



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

GLAUBER ALMINO FERREIRA RAMALHO DOS SANTOS



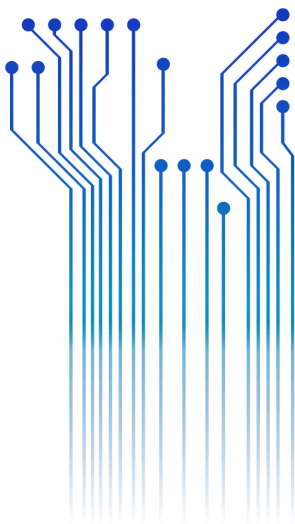
Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CONTROLADOR AUTOMÁTICO DE FATOR DE POTÊNCIA E DE DEMANDA



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2018

GLAUBER ALMINO FERREIRA RAMALHO DOS SANTOS

CONTROLADOR AUTOMÁTICO DE FATOR DE POTÊNCIA E DE DEMANDA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Ronimack Trajano de Souza, D. Sc.

Campina Grande
2018

GLAUBER ALMINO FERREIRA RAMALHO DOS SANTOS

CONTROLADOR AUTOMÁTICO DE FATOR DE POTÊNCIA E DE DEMANDA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Ronimack Trajano de Souza, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por intermédio de Jesus Cristo, autor e consumidor da minha fé, por ter me sustentado, me guiado e por ter permitido que eu chegasse até aqui. Não foi um caminho fácil, mas nunca fui desamparado. A Ele toda a glória.

Sou grato também aos meus pais, Gilberto e Kátia, pelo apoio incondicional, porque não mediram esforços para garantir minha formação até aqui, pelos ensinamentos de vida, pelo amor sacrificial e pela compreensão da distância. Esse sonho é nosso.

Agradeço às minhas irmãs, Grazielle e Giselle, pelos bons conselhos, pelo amor e pelo apoio de sempre. Aos demais familiares que também contribuíram, obrigado.

Agradeço especialmente aos meus amigos Elvys, Saul, Rodrigo, Bruna, Matheus, Felipe, Hiago, Sebastião e à minha namorada Nathalya pelo empenho em me ajudar e pela paciência comigo durante a realização deste trabalho. Saibam que a ajuda de vocês foi essencial.

Por último, agradeço ao professor e orientador Ronimack pelos ensinamentos acadêmicos e pelas contribuições para este trabalho.

RESUMO

Este trabalho dedica-se à construção de um controlador monofásico automático de fator de potência e de demanda. A necessidade de redução de custos para maior lucratividade na produção industrial tem feito crescer o interesse por meios de poupar gastos com energia elétrica. Com base nisso, neste trabalho foi proposto e feito um protótipo do equipamento elétrico responsável pelo controle de fator de potência, aliado ao controle da demanda, de baixo custo, objetivando a eliminação de multas na fatura de energia elétrica, por exceder o consumo de reativos e de demanda contratada. A construção do protótipo foi feita, basicamente, por meio de sensores de tensão e corrente, relés eletromecânicos e um microcontrolador ATmega2560, pertencente à plataforma Arduino Mega 2560, escolhido devido ao seu baixo custo e bom desempenho. Os sinais de tensão e de corrente para os testes foram simulados pelo *software* MATLAB e verificados através de um osciloscópio portátil. Na faixa operacional do controlador, os erros relativos apresentados no teste de fator de potência foram inferiores a 2% e a 6% para medidas de potência ativa. O controlador atuou em tempo hábil e com eficácia, prevenindo multas na fatura de energia elétrica.

Palavras-chave: Fator de potência; Controle de demanda; Baixo custo; Controlador automático.

ABSTRACT

This work is dedicated to the construction of a single-phase automatic power factor and demand controller. The need to reduce costs for greater profitability in industrial production has increased interest by means of saving energy costs. Based on this, in this work, a prototype of the electrical equipment responsible for power factor control, coupled with demand control, was proposed and made low cost, aiming at the elimination of fines in the electric energy bill, for exceeding the consumption of reagents and contracted demand. The construction of the prototype was done by means of voltage and current sensors, electromechanical relays and an ATmega2560 microcontroller, belonging to the Arduino Mega 2560 platform, chosen due to its low cost and good performance. The voltage and current signals for the tests were simulated by MATLAB software and verified through a portable oscilloscope. In the operating range of the controller, the relative errors presented in the power factor test were less than 2% and 6% for active power measurements. The controller acted in a timely and effective manner, preventing fines in the electric bill.

Keywords: Power factor; Demand control; Low cost; Automatic controller.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação de um triângulo de potências.	13
Figura 2 - Fotografia do controlador automático de fator de potência PFW01 da WEG.	15
Figura 3 - Diferença angular entre sinais.	16
Figura 4 - Representação de um capacitor de placas paralelas.	17
Figura 5 - Fotografia do contator WEG CWC09.	18
Figura 6 - Fotografia de um Controlador de demanda ST8500C SULTECH.	20
Figura 7 - Fotografia de um Arduino Mega 2560.	22
Figura 8 - Captura de tela do <i>software</i> disponibilizado pelo fabricante Arduino.	22
Figura 9 - Esquema elétrico de um canal do módulo do relé.	24
Figura 10 - Fotografia do Módulo de relés eletromecânicos de 4 canais.	24
Figura 11 - Fotografia do Sensor de corrente SCT-013-000 de 100 A.	25
Figura 12 - Esquema do Circuito elétrico do SCT-013-000.	26
Figura 13 - Ilustração do TC.	26
Figura 14 - Fotografia de um Visor LCD 16x2.	27
Figura 15 - Fotografia de um Módulo I2C para tela LCD 16x2.	28
Figura 16 - Esquema de um circuito elétrico abaixador de tensão.	29
Figura 17 - Gráfico de Tensão da rede	30
Figura 18 - Gráfico da Tensão na saída do transformador.	30
Figura 19 - Gráfico da Tensão após o divisor de tensão.	31
Figura 20 - Gráfico da Tensão na entrada do Arduino.	31
Figura 21 - Esquema do circuito da medição de corrente.	32
Figura 22 - Gráfico da Corrente máxima de entrada no sensor de corrente.	33
Figura 23 - Gráfico da Corrente máxima de saída no sensor de corrente.	33
Figura 24 - Gráfico da Tensão máxima no resistor de carga.	34
Figura 25 - Gráfico da Tensão máxima na entrada do Arduino.	34
Figura 26 - Gráfico da Amostragem dos sinais de Tensão e Corrente no microcontrolador.	36
Figura 27 - Gráfico das Amostras de Potência Ativa Instantânea no microcontrolador.	36
Figura 28 - Fluxograma do controle de fator de potência.	37
Figura 29 - Fluxograma do controle de demanda.	39
Figura 30 - Fotografia do controlador automático de fator de potência e de demanda.	41
Figura 31 - Esquema de medição do Fator de Potência.	42
Figura 32 - Gráfico comparativo do teste de Fator de Potência com os valores de entrada e com os valores de saída.	42
Figura 33 - Captura de tela da interface gráfica do osciloscópio NI myDAQ.	43
Figura 34 - Mensagem apresentada no display para demanda excedida.	44
Figura 35 - Fotografia do Display do protótipo com carga resistiva.	45
Figura 36 - Captura de tela do osciloscópio durante a medição da tensão e corrente da carga resistiva.	45
Figura 37 - Fotografia do display com carga mista antes da correção do fator de potência.	46
Figura 38 - Captura de tela do osciloscópio com carga indutiva antes da correção do fator de potência.	46
Figura 39 - Fotografia da montagem para correção automática do fator de potência com capacitor de poliéster de 4,75 μ F.	47
Figura 40 - Fotografia do Display com carga mista após a correção do fator de potência.	48
Figura 41 - Captura de tela do osciloscópio com carga mista após a correção automática do fator de potência.	48
Figura 42 - Gráfico das Curvas de Tendência para os valores real e medido do Fator de Potência.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Erros das medições dos testes com cargas.....	49
Tabela 2 - Valores medidos no teste de fator de potência.	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	ampère
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
F	farad
Hz	Hertz
ICSP	<i>In Circuit Serial Programmer</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
kVA	quilovolt-ampère
kVAh	quilovolt-ampère-hora
kvar	quilovolt-ampère reativo
kvarh	quilovolt-ampère-reativo-hora
kW	quilowatt
kWh	quilowatt-hora
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
NA	Normalmente Aberto
NF	Normalmente Fechado
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i>
Trimpot	<i>Trimmer Potentiometer</i>
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>
TVS	<i>Transient Voltage Suppressor</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
V	volt

SUMÁRIO

1	Introdução.....	11
1.1	Objetivos.....	11
2	Desenvolvimento.....	13
2.1	Fator de Potência.....	13
2.2	Potências Aparente, Ativa e Reativa.....	15
2.3	Capacitor.....	16
2.4	Contator.....	17
2.5	Demanda.....	18
3	Materiais.....	21
3.1	Arduino.....	21
3.2	Módulo de relés eletromecânicos.....	23
3.3	Sensor de corrente.....	25
3.4	Display LCD 16x2.....	27
3.5	Módulo Serial I2C.....	27
4	Metodologia.....	29
4.1	Condicionamento do sinal de tensão.....	29
4.2	Condicionamento do sinal de corrente.....	31
4.3	Lógica de Programação.....	35
4.3.1	Cálculo do Fator de potência.....	35
4.3.2	Controle de Fator de Potência.....	37
4.3.3	Controle de Demanda.....	38
4.4	Calibração dos sensores.....	39
4.4.1	Sensor de Tensão.....	40
4.4.2	Sensor de Corrente.....	40
5	Resultados.....	41
5.1	Teste de medição de Fator de Potência.....	41
5.2	Teste do controlador de demanda.....	44
5.3	Teste com carga resistiva.....	44
5.4	Teste do controlador de Fator de Potência com carga mista.....	46
5.4.1	Antes da correção do fator de potência.....	46
5.4.2	Após a correção automática do fator de potência.....	47
5.5	Análise de resultados dos testes.....	49
6	Considerações finais.....	52
	Referências.....	53
	APÊNDICE A – Código do Arduino.....	54
	ANEXO A – Emonlib.....	60

1 INTRODUÇÃO

A competitividade entre as indústrias impulsiona empresários à constante busca de redução de custos. Em relação ao controle de gastos com energia elétrica, é imprescindível quantificar e controlar a demanda medida e o fator de potência da instalação, a fim de evitar multas na fatura de energia elétrica. Os dispositivos disponíveis no mercado capazes de controlar esses parâmetros, fator de potência e demanda, apresentam custos elevados e raramente integram as duas funções no mesmo dispositivo.

O desafio de reduzir custos com demanda de energia elétrica contratada é causado pelo perfil de consumo energético não-linear da instalação, associado com a demanda contratada com um limite fixo. Em outras palavras, o consumidor industrial estará sempre pagando o limite contratado, utilizando ou não a quantia. Em virtude disto, muitos consumidores contratam um valor médio de demanda e casualmente pagam multas por ultrapassar a demanda prevista.

Uma maneira de evitar esse ônus na fatura de energia elétrica é controlando a demanda automaticamente com o uso de controlador de demanda, o qual é um dispositivo capaz de medir a potência ativa e desligar algumas cargas da instalação, caso seja necessário, a fim de não ultrapassar o limite de demanda contratada.

De modo semelhante, é possível evitar multa por exceder o consumo de potência reativa utilizando um controlador automático de fator de potência, o qual é um equipamento elétrico conectado a uma instalação elétrica capaz de regular seu fator de potência automaticamente, por meio da compensação reativa da inserção de bancos capacitivos no circuito, com o objetivo de elevar o fator de potência para o mais próximo possível da unidade. Este TCC insere-se neste contexto.

1.1 OBJETIVOS

Para a construção de um protótipo de controlador automático monofásico de fator de potência e de demanda, foi buscado:

- Amostrar sinais de tensão e de corrente, por meio de transdutores;
- Calcular tensão e corrente eficazes, potência ativa e fator de potência;

- Controlar o fator de potência e a demanda medida, utilizando atuadores com capacidade de chaveamento.

É imprescindível o uso de um microcontrolador. Para tal, foi escolhida a plataforma Arduino Mega 2560, a qual vem equipada com um microcontrolador ATmega2560. A fim de testar o controlador em questão, testes foram realizados com a simulação de sinais por meio do *software* MATLAB.

2 DESENVOLVIMENTO

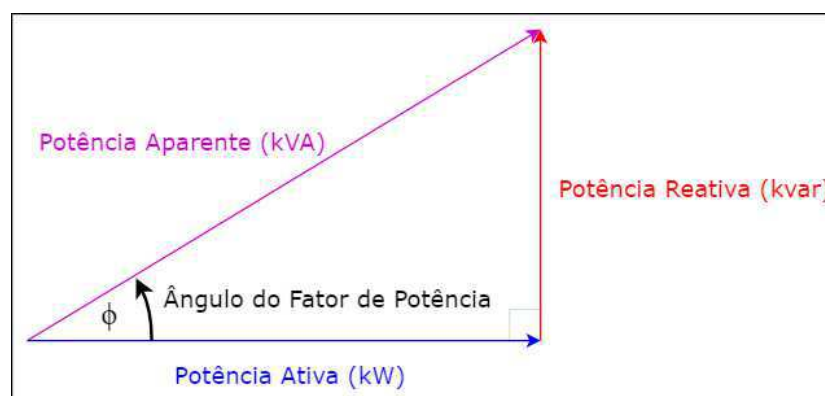
Para o completo entendimento deste trabalho, é necessário elucidar alguns termos e variáveis presentes neste tópico, como fator de potência, potência ativa, potência aparente, potência reativa e demanda, além de explicar o funcionamento e aplicação de capacitores e contadores.

2.1 FATOR DE POTÊNCIA

O fator de potência de uma instalação é um parâmetro adimensional que indica como está sendo aproveitada a energia elétrica da unidade consumidora ou como está o balanço entre energia ativa, a qual realiza efetivamente trabalho, e energia reativa, necessária apenas para a magnetização de motores (MAMEDE FILHO, 2017).

Segundo (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2010, p. 4), fator de potência é “a razão entre a energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias elétricas ativa e reativa, consumidas num mesmo período especificado” e pode variar entre zero e um, como pode ser observado na Figura 1 e na Equação (1).

Figura 1 - Representação de um triângulo de potências.



Fonte: Adaptado de (GLOVER, SARMA, & OVERBYE, 2011).

Matematicamente, o fator de potência (FP) pode ser calculado pela equação:

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{P}{S} = \cos \phi , \quad (1)$$

sendo P a potência ativa [W], Q a potência reativa [var] e S a potência aparente [VA]. Estas variáveis serão explicadas no próximo tópico deste trabalho.

A Resolução Normativa 414 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regulamenta:

Art. 76. O fator de potência da unidade consumidora, para fins de cobrança, deve ser verificado pela distribuidora por meio de medição permanente, de forma obrigatória para o grupo A.

Parágrafo Único. As unidades consumidoras do grupo B não podem ser cobradas pelo excedente de reativos devido ao baixo fator de potência. (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2010, p. 63).

Sendo assim, a cobrança de multa na fatura de energia elétrica por exceder o consumo de reativos é feita apenas ao Grupo A, ou seja, ao grupo de consumidores que recebe energia com tensões elétricas acima de 2,3 kV. Já os consumidores do Grupo B, formado por consumidores que recebem energia elétrica com tensões abaixo de 2,3 kV, não recebem incentivos para controlar seu fator de potência.

