

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RAMA RATNA SOUSA DE OLIVEIRA

**APARELHO MICROCONTROLADO PARA MULTIMEDIÇÃO E
MONITORAMENTO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS EM SISTEMAS
MONOFÁSICOS**

VIÇOSA
2014

RAMA RATNA SOUSA DE OLIVEIRA

**APARELHO MICROCONTROLADO PARA MULTIMEDIÇÃO E
MONITORAMENTO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS EM SISTEMAS
MONOFÁSICOS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. André Gomes Tôrres.

**VIÇOSA
2014**

RAMA RATNA SOUSA DE OLIVEIRA

**APARELHO MICROCONTROLADO PARA MULTIMEDIÇÃO E
MONITORAMENTO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS EM SISTEMAS
MONOFÁSICOS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 16 de Julho de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. André Gomes Tôrres - Orientador
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. Kétia Soares Moreira - Membro
Universidade Federal de Viçosa

Eng. Eletricista Michael Oliveira Resende - Membro
Universidade Federal de Viçosa

*“Hare Kṛṣṇa, Hare Kṛṣṇa
Kṛṣṇa Kṛṣṇa, Hare Hare
Hare Rāma, Hare Rāma
Rāma Rāma, Hare Hare”*

*Ao meu querido e amado pai, por sua dedicação incondicional e exemplar.
A Krishina, Sri, Govinda e Pancha pela irmandade e felicidades compartilhadas.
A todos os que participaram desse pequeno passo nessa grande caminhada
chamada vida.*

Agradecimentos

Agradeço imensamente a Deus pela vida a mim concebida.

Ao meu pai, pela educação, confiança, amizade e exemplo de caráter e dignidade da pessoa mais importante para mim.

À Krishina Ratna, Sri Ratna, Govinda Ratna e Pancha Tatva Ratna, por serem irmãos maravilhosos e insubstituíveis que tenho o prazer de dividir a minha jornada de vida com eles.

À Flavinha, pela paciência, entendimento e preocupação durante a execução do presente trabalho.

Aos meus amigos que fiz durante a graduação, pelos risos e felicidades proporcionados por eles esses anos não teriam sido tão prazerosos.

Aos amigos engenheiro eletricitas Adriano Antônio e Michael Oliveira Resende, pela ajuda e colaboração técnica durante a execução desse trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. André Gomes Tôrres, pelo apoio e orientação.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFV, especialmente ao Prof. Dr. Tarcísio de Assunção Pizziolo pelas conversas instrutivas e agradáveis que tivemos ao longo da graduação.

Ao programa Brafitec, financiado pela CAPES, pela oportunidade de intercâmbio à França.

À Direção e professores da Universidade Federal de Viçosa, pelo ensino e atenção.

Resumo

A veracidade na difusão das informações referentes a grandezas elétricas é de interesse de todos os indivíduos que usufruem da energia elétrica. Para tanto, é indispensável aparelhos que façam medições concisas e coerentes, acompanhando a tendência atual da simplificação de monitoramento e manuseio dos mesmos. Dessa forma, o presente trabalho tem a proposta de implementar uma solução viável, desenvolvendo assim um equipamento eletrônico capaz de aferir as potências e fator de potência de aparelhos de média e baixa potência. Portanto, o protótipo é composto por um sensor de corrente, transdutor de potencial para adaptar a tensão numa faixa aceitável pelo microcontrolador PIC18F4550, que tem a finalidade de gerenciar o sistema aferido fazendo os devidos cálculos de potência e fator de potência, disponibilizando-os em um visor LCD.

Abstract

The accuracy in the dissemination of information regarding electrical quantities is of interest to all individuals who benefit from electricity. Therefore, it is essential to develop devices that do concise and consistent measurements, following the current trend of simplifying monitoring and handling of them. Hence, the present work has the purpose to implement a viable solution, developing an electronic device capable of measuring the powers and factor power of equipments on low and medium power. The prototype consists of a current sensor, transducer voltage potential to adapt to a range acceptable by the microcontroller PIC18F4550, which aims to manage the system measured doing the proper calculations of power and power factor, making them available in a LCD display.

Sumário

1	Introdução.....	13
1.1	Contexto Atual.....	13
1.2	Proposta do Protótipo	15
1.3	Revisão Bibliográfica	15
1.3.1	Conceitos básicos	15
1.3.2	Triângulo de Potências	17
1.3.3	Fator de Potência	19
1.3.4	Excitações Não Senoidais e Cargas Não Lineares	21
1.4	Monografia “Wattímetro digital de baixo custo”	23
1.5	Objetivo	23
2	Materiais e Métodos	25
2.1	Abordagem Inicial	25
2.2	Proposta de Configuração.....	25
2.2.1	Sensor de Tensão	26
2.2.2	Sensor de Corrente	27
2.3	Implementação do Protótipo.....	30
2.3.1	Aquisição e Condicionamento dos Sinais de Tensão e Corrente	30
2.3.2	Tratamento da Curva de Tensão.....	33
2.3.3	Módulo de Processamento.....	34
2.3.4	Conversão Analógico/Digital	34
2.3.5	Algoritmo do Processamento	36
3	Resultados e Discussões.....	39
4	Conclusão	44
	Referências Bibliográficas	45

Lista de Figuras

Figura 1 - Aparelhos para instrumentação elétrica, antigos à esquerda e novos à direita [18].	14
Figura 2 - Anomalias mais comuns na análise de qualidade de energia [18].	14
Figura 3 - Da esquerda para direita: 1) Corrente em fase com a tensão; 2) Corrente atrasada da tensão; 3) Corrente adiantada da tensão [10].	16
Figura 4 - Triângulo das potências.	19
Figura 5 - Forma de onda da tensão num <i>dimmer</i> para controle de iluminação.	21
Figura 6 - Diagrama de blocos com a estrutura conceitual da proposta.	26
Figura 7 - Transformador de potencial.	27
Figura 8 - Divisor resistivo.	27
Figura 9 - Transformador de corrente [18].	28
Figura 10 - Resistor Shunt.	28
Figura 11 - Bobina de Rogowski [16].	29
Figura 12 - Representação de um sensor de efeito Hall [17].	29
Figura 13 - Relação linear de transformação do sensor de tensão.	30
Figura 14 - Circuito do sensor de tensão.	31
Figura 15 - Sensor Hall ACS754 LCB-050 [12].	32
Figura 16 - Configuração típica do Sensor Hall ACS754 LCB-050 [12].	33
Figura 17 - Circuito somador/inversor do sinal de tensão.	34
Figura 18 - Amostragem dos sinais de tensão e corrente na carga.	35
Figura 19 - Fluxograma da execução do programa no PIC18F4550.	38
Figura 20 - Esquema do Multimetro de Grandezas Elétricas.	39
Figura 21 - Protótipo do Multimetro de Grandezas Elétricas.	42
Figura 22 - Sinal de saída dos sensores de tensão (Curva Amarela) e corrente (Curva Verde).	42

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Medição de Potência Ativa.....	40
Tabela 2 - Medição de Potência Aparente.....	40
Tabela 3 - Medição de Fator de Potência.	40
Tabela 4 - Comparação entre os erros obtidos.	41

1 *Introdução*

1.1 *Contexto Atual*

A difusão de informações em congruência com o tema abordado, seja na área de engenharia elétrica ou qualquer outra, é solidária a maneira de como elas foram obtidas, refletindo assim no grau de confiabilidade da análise dessas informações.

Nesse aspecto, concomitante a evolução dos sistemas elétricos de acordo com as necessidades humanas, está a preocupação com a medida das grandezas envolvidas. Nos primórdios das pesquisas na área elétrica, o foco principal era em variáveis básicas como tensão, corrente e potência. Ainda nesse âmbito, pode-se delimitar como marco histórico a invenção do medidor de energia elétrica em corrente alternada por Oliver B. Shallenberger, na época engenheiro chefe da Westinghouse.

Por conseguinte, são diversas as situações nas quais a informação errônea de uma grandeza elétrica pode custar caro para os envolvidos. Exemplo típico disso é a adequação de eletroeletrônicos segundo às normas vigentes do INMETRO: a Avaliação da Conformidade. Dentre os requisitos, exige-se em alguns de seus testes a informação de tensão, corrente e potência consumida pelo equipamento. Caso o fabricante indique alguma dessas grandezas incorretamente e seja reprovado nesse quesito, terá de seguir novamente o processo dispendioso e burocrático para que assim seja reavaliado pelo INMETRO afim de adequar seus aparelhos.

Dessa forma, a utilização de instrumentos confiáveis é essencial tanto nas atividades de pesquisa e desenvolvimento quanto nas relações comerciais. Analisando a figura 1 é notável a evolução dos aparelhos de instrumentação, intimamente ligados as variáveis de interesse (grau de exatidão, custo, etc.).

Por outro lado, a evolução tecnológica proporcionada pela eletrônica de potência nos mais diversos ramos da engenharia elétrica a tornou uma solução viável e eficiente em vários sistemas. Entretanto, como será discutido mais adiante, a introdução de componentes não lineares num circuito, mesmo buscando-se o uso mais eficiente da energia elétrica, levanta uma outra questão ainda mais relevante: a qualidade desta energia.



Figura 1 - Aparelhos para instrumentação elétrica, antigos à esquerda e novos à direita [18].

Para tal, faz-se necessário a implementação de aparelhos capazes de medir as variáveis que afetam a qualidade dessa energia, como interrupções, surtos, distorção harmônica total, quedas e elevações temporárias de tensão (*sag* e *swell*, respectivamente) [1]. Algumas das situações que influenciam na qualidade da energia podem ser vistas na figura 2.

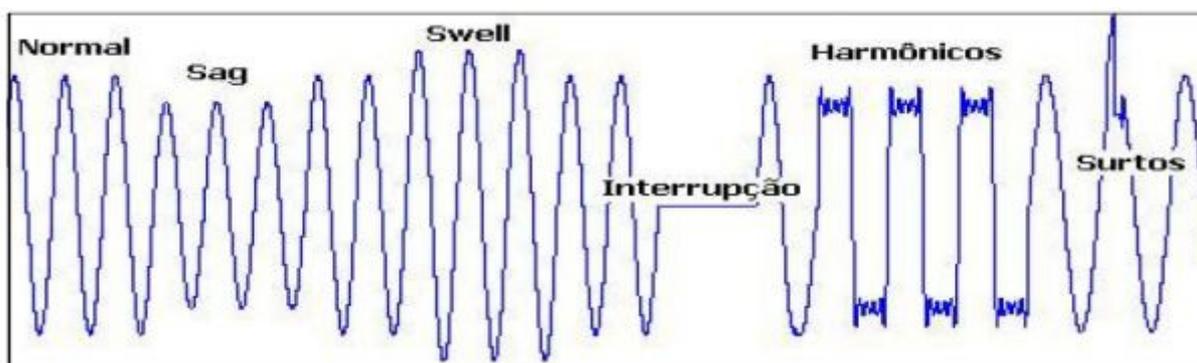


Figura 2 - Anomalias mais comuns na análise de qualidade de energia [18].

