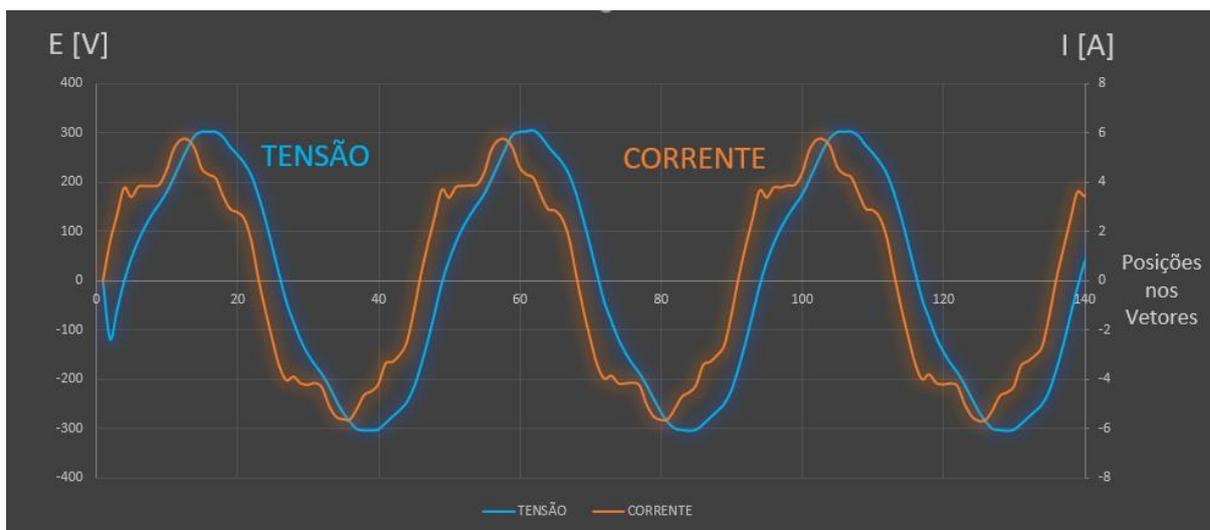
Fotografia 12 – Medições Analisador e Amperímetro com Resistência e Capacitor



Fonte: Registrada pelo Autor

O Gráfico 3 apresenta as formas de onda de tensão e corrente medidas sobre a carga resistiva e capacitiva, resultando em tensão e corrente defasadas, assim identificando a corrente adiantada em relação a tensão.

Gráfico 3 - Forma de onda medida com Resistência e Capacitores



Fonte: Elaborado pelo Autor

5.4.4 Medição em Modo Automático

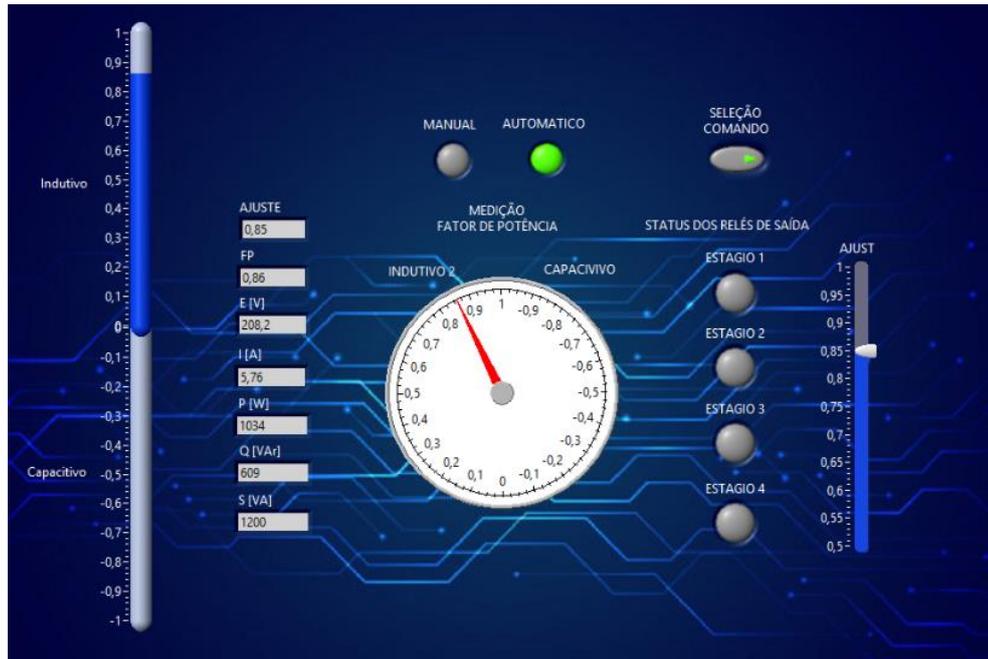
Com o intuito de verificar o controle em modo Automático, são realizados testes até o acionamento do segundo estágio, onde apresentam a correção do FP quando solicitado. A partir de um valor de *setpoint* enviado para o controlador, é calculada a potência reativa necessária a ser adicionada para a correção, garantindo que a correção seja feita mediante a uma carga conectada ao circuito.