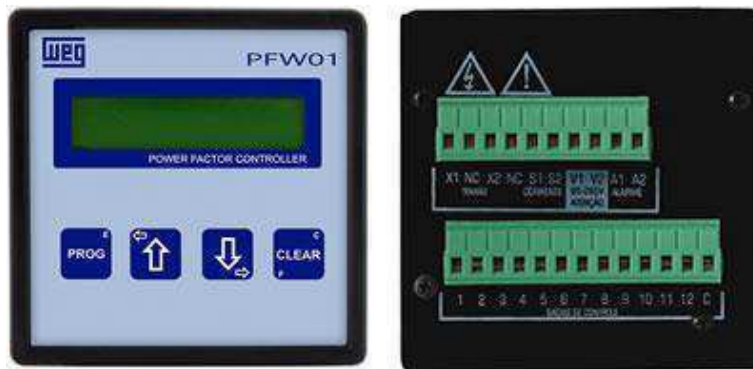
O ônus na fatura de energia elétrica ocorre quando o fator de potência não é controlado, durante o período de faturamento, com valor igual ou acima do valor de referência normatizado pela ANEEL, pois isso implica exceder o limite máximo da demanda reativa. Os valores de referência para FP são de 0,92 para consumidores em média tensão vinculados a uma distribuidora de energia elétrica e de 0,95 para consumidores livres, os quais compram energia livremente no mercado (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2010).

Além de evitar o pagamento de multas, existem outros motivos pelos quais se deseja controlar o fator de potência (MAMEDE FILHO, 2017), entre eles:

- i. Liberação de potência instalada em transformação;
- ii. Liberação da capacidade de carga em circuitos terminais e de distribuição;
- iii. Redução de perdas;
- iv. Melhoria do nível de tensão.

O controle de fator de potência pode ser feito de modo autônomo por um controlador automático, o qual é um dispositivo elétrico que opera dentro de um limite desejado realizando o chaveamento de bancos capacitivos em estágios. Com a inserção de bancos capacitivos, potência reativa é injetada na instalação, compensando a potência reativa solicitada por motores. Um exemplo comercial de um controlador automático de fator de potência pode ser visto na Figura 2 logo abaixo.

Figura 2 - Fotografia do controlador automático de fator de potência PFW01 da WEG.



Fonte: Disponível em: <<http://old.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Controls/Capacitores-e-Correcao-do-Fator-de-Potencia/Controladores-automaticos-do-Fator-de-Potencia>>. Acesso em: 1 de março de 2018.

2.2 POTÊNCIAS APARENTE, ATIVA E REATIVA

Potência aparente é a energia total demandada por uma carga ou instalação elétrica. É medida em quilovolt-ampère (kVA) e é totalizada pelo medidor de faturamento elétrico em quilovolt-ampère-hora (kVAh). Para circuitos monofásicos (GLOVER, SARMA, & OVERBYE, 2011), a potência aparente monofásica (S) é calculada como:

$$S = V * I, \quad (2)$$

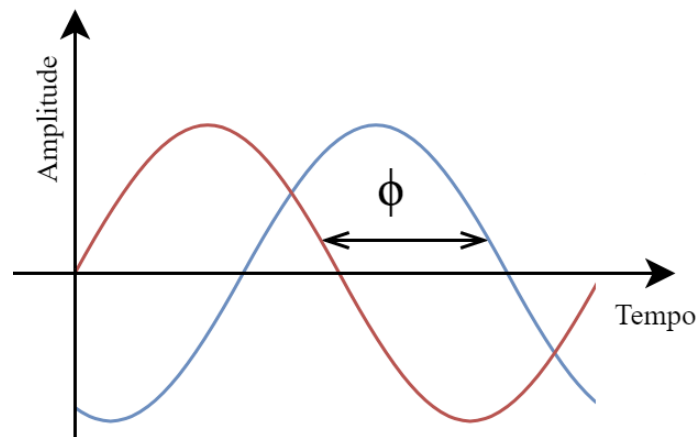
sendo V a tensão eficaz [V] e I a corrente eficaz [A].

A potência ativa é a energia que é efetivamente convertida em trabalho útil para criar calor, luz e movimento. Ela é medida em quilowatt (kW) e é totalizada pelo medidor de faturamento elétrico em quilowatt-hora (kWh) e também tratada por demanda, sobre a qual será comentado na Seção 2.5. Matematicamente, a potência ativa monofásica (P) é calculada como:

$$P = V * I * \cos \phi, \quad (3)$$

sendo ϕ a diferença angular [°] entre os sinais senoidais da tensão V e da corrente I , no domínio do tempo. Essa diferença angular ϕ está explicitada na Figura 3.

Figura 3 - Diferença angular entre sinais.



Fonte: Próprio autor.

A potência reativa é usada para sustentar o campo eletromagnético em equipamentos indutivos e capacitivos. É a componente de energia que não realiza trabalho. É medida em quilovolt-ampère reativo (kvar). Esta potência, quando excedido seu consumo, é apresentada em multa na fatura de energia elétrica e é medida em quilovolt-ampère-reativo-hora (kvarh). A potência reativa monofásica (Q) pode ser calculada da seguinte forma:

$$Q = V * I * \sin \phi. \quad (4)$$

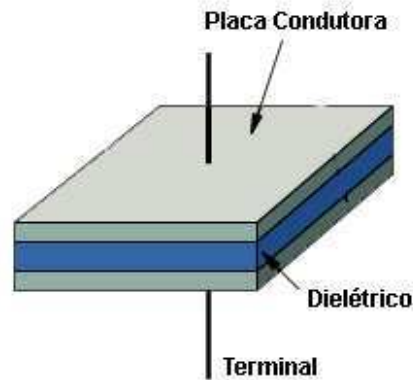
Um modo de injetar potência reativa na instalação elétrica é por meio do uso de capacitores, sobre os quais será tratado na Seção 2.3.

2.3 CAPACITOR

Um capacitor é um componente elétrico passivo de dois terminais, utilizado para armazenar energia em um campo elétrico. Existem diversos modelos para aplicações variadas, e com materiais diferentes, mas todos são construídos com, pelo menos, dois condutores elétricos separados por um dielétrico, como apresentado na Figura 4. Quando

existe uma diferença de tensão entre os condutores, um campo elétrico estático se desenvolve através do dielétrico, causando polarização dos terminais e armazenamento de energia no campo eletrostático.

Figura 4 - Representação de um capacitor de placas paralelas.



Fonte: Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAMT4AG/capacitor-indutor>>. Acesso em: 1 de março de 2018.

A capacitância, medida em Farad [F], é proporcional às áreas dos condutores e inversamente proporcional à distância entre eles. Por causa disto, os condutores de capacitores geralmente são placas. Na prática, à medida que a tensão varia com o tempo, ocorre um deslocamento de cargas, variante no tempo, dentro do capacitor, provocando uma corrente de deslocamento (NILSSON & RIEDEL, 2014).

Os capacitores exigem energia reativa para operar, no entanto, capacitores e indutores têm comportamentos opostos, relacionados à potência reativa. O fator de potência para capacitores é dito adiantado, enquanto o fator de potência para indutores é atrasado. Cargas indutivas absorvem potência reativa e cargas capacitivas injetam potência reativa. Portanto, os capacitores são instalados para anular o efeito da potência reativa usada por equipamentos indutivos.

Grandes cargas elétricas geralmente são ligadas e desligadas com o auxílio de contator, explicado na Seção 2.4.

2.4 CONTATOR

Contator é um equipamento elétrico, com atuação magnética, para seccionamento de circuitos em carga (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS &

International Electrotechnical Commission, 2009). É formado, basicamente, por um conjunto de contatos elétricos acionados por um eletroímã, podendo ser contatos do tipo Normalmente Fechado (NF) ou do tipo Normalmente Aberto (NA). Além dos três contatos de força para alimentação do motor, todos eles NA, existe o bloco de contatos auxiliares, utilizados para aumentar a capacidade de automatização no comando a ser executado, sendo possível sua fixação na parte frontal ou lateral do contator. Uma fotografia de um contator é mostrada na Figura 5.

Figura 5 - Fotografia do contator WEG CWC09.



Fonte: <www.lojaeletrica.com.br>. Acesso em: 1 de março de 2018.

O contator é usado para a interrupção de grandes cargas e, também, comandos elétricos, de ligamento ou desligamento, à distância. É um equipamento muito utilizado na indústria para acionamento de motores e bancos capacitivos. Uma das suas principais vantagens é de ser um contato não-retentivo para cargas reativas, as quais apresentam elevadas correntes de partida

Em casos de falhas na alimentação da instalação, contadores não religam automaticamente. Com isso, promovem uma maior segurança a operários e garantem a integridade da instalação elétrica. É por meio dos contadores que o controle da demanda é simplificado.

2.5 DEMANDA

Demanda contratada pode ser entendida como o limite máximo de potência ativa solicitado à distribuidora no ponto de entrega da unidade consumidora, representado em kWh e é medido de forma integralizada em períodos de 15 minutos (ANEEL, 2010). O interesse em controlar a demanda de energia elétrica é financeiro, ou seja, visa a redução de custos com o maior aproveitamento da menor demanda possível e sem pagar multa por ultrapassar a demanda contratada.

Sobre demanda, a Resolução Normativa 414 define:

XX – Demanda: média das potências elétricas ativas ou reativas, solicitadas ao sistema elétrico pela parcela da carga instalada em operação na unidade consumidora, durante um intervalo de tempo especificado, expressa em quilowatts (kW) e quilovolt-ampère-reativo (kVAr), respectivamente;

XXI – demanda contratada: demanda de potência ativa a ser obrigatória e continuamente disponibilizada pela distribuidora, no ponto de entrega, conforme valor e período de vigência fixados em contrato, e que deve ser integralmente paga, seja ou não utilizada durante o período de faturamento, expressa em quilowatts (kW);

XXII – demanda faturável: valor da demanda de potência ativa, considerada para fins de faturamento, com aplicação da respectiva tarifa, expressa em quilowatts (kW);

XXIII – demanda medida: maior demanda de potência ativa, verificada por medição, integralizada em intervalos de 15 (quinze) minutos durante o período de faturamento; (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2010, p. 3).

A demanda medida pela concessionária, integralizada no intervalo de 15 minutos, não deve exceder a demanda contratada. Caso seja excedida, o consumidor irá pagar multa na fatura de energia elétrica por exceder a demanda contratada.

Um controlador de demanda é um dispositivo elétrico capaz de monitorar grandezas elétricas, como corrente e tensão da instalação e com isso calcular a potência ativa instantânea em kWh, controlando a demanda medida dentro do limite da demanda contratada por meio do desligamento de algumas cargas, se necessário for. Um exemplo comercial de um controlador de demanda é apresentado na Figura 6 abaixo.

Figura 6 - Fotografia de um Controlador de demanda ST8500C SULTECH.



Fonte: Disponível em: <<http://sultech.com.br/produtos/controladores-de-demanda-st8500c-tc>>. Acesso em: 1 março de 2018.

3 MATERIAIS

Neste tópico serão listados e explicados os componentes e módulos utilizados para a montagem do controlador automático proposto neste trabalho, como exemplo, o microcontrolador Arduino e os sensores de corrente e tensão utilizados.

3.1 ARDUINO

O Arduino foi criado em 2005 por um grupo composto de 5 pesquisadores: Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino e David Mellis. O objetivo era desenvolver um dispositivo que fosse barato, funcional e fácil de programar, a fim de ser acessível a estudantes e projetistas amadores. Além disso, foi adotado o conceito de *hardware* livre, o que significa que qualquer um pode montar, modificar, melhorar e personalizar o Arduino, partindo do mesmo *hardware* básico. Sendo assim, Arduino pode ser compreendido como uma plataforma eletrônica de código aberto com *hardware* simples, *software* de fácil utilização e possui suporte de uma comunidade vasta de usuários, os quais contribuem abertamente com códigos e bibliotecas para diversas aplicações (ARDUINO, 2018).

O Arduino Mega 2560, mostrado na Figura 7, é um entre os modelos existentes e foi adotado neste trabalho. Ele possui 54 pinos de entradas e saídas, entre as quais 15 podem ser utilizadas como saídas *Pulse-Width-Modulation* (PWM), 16 entradas analógicas, 4 *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* (UARTs), um cristal oscilador de 16 megahertz (MHz), porta *Universal Serial Bus* (USB) para conexão com computador, conector de alimentação, botão reset e conexão *In Circuit Serial Programmer* (ICSP) (ARDUINO, 2018). Este modelo é baseado no microcontrolador ATmega2560, o qual apresenta as seguintes características:

- Tensão de Operação: 5 V;
- Tensão de Entrada (recomendada): 7-12 V;
- Tensão de Entrada (suportável): 6-20 V;
- Pinos Digitais de Entrada/Saída: 54;

- Pinos de Entradas Analógicas: 16;
- Corrente Contínua por pino: 20 mA;
- Corrente Contínua para o pino de 3,3 V: 50 mA;
- Memória Flash: 256 kB;
- SRAM (Static Random Access Memory): 8kB;
- EEPROM (Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory): 4kB;
- Clock: 16 MHz.

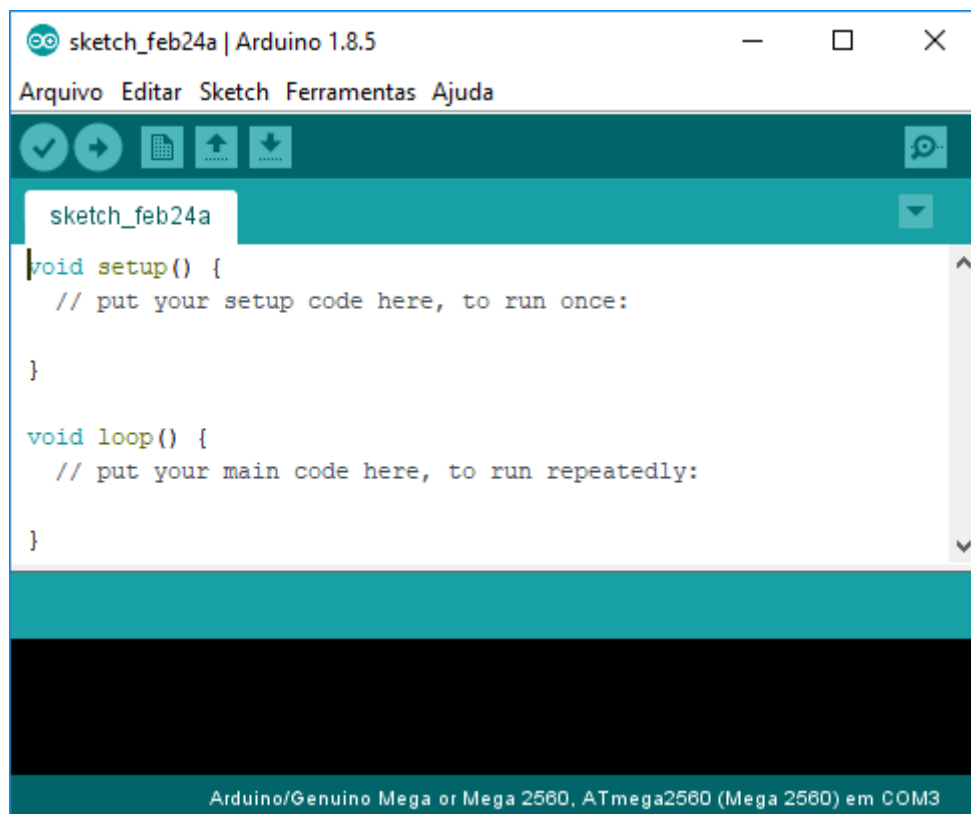
Figura 7 - Fotografia de um Arduino Mega 2560.



Fonte: Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3>>. Acesso em: 1 de março de 2018.

Para fazer a programação do microcontrolador, o fabricante disponibiliza um Ambiente Integrado de Desenvolvimento (IDE, do inglês *Integrated Development Environment*) próprio, onde é escrito o código em uma linguagem de programação baseada em C/C++ e, posteriormente, pode ser compilado e enviado à placa por meio da conexão USB. Depois de programado, o microcontrolador Arduino pode ser usado de forma independente, necessitando apenas de alimentação de energia via conector de energia ou pela porta USB. Na Figura 8 abaixo é exibida a IDE disponibilizada.

Figura 8 - Captura de tela do *software* disponibilizado pelo fabricante Arduino.



Fonte: Próprio autor.

O Arduino, utilizando a função *digitalWrite*, pode controlar atuadores como o módulo de relés eletromecânicos utilizado neste trabalho e mostrado na Seção 3.2.