São diversas as situações em que qualquer um dos itens presentes na figura 2 pode acarretar danos irreversíveis e altos prejuízos aos sistemas afetados por essas anomalias. Interrupções, e.g., caracterizam uma das maiores problemáticas no cenário da energia elétrica, já que faltas de alguns minutos em setores de produção contínua, como indústrias siderúrgicas e têxteis, pode ocasionar perdas de até US\$ 500 mil [1].

Uma das formas de penalizar uma má qualidade de energia está na análise no fator de potência, que requer sofisticados métodos de aferição. A legislação brasileira determina que o fator de potência seja o mais próximo possível da unidade, permitindo um valor mínimo de 0,92 [2]. É previsto em lei também uma cobrança adicional caso o fator de potência esteja abaixo

desse valor mínimo. Por outro lado, um baixo fator de potência representa uma utilização não adequada da energia elétrica, já que a energia que está sendo consumida não está sendo transformada totalmente em trabalho, caracterizando perdas por efeito Joule nos condutores da instalação. Dessa forma, um fator de potência adequado representa um fator de economia.

1.2 Proposta do Protótipo

O protótipo será um dispositivo versátil e portátil capaz de realizar o levantamento de parâmetros de qualidade de energia elétrica. Será possível visualizar os valores de potência e fator de potência da carga aferida, e os efeitos de componentes harmônicas da rede na carga, já que a frequência de amostragem será muito maior que a fundamental.

A principal motivação para realização desse trabalho é proporcionar a possibilidade de aferição em equipamentos de baixa potência, já que no mercado não há muitos dispositivos metrológicos capazes de fazer essa tarefa.

Sendo assim, será possível utilizá-lo nos laboratórios de engenharia elétrica da Universidade Federal de Viçosa, por exemplo, já que são compostos em sua maioria por cargas de baixa e média potência.

1.3 Revisão Bibliográfica

1.3.1 Conceitos básicos

A tensão elétrica aplicada a um elemento é definida como o trabalho realizado para mover a carga de um Coulomb através deste [3]. Dessa forma, o movimento ordenado das cargas no interior de um material condutor é definido como corrente elétrica, que é devida a aplicação de uma força eletromotriz neste. Assim, um trabalho é realizado sobre as cargas elétricas.

Por outro lado, pode-se definir tensão em termos de diferenças de potencial, sejam quedas ou elevações de potencial. Nessa situação é comum se referir a tensão como diferença de potencial [3]. Por conseguinte, definindo-se um ponto no circuito como referencial, geralmente com potencial igual a zero Volt, tem-se tensões positivas e negativas no sistema em questão.

Atrelado a utilização em larga escala de sistemas CA, proporcionado pela contribuição inigualável de Nikola Tesla (1856-1943), estava também a necessidade de métodos matemáticos mais práticos para análise desses sistemas. Isso era praticamente impossível até as propostas de análise de circuitos em CA por Karl August Rudolf Steinmetz (1865-1923), também conhecido pelo pseudônimo de Charles Proteus Steinmetz. Esse renomado matemático e engenheiro eletricista desenvolveu um método que revolucionou a análise de circuitos em corrente alternada. O método baseava-se na descrição de circuitos em corrente alternada utilizando números complexos. Com isto, facilitou-se o entendimento de fenômenos físicos causados por correntes alternadas, corroborando para sua aplicação nas mais diversas áreas.

Seja uma fonte de tensão dada pela seguinte relação em regime permanente, onde V_p refere-se a tensão de pico [3]:

$$v(t) = V_p \text{sen}(wt) \quad (1)$$

Por conseguinte, conectando-se uma carga qualquer, mas de características lineares, a essa fonte de tensão uma corrente circulará pelo circuito segundo a relação, onde I_p refere-se a corrente de pico [3]:

$$i(t) = I_p \text{sen}(wt + \varphi) \quad (2)$$

Assim, a figura 3 representa a plotagem das equações (1) e (2) no mesmo gráfico.

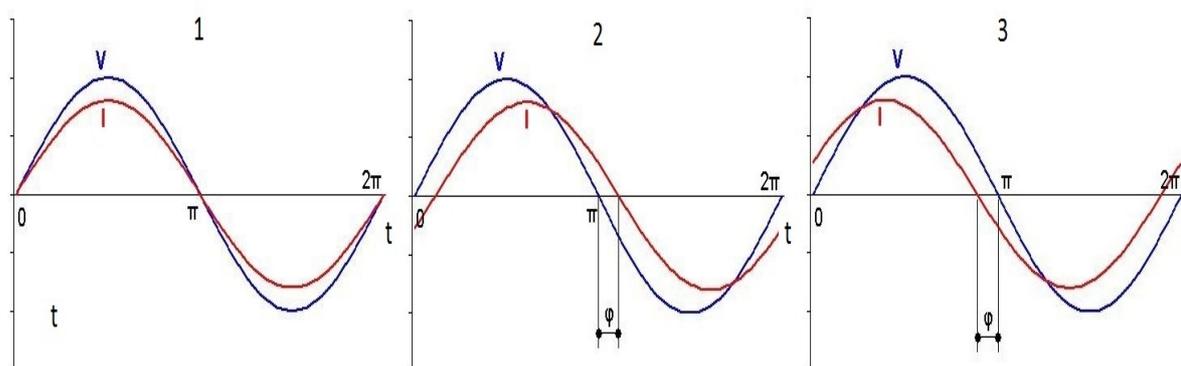


Figura 3 - Da esquerda para direita: 1) Corrente em fase com a tensão; 2) Corrente atrasada da tensão; 3) Corrente adiantada da tensão [10].

A partir da figura 3, pode-se analisar se um circuito possui características resistivas, capacitivas ou indutivas.

Se a corrente e a tensão de um circuito estão em fase, diz-se que este sistema é resistivo ($\varphi = 0$) em relação à tensão. Nota-se que o valor de pico da corrente é atingido no mesmo instante que o valor de pico da tensão [3].

Por outro lado, se corrente está atrasada de um ângulo φ em relação à tensão, a carga do circuito possui características indutivas. Isso faz com que o valor de pico da corrente ocorra depois do valor de pico da tensão [3].

Por fim, quando a corrente está adiantada um ângulo φ em relação à tensão, a carga do circuito possui características capacitivas. Isso faz com que o valor de pico da corrente ocorra antes do valor de pico da tensão [3].

Numa outra análise, o estudo de sistemas que apresentam componentes CA exige a introdução de um outro tema: valor eficaz de componentes alternadas. O valor eficaz ou valor quadrático médio *rms* (do inglês *root mean square*) é uma medida estatística da magnitude de uma quantidade variável. Com isto, o valor eficaz de uma corrente alternada é [3]:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [i(t)]^2 dt} \quad (3)$$

Analogamente, para a tensão dada pela equação (1) tem-se [3]:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v(t)]^2 dt} \quad (4)$$

Supondo uma excitação puramente senoidal dada pelas equações (1) e (2), chega-se aos seguintes resultados [3]:

$$V_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

$$I_{rms} = \frac{I_p}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

1.3.2 Triângulo de Potências

A partir dos sinais de tensão e corrente devidamente medidos ou calculados, pode-se obter uma outra grandeza relacionada de grande importância em sistemas elétricos: a potência. A partir da definição inicial de potência [3]:

$$p(t) = \frac{dw}{dt} = v(t) \cdot i(t) \quad (7)$$

Usualmente em circuitos elétricos considera-se a potência média, dada em Watt (W) e dissipada num elemento genérico do sistema em questão. Essa relação pode ser expressa por [3]:

$$P_{med} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt} \quad (8)$$

Numa outra ótica, para sistemas digitais onde os dados são de natureza discreta, para calcular a potência média necessita-se do valor a cada instante da amostra da tensão e da corrente e, nesse mesmo instante, realiza-se a multiplicação destes pontos, obtendo-se assim o valor de uma amostra da potência. O somatório das potências obtidas ponto a ponto, dividido pela quantidade de amostras, corresponde à potência média do sinal amostrado [14].

$$P_{med} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N v_k i_k \quad (9)$$

Onde k é a quantidade de amostras correspondente a um intervalo de tempo, v e i os valores de tensão e corrente, respectivamente.

Substituindo-se as equações (1) e (2) na equação (8), obtém-se a equação (10), que exprime a potência ativa dissipada num elemento linear de circuito ligado a uma fonte de tensão alternada senoidal:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T V_p \sin(\omega t) I_p \sin(\omega t + \varphi) dt$$

$$P = \frac{V_p I_p}{T} \int_0^T \sin(\omega t) \sin(\omega t + \varphi) dt$$

Sabendo-se que $2\sin(a)\sin(b) = \cos(a-b) - \cos(a+b)$, tem-se:

$$P = \frac{V_p I_p}{2T} \int_0^T \cos(\omega t - (\omega t + \varphi)) - \cos(\omega t + (\omega t + \varphi)) dt$$

$$P = \frac{V_p I_p}{2T} \cos(\varphi) \int_0^T 1 dt$$

$$P = \frac{V_p I_p}{2T} \cos(\varphi) T = \frac{V_p I_p}{2} \cos(\varphi) = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_p}{\sqrt{2}} \cos(\varphi)$$

Finalmente:

$$P = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos(\varphi) \quad (10)$$

Essa potência que o circuito utiliza para produzir trabalho num determinado período de tempo [14].

Por outro lado, a potência total fornecida a um circuito é dita potência aparente S , dada pela seguinte relação [14]:

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms} \quad (11)$$

A potência referente a carga puramente reativa é conhecida como potência reativa Q . Essa potência relaciona-se com a energia que é armazenada e devolvida para a fonte durante cada ciclo de corrente alternada, dada por [14]:

$$Q = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \sin(\varphi) \quad (12)$$

Tendo em vista essas três potências, pode-se construir geometricamente a representação gráfica dessas grandezas, conhecida como triângulo das potências, conforme a figura 4.

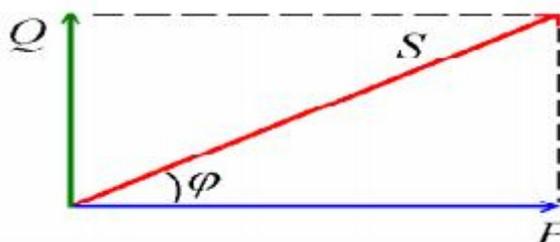


Figura 4 - Triângulo das potências.