Na Figura 30 é apresentada a medição pelo controlador com *setpoint* do FP em 0,85 indutivo, sendo que a carga já está com neste valor, assim o controlador identifica que não há a necessidade de corrigir o reativo.

A partir do instante em que a medição é 0,86 indutivo, conforme Figura 30, alterado o ajuste para 0,889 indutivo, é acionado um relé de interface que conecta um capacitor de 10 μF com a carga, assim medindo FP de 0,91 indutivo, conforme Figura 31.

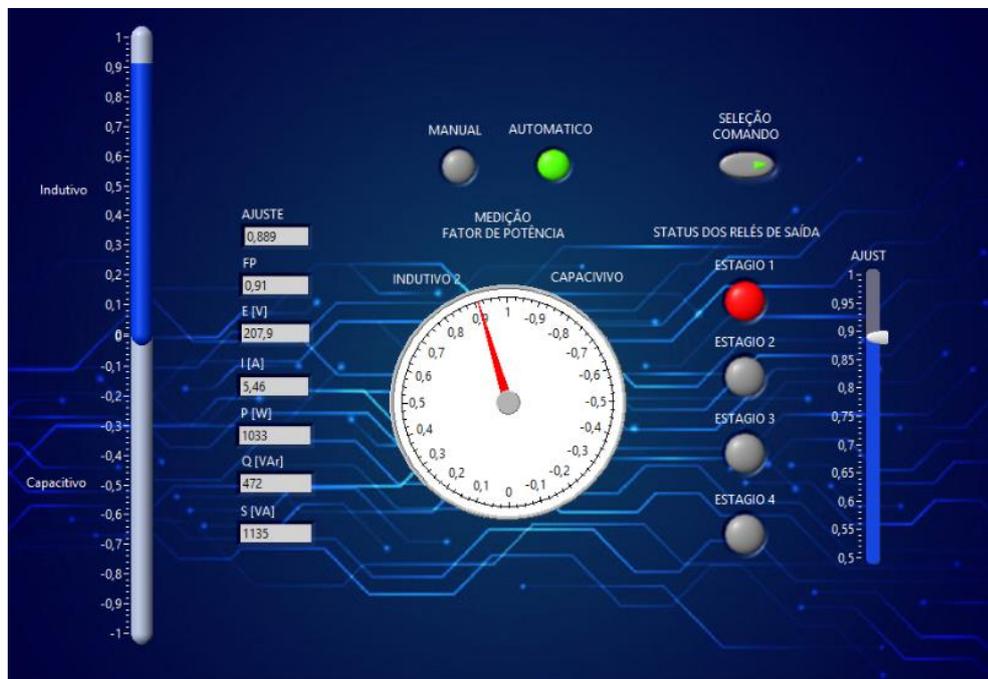
A partir do instante em que a medição é 0,91 indutivo, conforme Figura 31, alterado o ajuste para 0,936 indutivo, é acionado um segundo relé de interface que conecta mais um capacitor de 10 μF com a carga, assim medindo FP de 0,95 indutivo, conforme Figura 32.