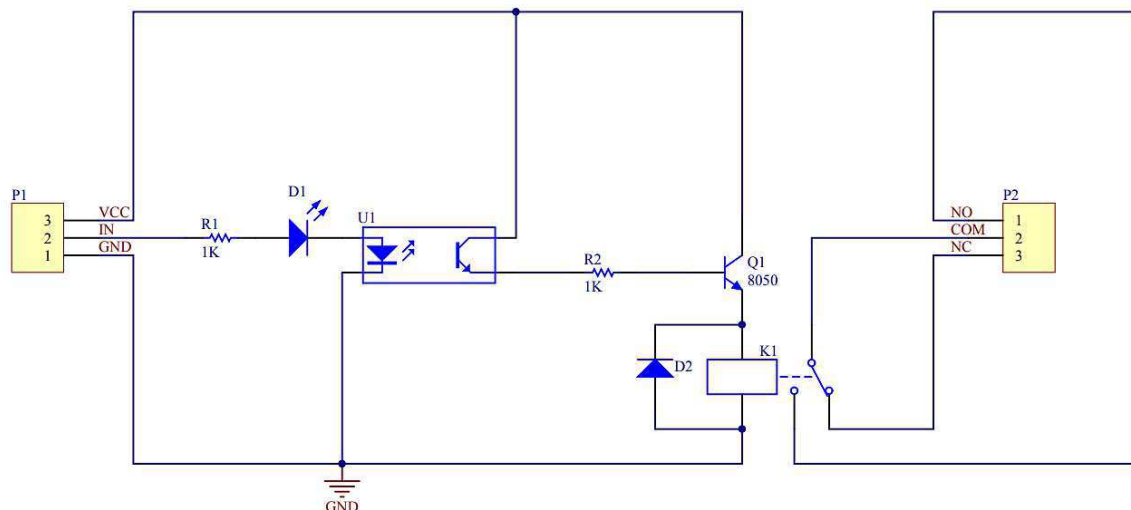
3.2 MÓDULO DE RELÉS ELETROMECAÑICOS

O relé eletromecânico é utilizado para acionar cargas com variadas tensões e correntes. Com isso, pode-se ligar e desligar aparelhos de quase todos os tipos, atentando aos limites operacionais de tensão e corrente. Pode ser conectado diretamente a sensores, microcontroladores ou qualquer circuito que use lógica *Transistor-Transistor Logic* (TTL). A partir das saídas digitais de 5 V do microcontrolador é possível, por meio do relé, controlar cargas maiores e dispositivos com 220 V como motores, eletroímãs, solenóides e lâmpadas incandescentes.

Quando a corrente originada no circuito primário flui pela bobina, um campo eletromagnético é gerado, acionando o relé e possibilitando o funcionamento do circuito secundário. Sendo assim, uma das aplicações do relé é usar baixas tensões e correntes para o comando no primeiro circuito para controlar o circuito secundário de alta potência, protegendo o operador e o microcontrolador, por meio de um circuito opto acoplado, das

possíveis altas tensões e correntes que irão circular no segundo circuito. Um esquema elétrico de um canal do circuito do relé eletromecânico é mostrado na Figura 9.

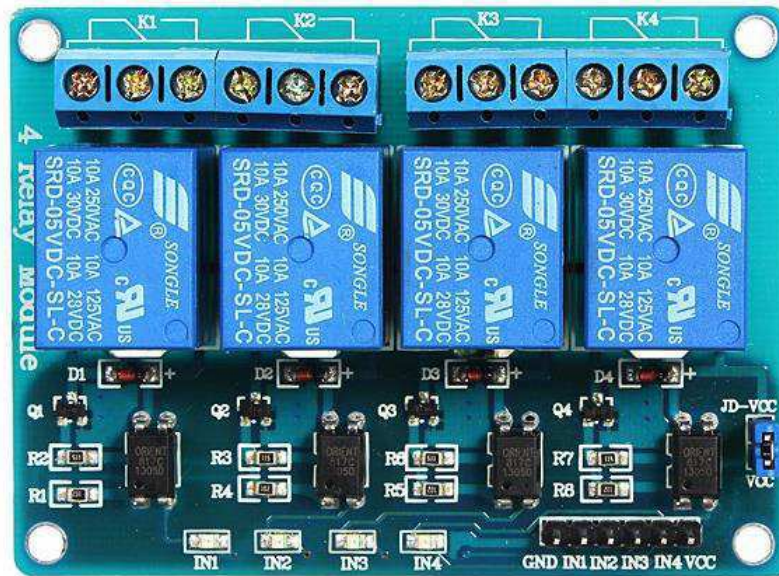
Figura 9 - Esquema elétrico de um canal do módulo do relé.



Fonte: Disponível em: <<http://elecfreaks.com/store/download/datasheet/breakout/Relay/Relay.pdf>>. Acesso em: 1 de março de 2018.

Uma fotografia do módulo de relés eletromecânicos utilizado é mostrada na Figura 10. Foram utilizados dois módulos de relés com 4 canais de 5 V e cada um possui um LED para indicar o estado da saída do relé. O intuito de utilizar relés de múltiplos canais é de chavear bancos capacitivos em estágios e de controlar a demanda com o desligamento de cargas em sequência com prioridades. Cada relé pode conduzir uma corrente máxima de 10 A e suporta uma tensão máxima de 250 V AC. Possui 3 contatos para permitir as configurações de ligação NA e NF.

Figura 10 - Fotografia do Módulo de relés eletromecânicos de 4 canais.



Fonte: Disponível em: <<http://www.onshop.pt/home/67-modulo-rele-4-canais-5v-arduino-0520141421286.html>>. Acesso em: 1 de março de 2018.

3.3 SENSOR DE CORRENTE

O sensor de corrente utilizado, apresentado na Figura 11, foi o SCT-013-000, o qual é muito versátil e tem como principal vantagem o fato de não necessitar de contato elétrico com o circuito principal para medir a corrente elétrica alternada. Em outras palavras, não é preciso abrir o circuito para ligá-lo em série com a carga como um amperímetro convencional, basta apenas envolver um dos fios ligados na carga, no qual se deseja monitorar a corrente com o sensor.

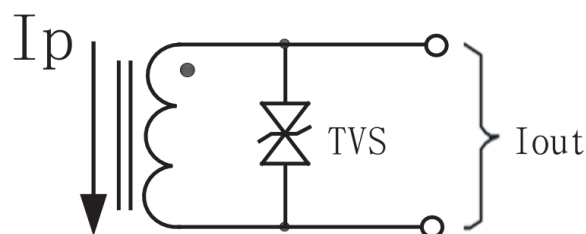
Figura 11 - Fotografia do Sensor de corrente SCT-013-000 de 100 A.



Fonte: Disponível em: <<https://www.luisllamas.es/arduino-sensor-corriente-sct-013>>. Acesso em: 1 de março de 2018.

O sensor é formado basicamente por um pequeno Transformador de Corrente (TC), com um núcleo partido de ferrite para possibilitar a abertura, com relação de transformação de corrente de 100 A: 50 mA, equivalente a uma relação entre espiras de 2000:1, e possui um diodo supressor de surtos para proteção. Sua faixa de temperatura de trabalho é de $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Um esquema do circuito elétrico é apresentado na Figura 12, sendo I_p a corrente no circuito primário [A], I_{out} a corrente na saída do circuito [A] e *Transient-voltage Suppressor* (TVS) um diodo de proteção bipolar.

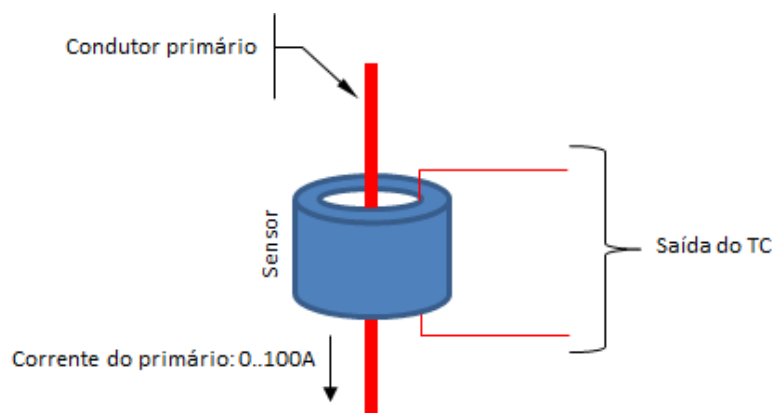
Figura 12 - Esquema do Circuito elétrico do SCT-013-000.



Fonte: Disponível em: <https://www.elecrow.com/download/SCT013-000_datasheet.pdf>. Acesso em: 1 de março de 2018.

Seu princípio de funcionamento é similar ao transformador de tensão, fazendo uso do fluxo magnético formado pela passagem da corrente alternada no condutor. Para o transformador de corrente, uma corrente que passa no enrolamento primário induz uma corrente proporcional e menor no secundário, como pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Ilustração do TC.



Fonte: Disponível em: <<http://forum.fazedores.com/t/sensor-de-corrente-nao-invasivo-20a-ou-100a-arduino-uno/2249/4>>. Acesso em: 1 de março de 2018.

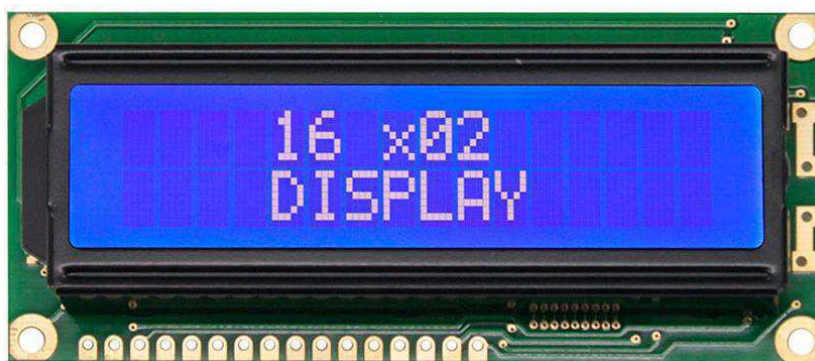
É importante ressaltar que, por motivos de segurança, o enrolamento secundário do transformador de corrente nunca deve ficar em aberto pelo risco de expor pessoas ao perigo de altas tensões induzidas. Por este motivo, o sensor possui um diodo TVS bipolar no secundário, que é um componente de segurança contra surtos de tensão.

3.4 DISPLAY LCD 16X2

Foi utilizado um *Liquid Crystal Display* (LCD) 16x2, que é um módulo amplamente utilizado para exibição em circuitos eletrônicos. Esse módulo apresenta vantagens como: baixo custo, não tem limitação para exibição de caracteres especiais, ao contrário do visor de sete segmentos, e possibilita a realização de animações.

Um LCD de 16x2 significa que ele tem capacidade de exibição de 16 caracteres por linha e possui 2 linhas. Neste LCD, cada caractere é representado como uma matriz de 5x7 pixels. Uma fotografia de um LCD 16x2 é apresentada na Figura 14.

Figura 14 - Fotografia de um Visor LCD 16x2.



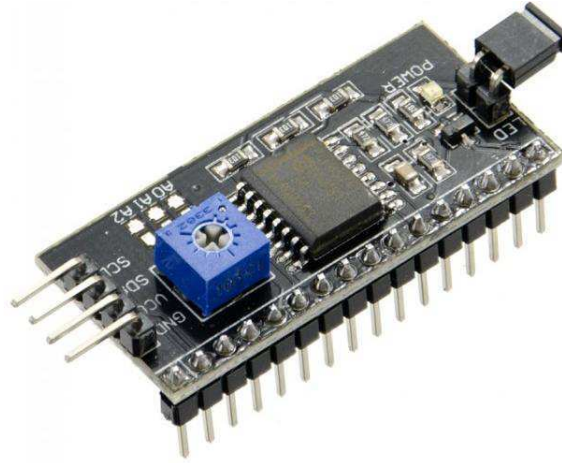
Fonte: Disponível em: <<http://www.winstar.com.tw/products/character-lcd-display-module/wh1602j.html>>. Acesso em: 1 de março de 2018.

3.5 MÓDULO SERIAL I2C

Foi utilizado também um Módulo Serial *Inter-Integrated Circuit* (I2C) para simplificar a conexão do Arduino com o Display LCD 16x2. A vantagem da utilização deste módulo está na praticidade da conexão e economia de espaço e de pinos do Arduino, pois seria necessário conectar 16 fios do Arduino e adicionar um potenciômetro para ajustar o nível de contraste da tela. Já com a utilização do Módulo Serial I2C, apenas 4 fios (2 para alimentação e 2 saídas analógicas para comunicação) foram usados. O módulo

integra um *Trimmer Potentiometer* (Trimpot) para regular o contraste da tela e pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 - Fotografia de um Módulo I2C para tela LCD 16x2.



Fonte: Disponível em: <<https://core-electronics.com.au/i2c-lcd-backpack-for-1602-to-2004-lcds.html>>. Acesso em: 1 de março de 2018.

4 METODOLOGIA

Como as entradas analógicas do Arduino só conseguem reconhecer tensões entre 0 V e +5 V, é necessário condicionar os sinais que saem dos sensores para que estes fiquem dentro das amplitudes máxima e mínima suportáveis pelo microcontrolador. O conversor Analógico-Digital (A/D) do ATmega2560 possui uma resolução de 10 bits, resultando em:

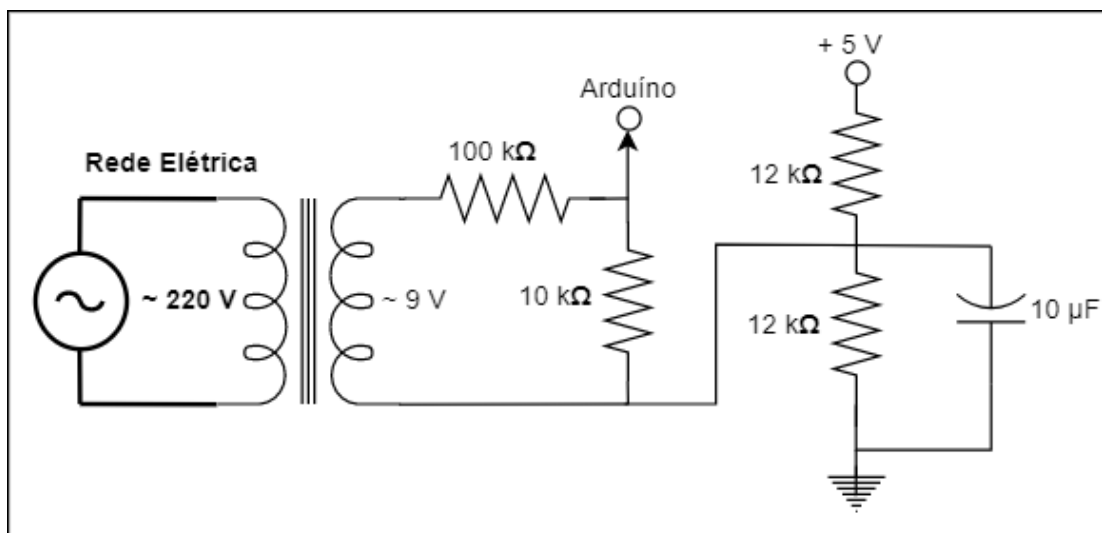
$$Resolução = \frac{5 V}{2^{10}} \cong 5 mV. \quad (5)$$

Ou seja, a sensibilidade do microcontrolador para diferenciar diferentes níveis de tensão é de 5 mV. Logo, é necessário condicionar os sinais de saída dos sensores tendo em vista estes parâmetros, com cuidado para não resultar em sinais de amplitudes elevadas que possam danificar o microcontrolador ou amplitudes muito baixas e irrecuperáveis.