1.3.3 Fator de Potência

A partir da figura 4, surge o conceito de fator de potência (fp), definido pela relação entre a potência ativa e aparente de um circuito, conforme a equação (13) [14]:

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{rms} I_{rms}} \quad (13)$$

Na condição discutida até então, para uma excitação senoidal [14]:

$$fp = \cos(\varphi) \quad (14)$$

O ângulo φ é chamado de ângulo de deslocamento e seu cosseno de fator de deslocamento. Na presente situação, o fator de deslocamento é igual ao fator de potência.

O fator de potência é determinado pelas características da carga ligada ao circuito em questão, podendo ser classificado como:

- Resistivo;
- Indutivo;
- Capacitivo.

Caso uma carga de característica puramente resistiva for conectado ao sistema, a tensão e a corrente cruzarão o zero no mesmo instante de tempo, ou seja, inverterão suas respectivas polaridades em fase. Nessa situação, diz-se que o fator de potência é unitário ou resistivo.

Cargas indutivas, e.g., motores e transformadores, produzem potência reativa com corrente atrasada em relação à tensão. Sendo assim, diz-se que o fator de potência é indutivo.

Por fim, cargas capacitivas, e.g., bancos de capacitores ou motores síncronos superexcitados, produzem potência reativa com corrente adiantada em relação à tensão. Nesse caso, diz-se que o fator de potência é capacitivo.

Dessa maneira, analisando a figura 3 pela ótica do fator de potência, pode-se determinar também o ângulo de defasagem de uma onda em relação à outra a partir do tempo de defasagem [3] [14].

$$\varphi = 2\pi \left(\frac{t_{def}}{t_{ciclo}} \right) \quad (15)$$

No qual t_{def} e t_{ciclo} dizem respeito ao tempo de defasagem e de um ciclo completo da onda, respectivamente. Para excitações senoidais de 60 Hz, tem-se que $t_{ciclo} = 1/60$ s. Portanto, a equação 15 se reduz a:

$$\varphi = 120\pi \cdot t_{def} \quad (16)$$

Finalmente, o fator de potência indica a eficiência com a qual a energia está sendo utilizada, daí sua grande importância no âmbito dos fatores econômicos e ambientais nos quais se inserem os consumidores de energia. Sendo assim, o estudo e pesquisa de novas técnicas para correção e medição do fator de potência tornam-se cada vez mais importantes, à medida que o fator de potência também é um fator de economia. Tendo em vista uma carga com fator de potência menor que a unidade, mais corrente é necessária para suprir a mesma quantidade

de potência útil. Quanto maior a corrente, mais perdas nas instalações elétricas do sistema analisado.

O Artigo nº 95 da Resolução da ANEEL 414 datado no dia 9 de setembro de 2010 estabelece que o fator de potência nas unidades consumidoras deve ser superior a 0,92. Essa Resolução ainda obriga a medição do fator de potência para unidades consumidoras de alta tensão (tensão acima de 1kV) e faculta a medição para unidades consumidoras de baixa tensão (abaixo de 1kV). Unidades consumidoras com fator de potência abaixo de 0,92 são sujeitadas à multas e encargos econômicos na referida conta de luz [2].

1.3.4 Excitações Não Senoidais e Cargas Não Lineares

O estudo de um circuito que apresenta cargas não lineares e/ou excitações não senoidais implicam numa análise mais árdua. Um exemplo simples é a utilização de um *dimmer* para controle de potência, muitas vezes usado em circuitos de iluminação. A partir da análise do circuito em questão, percebe-se uma distorção da onda de corrente. Isso ocorre, em aspectos gerais, pela presença do triac nesse sistema, que a partir da potência desejada, faz o controle da tensão de entrada e corrente de saída. Na figura 5 pode-se observar uma forma de onda clássica para essa aplicação.

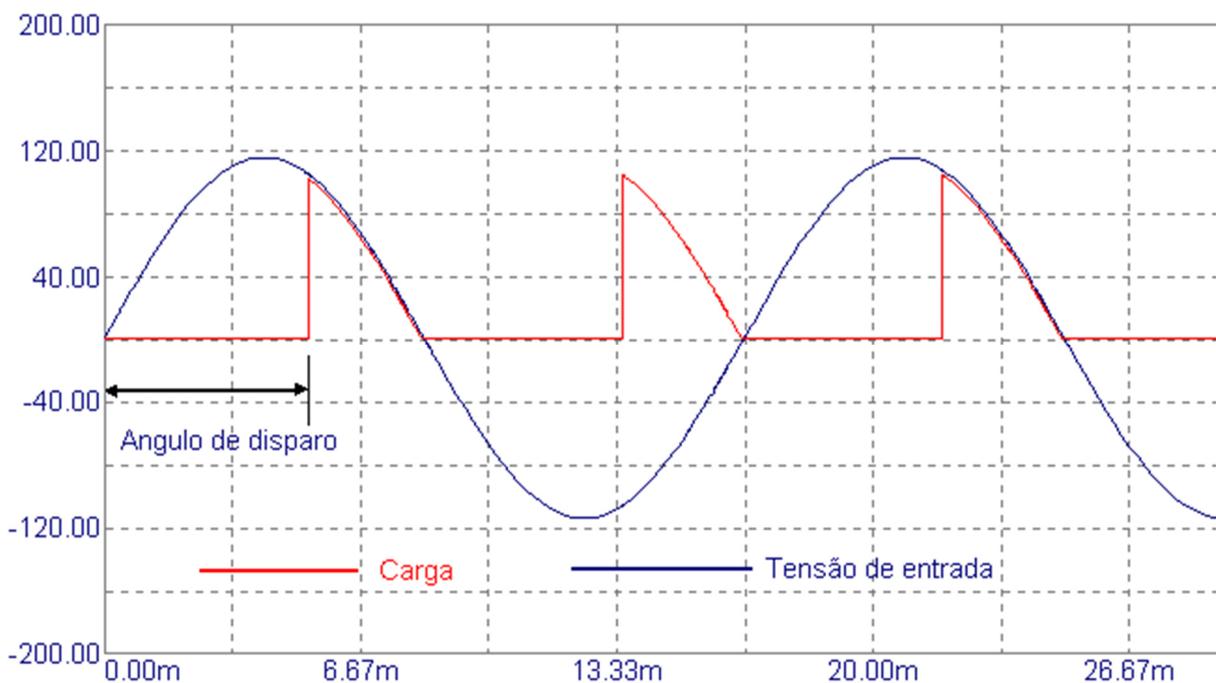


Figura 5 - Forma de onda da tensão num *dimmer* para controle de iluminação.

Dessa forma, tanto a tensão quanto a corrente apresentam um comportamento não senoidal. Por outro lado, pode-se representar qualquer sinal periódico a partir de uma soma de sinais senoidais, através da série de Fourier. A equação 17 descreve a corrente a partir da soma de todas as componentes harmônicas, onde I_n se refere a n-ésima componente harmônica e φ_n ao ângulo de defasagem dessa n-ésima componente em relação à tensão senoidal [14] [15].

$$i(t) = \sum_1^{\infty} I_n \text{sen}(w_n t + \varphi_n) \quad (17)$$

A partir das condições expostas e a análise de circuitos, o estudo dessas situações exige um cálculo matemático mais refinado, sendo necessário o uso das definições de caso geral, sem a permissão de restrições. Conseqüentemente, a análise da eletrônica de potência é, muitas vezes, feita através de gráficos, obtidos a partir de métodos numéricos.

Contudo, em sistemas não lineares surgem outras variáveis a serem levadas em conta.

Existem várias formas de quantificar as perturbações harmônicas. A mais empregada é a distorção harmônica total que quantifica o conteúdo harmônico de um sinal periódico. A relação entre o valor RMS das componentes harmônicas da corrente e a fundamental consiste na distorção harmônica total (DHT) da corrente, dada pela seguinte relação [15]:

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n \text{rms}^2}}{I_1 \text{rms}} \quad (18)$$

Relacionando-se as equações (13) e (18), pode-se obter uma nova relação entre o fator de potência e a DHT [15]:

$$fp = \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{1+(DHT)^2}} \quad (19)$$

Uma comparação mais minuciosa pode então ser feita entre as equações (13) e (19) que representam o fator de potência. Nessa ótica, a equação (13) é válida para calcular o FP quando se tem elementos lineares alimentados pela rede elétrica, e.g., resistores, capacitores e indutores, assim como equipamentos que podem ser representados pela associação dos componentes supracitados, como motores e geradores elétricos. A equação (19), por sua vez, é mais ampla e genérica, podendo ser aplicada tanto para elementos lineares quanto para não lineares, tais como retificadores de onda e conversores AC-DC. Tendo em vista essas duas abordagens do FP, pode-se delinear algumas situações [4] [15]:

- Ao conectar-se um elemento de características lineares a uma fonte de tensão senoidal, o fp é dado simplesmente pelo cosseno do ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente. Na prática, o fp de um elemento linear e pode ser facilmente medido por instrumentos eletromecânicos. Entretanto, essas medições são restritas, já que o $\cos \varphi$ é numericamente igual ao fp se a forma de onda da corrente for puramente senoidal, ou seja, se a DHT for nula.
- Ao conectar-se um elemento de características não lineares a uma fonte de tensão não senoidal, a DHT passa a influenciar diretamente no cálculo do FP, uma vez que a corrente que circulará pelo circuito não é senoidal. Via de regra, faz-se necessário a análise das componentes harmônicas da corrente, concomitante a quantificação da DHT. Existem atualmente no mercado instrumentos digitais capazes de fazer essa análise e medição. Porém, é interessante ressaltar que a série harmônica é infinita, havendo dessa forma um erro intrínseco na medição, já que os aparelhos truncam a série num valor de espectro de frequência conveniente.

1.4 Monografia “Wattímetro digital de baixo custo”

O trabalho implementado na monografia do autor Eduardo Batista Donato consistia no estudo e projeto de um instrumento capaz de medir o consumo de energia de aparelhos, tendo como características principais ser pequeno, ter baixo custo e de fácil utilização [13]. Esse wattímetro digital foi implementado com um microcontrolador da MICROCHIP.

Contudo, será discutido nas seções subsequentes os erros e obstáculos encontrados pelo autor, como também a continuidade do projeto e as soluções implementadas para contornar os resultados incongruentes.

1.5 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um dispositivo microcontrolado eficiente e de baixo custo, capaz de aferir parâmetros de qualidade de energia, como potência e fator de potência. A principal aplicação desse protótipo seria em cargas de baixa e média potência, visto a carência e custo elevado de dispositivos que apresentam uma escala coerente a este tipo de equipamento.