Figura 30 – Medições em modo Automático



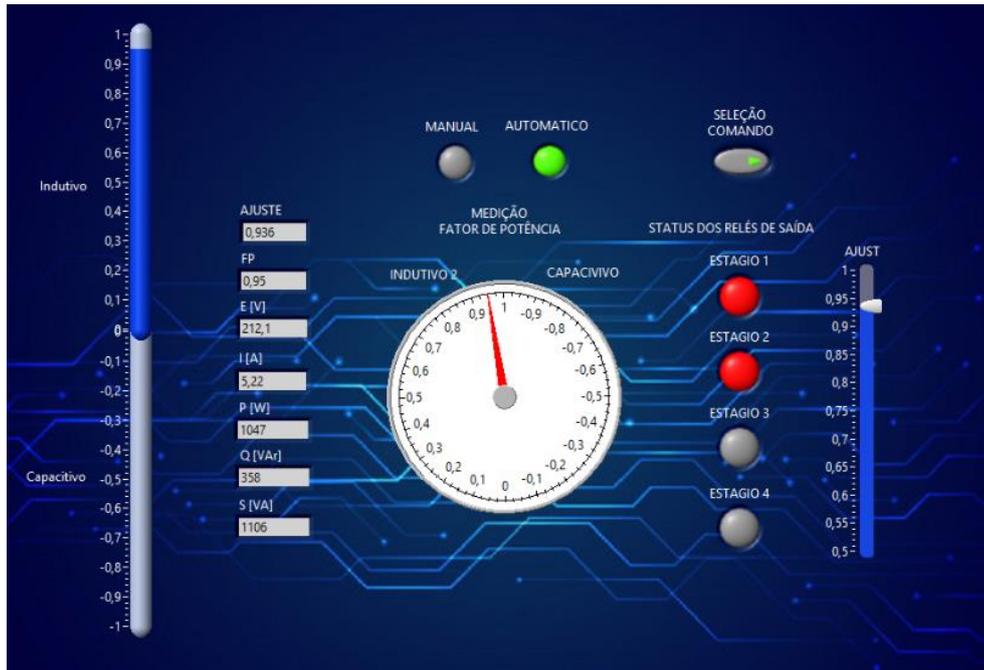
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 31 – Medições em modo Automático com um estágio de Capacitor



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 32 – Medição em modo Automático com dois estágios de Capacitores



Fonte: Elaborado pelo Autor

5.5 Validação

Na Tabela 4 são apresentados os dados das medições realizadas com diferentes cargas, com o intuito de visualizar os valores e realizar a validação do correto funcionamento do controlador em estudo. Também objetivando a definição do erro percentual de cada medida a partir do controlador, comparada com instrumentos utilizados. Pelo fato de o analisador não apresentar a corrente com casas decimais, se optou em utilizar um amperímetro para obter esta informação com maior precisão.

Compondo a Tabela 4, a nomenclatura utilizada para as cargas segue em que “R” é a resistência do forno, “M” é o motor monofásico do compressor e “C” são os capacitores de 10 μ F, onde o número de 1 a 4 que acompanha o “C” indica a quantidade de capacitores conectados juntos à carga.

Tabela 4 – Medições elétricas verificadas

Carga	Controlador						Analisador FLUKE			Amp.	erro		
	E [V]	I [A]	P [W]	Q [var]	S [VA]	FP	E [V]	Ang.	FP	I [A]	E [%]	I [%]	FP [%]
R	208,4	2,65	550	-49	552	1	221,5	-2	0,99 ind	2,8	5,91	5,35	1,01
R+1C	210	2,77	551	-187	581	0,95 cap	214	14	0,97 cap	2,7	1,87	2,59	2,06
R+2C	210,8	3,03	545	-335	639	0,85 cap	214,2	27	0,89 cap	3	1,58	1	4,49
R+3C	213,4	3,47	550	-497	741	0,74 cap	214,6	38	0,78 cap	3,4	0,56	2,06	5,12
R+4C	215,8	4,03	558	-667	869	0,64 cap	214,8	47	0,68 cap	4	0,46	0,75	5,88
M	223,2	4,05	554	722	904	0,6 ind	228,4	-53	0,6 ind	3,9	2,27	3,84	0
M+1C	224,9	3,44	537	557	774	0,69 ind	230,9	-45	0,71 ind	3,2	2,59	7,5	2,82
M+2C	225,1	2,91	524	393	655	0,8 ind	225,5	-33	0,83 ind	2,7	0,18	7,77	3,61
M+3C	227,8	2,52	510	266	575	0,89 ind	231,6	-21	0,93 ind	2,4	1,64	5	4,3
M+4C	228,2	2,44	506	233	557	0,91 ind	228,9	-1	0,99 ind	2,3	0,24	6,1	8,08
R+M	211,6	5,88	1075	627	1244	0,86 ind	211,8	-33	0,84 ind	5,9	0,09	0,34	2,38
R+M+1C	214,2	5,57	1091	486	1194	0,91 ind	221,2	-26	0,89 ind	5,6	3,16	0,53	2,25
R+M+2C	212,3	5,29	1072	332	1122	0,96 ind	217,6	-19	0,94 ind	5,3	2,43	0,19	2,13
R+M+3C	214,8	5,16	1084	229	1108	0,98 ind	218,2	-10	0,98 ind	5,2	1,56	0,77	0
R+M+4C	210	5,09	1049	205	1068	0,98 ind	210,8	-2	0,99 ind	5,2	0,38	2,11	1,01