4.1 CONDICIONAMENTO DO SINAL DE TENSÃO

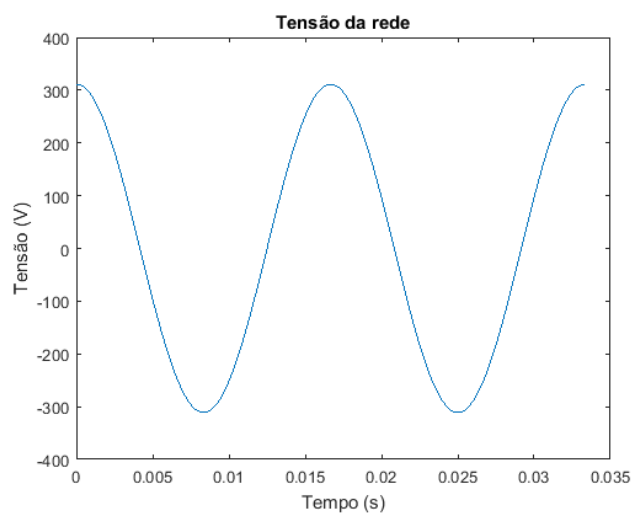
Para realizar a leitura adequada da tensão da rede, mostrada na Figura 17, foram necessários três estágios: aplicação de um transformador abaixador de tensão de 220 V para 9 V, com o sinal mostrado na Figura 18, um divisor resistivo, com resistores em série de 100 k Ω e 10 k Ω , para reduzir a tensão a 0,81 V, tensão mostrada na Figura 19, e um segundo divisor resistivo, com dois resistores em série de 12 k Ω , para dar um deslocamento de +2,5 V no sinal, com o sinal mostrado na Figura 20. Foi inserido um capacitor de 10 μ F em paralelo com um resistor de 12 k Ω , no arranjo de filtro passa baixa, para atenuar o ruído de alta frequência no sinal amostrado. A inserção de capacitores com capacitâncias muito superiores a 10 μ F para o filtro, com frequência de corte de 1,32 Hz, poderia interferir no sinal de medição. O circuito completo do sensor de tensão está apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Esquema de um circuito elétrico abaixador de tensão.



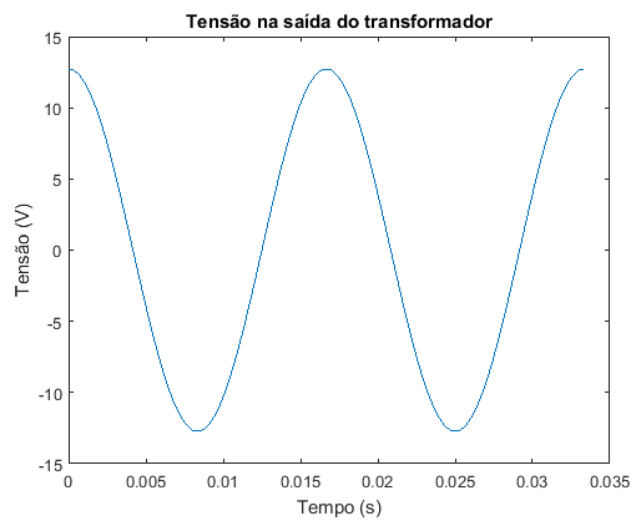
Fonte: Próprio autor.

Figura 17 - Gráfico de Tensão da rede



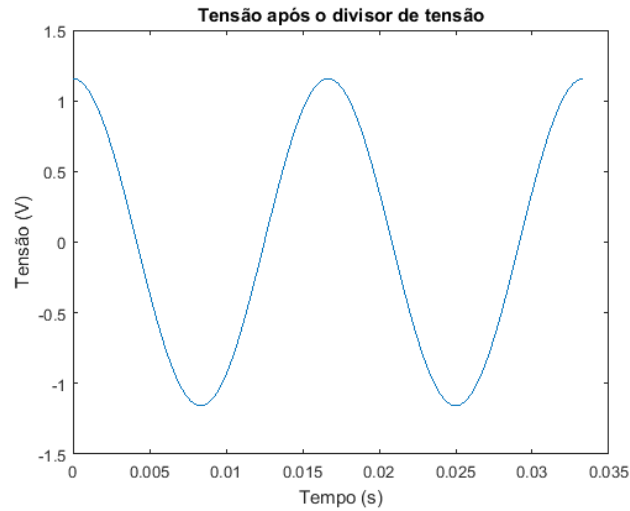
Fonte: Próprio autor.

Figura 18 - Gráfico da Tensão na saída do transformador.



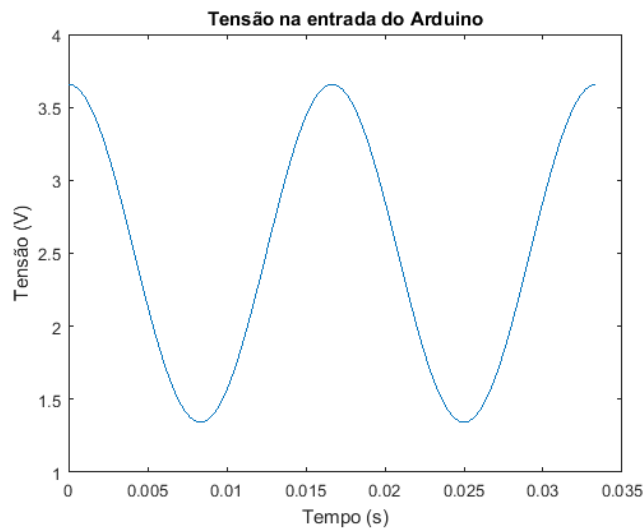
Fonte: Próprio autor.

Figura 19 - Gráfico da Tensão após o divisor de tensão.



Fonte: Próprio autor.

Figura 20 - Gráfico da Tensão na entrada do Arduino.



Fonte: Próprio autor.

Desta forma, a amplitude do sinal de tensão na entrada do Arduino ficou no intervalo entre +3,65 V e +1,34 V.

4.2 CONDICIONAMENTO DO SINAL DE CORRENTE

Como o sensor de corrente SCT-013-000 é um transformador de corrente, seu sinal de saída é um sinal de corrente. O Arduino só trabalha com leitura de sinais de tensão, sendo necessário converter este sinal. A alternativa adotada foi a utilização de um

resistor de carga. O princípio da conversão é fundamentado na Lei de Ohm: um resistor com resistência elétrica conhecida, quando percorrido por uma corrente elétrica, provocará uma variação de tensão no circuito proporcional à corrente. Mais uma vez, é necessário condicionar o sinal de tensão a amplitudes operacionais do microcontrolador.

A corrente máxima de entrada é exibida na Figura 22 e a corrente máxima eficaz na saída do sensor de corrente é 50 mA, como demonstrado na Figura 23, então o valor de pico da máxima corrente no secundário ($I_{S\text{Máx}}$) é:

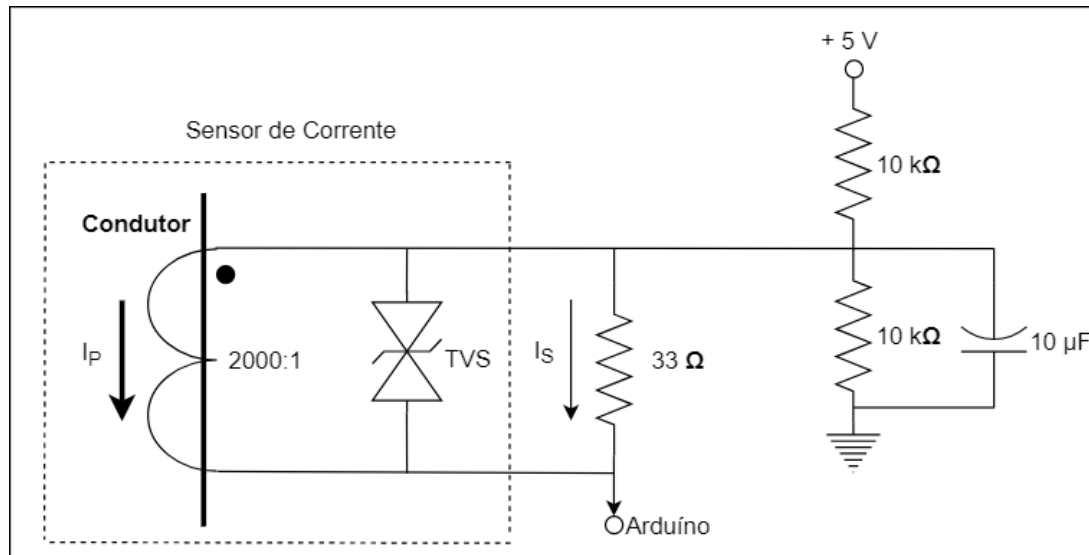
$$I_{S\text{Máx}} = 50 * \sqrt{2} = 70,71 \text{ mA}. \quad (6)$$

Como será necessário dar um deslocamento no último estágio de condicionamento do sinal, o valor apropriado, e em torno do qual o sinal deve variar, é o valor médio operacional do Arduino. Logo, a tensão máxima antes do deslocamento deverá ser de +2,5 V como mostrado na Figura 24, assim o resistor R necessário será:

$$R = \frac{2,5}{70,71 * 10^{-3}} = 35,35 \Omega. \quad (7)$$

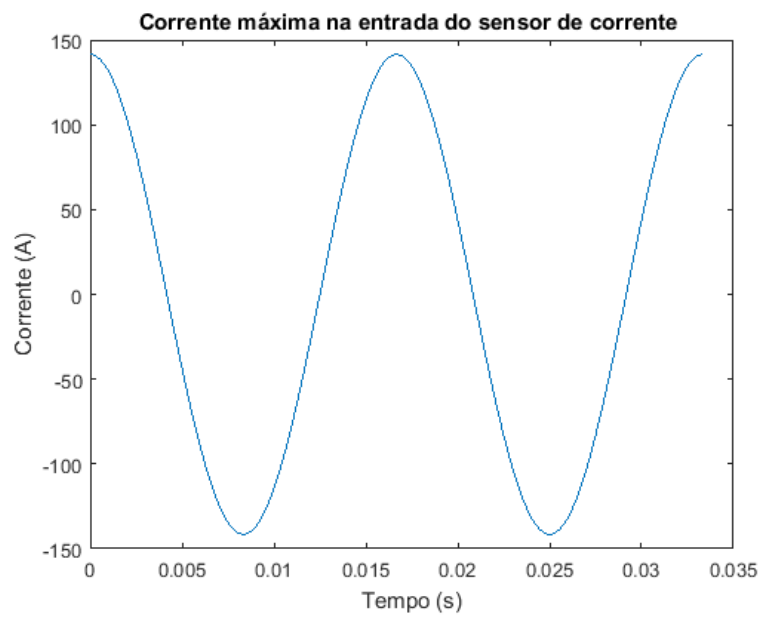
O resistor adotado foi o de 33 Ω , valor comercial imediatamente abaixo e mais próximo do resultado. Após o último estágio do divisor resistivo, resultando um deslocamento de +2,5 V no sinal, a entrada no Arduino para medição de corrente ficou limitada com valores entre +0,16 V e +4,83 V, como pode ser observado na Figura 25. O circuito elétrico de medição da corrente pode ser visto na Figura 21. Assim como aplicado no sensor de tensão, foi inserido um capacitor de 10 μF , na configuração de filtro passa baixa, para filtrar ruídos de alta frequência.

Figura 21 - Esquema do circuito da medição de corrente.



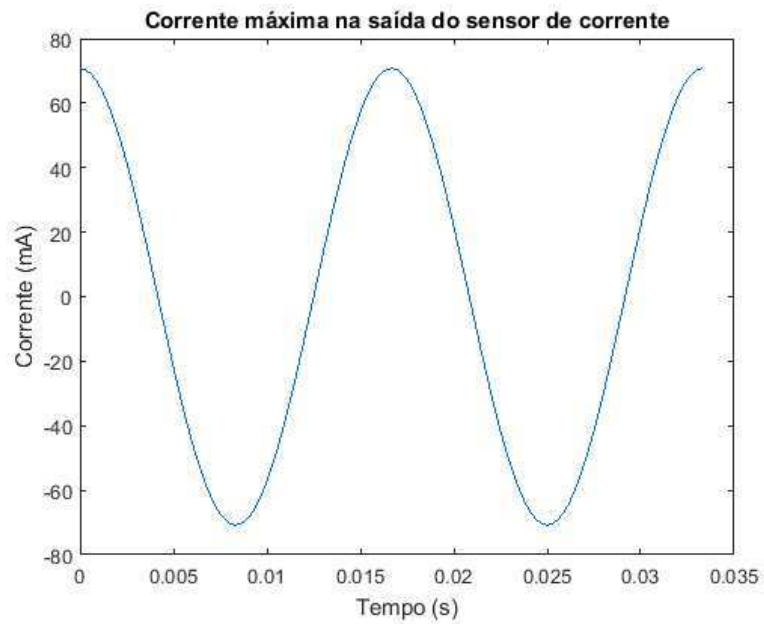
Fonte: Próprio autor.

Figura 22 - Gráfico da Corrente máxima de entrada no sensor de corrente.



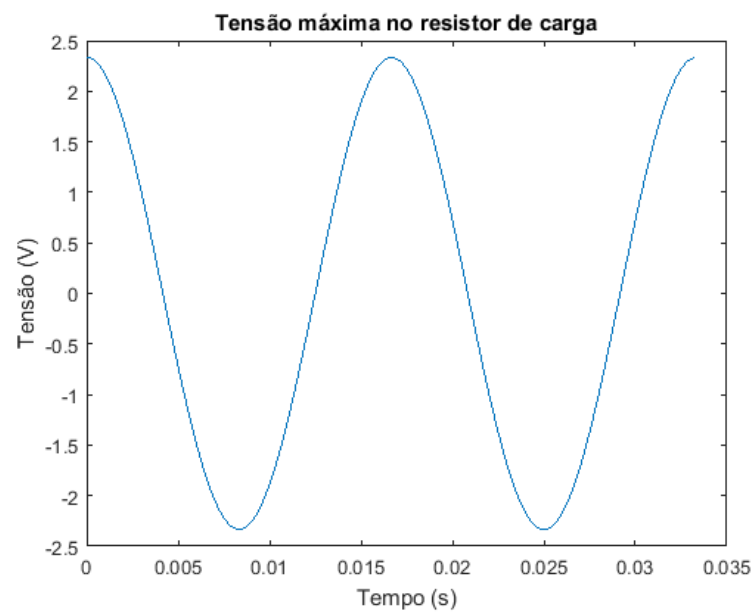
Fonte: Próprio autor

Figura 23 - Gráfico da Corrente máxima de saída no sensor de corrente.



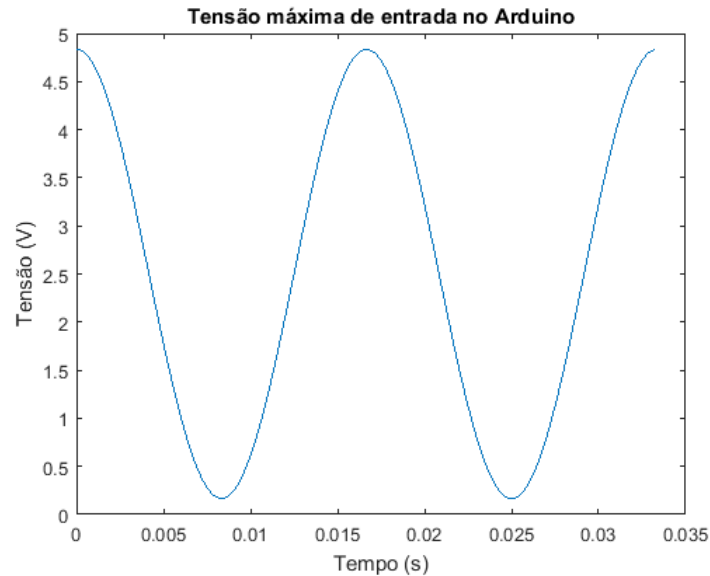
Fonte: Próprio autor.

Figura 24 - Gráfico da Tensão máxima no resistor de carga.



Fonte: Próprio autor.

Figura 25 - Gráfico da Tensão máxima na entrada do Arduino.



Fonte: Próprio autor.