Portanto, o usuário poderá visualizar em tempo real o comportamento do seu equipamento através de um display LCD e como distúrbios na rede podem influenciar no desempenho e eficiência do mesmo. Ressalta-se também a continuidade e melhoramento do trabalho de monografia do autor Eduardo Batista Donato, intitulado “*Wattímetro digital de baixo custo*”, 2006, Viçosa [13]. Sendo assim, nas seções subsequentes será mostrado que o algoritmo desenvolvido apresenta valores com baixo percentual de erro, diferenciando-se do trabalho supracitado por utilizar um microcontrolador com maior capacidade de memória e maior resolução para cálculos e, sobretudo, um sensor de corrente de efeito Hall.

2 *Materiais e Métodos*

2.1 *Abordagem Inicial*

Inicialmente, pode-se dizer que há duas possíveis maneiras para se realizar a medição das grandezas elétricas propostas por esse trabalho: digital e analógica.

Considerando-se a abordagem digital, é interessante frisar que, segundo o Teorema de Nyquist, o sinal deve ser amostrado com pelo menos o dobro da frequência do sinal de interesse [5]. Dessa forma, a frequência de amostragem utilizada será muito maior que a frequência de Nyquist, ficando restrita apenas a capacidade de processamento do microcontrolador. Essa abordagem será mais enfatizada nas subseções seguintes.

Por outro lado, o tratamento analógico dos sinais também pode ser feito. Entretanto, a medida que novos elementos vão sendo inseridos no circuito analisado, este começa a apresentar características mais complexas, tendo a necessidade da inserção de filtros e componentes atenuadoras, fugindo do escopo do trabalho.

Dessa forma, o processamento dos sinais será realizado de forma digital, sendo capaz de medir grandezas elétricas como tensão, corrente, potência ativa e aparente, e o fator de potência do circuito analisado e apresentando algumas delas num visor LCD 16x2.

2.2 *Proposta de Configuração*

Atualmente, com a expansão tecnológica e o grande uso de sistemas digitais, a aplicação de instrumentos tradicionais baseados no princípio de bobina móvel e imã permanente, se torna inviável, já que suas respectivas respostas em frequência não atendem a necessidade de projetos mais sofisticados. Dessa forma, uma solução mais interessante é uma proposta digital capaz de utilizar um conversor A/D para amostrar o sinal de tensão e corrente, e a partir destes calcular as outras grandezas elétricas envolvidas. A figura 6, ilustra como o problema será abordado.

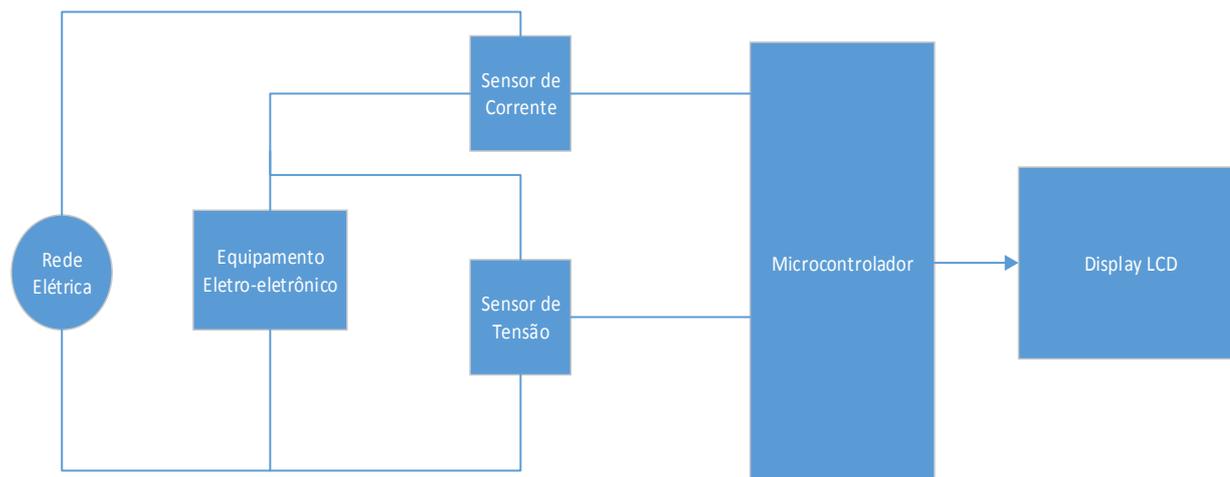


Figura 6 - Diagrama de blocos com a estrutura conceitual da proposta.

Num primeiro momento, surge a problemática de como fazer a coleta dos sinais de tensão e corrente. Como o módulo de tratamento dos dados se trata de um microcontrolador PIC, os níveis de tensão para essa classe de equipamento devem estar contidos no intervalo de 0 a 5V, uma vez que o PIC também não lê sinais negativos.

Os sinais de tensão e corrente passarão por um processo de aquisição, afim de serem tratados, para que possam finalmente serem processados pelo microcontrolador. Dessa forma, é necessário implementar sensores de tensão e corrente para coletar os dados. Em seguida, esses sinais serão condicionados, permitindo o processamento na sequência. A escolha dos sensores deve ser feita de forma minuciosa, levando-se em consideração requisitos de projeto como a faixa de operação do equipamento, a influência que este pode provocar na carga e a classe de exatidão. Em termos de engenharia, é impreterível implementar um equipamento viável e coerente a sua aplicação, seja ela simples ou mais dispendiosa.

2.2.1 Sensor de Tensão

Dentre as possíveis opções para resolução da situação adversa dos níveis de tensão, pode-se destacar:

1. **Transformador de Potencial (TP):** trata-se de um transformador cujo enrolamento primário é ligado em derivação com um circuito elétrico e cujo enrolamento secundário se destina a alimentar o subsistema de medição, controle ou proteção, geralmente com um potencial mais baixo.

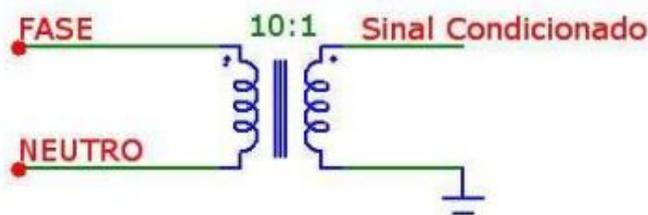


Figura 7 - Transformador de potencial.

2. **Divisor Resistivo:** Também pode-se adequar um sinal de tensão através da ligação de um circuito que tem por finalidade dividir a tensão a qual se quer medir. Este divisor consiste da associação de resistores para que a tensão aplicada à entrada desse circuito seja dividida entre seus componentes, obtendo-se assim na saída níveis de tensão adequados.

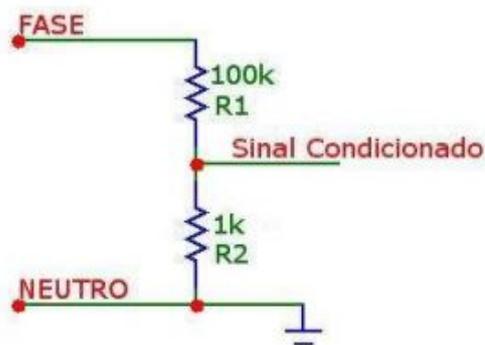


Figura 8 - Divisor resistivo.

2.2.2 Sensor de Corrente

Assim como os sensores de tensão, os sensores de corrente também devem adequar o nível de corrente medida para um nível que o módulo de aquisição possa ler esses valores. Dessa forma, dentre as diversas soluções, pode-se destacar:

1. **Transformador de Corrente:** O transformador de corrente é um dispositivo que transforma a corrente que circula em um enrolamento primário, através de um acoplamento magnético, em uma corrente induzida no secundário. Os transformadores de corrente têm a função de fornecer correntes proporcionais às medidas no circuito primário de potência, mas suficientemente reduzidas e isoladas galvanicamente de forma a possibilitar a medição a partir de instrumentos adequados [6]. É interessante acoplar no secundário do transformador um amperímetro, assim a corrente que circula

pelo circuito será medida de forma precisa. Apesar de ser uma forma eficiente de medição de corrente, fatores adversos como dimensões e preços elevados, prejudicaram sua utilização nesse trabalho.

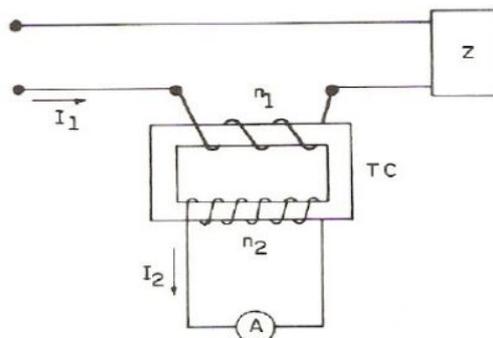


Figura 9 - Transformador de corrente [18].

2. **Resistor Shunt:** Essa técnica consiste em introduzir uma resistência de baixo valor em série com a carga. A intensidade da corrente é obtida pela lei de Ohm a partir da tensão medida nos terminais desse resistor. As vantagens de se utilizar esse método são o baixo custo e a relativa precisão. Entretanto, o resistor shunt é inadequado para aplicações que possuem elevadas correntes que provocam aquecimento no resistor e perda de potência considerável, juntamente com o problema da isolação elétrica na medida em altas tensões e alta frequência que produz o efeito pelicular [7].

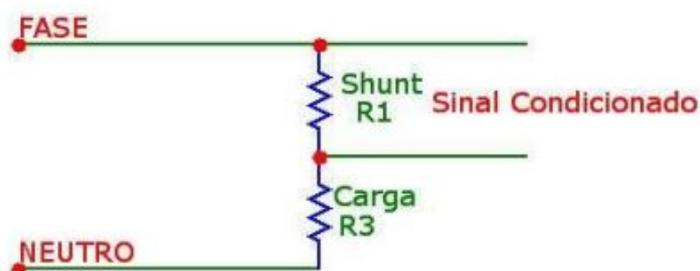


Figura 10 - Resistor Shunt.

3. **Bobina de Rogowski:** Trata-se de uma alternativa segura e confiável para medida de corrente elétrica. Consiste numa bobina enrolada num núcleo toroidal, que é colocado em torno do condutor. O campo magnético produzido pela corrente alternada no condutor induz uma tensão na bobina. Dentre as vantagens da bobina de Rogowski, pode-se citar a larga faixa de leitura em relação ao resistor *shunt*, medindo desde mA até kA. A bobina não apresenta histerese, já que seu núcleo é feito de material não

magnético. Apresenta boa linearidade, formato que facilita medições em lugares com acesso limitado, não possui contato físico com o circuito, baixo consumo e uma baixa variação do sinal de saída com a temperatura [8].