Fonte: Elaborado pelo Autor

Em análise das informações contidas na tabela 4, se verifica em que para tensão, o erro percentual mínimo é 0,09% medido sobre a carga resistência e motor, como erro máximo 5,91% medido apenas sobre a carga resistiva.

Para a corrente, o erro percentual mínimo é 0,19% medido sobre a carga resistência, motor e dois capacitores, como erro máximo 7,77% medido sobre a carga do motor com dois capacitores conectados. Já para o Fator de Potência, se obteve erro praticamente zero em dois pontos, apenas sobre o motor e com a carga de resistência, motor e três capacitores, sendo o maior erro de 8,08, medidos sobre o motor com 4 capacitores.

A partir dos dados de medição da Tabela 4, definindo como erro médio sobre a medição de tensão de 1,66%, erro médio para a medição de corrente de 3,09% e Fator de Potência médio de 3,0%.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As técnicas de instrumentação, medição e controle estudadas nos capítulos 2 e 3, podem ser utilizadas na metodologia proposta para a solução do problema de correção de fator de potência descrita no capítulo 4.

O *hardware* de microcontrolador (capítulos 2 e 3), possibilita ampla aplicação na implementação de protótipos e equipamentos que necessitam de controle, medição e processamento de dados. Partindo desta capacidade do microcontrolador, é visto a viabilidade da implementação do protótipo do controlador de fator de potência.

Uma importante etapa do desenvolvimento do protótipo é descrita no capítulo 4, onde aborda a questão de validação, sendo necessária principalmente para conferência das medições, pelo protótipo utilizar elementos de medição que operam por indução eletromagnética, causando distorções nos valores medidos.

Do modo que foi proposta a implementação da interface do controlador, o acesso as informações e controle são realizados de forma remota, sendo via sistema supervisor.

Utilizando elementos como transformadores de potencial e de corrente elétrica, associados ao microcontrolador, torna-se possível a implementação de um monitor de energia, com controle de saídas digitais para a correção de fator de potência, também com possibilidade de aplicação a conceitos utilizados em sistemas de indústria 4.0, com comunicação e tratamento de dados, com acesso via redes.

Após a implementação, testes e validação realizada sobre o protótipo do controlador de Fator de Potência, se observa o bom funcionamento e eficiência obtido, com relação a medição de tensão e corrente, corrigindo reativo e dispondo de uma interface intuitiva para a visualização e controle das variáveis.

Todo o desenvolvimento e implementação foram realizados considerando circuito monofásico, e com os resultados satisfatórios pode ser aplicado em circuitos trifásicos tipicamente equilibrados.

Em análise dos erros nas medições e formas de onda obtidas, se pressupõe que o erro pode ser causado pela presença de distorções harmônicas, e como foi implementado pelo cálculo do Fator de Potência a partir das potências ativa e aparente, o efeito desta distorção é refletido no valor do FP.

Recomenda-se para trabalhos futuros a implementação de filtros na medição de tensão e corrente para correção do erro ou pelo método da passagem por zero, com o intuito de melhorar o resultado na medição e conseqüentemente na correção do Fator de Potência. Também para trabalhos futuros, a implementação de um display para interface local, medição trifásica, identificação automática dos valores dos capacitores.