4.3 LÓGICA DE PROGRAMAÇÃO

A fim de cumprir os propósitos deste trabalho, é fundamental monitorar sinais de tensão e de corrente da rede elétrica. Com os sinais condicionados a níveis operacionais do Arduino, torna-se possível a aquisição dos sinais por meio do conversor A/D do microcontrolador. Uma vez amostrados, inicia-se o tratamento digital de dados. Esta seção é dedicada à explicação da lógica de programação do código escrito.

Foi utilizada a biblioteca de código aberto *Emonlib*, disponibilizada pela organização OpenEnergyMonitor. Ela disponibiliza funções para cálculo, no domínio discreto, de tensão e corrente eficazes, fator de potência e potências aparente e real. Foi necessário realizar um ajuste na biblioteca a fim de melhorar a exatidão nas medições com correntes de baixas amplitudes.

Para facilitar a compreensão desta seção, a lógica de programação foi dividida em dois blocos: controle de fator de potência, apresentado na Seção 4.3.2, e controle de demanda, apresentado na Seção 4.3.3. Antes de explicar o controle do fator de potência e controle de demanda, é necessário explicar como o microcontrolador calcula o fator de potência e a potência ativa, o que é apresentado na Seção 4.3.1.

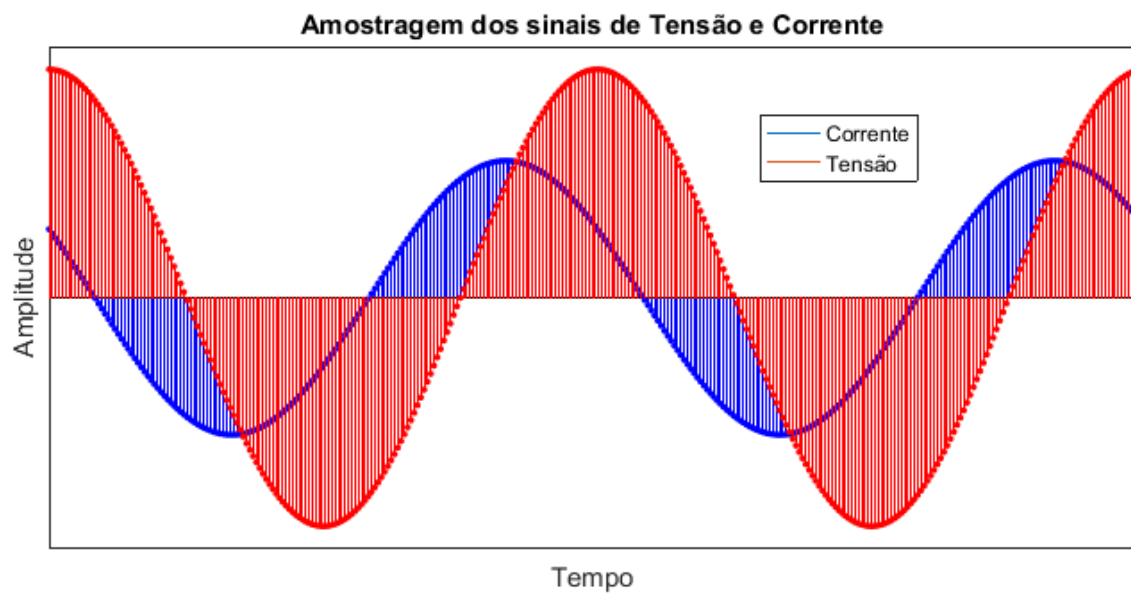
4.3.1 CÁLCULO DO FATOR DE POTÊNCIA

A primórdio, o microcontrolador recebe os sinais de tensão e corrente amostrados no tempo, como mostrado na Figura 26. Cada amostra de tensão $V[i]$ é multiplicada pela respectiva amostra de corrente $I[i]$, obtendo a Potência Ativa Instantânea $P[i]$, a qual é somada em um período de tempo T inversamente proporcional à frequência do sinal para obter a Potência Ativa P :

$$P = \sum_{i=0}^T P[i] = \sum_{i=0}^T V[i] * I[i], \quad (8)$$

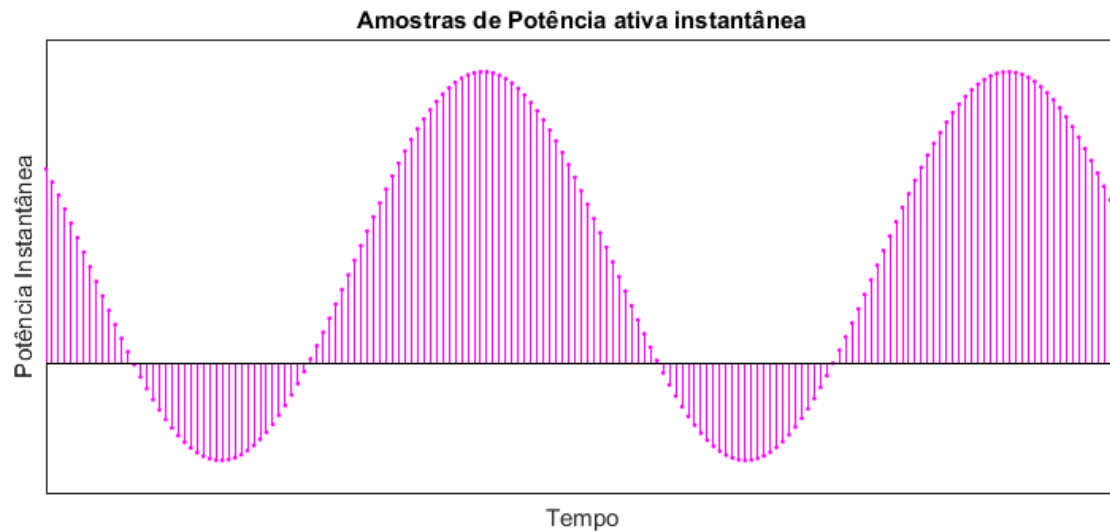
sendo a potência P representada na Figura 27.

Figura 26 - Gráfico da Amostragem dos sinais de Tensão e Corrente no microcontrolador.



Fonte: Próprio autor.

Figura 27 - Gráfico das Amostras de Potência Ativa Instantânea no microcontrolador.



Fonte: Próprio autor.

A Potência Aparente S é obtida com a partir das mesmas amostras:

$$S = \sqrt{\sum_{i=0}^T P_{[i]}^2} = \sqrt{\sum_{i=0}^T V_{[i]}^2 * I_{[i]}^2}. \quad (9)$$

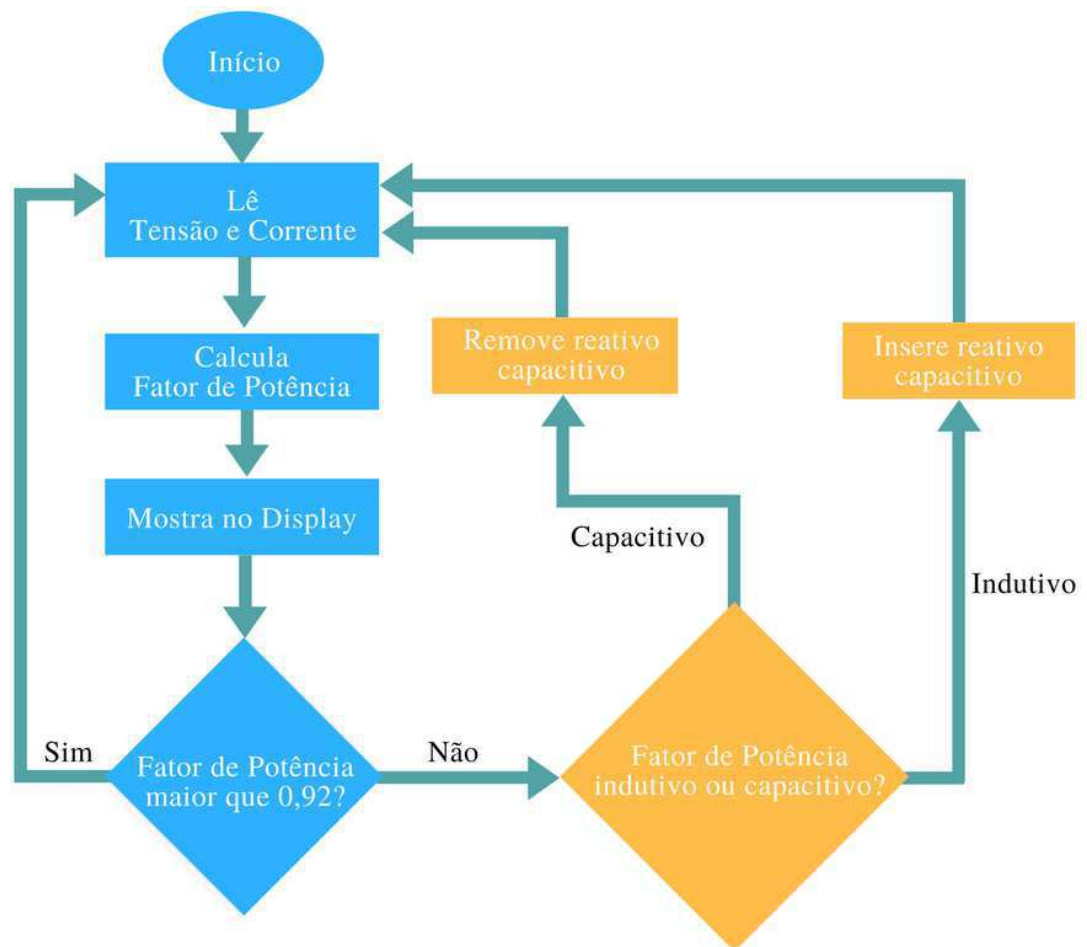
Desta forma, o Fator de Potência FP pode ser obtido:

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

4.3.2 CONTROLE DE FATOR DE POTÊNCIA

Este bloco do código importa o valor do fator de potência da função *calcVI* da biblioteca e analisa se ele é maior ou menor que 0,92. Caso seja menor, a correção se fará necessária, por meio da atuação dos relés eletromecânicos, com chaveamento de bancos capacitivos. O fluxograma do controle de fator de potência é apresentado na Figura 28.

Figura 28 - Fluxograma do controle de fator de potência.



Fonte: Próprio autor.

O módulo de relés adotado foi o de 4 canais, para que o chaveamento fosse feito sequencialmente, em 4 estágios capacitivos uniformes, de modo crescente ou decrescente. Foram adicionados contadores com o objetivo de evitar o chaveamento excessivo dos capacitores, causados por transitórios elétricos na rede.

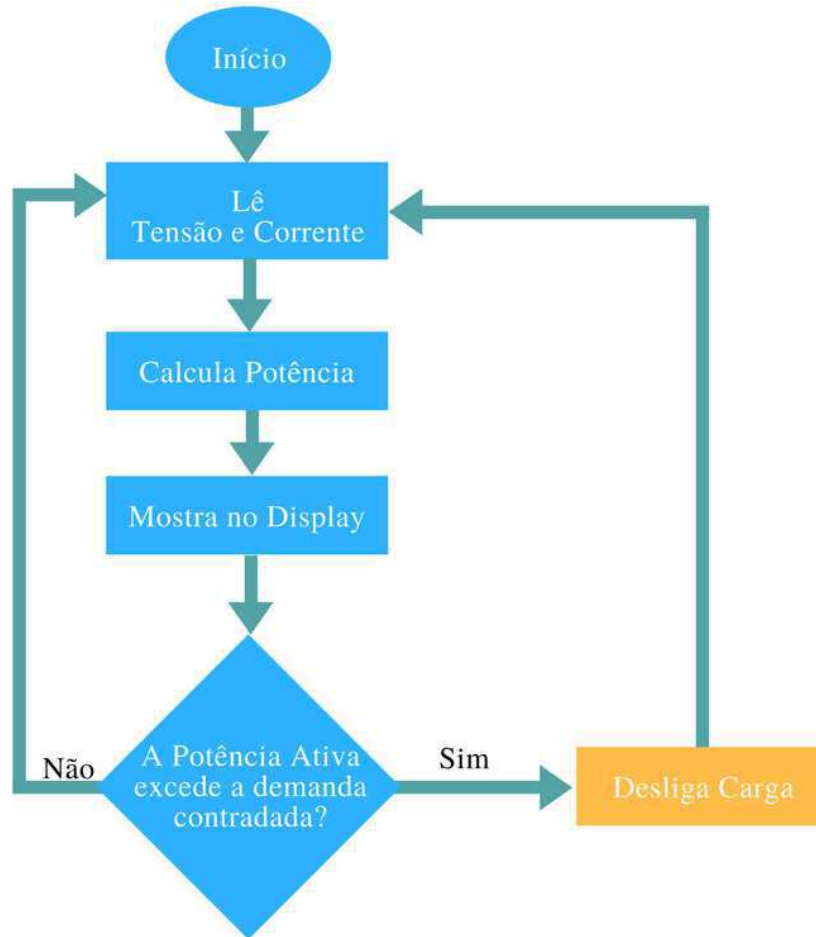
Como os bancos capacitivos só devem ser ligados quando necessários, o arranjo escolhido para a ligação dos bancos capacitivos nos relés foi NA, acionados com nível lógico alto pelas saídas digitais do Arduino.

4.3.3 CONTROLE DE DEMANDA

Este segundo bloco recebe a potência ativa, calculada pela função *calcVI* da biblioteca utilizada, e compara se ela é maior que a demanda determinada pelo usuário. Caso seja, os relés do segundo módulo serão chaveados, de modo sequencial e

progressivo, até obter uma potência ativa menor que a demanda. O fluxograma do controle de demanda é apresentado na Figura 29.

Figura 29 - Fluxograma do controle de demanda.



Fonte: Próprio autor.

As grandes cargas industriais são acionadas por contadores, o que simplifica o controle da demanda. Os contatos auxiliares dos contadores devem estar sempre ligados, exceto quando necessário o desligamento. Desta forma, foram usados os contatos NF dos relés e são pulsados, por um curto intervalo com nível lógico alto, quando for preciso realizar o desligamento da carga.

4.4 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

Para que o controle de fator de potência e de demanda funcione adequadamente, é necessário calibrar os sensores que fornecem os sinais de tensão e de corrente para o

Arduino. Assim, será possível recuperar estes sinais e obter valores de potência e de fator de potência.

4.4.1 SENSOR DE TENSÃO

Para a exibição correta da tensão, é necessário inserir na programação do microcontrolador o fator de calibração da tensão, ou seja, um número que indica quantas vezes o sinal de tensão está atenuado. Para isto, é necessário verificar os estágios do circuito de tensão.

Como visto na Figura 16, o primeiro estágio é composto por um transformador abaixador de tensão de 220 V para 9V, possuindo uma relação de espiras proporcional a 24:1. O segundo estágio é um divisor de tensão composto por um resistor de 100 k Ω e outro de 10 k Ω . Desta forma, o fator de calibração da tensão é igual a:

$$\text{Fator de calibração da tensão} = \frac{24}{1} * \frac{100k + 10k}{10k} = 264. \quad (11)$$

Isso significa que uma variação de 264 V na amplitude do sinal de entrada do sensor de tensão acarreta uma variação de 1 V no sinal de entrada do Arduino.