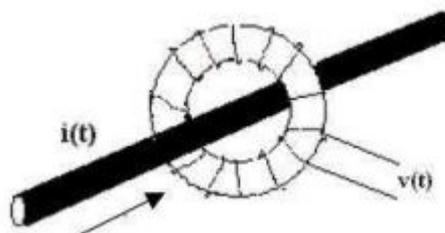


Figura 11 - Bobina de Rogowski [16].

4. **Sensor de Efeito Hall:** Os sensores de efeito Hall consistem basicamente numa pastilha retangular de material condutor, conduzindo corrente, posicionada em uma região de campo magnético para medir sua densidade de fluxo. Esse fenômeno pode ser visto na figura 12. Se há uma densidade de fluxo magnético B ortogonal a superfície de uma pastilha de espessura t , uma diferença de potencial V é induzida ao longo de sua largura, dada por:

$$V = \frac{R_h \cdot I \cdot B}{t} \quad (20)$$

Onde R_h é o coeficiente Hall, o qual é constante para um dado material a uma temperatura fixa [9]. Sendo assim, para uma corrente I e temperatura constante, a tensão V é proporcional a densidade de fluxo magnético B .

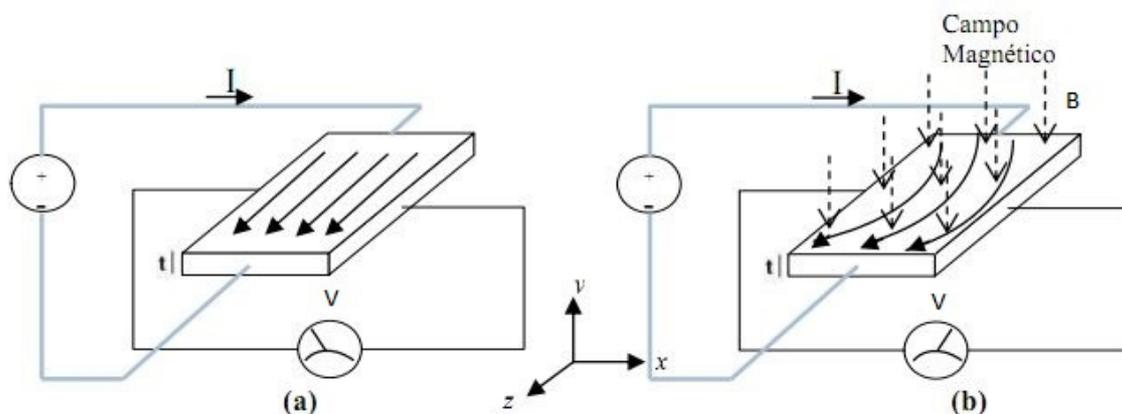


Figura 12 - Representação de um sensor de efeito Hall [17].

2.3 Implementação do Protótipo

Nesta seção será discutido qual foi a metodologia aplicada para implementação do protótipo, destringindo-se as funções para medida de tensão e corrente na carga, defasagem entre esses sinais, fator de potência e o respectivo triângulo de potências. Por conseguinte, as seções subsequentes tratarão da aquisição concomitante ao condicionamento e digitalização, processamento e visualização dos resultados.

2.3.1 Aquisição e Condicionamento dos Sinais de Tensão e Corrente

Nas subseções 2.2.1 e 2.2.2 discutiu-se diferentes métodos para aquisição dos sinais. Nos parágrafos seguintes será discutido quais sensores foram utilizados e porquê.

Inicialmente, para a aquisição do sinal de tensão optou-se pelo transformador de potencial comercial com valores nominais 110/220V no primário, e +15V, 0 e -15V no secundário. Juntamente com o fato de haver isolamento galvânica através deste transformador, ele também apresenta linearidade em relação a variação da tensão nos seus terminais e por sua largura de banda permitir o uso para medições em 60 Hz. A figura 13 mostra o gráfico desse transformador sendo testado na tensão de 220 V, alimentando uma carga de 1 k Ω .

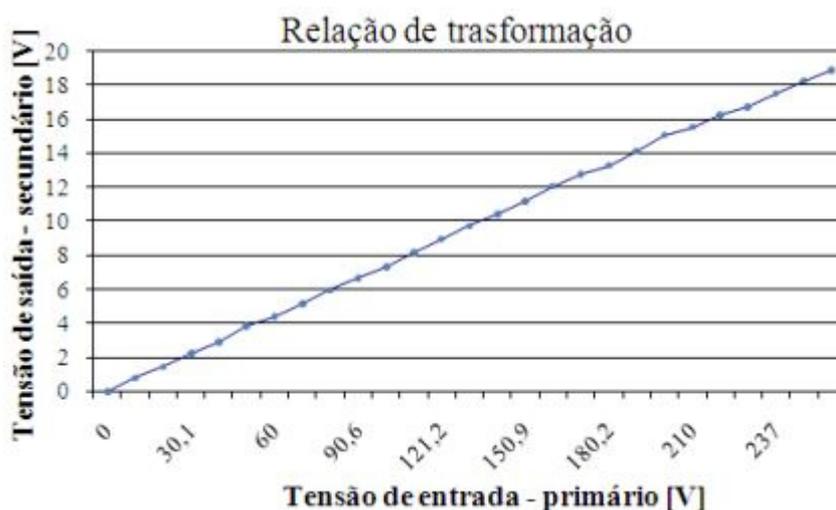


Figura 13 - Relação linear de transformação do sensor de tensão.

Por outro lado, para modificar a tensão de saída do secundário do transformador numa faixa aceitável a ser lida pela porta A/D do microcontrolador (0 a 5 Vpp), aplicou-se um divisor de tensão e um circuito somador/inversor que será discutido posteriormente. Essa configuração pode ser vista na figura 14.

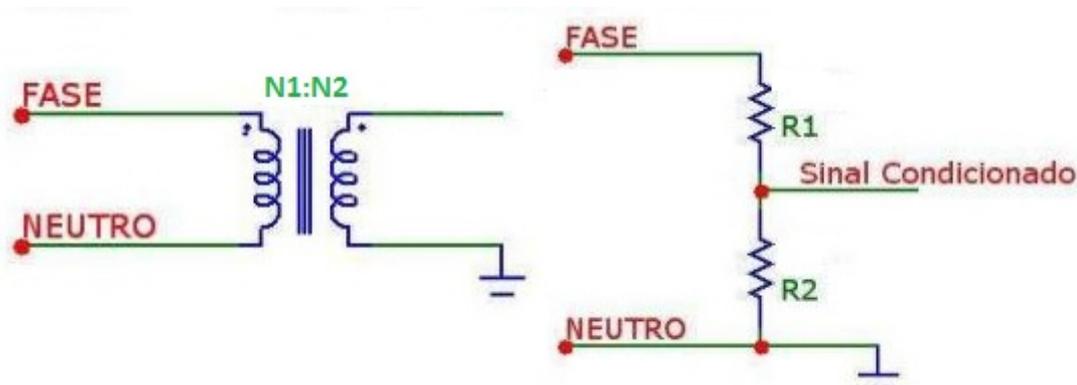


Figura 14 - Circuito do sensor de tensão.

O sensor de corrente utilizado foi o circuito do sensor Hall por apresentar características precisas de baixo offset. O circuito é composto por um caminho de condução de cobre localizado perto da superfície de encapsulamento, permitindo a linearidade do sistema. Excitando o circuito através de uma corrente que flui através desse caminho de cobre, gera-se um campo magnético que é notado pelo integrado CI Hall e convertido numa tensão proporcional [10] [11]. A precisão do dispositivo é otimizada a partir da proximidade do sinal magnético para o transdutor Hall.

Utilizou-se o circuito integrado ACS754 LCB 050 da *Allegro Microsystems*. A figura 15 ilustra esse dispositivo.

Este CI consiste num sensor de efeito Hall de alta precisão. O sensor é ligado em série com a carga através dos pinos 4 e 5. A alimentação do CI é feita nos pinos 1 e 2. No pino 3, obtém-se o sinal de saída corresponde à corrente na carga. Este sinal é linearmente proporcional à corrente consumida pela carga. A principal vantagem da aplicação desse dispositivo é que o mesmo dispensa o circuito somador implementado para o sensor de tensão. Isso é decorrente do fato que o sinal correspondente à corrente obtido na saída já se encontra deslocado de 2,5V. A faixa de corrente suportada por esse sensor varia de -50 a 50A.

Os terminais do caminho condutor são eletricamente isolados da saída do sensor. Dessa maneira, esse sensor de efeito Hall pode ser usado em aplicações que exigem isolamento

elétrico sem o uso de opto-isoladores ou outras técnicas de isolamento. Na figura 15 pode-se ver a sua configuração típica.

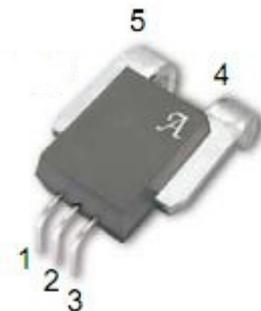


Figura 15 - Sensor Hall ACS754 LCB-050 [12].

Onde [12],

- I_P é a corrente que se quer medir;
- V_{out} é a saída de tensão proporcional a I_P ;
- Aplicação de um capacitor filtro entre os pinos 1 e 2.

A saída de tensão no pino 3 é dada por:

$$V_{out} = \frac{V_{CC}}{2} \pm 40 \text{ mV/A} \quad (21)$$

Tendo em vista a equação 21, a corrente na carga pode oscilar de -50 a 50A. Aplicando-se 5V na alimentação do CI, tem-se na saída o sinal variando de 0,5V a 4,5V.

Algumas características desse sensor são [12]:

- Largura de banda de 35 kHz;
- Caminho de sinal analógico de baixo ruído;
- Erro de 1,5% na saída a temperatura ambiente de 25°C;
- 100 $\mu\Omega$ de resistência interna;
- 3 kV_{rms} de isolamento entre os pinos 4/5 e 1/2/3;
- 5V alimentação simples;
- 40 mV/A sensibilidade de saída;
- Medição de corrente AC e DC.

Devido a pequena resistência interna, há uma perda ínfima de potência no CI, ratificando o uso dele nessa aplicação.

Finalmente, a partir dos sensores de tensão e corrente supracitados, serão medidos os respectivos sinais, e estes enviados pelas entradas analógicas do microcontrolador.