REFERÊNCIAS

ALVES, José Luiz Loureiro. Instrumentação, Controle e Automação de Processos: Rio de Janeiro: LTC, 2010.

BRANQUINHO, Omar Carvalho, Redes de Comunicação De Dados sem Fio – Uma Análise de Desempenho: PUC, Campinas, 2005.

<http://www.homexpert.com.br/areaservada/wp-content/uploads/2011/06/Redes-de-comunica%C3%A7%C3%A3o-sem-fio-Uma-an%C3%A1lise-de-desempenho.pdf> - Acesso em 14/06/2019.

BORGES, Diego Garcia. Microcontrolador para correção automática do fator de potência e seleção de filtro passivo: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Jataí, Goiás, 2013.

https://www.ifg.edu.br/attachments/article/3018/IC_2013_Diego%20Garcia%20Borges.pdf - Acesso em 27/10/2019.

CESARIO JUNIOR, José Maria. Um medidor de energia elétrica integrado em redes de comunicações: Limeira, 2014.

http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/267697/1/CesarioJunior_JoseMaria_M.pdf - Acesso em 30/05/2019.

CREDER, Hélio. Instalações Elétricas: Rio de Janeiro: LTC, 2016.

ESPRESSIF SYSTEMS, Datasheet: ESP-WROOM-32. Publicação Eletrônica 2019.

https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf - acesso em 11/05/2019.

JOSÉ DE PAULA, Gilberto. Medidor de demanda de energia elétrica residencial com acesso remoto: Brasília, 2013.

https://repositorio.uniceub.br/jspui/bitstream/235/3857/1/Gilberto%20Jos%c3%a9%20De%20Paula%20Monografia%201_2013.pdf - Acesso em 23/06/2019.

LABIOD, Houda. Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee e Wimax: Dordrecht: Springer, 2007.

<https://b-ok.cc/book/634449/0c68cf> – acesso em 11/05/2019.

NISKIER, Julio. Instalações Elétricas: Rio de Janeiro: LTC, 2013.

PACHECO, Ábner C. P., Projeto de um Sistema de Medição, Monitoramento e Acionamento Remoto de uma Carga Elétrica: Uberlândia, 2016. https://www.peteletricaufu.com/static/ceel/doc/artigos/artigos2016/ceel2016_artigo167_r01.pdf - Acesso em 12/06/2019.

ROSA – Gustavo – Manual de Instalação e Operação CM 4040 Embrasul – 2009 - http://www.automacenter.com.br/manuais/embrasul/manual_cm_4040.pdf - acesso em 30/04/2019.

SANTOS, Sandro. Introdução à Indústria 4.0: Saiba tudo sobre a REVOLUÇÃO DAS MAQUINAS: SSIInvestimentos, 2018.

SIMONE, Gilio Aluisio. Transformadores – Teoria e Exercícios: São Paulo: Erica, 2010.

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536520452/cfi/0!/4/2@100:0.00> – acesso em 04/05/2019.

SOUZA, Lindeberg Barros de. TCP/IP e Conectividade em redes: guia prático: São Paulo: Érica, 2010.

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536522111/cfi/0!/4/2@100:0.00> – acesso em 11/05/2019.

SPANULESCU, Sever. ESP32 programming for the Internet of Things: Kindle Edition, 2018 - https://www.amazon.co.uk/ESP32-programming-Internet-Things-Microcontrollers-ebook/dp/B07L7Q6WZX/ref=sr_1_1?s=books&ie=UTF8&qid=1551929760&sr=1-1&keywords=esp32 - acesso em 17/05/2019.

STEVAN JR, Sergio Luiz. Automação e Instrumentação Industrial com Arduino: teoria e projetos: São Paulo: Erica, 2010.

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536518152/cfi/0!/4/2@100:0.00> – acesso em 23/05/2019.

WHITE, Curt. Redes de computadores e comunicação de dados / Curt White [tradução All Tasks]: São Paulo: Cengage Learning, 2012. <https://book.cc/book/4991262/30a29a> - acesso em 11/05/2019.

YHDC, 2015. <http://en.yhdc.com/product/SCT013-401.html> – acesso em 17/05/2019.