4.4.2 SENSOR DE CORRENTE

A calibração do sensor de corrente é feita de modo semelhante a do sensor de tensão. Como visto na Figura 21, a relação de espiras do TC utilizado é de 2000:1 e a corrente máxima de saída é de 50 mA. Foi utilizado um resistor de carga de 33 Ω para converter o sinal de corrente em sinal de tensão, resultando em um fator de calibração do sensor de corrente igual a:

$$\text{Fator de calibração da corrente} = \frac{2000}{1} * \frac{1}{33} \cong 60,61. \quad (12)$$

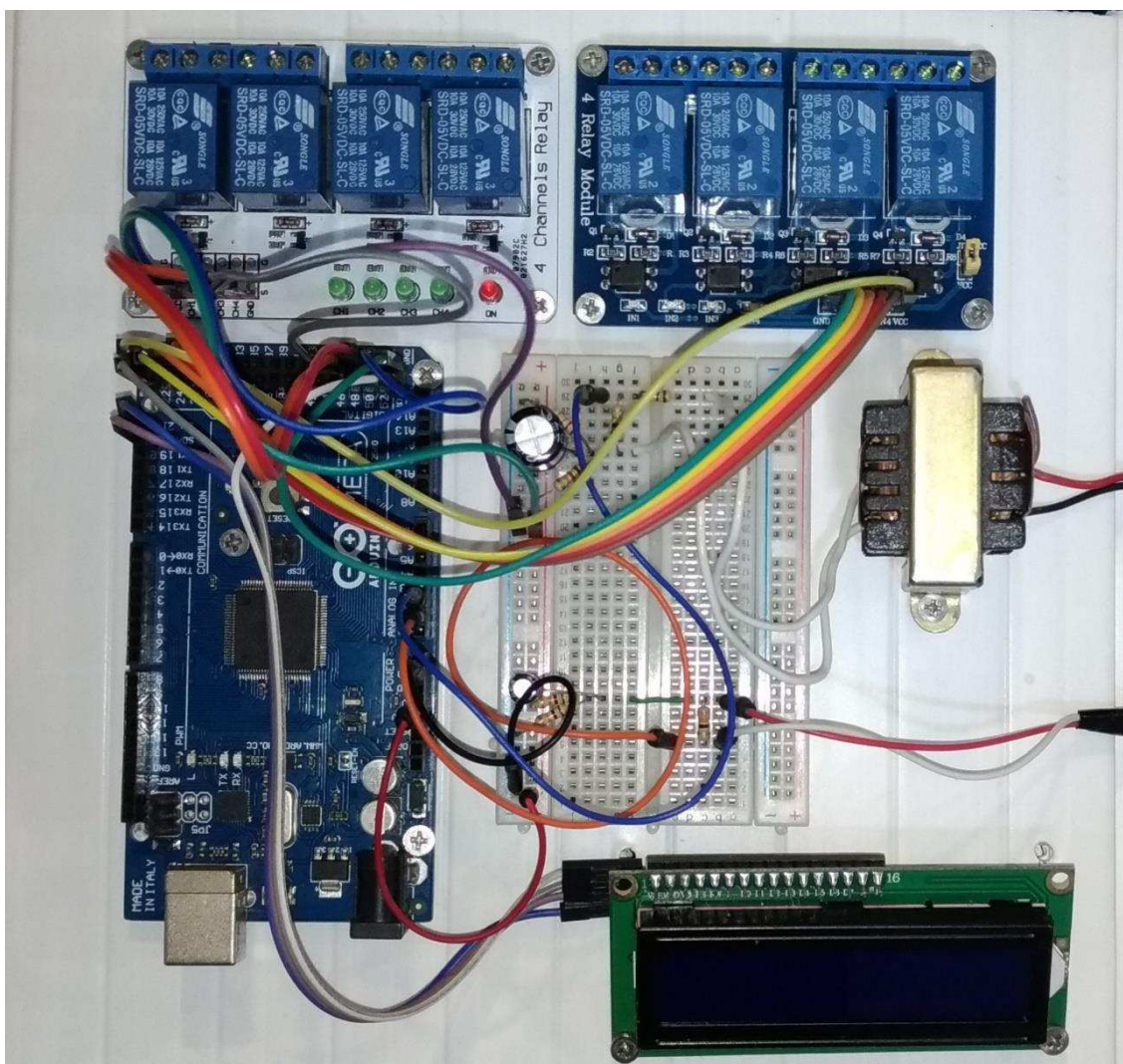
Em outras palavras, uma variação de, aproximadamente, 60,61 A no circuito do sensor de corrente acarreta uma variação de 1 V na amplitude do sinal de entrada do Arduino.

Com o controlador pronto e calibrado, é possível iniciar os testes para validação do protótipo.

5 RESULTADOS

Foram realizados dois testes com cargas, resistiva e mista, para medição do fator de potência e da potência ativa, analisados por um osciloscópio. Foi realizada também uma simulação no *software* MATLAB a fim de verificar a exatidão de saída do fator de potência. A montagem do controlador proposto pode ser vista na Figura 30.

Figura 30 - Fotografia do controlador automático de fator de potência e de demanda.

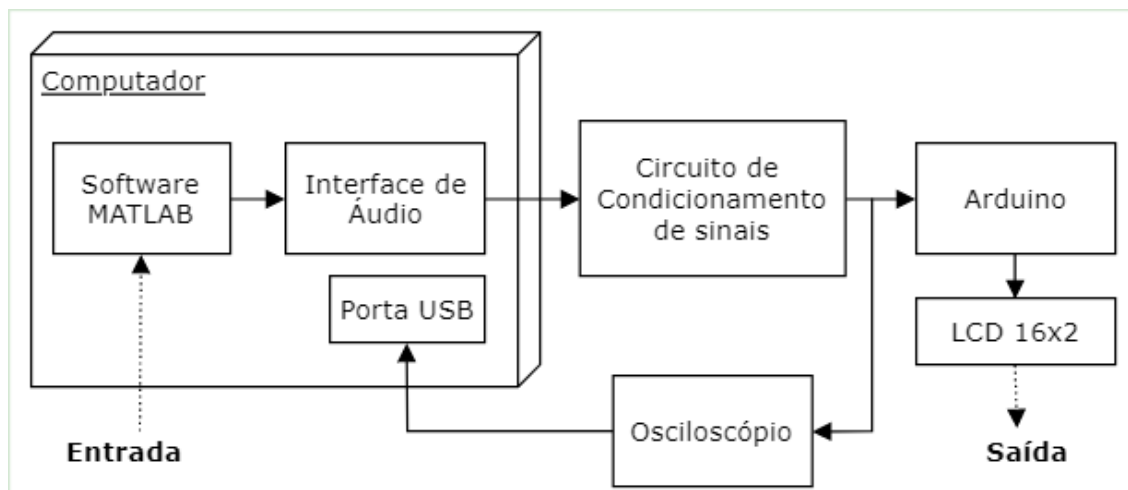


Fonte: Próprio autor.

5.1 TESTE DE MEDIÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA

Com o objetivo de comparar a exatidão dos valores de saída, exibidos no LCD 16x2, com os valores de entrada no Arduino, foi simulado o teste representado na Figura 31.

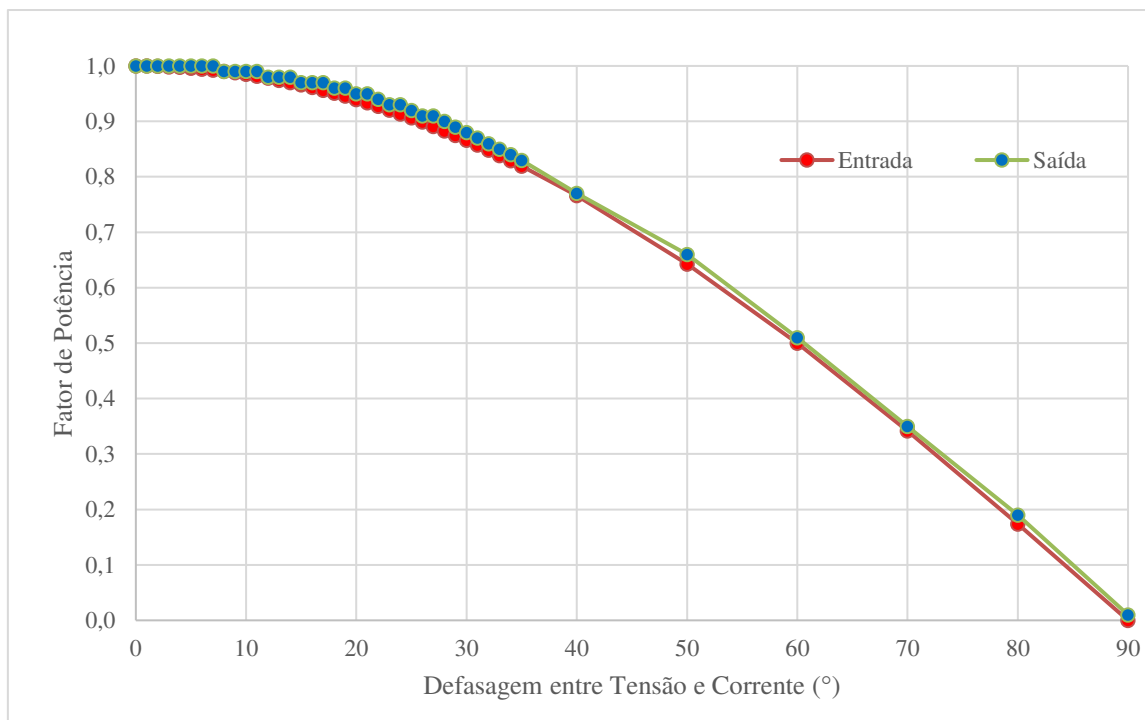
Figura 31 - Esquema de medição do Fator de Potência.



Fonte: Próprio autor.

A princípio, dois sinais de áudio senoidais, em fase e com frequência de 60 Hz, foram simulados no *software* MATLAB, pela função *sound*, e reproduzidos na saída de áudio do computador. Em seguida, um dos sinais foi defasado no tempo em intervalos específicos, conforme registrado nos resultados obtidos e exibidos na Figura 32.

Figura 32 - Gráfico comparativo do teste de Fator de Potência com os valores de entrada e com os valores de saída.

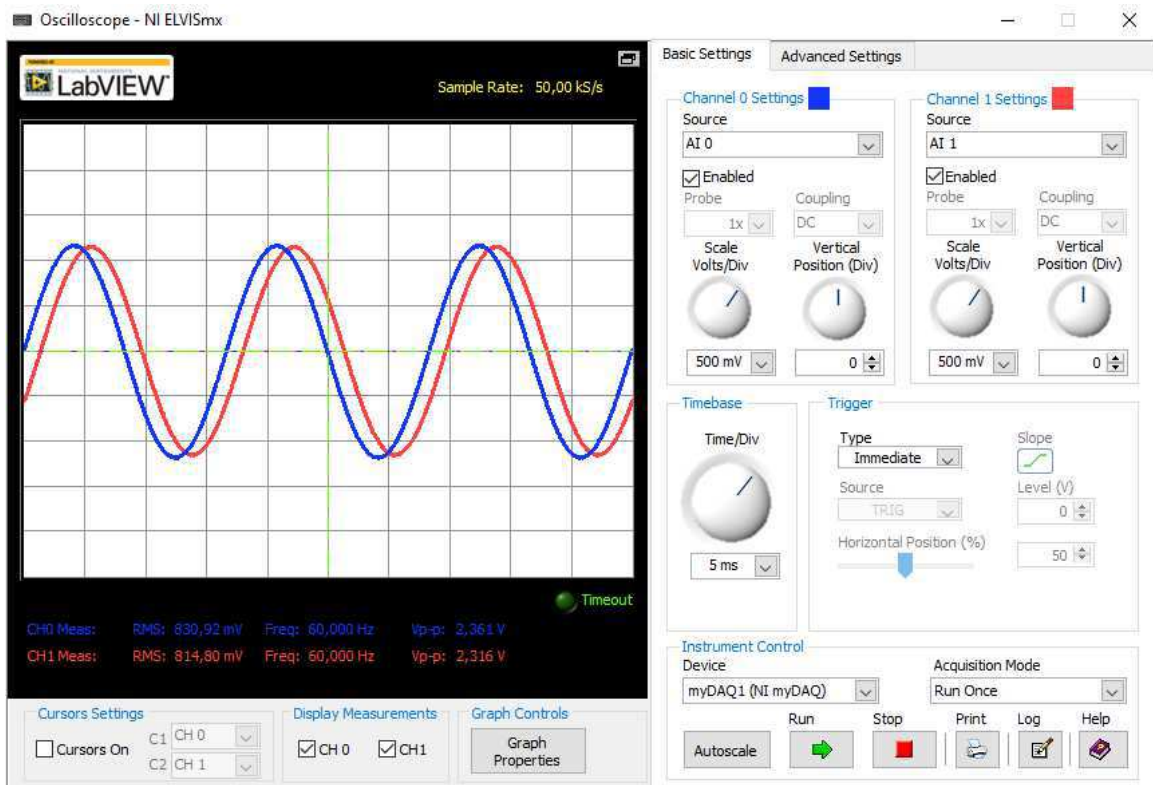


Fonte: Próprio autor.

No código do microcontrolador, o valor do FP era apresentado como uma média de 1 segundo de amostras, equivalendo a 60 ciclos amostrados em intervalos verificados de aproximadamente 111 μ s. Em virtude da impedância interna da interface de áudio, na saída de áudio do computador foram utilizados resistores de carga de 150 Ω , um em cada canal.

O osciloscópio portátil NI myDAQ, da National Instruments, foi usado para monitorar os sinais na saída do computador. A interface gráfica do osciloscópio é exibida na Figura 33.

Figura 33 - Captura de tela da interface gráfica do osciloscópio NI myDAQ.



Fonte: Próprio autor.

5.2 TESTE DO CONTROLADOR DE DEMANDA

No mesmo ambiente de teste do fator de potência, foi realizado um teste para verificar o funcionamento do controlador de demanda. Na programação do Arduino, foi inserido o valor de demanda de 10 kW e o teste foi iniciado. Após 10 ciclos de contagem, com 1 segundo cada, de constatação do excesso de demanda e com a exibição da imagem no display na Figura 34, os relés foram pulsados por períodos de 2 segundos de modo sequencial e crescente, simulando uma ordem prioritária de cargas.

Figura 34 - Mensagem apresentada no display para demanda excedida.



Fonte: Próprio autor.

5.3 TESTE COM CARGA RESISTIVA

Para este teste, foi utilizada uma carga resistiva com potência nominal de 1830 W e tensão nominal de 220 V. O resultado foi exibido na Figura 35.

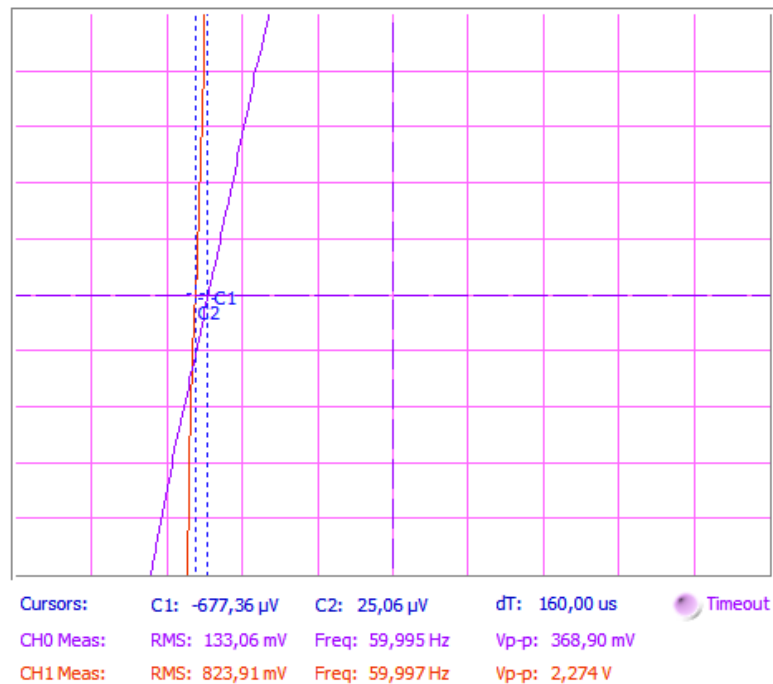
Figura 35 - Fotografia do Display do protótipo com carga resistiva.



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 36 foram mostrados os sinais de tensão, com marcador C2, e corrente, com marcador C1.

Figura 36 - Captura de tela do osciloscópio durante a medição da tensão e corrente da carga resistiva.



Fonte: Próprio autor.

Calcula-se o fator de potência a partir da diferença no tempo entre os sinais vista na Figura 36:

$$FP = \cos\left(\frac{160 * 10^{-6}}{16,67 * 10^{-3}} * 360^\circ\right) = 0,9981 \quad (13)$$

5.4 TESTE DO CONTROLADOR DE FATOR DE POTÊNCIA COM CARGA MISTA

A carga analisada foi uma carga mista com predominância indutiva, com potência nominal de 116 W e tensão nominal de 220 V. Pode-se distinguir dois estágios do teste: antes da correção automática do fator de potência e depois.