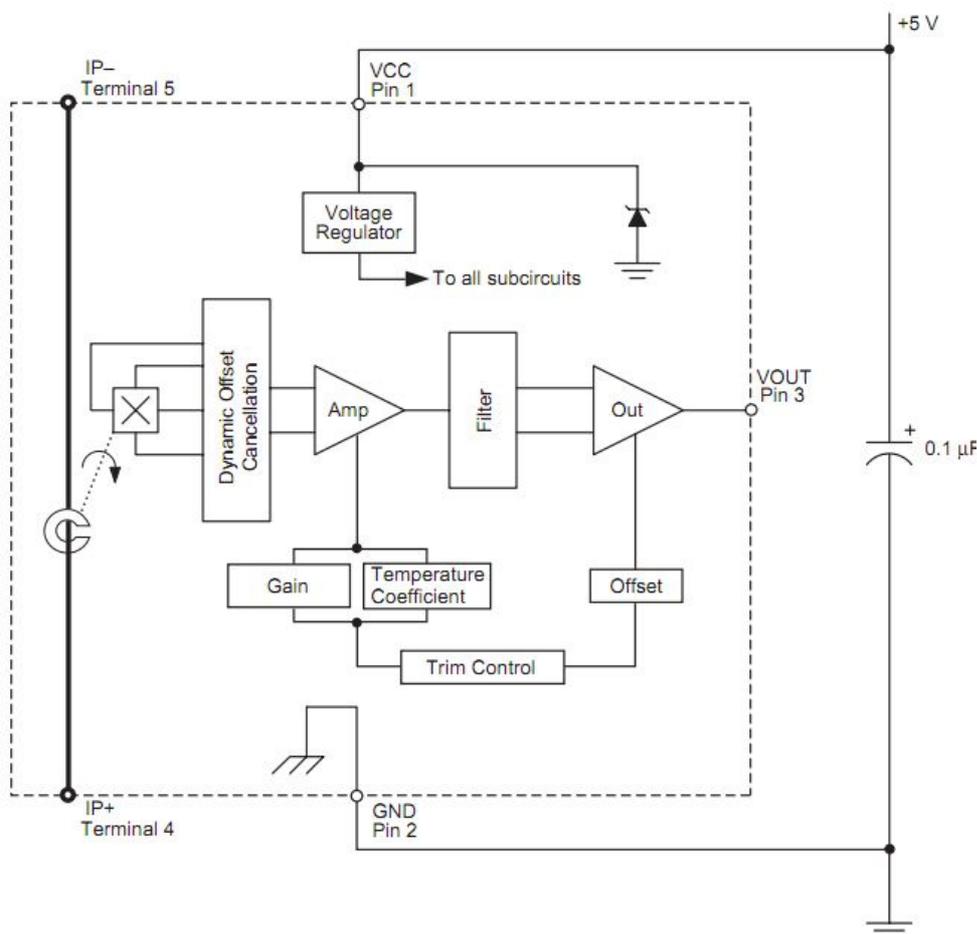


Figura 16 - Configuração típica do Sensor Hall ACS754 LCB-050 [12].

2.3.2 Tratamento da Curva de Tensão

O sinal de tensão após passar pelo circuito da figura 14 estará oscilando no intervalo de -2,5V a 2,5V, referenciado em 0V. Como já foi mencionado, a entrada do conversor A/D do microcontrolador é capaz de suportar valores de tensão na faixa de 0 a 5V. Dessa forma, foi necessário implementar um circuito somador/inversor para aumentar a referência do sinal em 2,5V. Na figura 17 é apresentado o circuito deslocador do sinal de tensão.

Inicialmente, o sinal de tensão proveniente do sensor de tensão é aplicado a um circuito buffer que tem a função de isolar o sensor, permitindo que ele seja conectado a qualquer outro tipo de circuito. O sinal Vcc disponibiliza a tensão contínua de 2,5V a ser somada ao sinal presente na saída do circuito buffer. Esses sinais são aplicados ao circuito somador. Como os

sinais aplicados a entrada inversora são somados e tem sua polaridade invertida, faz-se necessário a inversão do sinal resultante na saída do amplificador operacional. Assim, o sinal é aplicado na sequência a um estágio inversor de ganho unitário com a finalidade de deixá-lo na faixa de 0 à 5V.

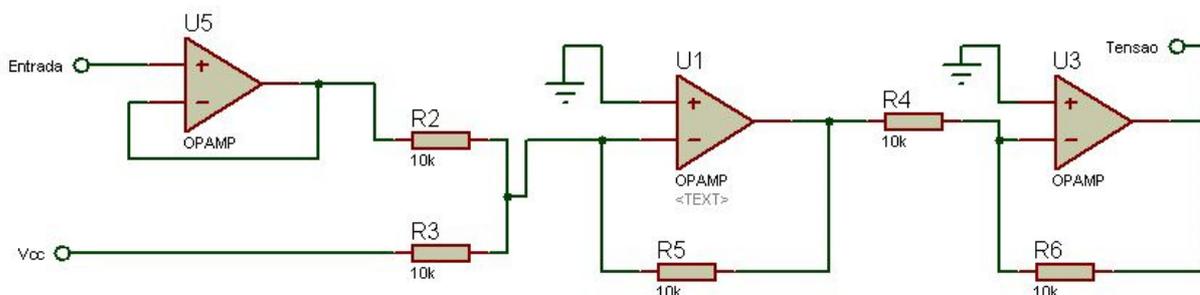


Figura 17 - Circuito somador/inversor do sinal de tensão.

2.3.3 Módulo de Processamento

O módulo consiste num microcontrolador PIC18F4550 que interage com o restante do circuito durante seu funcionamento. Este módulo é responsável pela discretização dos sinais de tensão e corrente que é feita através do conversor A/D do microcontrolador. Assim, os sinais são processados e em seguida mostra-se os dados de medição num display LCD.

2.3.4 Conversão Analógico/Digital

Os conversores A/D padrão dos PICs são implementados utilizando a técnica de aproximação sucessiva, com resolução máxima de 10 bits, *clock* selecionável pelo usuário e múltiplas entradas multiplexadas [11]. Deve-se ressaltar também que quando se trabalha com os conversores A/D internos dos PICs, a impedância máxima da fonte de sinal analógico deve ser de 10 k Ω .

Por conseguinte, após a aquisição e condicionamento dos sinais de tensão e corrente como já foi mencionado, estes chegam às entradas analógicas utilizadas para a conversão. Vale ratificar que a amplitude dos sinais está contida na faixa de 0 a 5V. Dessa maneira, os sinais analógicos são convertidos em digital através do conversor interno A/D do PIC18F4550. O valor de cada ponto é armazenado pelo conversor numa variável de comprimento fixo. Neste caso, como o conversor é de 10 bits, pode-se armazenar valores de 0 a 1023.

Por outro lado, o conversor interno do PIC é capaz de converter apenas um sinal por vez. O tempo de aquisição faz com que seja necessário a realizar duas amostragens de tensão

para cada amostragem de corrente para não causar defasagem nos sinais. Portanto, para minimizar a aquisição de erros na conversão dos sinais de tensão e corrente adotou-se a seguinte estratégia de cálculo: Inicialmente amostra-se a tensão, em seguida a corrente e novamente a tensão. A figura 18 ilustra o processo supracitado.

Nessa situação, tem-se as medidas de tensão $v_a(i)$ e $v_b(i)$. Daí é tirado a média aritmética entre os valores de tensão, dado pela equação 27.

$$m(i) = \frac{v_a(i) + v_b(i)}{2} \quad (22)$$

Implementada a lógica supracitada de cálculo, tem-se que a média das duas amostragens de tensão referentes aos valores anteriores e posteriores à amostragem da corrente, faz com que $m(i)$ e esteja em fase com $i(i)$.

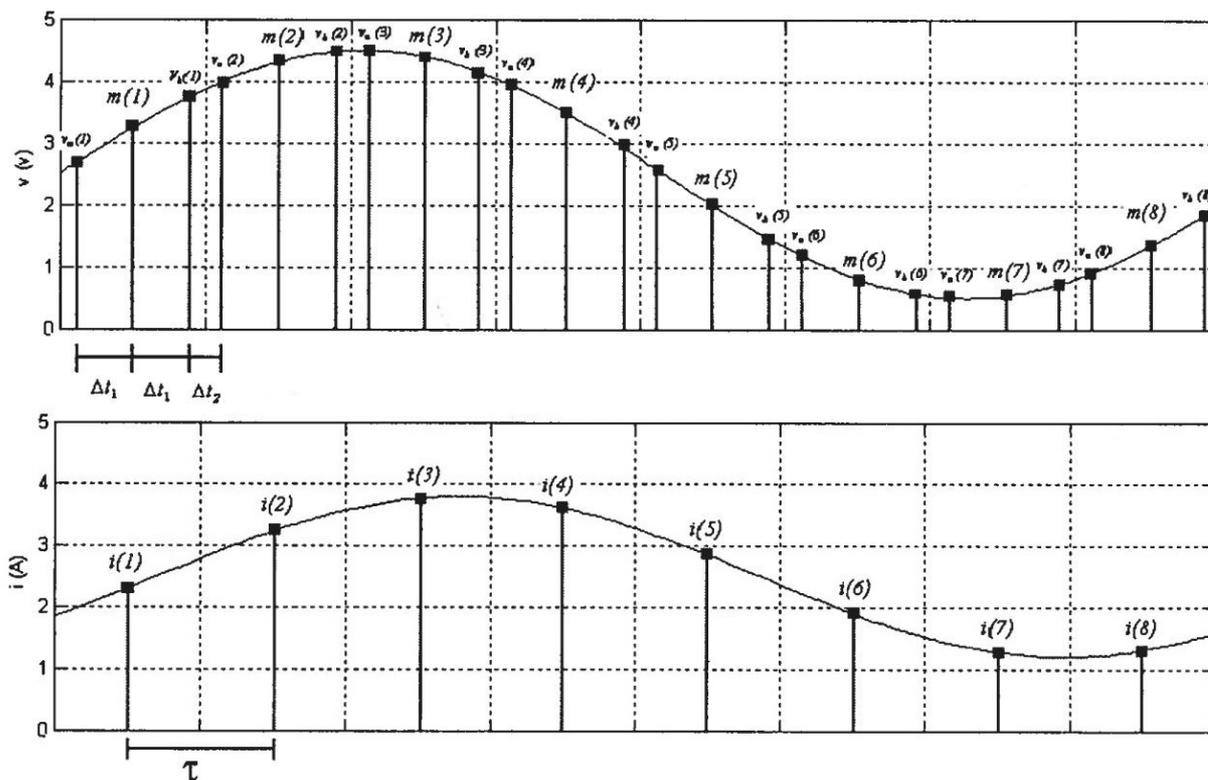


Figura 18 - Amostragem dos sinais de tensão e corrente na carga.

Onde:

- Δt_1 é o tempo de aquisição (s);
- Δt_2 é o tempo gasto nos cálculos (s);
- E τ é igual a $2\Delta t_1 + \Delta t_2$, ou seja, o período de amostragem (s).

2.3.5 Algoritmo do Processamento

A partir da amostragem de cada sinal e cálculo da média das medidas de tensão (equação 22), há a necessidade de subtrair o valor correspondente à componente contínua somada ao sinal de tensão e a mesma contida no sinal de corrente para que os mesmos possam ser devidamente utilizados nos cálculos de potência e fator de potência.