5.4.1 ANTES DA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Quando a carga foi conectada ao controlador, apresentava um fator de potência igual a 0,61, visto na Figura 37.

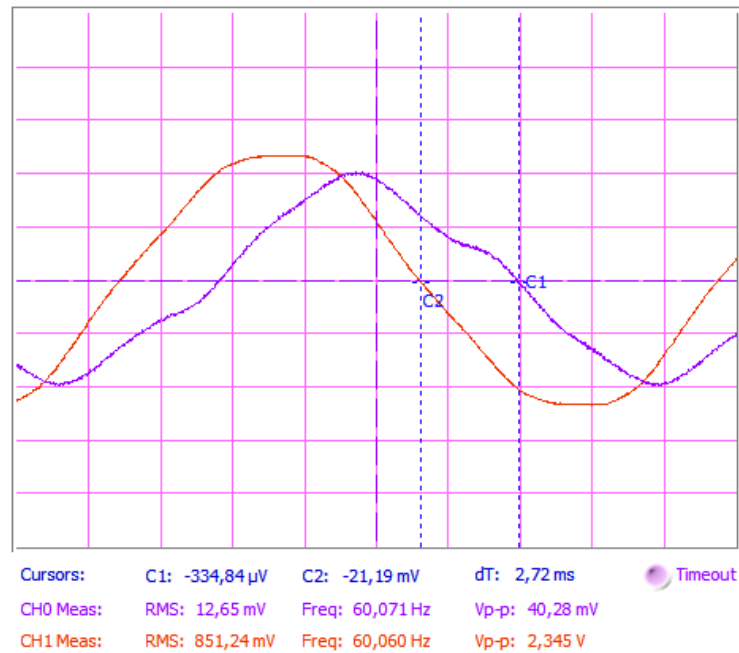
Figura 37 - Fotografia do display com carga mista antes da correção do fator de potência.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 38 podem ser vistos os sinais de tensão, com marcador C2, e de corrente, com marcador C1.

Figura 38 - Captura de tela do osciloscópio com carga indutiva antes da correção do fator de potência



Fonte: Próprio autor.

Calcula-se o fator de potência a partir da diferença no tempo dos sinais vista na Figura 38:

$$FP = \cos\left(\frac{2,72 * 10^{-3}}{16,67 * 10^{-3}} * 360^\circ\right) = 0,5187. \quad (14)$$

5.4.2 APÓS A CORREÇÃO AUTOMÁTICA DO FATOR DE POTÊNCIA

Ao se passar a contagem de 10 períodos, equivalendo a 10 segundos, o Arduino acionou o primeiro estágio capacitivo para correção do fator de potência. O módulo de relés eletromecânicos com um capacitor de 4,75 μF, dimensionado a partir da potência reativa, é mostrado na Figura 39. Os novos valores após a correção do fator de potência são exibidos pelo LCD 16x2 do controlador na Figura 40 e os novos sinais são mostrados pelo osciloscópio na Figura 41.

Figura 39 - Fotografia da montagem para correção automática do fator de potência com capacitor de poliéster de 4,75 μF.



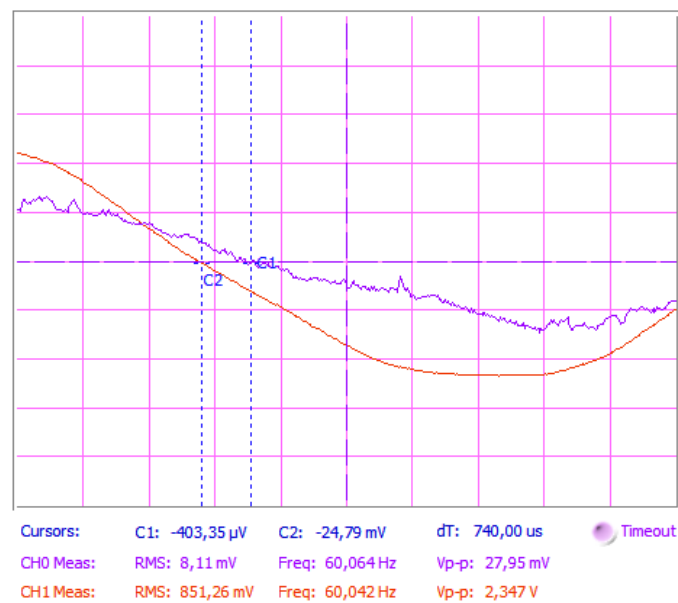
Fonte: Próprio autor.

Figura 40 - Fotografia do Display com carga mista após a correção do fator de potência.



Fonte: Próprio autor.

Figura 41 - Captura de tela do osciloscópio com carga mista após a correção automática do fator de potência.



Fonte: Próprio autor.

Calcula-se o fator de potência a partir da diferença de tempo entre os sinais de tensão, com marcador C2, e de corrente, com marcador C1, mostrada na Figura 41:

$$FP = \cos\left(\frac{740 * 10^{-6}}{16,67 * 10^{-3}} * 360^\circ\right) = 0,9613. \quad (15)$$

5.5 ANÁLISE DE RESULTADOS DOS TESTES

Quando comparados os valores de fator de potência e potência ativa exibidos no protótipo construído com os valores das cargas e valores obtidos no osciloscópio, na Seção 5.3 e na Seção 5.4, são obtidos os erros mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Erros das medições dos testes com cargas.

	Erro relativo do FP (%)	Erro relativo da Potência Ativa (%)
Carga Resistiva	0,18	5,95
Carga Mista (Antes)	17,60	5,32
Carga Mista (Depois)	3,25	3,18

Fonte: Próprio autor

O resultado do teste de fator de potência realizado na Seção 5.1 é mostrado na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Valores medidos no teste de fator de potência.

Defasagem (°)	Valor real do FP	Valor medido do FP	Desvio calculado (°)	Erro relativo
0	1,0000	1,00	0,00	0,00%
1	0,9998	1,00	0,01	0,02%
2	0,9994	1,00	0,02	0,06%
3	0,9986	1,00	0,06	0,14%
4	0,9976	1,00	0,10	0,24%
5	0,9962	1,00	0,15	0,38%
6	0,9945	1,00	0,22	0,55%
7	0,9925	1,00	0,30	0,75%
8	0,9903	0,99	0,01	0,03%
9	0,9877	0,99	0,09	0,23%
10	0,9848	0,99	0,21	0,53%
11	0,9816	0,99	0,34	0,85%
12	0,9781	0,98	0,08	0,19%
13	0,9744	0,98	0,23	0,58%
14	0,9703	0,98	0,39	1,00%

15	0,9659	0,97	0,17	0,42%
16	0,9613	0,97	0,35	0,91%
17	0,9563	0,97	0,55	1,43%
18	0,9511	0,96	0,36	0,94%
19	0,9455	0,96	0,59	1,53%
20	0,9397	0,95	0,42	1,10%
21	0,9336	0,95	0,67	1,76%
22	0,9272	0,94	0,52	1,38%
23	0,9205	0,93	0,38	1,03%
24	0,9135	0,93	0,67	1,80%
25	0,9063	0,92	0,55	1,51%
26	0,8988	0,91	0,45	1,25%
27	0,8910	0,91	0,77	2,13%
28	0,8829	0,90	0,69	1,93%
29	0,8746	0,89	0,62	1,76%
30	0,8660	0,88	0,57	1,61%
31	0,8572	0,87	0,52	1,50%
32	0,8480	0,86	0,48	1,41%
33	0,8387	0,85	0,46	1,35%
34	0,8290	0,84	0,44	1,32%
35	0,8192	0,83	0,44	1,32%
40	0,7660	0,77	0,16	0,52%
50	0,6428	0,66	0,70	2,68%
60	0,5000	0,51	0,41	2,00%
70	0,3420	0,35	0,32	2,33%
80	0,1736	0,19	0,66	9,42%
90	0,0000	0,01	0,41	0,41°

Fonte: Próprio autor.

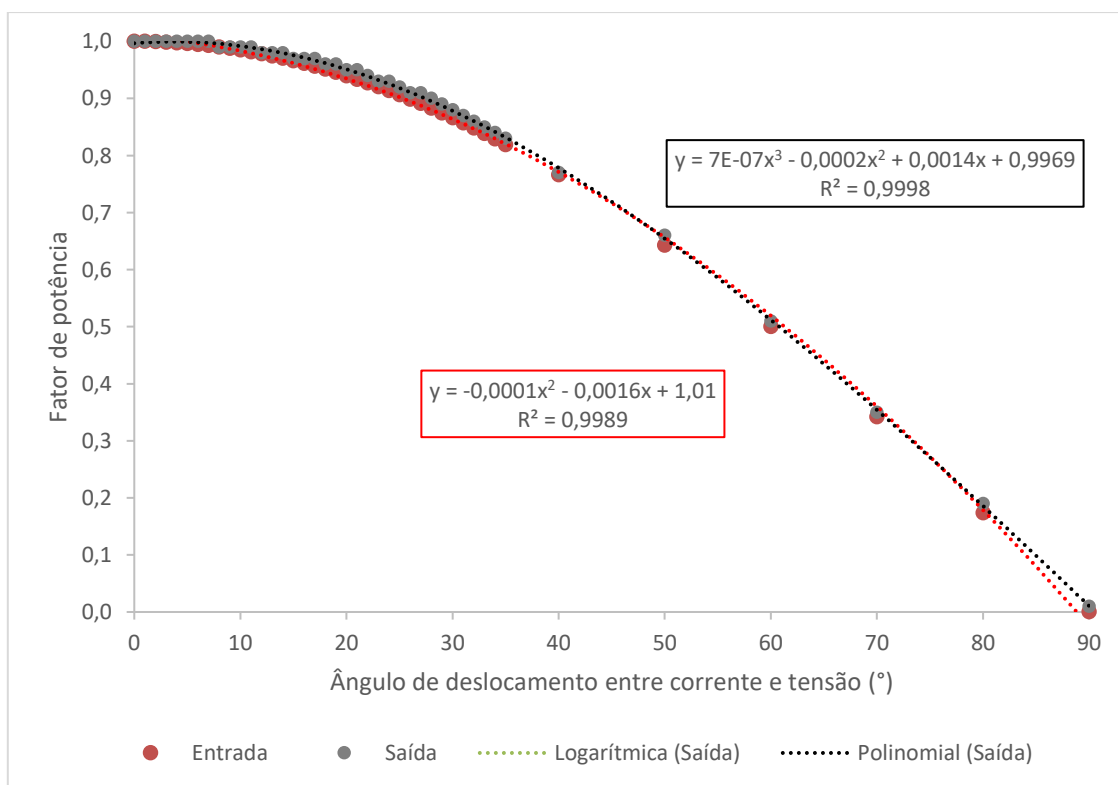
Algumas observações podem ser feitas sobre os erros nas medições apresentados na Tabela 1 e na Tabela 2:

- Exatidão dos resistores: não foram usados resistores de precisão, interferindo na calibração dos sensores;
- Resistor de carga projetado para correntes de até 100 A: a amplitude do sinal fica muito atenuada, tornando a medida inexata para correntes abaixo de 1 A;
- O maior erro, 17,60%, encontrado nos testes com cargas foi na medição do fator de potência. O menor erro, 0,18%, nos testes com cargas também foi da medição de fator de potência. Quanto menor for o fator de potência, menos exata é a medição. O alto erro de 17,60% é justificado pela baixa corrente, abaixo de 1 A, da corrente medida, tornando o controlador mais exato para correntes mais elevadas;

- Erro menor que 6% para medições de potência ativa, podendo ser diminuído com uma calibração melhor dos sensores;
- Resolução de 10 bits do microcontrolador: introduz erros de 1,25 V na amostragem do sinal de tensão e 0,30 A na amostragem do sinal de corrente;
- O fator de potência calculado pelo deslocamento no tempo não levou em conta as ondas harmônicas da frequência fundamental de 60 Hz. Já o fator de potência calculado pelo protótipo, como faz um cálculo por área do sinal, abrange as harmônicas presentes nos sinais. Quanto maior o nível de ondas harmônicas presentes no sinal de corrente, maior a diferença entre o fator de potência calculado pelo deslocamento angular e o fator de potência calculado pela potência ativa instantânea.

O *software* Microsoft Excel possibilita a construção de curvas de tendência, a partir dos dados inseridos, o que significa obter equações aproximadas das curvas dos dados, conforme a Figura 42. A partir da inserção dessas equações no microcontrolador, seria possível diminuir o erro apresentado para as leituras do Fator de Potência.

Figura 42 - Gráfico das Curvas de Tendência para os valores real e medido do Fator de Potência.



Fonte: Próprio autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi elaborado um protótipo de um controlador monofásico de fator de potência e de demanda de baixo custo, com a finalidade de evitar multas na fatura de energia elétrica aos consumidores do Grupo A, os quais, atualmente, são multados por exceder o limite de consumo de reativos e por exceder o limite contratado de demanda elétrica, nos intervalos integralizados pelas distribuidoras de energia elétrica.

Excetuando um teste envolvendo carga com corrente inferior a 0,56 A, os testes realizados comprovaram que o controlador desenvolvido apresenta uma exatidão nas leituras de fator de potência e de potência ativa com erros máximos de 2,33%, para o fator de potência de até 0,35, e de 5,95% para potência ativa. O controlador apresentou desempenho satisfatório, se considerada a faixa de operação, o propósito deste trabalho e o custo 10 vezes inferior a modelos comerciais.

Para trabalhos futuros, foi explicitado que é possível diminuir os erros com o ajuste da escala do resistor de carga no sensor de corrente, inserindo as equações das curvas de tendência no código do microcontrolador, melhorar a calibração dos sensores com resistores de precisão e utilizando um microcontrolador com conversor A/D de maior resolução. É importante destacar que a adição de comunicação sem fio com servidores para gerar relatórios mensais da qualidade e do uso da energia elétrica na instalação é uma possibilidade factível e interessante, pois possibilita um melhor controle, por parte do usuário, da energia comprada.

Em relação ao aprendizado, este projeto possibilitou o desenvolvimento de competências em diferentes áreas da engenharia elétrica, além da familiarização com o uso de instrumentos de medição, ambientes de testes e calibração de equipamentos de medição.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. (2010). *Resolução Normativa 414: Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica*.
- ARDUINO. (1 de março de 2018). Fonte: <https://www.arduino.cc/>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, & International Electrotechnical Commission. (2009). *Dispositivo de manobra e comando de baixa tensão - Parte 4-1: Contatores e chaves de partidas de motores - Contatores e chaves de partidas de motores eletromecânicos*.
- BARBOSA, L. A. (2016). *Wattímetro Microprocessado*. Campina Grande.
- GLOVER, J. D., SARMA, M. S., & OVERBYE, T. J. (2011). *Power System Analysis and Design* (Fifth ed.). Stamford: Cengage Learning.
- MAMEDE FILHO, J. (2017). *Instalações Elétricas Industriais* (9ª ed.). Rio de Janeiro: LTC.
- NILSSON, J. W., & RIEDEL, S. A. (2014). *Circuitos Elétricos* (8ª ed.). São Paulo: Pearson.
- OpenEnergyMonitor. (1 de março de 2018). Fonte: <https://openenergymonitor.org/>
- SANTOS, A. G. (2017). *Projeto de um analisador da qualidade da energia elétrica monofásico de baixo custo*. Campina Grande.

APÊNDICE A – CÓDIGO DO ARDUINO

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include "EmonLib.h"

#define TEMPOINICIALIZACAO 5000 //Tempo para estabilizar 5s
#define ESTABILIZACAO 10 //contagem de loops para eliminar chaveamentos
causados por instabilidade transitória
#define DEMANDA 10000 //DEMANDA EM W

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,2,1,0,4,5,6,7,3, POSITIVE);
EnergyMonitor emon1;

void setup()
{
  lcd.begin (16,2);
  pinMode(23, OUTPUT);
  pinMode(25, OUTPUT);
  pinMode(27, OUTPUT);
  pinMode(29, OUTPUT);
  pinMode(53, OUTPUT);
  pinMode(51, OUTPUT);
  pinMode(49, OUTPUT);
  pinMode(47, OUTPUT);

  digitalWrite(29,HIGH); //o módulo de relés é nivel baixo ativo
  digitalWrite(27,HIGH);
  digitalWrite(25,HIGH);
  digitalWrite(23,HIGH);

  digitalWrite(53,LOW);
```

```

digitalWrite(51,LOW);
digitalWrite(49,LOW);
digitalWrite(47,LOW);
emon1.voltage(2, 264, 1); // Voltage: input pin, calibration, phase_shift,
emon1.current(1, 60.61);
}

int a=0; //Número de capacitores ligados
int D=0; //Número de motores desligados
long int tempoPassado=0;
int transitorio=0;

void loop()
{
    emon1.calcVI(200,1000); // Calcula tudo. (Número de meias ondas -
cruzamentos por zero | Tempo máximo de espera )

    float Irms      = emon1.Irms;
    float Vrms      = emon1.Vrms;
    float PotenciaAtiva = emon1.realPower;
    float FatorDePotencia = emon1.powerFactor;

    long int diferencaTempo=millis()-tempoPassado;

    if(Irms<=0.31 && millis(>TEMPOINICIALIZACAO)
    {
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Tensao:");
        lcd.print(Vrms,1);
        lcd.print("V      ");
        lcd.print("      ");
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print("      ");

```

```

digitalWrite(29,HIGH);
digitalWrite(27,HIGH);
digitalWrite(25,HIGH);
digitalWrite(23,HIGH);
a=0;
tempoPassado=millis();
transitorio=0;
D=0;
}
else if (Irms>0.31 && millis(>TEMPOINICIALIZACAO &&
PotenciaAtiva<DEMANDA) //Funcionando
{
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print(Vrms,1);
  lcd.print("V ");
  lcd.print(Irms);
  lcd.print("A ");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print(PotenciaAtiva);
  lcd.print("W ");
  lcd.print("FP:");
  lcd.print(FatorDePotencia);
  lcd.print(" ");
  D=0;

  if (FatorDePotencia<0.92 && FatorDePotencia>0 &&
diferencaTempo>TEMPOINICIALIZACAO){

    transitorio=transitorio+1; //espera a corrente e o fator de potencia
estabilizarem

    if(transitorio>ESTABILIZACAO){
      transitorio=0;
      tempoPassado=millis();

```



```

switch(a){
  case 0:
    digitalWrite(23,LOW); //Liga o primeiro banco capacitivo
    a=1;
    break;
  case 1:
    digitalWrite(25,LOW); //Liga o segundo banco capacitivo
    a=2;
    break;
  case 2:
    digitalWrite(27,LOW); //Liga o terceiro banco capacitivo
    a=3;
    break;
  case 3:
    digitalWrite(29,LOW); //Liga o quarto banco capacitivo
    a=4;
    break;
}
}
}
else if (FatorDePotencia<0 && FatorDePotencia>-0.92 &&
diferencaTempo>TEMPOINICIALIZACAO){
  tempoPassado=millis();
  switch(a){
    case 4:
      digitalWrite(29,HIGH); //Desliga o quarto banco capacitivo
      a=3;
      break;
    case 3:
      digitalWrite(27,HIGH); //Desliga o terceiro banco capacitivo
      a=2;
      break;
    case 2:

```

```

digitalWrite(25,HIGH);//Desliga o segundo banco capacitivo
a=1;
break;
case 1:
digitalWrite(23,HIGH);//Desliga o primeiro banco capacitivo
a=0;
break;
}
}
}
else if(diferencaTempo>TEMPOINICIALIZACAO &&
PotenciaAtiva>DEMANDA){
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Demanda excedida!");
transitorio=transitorio+1; //espera a corrente e o fator de potencia estabilizarem
if(transitorio>ESTABILIZACAO){
transitorio=0;
tempoPassado=millis();
switch(D){
case 0:
digitalWrite(53,HIGH); //Desliga a primeira carga
delay(2000);
digitalWrite(53,LOW);
D=1;
break;
case 1:
digitalWrite(51,HIGH); //Desliga a segunda carga
digitalWrite(53,HIGH); //Desliga a primeira carga
delay(2000);
digitalWrite(51,LOW); //Liga
digitalWrite(53,LOW);
D=2;
break;

```

```
case 2:
digitalWrite(49,HIGH);//Desliga a terceira carga
digitalWrite(51,HIGH); //Desliga a segunda carga
digitalWrite(53,HIGH); //Desliga a primeira carga
delay(2000);
digitalWrite(49,LOW); //Liga
digitalWrite(51,LOW);
digitalWrite(53,LOW);
D=3;
break;
case 3:
digitalWrite(47,HIGH);//Desliga a quarta carga
digitalWrite(49,HIGH);//Desliga a terceira carga
digitalWrite(51,HIGH); //Desliga a segunda carga
digitalWrite(53,HIGH); //Desliga a primeira carga
delay(2000);
digitalWrite(47,LOW); //Liga tudo
digitalWrite(49,LOW);
digitalWrite(51,LOW);
digitalWrite(53,LOW);
D=4;
break;
}
}
}
else{
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Aguarde...");
}
}
```

ANEXO A – EMONLIB

```

/* Emon.h - Library for openenergymonitor */
#if defined(ARDUINO) && ARDUINO >= 100
#include "Arduino.h"
#else
#include "WProgram.h"
#endif

#ifndef READVCC_CALIBRATION_CONST
#define READVCC_CALIBRATION_CONST 1126400L
#endif

#if defined(__arm__)
#define ADC_BITS 12
#else
#define ADC_BITS 10
#endif

#define ADC_COUNTS (1<<ADC_BITS)

class EnergyMonitor
{
public:
    void voltage(unsigned int _inPinV, double _VCAL, double _PHASECAL);
    void current(unsigned int _inPinI, double _ICAL);
    void voltageTX(double _VCAL, double _PHASECAL);
    void currentTX(unsigned int _channel, double _ICAL);
    void calcVI(unsigned int crossings, unsigned int timeout);
    double calcIrms(unsigned int NUMBER_OF_SAMPLES);
    void serialprint();
    long readVcc();
    //Useful value variables
    double realPower,
        apparentPower,

```

```

    powerFactor,
    Vrms,
    Irms;
private:
    //Set Voltage and current input pins
    unsigned int inPinV;
    unsigned int inPinI;
    //Calibration coefficients
    //These need to be set in order to obtain accurate results
    double VCAL;
    double ICAL;
    double PHASECAL;
    // Variable declaration for emon_calc procedure
    int sampleV;           //sample_ holds the raw analog read value
    int sampleI;

    double lastFilteredV,filteredV;    //Filtered_ is the raw analog value minus
the DC offset
    double filteredI;
    double offsetV;           //Low-pass filter output
    double offsetI;          //Low-pass filter output
    double phaseShiftedV;    //Holds the calibrated phase shifted voltage.
    double sqV,sumV,sqI,sumI,instP,sumP; //sq = squared, sum = Sum, inst =
instantaneous
    int startV;              //Instantaneous voltage at start of sample window.
    boolean lastVCross, checkVCross; //Used to measure number of
times threshold is crossed.
};
#ifdef ARDUINO && ARDUINO >= 100
#include "Arduino.h"
#else
#include "WProgram.h"
#endif
// Sets the pins to be used for voltage and current sensors

```

```

void EnergyMonitor::voltage(unsigned int _inPinV, double _VCAL, double
_PHASECAL)
{
  inPinV = _inPinV;
  VCAL = _VCAL;
  PHASECAL = _PHASECAL;
  offsetV = ADC_COUNTS>>1;
}
void EnergyMonitor::current(unsigned int _inPinI, double _ICAL)
{
  inPinI = _inPinI;
  ICAL = _ICAL;
  offsetI = ADC_COUNTS>>1;
}
// Sets the pins to be used for voltage and current sensors based on emontx pin
map
void EnergyMonitor::voltageTX(double _VCAL, double _PHASECAL)
{
  inPinV = 2;
  VCAL = _VCAL;
  PHASECAL = _PHASECAL;
  offsetV = ADC_COUNTS>>1;
}
void EnergyMonitor::currentTX(unsigned int _channel, double _ICAL)
{
  if (_channel == 1) inPinI = 3;
  if (_channel == 2) inPinI = 0;
  if (_channel == 3) inPinI = 1;
  ICAL = _ICAL;
  offsetI = ADC_COUNTS>>1;
}
// emon_calc procedure
// Calculates realPower,apparentPower,powerFactor,Vrms,Irms,kWh increment
// From a sample window of the mains AC voltage and current.

```

// The Sample window length is defined by the number of half wavelengths or crossings we choose to measure.

```

void EnergyMonitor::calcVI(unsigned int crossings, unsigned int timeout)
{
  #if defined emonTxV3
  int SupplyVoltage=3300;
  #else
  int SupplyVoltage = readVcc();
  #endif

  unsigned int crossCount = 0;           //Used to measure number of times
  threshold is crossed.

  unsigned int numberOfSamples = 0;     //This is now incremented
  // 1) Waits for the waveform to be close to 'zero' (mid-scale adc) part in sin curve.
  boolean st=false;                    //an indicator to exit the while loop
  unsigned long start = millis();      //millis()-start makes sure it doesnt get stuck in
  the loop if there is an error.

  while(st==false)                     //the while loop...
  {
    startV = analogRead(inPinV);       //using the voltage waveform
    if ((startV < (ADC_COUNTS*0.52)) && (startV > (ADC_COUNTS*0.48)))
    st=true; //MELHOR RESULTADO AJUSTANDO DE 0.55 PARA 0.52 E 0.45 PARA
    0.48

    if ((millis()-start)>timeout) st = true;
  }
  // 2) Main measurement loop
  start = millis();

  while ((crossCount < crossings) && ((millis()-start)<timeout))
  {
    numberOfSamples++;                //Count number of times looped.
    lastFilteredV = filteredV;        //Used for delay/phase compensation
    // A) Read in raw voltage and current samples
    sampleV = analogRead(inPinV);     //Read in raw voltage signal
    sampleI = analogRead(inPinI);     //Read in raw current signal
  }
}

```

```

// B) Apply digital low pass filters to extract the 2.5 V or 1.65 V dc offset,
// then subtract this - signal is now centred on 0 counts.
offsetV = offsetV + ((sampleV-offsetV)/1024);
filteredV = sampleV - offsetV;
offsetI = offsetI + ((sampleI-offsetI)/1024);
filteredI = sampleI - offsetI;
// C) Root-mean-square method voltage
sqV= filteredV * filteredV;          //1) square voltage values
sumV += sqV;                          //2) sum
// D) Root-mean-square method current
sqI = filteredI * filteredI;          //1) square current values
sumI += sqI;                          //2) sum
// E) Phase calibration
phaseShiftedV = lastFilteredV + PHASECAL * (filteredV - lastFilteredV);
// F) Instantaneous power calc
instP = phaseShiftedV * filteredI;    //Instantaneous Power
sumP +=instP;                          //Sum
// G) Find the number of times the voltage has crossed the initial voltage
// - every 2 crosses we will have sampled 1 wavelength
// - so this method allows us to sample an integer number of half wavelengths

```

which increases accuracy

```

lastVCross = checkVCross;
if (sampleV > startV) checkVCross = true;
    else checkVCross = false;
if (numberOfSamples==1) lastVCross = checkVCross;

if (lastVCross != checkVCross) crossCount++;
}
// 3) Post loop calculations
//Calculation of the root of the mean of the voltage and current squared (rms)
//Calibration coefficients applied.
double V_RATIO = VCAL * ((SupplyVoltage/1000.0) / (ADC_COUNTS));
Vrms = V_RATIO * sqrt(sumV / numberOfSamples);
double I_RATIO = ICAL * ((SupplyVoltage/1000.0) / (ADC_COUNTS));

```



```

Irms = I_RATIO * sqrt(sumI / numberOfSamples);
//Calculation power values
realPower = V_RATIO * I_RATIO * sumP / numberOfSamples;
realPower = abs(realPower);
apparentPower = Vrms * Irms;
powerFactor=realPower / apparentPower;
    //Reset accumulators
sumV = 0;
sumI = 0;
sumP = 0;
}
double EnergyMonitor::calcIrms(unsigned int Number_of_Samples)
{
    #if defined emonTxV3
        int SupplyVoltage=3300;
    #else
        int SupplyVoltage = readVcc();
    #endif
    for (unsigned int n = 0; n < Number_of_Samples; n++)
    {
        sampleI = analogRead(inPinI);
        // Digital low pass filter extracts the 2.5 V or 1.65 V dc offset,
        // then subtract this - signal is now centered on 0 counts.
        offsetI = (offsetI + (sampleI-offsetI)/1024);
        filteredI = sampleI - offsetI;

        // Root-mean-square method current
        // 1) square current values
        sqI = filteredI * filteredI;
        // 2) sum
        sumI += sqI;
    }
    double I_RATIO = ICAL *((SupplyVoltage/1000.0) / (ADC_COUNTS));
    Irms = I_RATIO * sqrt(sumI / Number_of_Samples);

```

```

//Reset accumulators
sumI = 0;
return Irms;
}

void EnergyMonitor::serialprint()
{
  Serial.print(realPower);
  Serial.print(' ');
  Serial.print(apparentPower);
  Serial.print(' ');
  Serial.print(Vrms);
  Serial.print(' ');
  Serial.print(Irms);
  Serial.print(' ');
  Serial.print(powerFactor);
  Serial.println(' ');
  delay(100);
}

long EnergyMonitor::readVcc() {
  long result;

  //not used on emonTx V3 - as Vcc is always 3.3V - eliminates bandgap error and
  need for calibration http://harizanov.com/2013/09/thoughts-on-avr-adc-accuracy/
  #if defined(__AVR_ATmega168__) || defined(__AVR_ATmega328__) ||
  defined (__AVR_ATmega328P__)
    ADMUX = _BV(REFS0) | _BV(MUX3) | _BV(MUX2) | _BV(MUX1);
  #elif defined(__AVR_ATmega644__) || defined(__AVR_ATmega644P__) ||
  defined(__AVR_ATmega1284__) || defined(__AVR_ATmega1284P__)
    ADMUX = _BV(REFS0) | _BV(MUX4) | _BV(MUX3) | _BV(MUX2) |
    _BV(MUX1);
  #elif defined(__AVR_ATmega32U4__) || defined(__AVR_ATmega1280__) ||
  defined(__AVR_ATmega2560__) || defined(__AVR_AT90USB1286__)
    ADMUX = _BV(REFS0) | _BV(MUX4) | _BV(MUX3) | _BV(MUX2) |
    _BV(MUX1);

```

ADCSRB &= ~_BV(MUX5); // Without this the function always returns -1 on the ATmega2560 <http://openenergymonitor.org/emon/node/2253#comment-11432>

```
#elif defined (__AVR_ATtiny24__) || defined(__AVR_ATtiny44__) ||
defined(__AVR_ATtiny84__)
```

```
ADMUX = _BV(MUX5) | _BV(MUX0);
```

```
#elif defined (__AVR_ATtiny25__) || defined(__AVR_ATtiny45__) ||
defined(__AVR_ATtiny85__)
```

```
ADMUX = _BV(MUX3) | _BV(MUX2);
```

```
#endif
```

```
#if defined(__AVR__)
```

```
delay(2); // Wait for Vref to settle
```

```
ADCSRA |= _BV(ADSC); // Convert
```

```
while (bit_is_set(ADCSRA,ADSC));
```

```
result = ADCL;
```

```
result |= ADCH<<8;
```

```
result = READVCC_CALIBRATION_CONST / result; //1100mV*1024 ADC
```

```
return result;
```

```
#elif defined(__arm__)
```

```
return (3300); //Arduino Due
```

```
#else
```

```
return (3300); //Guess that other un-supported architectures
```

will be running a 3.3V!

```
#endif
```

```
}
```