Os sinais foram amostrados numa frequência de 4983,4 Hz. Esse valor de frequência é justificado pelo Teorema de Nyquist para se garantir a reconstrução dos sinais, já que a frequência da rede é de 60 Hz. Esse valor foi obtido a partir de diversos testes empíricos, levando-se em consideração à falta de memória do microprocessador. Os sinais foram armazenados num vetor de 83 posições cada.

A realização dos cálculos de potência e fator de potência foi feita a partir do método de batelada.

Dessa forma, a tensão *rms* e a corrente *rms* para o caso discreto são dadas por [15]:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N v_k^2} \quad (22)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_k^2} \quad (23)$$

Portanto, após a amostragem dos sinais de tensão e corrente concomitante as equações (22) e (23), tendo em vista que $N = 83$, a potência aparente S pode ser calculada pela equação (11), ou seja:

$$S_{carga} = V_{rms} I_{rms} = \left\{ \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N v_k^2} \right\} \left\{ \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_k^2} \right\} \quad (24)$$

Tendo em vista a equação (9) e cada valor pontual de tensão v_k e corrente i_k dos sinais amostrados, pode-se calcular a potência média consumida pela carga no caso discreto:

$$P_{carga} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N v_k i_k \quad (25)$$

Em seguida, repete-se esses dois procedimentos vinte vezes tirando a média desse resultado final, afim de se obter dados com o menor erro possível.

$$S_{final} = \frac{S_{carga}}{20} \quad (26)$$

$$P_{final} = \frac{P_{carga}}{20} \quad (27)$$

Finalmente, a partir dos valores da potência ativa e aparente e da equação 13, pode-se facilmente calcular o fator de potência ϕ da carga:

$$FP_{final} = \frac{P_{final}}{S_{final}} \quad (28)$$

O fluxograma da figura 19 descreve a lógica do algoritmo utilizado na programação do microcontrolador, evidenciando o processo de entrada e saída de dados.

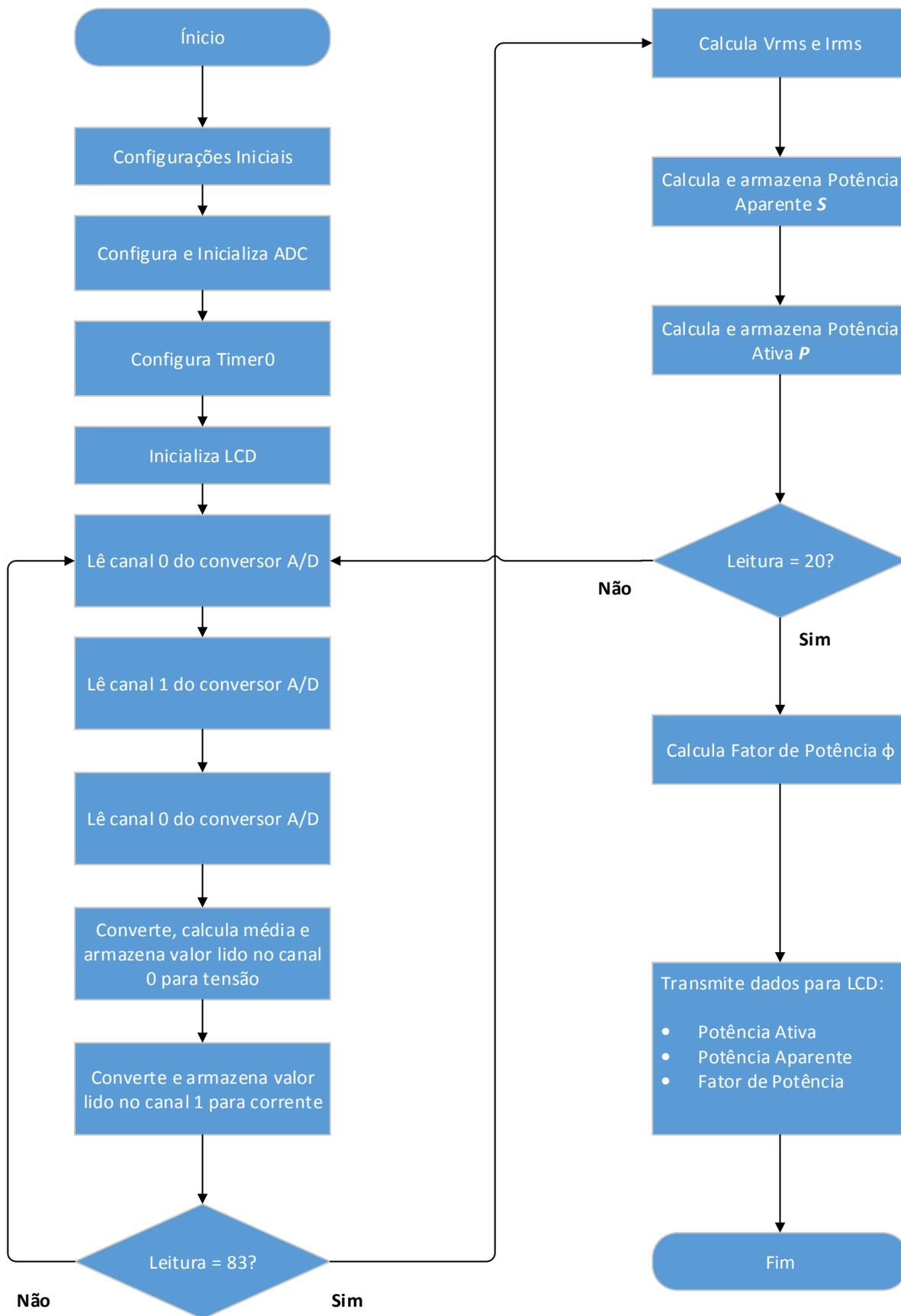


Figura 19 - Fluxograma da execução do programa no PIC18F4550.

3 Resultados e Discussões

Após o estudo minucioso de cada parte do protótipo, relevando-se os prós e contras dos módulos que o compõem, é possível concluir a montagem do projeto. A figura 20 ilustra o esquema completo de ligação do circuito do multimetror de grandezas elétricas.

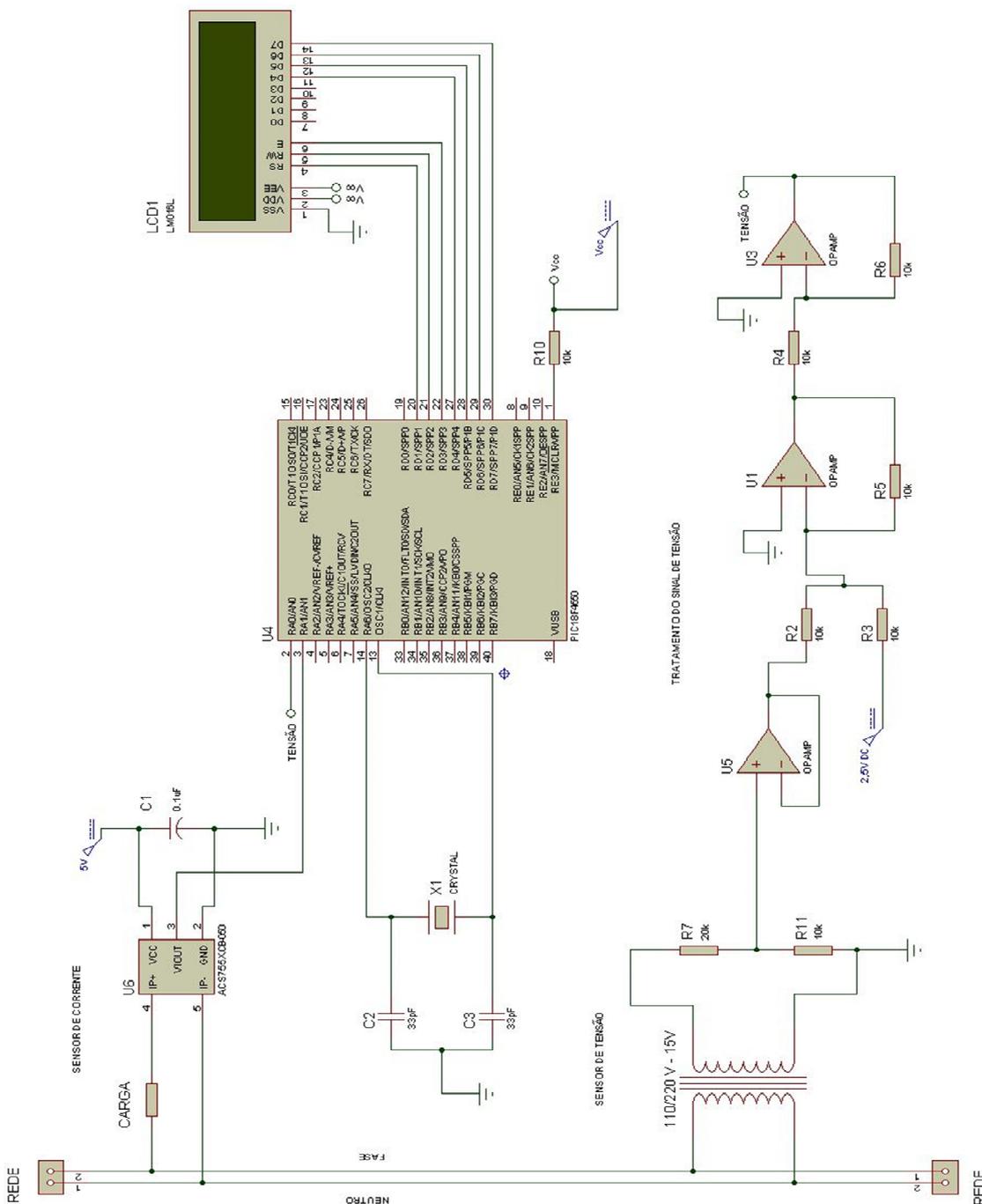


Figura 20 - Esquema do Multimetror de Grandezas Elétricas.

Por conseguinte, num primeiro momento, com intuito de verificar a veracidade dos dados obtidos, comparou-se os valores da simulação do presente trabalho com a monografia intitulada “*Wattímetro Digital de Baixo Custo*” [13]. As tabelas 1, 2 e 3 apresentam os valores ideais e medidos, e o respectivo erro. Os ângulos de defasagem utilizados foram de 0°, 30°, 45° e 60°.

Tabela 1 - Medição de Potência Ativa.

Potência Ativa Ideal (W)	Potência Ativa Medida (W)	Erro (%)
0,433	0,431	0,462
2,250	2,261	0,489
8,000	8,002	0,025
8,838	8,831	0,079

Tabela 2 - Medição de Potência Aparente.

Potência Aparente Ideal (VA)	Potência Aparente Medida (VA)	Erro (%)
0,500	0,501	0,200
4,500	4,492	0,178
8,000	8,002	0,025
12,500	12,489	0,088

Tabela 3 - Medição de Fator de Potência.

FP Ideal	FP Medido	Erro (%)
0,866	0,860	0,661
0,500	0,503	0,668
1,000	1,000	0,000
0,707	0,707	0,014

Por outro lado, a tabela 4 compara os valores de erro obtidos, sendo que a variável Erro 1 corresponde ao erro obtido pela monografia “*Wattímetro digital de baixo custo*”, enquanto que o Erro 2 corresponde ao erro obtido pelo presente trabalho.

Tabela 4 - Comparação entre os erros obtidos.

Potência Ativa		Potência Aparente		Fator de Potência	
Erro 1 (%)	Erro 2 (%)	Erro 1 (%)	Erro 2 (%)	Erro 1 (%)	Erro 2 (%)
0,693	0,462	2,000	0,200	100,000	0,661
0,444	0,489	2,000	0,178	12,000	0,668
2,000	0,025	2,000	0,025	12,000	0,000
1,222	0,079	2,000	0,088	1,839	0,014

De acordo com os erros percentuais 1 e 2 obtidos nas tabelas 3, 4 e 5, percebe-se que o algoritmo aplicado tem seu funcionamento constante e dentro de uma faixa de flutuação bem pequena. Observa-se que o Erro 1 é mais acentuado quando comparado ao Erro 2, uma vez que no trabalho de monografia “*Wattímetro Digital de Baixo Custo*” o autor utilizou em seu algoritmo variáveis do tipo inteira (**int**). A discrepância que esse tipo de variável pode gerar em sistemas que necessitem de uma certa exatidão nos seus cálculos é alta, porque as operações que geram valores com casas decimais tem seus resultados truncados. Dessa maneira, são descartadas informações de grande valia matemática. Por outro lado, os erros mais acentuados obtidos pelo autor foram no fator de potência. Novamente foram utilizadas variáveis do tipo inteira, aplicando uma lógica matemática que consistia em dividir a potência aparente por cem, antes de fazer a divisão entre potência ativa e aparente, e em seguida multiplicava-se o fator de potência por cem, afim de se obter o resultado final. Entretanto, é possível notar que o valor do fator de potência se depreciava mais a medida que a diferença entre a potência ativa e aparente era pequena, ou seja, para defasagens mais próxima de zero, o erro é muito grande.

Por conseguinte, esse problema foi contornado utilizando-se variáveis do tipo *float* concomitante a um microcontrolador de 16bits de alto processamento.

Finalmente, com intuito de agregar valor à simulação e ao presente trabalho, implementou-se a montagem prática do protótipo. O esquema da montagem é ilustrado na figura 21.

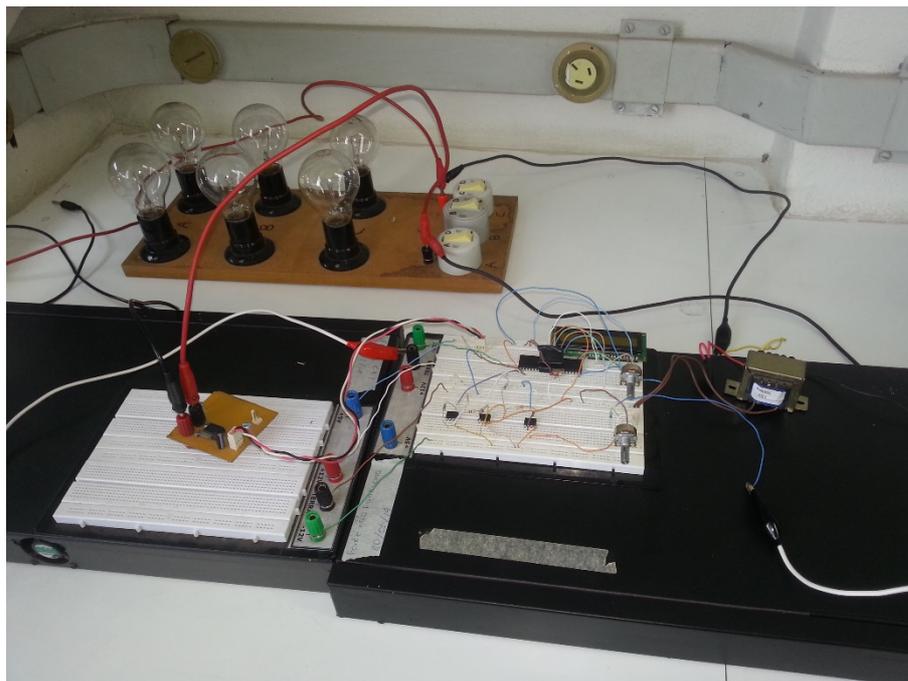


Figura 21 - Protótipo do Multimetro de Grandezas Elétricas.

Inicialmente, os testes foram realizados num banco de Lâmpadas de 127V/100W. Mediu-se a defasagem entre os sinais de saída do sensor de tensão e corrente, e também os valores de saída dos mesmos. A figura 22 ilustra o teste feito.



Figura 22 - Sinal de saída dos sensores de tensão (Curva Amarela) e corrente (Curva Verde).

Nota-se que o sensor de tensão está implementado corretamente, já que a saída (em amarelo) apresenta um valor de 5Vpp. A saída do sensor de corrente (em verde), por sua vez, também está coerente, ressaltando-se o offset inserido pelo próprio sensor.

Contudo, quando esses dados são aplicados às entradas do PIC, os resultados amostrados no display LCD divergem em relação ao ideal. Dessa forma, a parte prática não foi totalmente implementada, sendo proposta de uma futura continuidade do trabalho.

4 Conclusão

Neste projeto foi possível implementar um protótipo digital capaz de mensurar as potências e fator de potências em cargas de baixa e média potência com uma alta frequência de amostragem que proporciona uma análise dos dados a partir da influência de harmônicas na rede. Pôde-se aprimorar o trabalho proposto na monografia “*Wattímetro digital de baixo custo*”, obtendo-se assim resultados de potência ativa e aparente e fator de potência com menor erro, e mais rapidez de processamento. Muito embora a parte prática do módulo de processamento não apresentou resultados coerentes, acredita-se que o erro se deve a aplicação de um sensor de corrente de variações muito sensíveis, já que a corrente máxima era de 50A e os testes estavam sendo realizados para uma carga de corrente nominal de aproximadamente 4A. Com isto, a probabilidade do erro inferido é alta, já que está sendo utilizado o início da escala do sensor. Sendo assim, o tempo de amostragem do PIC não mensurava essas pequenas variações de tensão que correspondiam a determinados valores de corrente para frequência de amostragem aplicada. A implementação de um sensor de corrente de menor amplitude concomitante a uma frequência de oscilação adequada deve solucionar essa problemática, já que os valores de tensão eram amostrados corretamente.

Finalmente, como propostas de continuidade, pode-se finalizar a construção prática do Multimetro de Grandezas Elétricas, e implementar-se uma comunicação USB para possíveis análises dos valores adquiridos.

Não obstante, ressalta-se a necessidade de se utilizar um componente com capacidade de processamento maior, já que o PIC18F4550 utilizado nesse trabalho esgotou praticamente toda sua memória computacional nas condições de cálculo supracitadas nas seções anteriores. A aplicação do chip CS5463 fabricado pela Cirrus Logic com a função de processamento dos dados é uma solução viável. Este componente integra dois conversores A/D, uma máquina para cálculos matemáticos, um conversor energia-frequência e uma máquina serial de interface. Sua principal aplicação sugerida é em medição de potência e energia em sistemas de alimentação. Por fim, haveria apenas a necessidade de se implementar um bloco que contém um microcontrolador capaz de fazer a comunicação USB.

A implementação de um display LCD *touch screen* também é interessante, proporcionando ao usuário um designer mais sofisticado e facilidade no manuseio.

Referências Bibliográficas

- [1] Pomilio, J. A. (2007). Pré-reguladores de fator de potência. Material da disciplina “Fontes Chaveadas”. UNICAMP – 2007.
- [2] Resolução ANEEL 456/2000 atualizada.
- [3] Johnson, D. E., Hilburn, J. L., Johnson, J. R. (1994). Fundamentos de Análise de Circuitos Elétricos. Ed LTC - 2000.
- [4] Pereira de Souza, R. (2008). Desenvolvimento de um analisador de qualidade de energia via USB. Trabalho de monografia. Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Viçosa – 2008.
- [5] Diniz, P. S. R (2004). Processamento digital de sinais. Ed. Bookman – 2004.
- [6] Filho, S. de M. (1997). Medição de energia elétrica. Ed. Guanabara Dois - 1997.
- [7] Ortiz, É. B. (2007). Interface de controle e caracterização de MicroSQUIDs histeréticos. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - 2007.
- [8] Gouveia, S. C. M. (2013). Transdutor de corrente tipo bobina de Rogowski. Trabalho de monografia. Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – 2013.
- [9] Paun, M. A., Salesse, J., Kayal, M. (2012). Temperature considerations on Hall Effect sensors current-related sensivity behavior. IEEE Electronics, Circuits and Systems (ICECS), 19º IEEE Conferência Internacional em Sevilla - 2012.
- [10] Suela, F. (2013). Tarifador Digital de Energia Elétrica. Trabalho de monografia. Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Viçosa – 2013.
- [11] Nicácio, J. V. (2008). Sistema de automação aplicado á medição e racionalização do consumo de energia elétrica. Trabalho de monografia. Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Viçosa – 2008.
- [12] Datasheet do Sensor de Corrente ACS754xCB-050.
- [13] Donato, E. B. (2006). Wattímetro Digital de Baixo Custo. Trabalho de monografia. Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Viçosa – 2006.
- [14] Close, C. M. (1972). Circuitos Lineares. Rio de Janeiro: LTC, 1972. v.1 e 2.
- [15] Pomilio, J. A., Deckmann, S. M. (2007). Distorções Harmônicas: Causas, efeitos e soluções. Material da disciplina “Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica”. UNICAMP – 2007.
- [16] Bittencourt, J. D. A. (2008). Medidor de consumo microcontrolado. Trabalho de monografia. Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – 2008.
- [17] Nunes, S. A. (2009). Multimetro eletrônico para medição e monitoramento de grandezas elétricas em sistemas elétricos residenciais. Trabalho de monografia. Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Rio de Janeiro – 2009.
- [18] Vieira, F. P. (2009). Instrumento microprocessado para medição de potência ativa, reativa e fator de potência. Trabalho de monografia. Engenharia Elétrica – Universidade de São Paulo – 2009.