

Revista da Graduação

Vol. 4

No. 2

2011

15

Seção: FACULDADE DE ENGENHARIA

Título: Projeto e implementação de um protótipo de registrador de grandezas elétricas

Autor: Vagner Guadagnin e Júlio César Marques de Lima

Este trabalho está publicado na Revista da Graduação.

ISSN 1983-1374

<http://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/graduacao/article/view/10078/7111>

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE REGISTRADOR DE GRANDEZAS ELÉTRICAS

*Vagner Guadagnin
Júlio César Marques de Lima*

Resumo

A concessionária fornecedora de energia elétrica tarifa o cliente de forma proporcional ao seu consumo, o qual está diretamente relacionado com a carga instalada. Tornando possível mensurar a potência consumida, tal como analisar o perfil das cargas instaladas no cliente, este trabalho propõe o desenvolvimento de um equipamento registrador de grandezas elétricas. Através de sondas de corrente e tensão ligadas ao sistema elétrico, o equipamento proposto calcula grandezas elétricas como: tensão, corrente, potência ativa, potência aparente, potência reativa e fator de potência. Para realizar os cálculos, o protótipo utiliza o microcontrolador LPC2378, fabricado pela NXP Semiconductors. As métricas do sistema em análise, podem ser visualizadas em um display de cristal líquido, ou armazenadas em memória para posterior análise em um computador. Traçou-se a curva de carga a partir de medidas realizadas em um imóvel residencial, a qual demonstrou coerência com a carga instalada. Também a título de validação, submeteu-se o protótipo à comparação com o equipamento existente no mercado, modelo MARH-21 fabricado pela empresa RMS Sistemas Eletrônicos, onde verificou-se equivalência entre os resultados. Desta forma o protótipo proposto neste trabalho, apresenta-se como uma alternativa tecnicamente viável, para a avaliação de sistemas elétricos.

Palavras-chave: grandezas elétricas; microcontrolador; curva de carga; memória.

PROJECT AND IMPLEMENTATION OF A PROTOTYPE OF POWER ELECTRICAL MEASUREMENT SYSTEM

*Vagner Guadagnin
Júlio César Marques de Lima*

Abstract

The Electric Supplier charges the clients proportional to the demand, which is related to the total load installed. This work hereby described proposes an equipment to measure the consumed power, as well as the characteristics of the load. Throughout current and voltage sensors connected to the electrical system, the equipment calculates: voltage, current, active power, reactive power, apparent power and power factor. In order to calculate these values the device uses an ARM7 microcontroller manufactured by NXP Semiconductors (LPC2378). The measures can be visualized in a liquid crystal display, or stored in a non-volatile memory to latter analysis. This work shows a study about the load curve of an apartment, the results confirm the expected values. The developed equipment has been successfully validated with the MARH-21 Power Analyzer, manufactured by RMS Sistemas Eletrônicos. Thus the system proposed in this work is proved to be efficient on the electrical system analysis.

Key-words: electrical magnitudes; microcontroller; load curve, memory.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de uma nação esta diretamente interligado com seu consumo de energia [1]. A crescente demanda por energia elétrica exige uma constante evolução nos sistemas de geração, transmissão, distribuição e gerenciamento da energia elétrica. Empresas especializadas se responsabilizam pelo fornecimento de energia elétrica, tarifando o serviço de maneira proporcional à quantidade de energia consumida, a qual está diretamente relacionada com a carga instalada no cliente.

Conforme Sadiku [2], potência é a grandeza elétrica mais importante em concessionárias de energia elétrica, sistemas eletrônicos e sistemas de comunicação. Equipamentos em geral trabalham com a transmissão de potência de um ponto a outro, e estes são classificados em função da quantidade de potência que necessitam.

Equipamentos registradores de grandezas elétricas podem ser utilizados para medir potência em sistemas elétricos como: geração, consumo, distribuição e circuitos de alimentação de máquinas elétricas em geral. Tais equipamentos podem ser eletromecânicos ou digitais. Para realizar análise de características elétricas em um sistema, é comum o uso de equipamentos digitais, sendo estes encontrados no mercado com diferentes configurações e facilidades, conforme necessidades do cliente.

Em instalações elétricas industriais, é comum grande parte das cargas serem de perfil indutivo, as quais consomem dois tipos de potência elétrica: potência reativa, necessária para manter o campo eletromagnético em equipamentos como motores e reatores e; potência ativa, responsável para produzir, dentre outras aplicações, calor, luz e movimento. Neste contexto, é necessário o uso de equipamentos que meçam tanto a potência ativa, quanto a potência reativa. Fator de potência é a grandeza elétrica utilizada para avaliar os níveis de potência reativa consumidos pelo cliente. Se o cliente ultrapassar os limites de fator de potência, estipulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), multas poderão ser atribuídas ao mesmo.

A partir das grandezas elétricas como: tensão, corrente, potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência, é possível realizar uma avaliação de sistemas elétricos. Nesse contexto, o presente trabalho objetiva o desenvolvimento de um equipamento registrador de grandezas elétricas, que através de sondas de corrente e tensão, calcule métricas úteis para análise de sistemas elétricos.

O trabalho propõe a aquisição dos sinais elétricos, utilizando transformadores de corrente e tensão, os quais são responsáveis por reduzir a amplitude dos sinais, e isolar o equipamento do sistema elétrico. Após o condicionamento dos sinais, estes serão entregues a um microcontrolador LPC2378, o qual fará os cálculos e o tratamento dos dados. O usuário poderá em tempo real, visualizar os resultados em um display de cristal liquido, ou, configurar o analisador de energia, fazendo que o mesmo passe a gravar os resultados em um cartão de memória do tipo SDcard, podendo os dados serem lidos e analisados em um computador qualquer.

O presente trabalho é composto por três partes. A primeira demonstra o panorama geral sobre o tema a ser abordado, como também o referencial teórico utilizado no mesmo. A segunda parte descreve a metodologia utilizada no desenvolvimento da proposta, possibilitando a reprodução da mesma. Na parte final são apresentados os resultados experimentais e as conclusões tomadas sobre o trabalho.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

As informações fornecidas neste capítulo são de extrema importância para a compreensão do trabalho. Aqui serão abordados temas referentes a sistemas elétricos de potência, conceitos de energia elétrica, processamento digital de sinais, normas referentes a medidores de energia e principais características do microcontrolador utilizado.

Conforme demonstrado na Equação (2.1), Sadiku [2] define potência instantânea absorvida por um elemento como sendo o produto da tensão instantânea aplicada no elemento pela corrente instantânea que passa pelo mesmo. A unidade de medida para potência é o Watt (W). Conforme definido pela norma IEEE 1459-2000 [4] e representado na Equação (2.2), a média da potência instantânea em um determinado período é denominada como potência média. Potência média pode ser denominada como a potência consumida por uma carga puramente resistiva, uma vez que cargas reativas não consomem potência média.

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (2.1)$$

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t) dt \quad (2.2)$$

Onde, $p(t)$ é a potência instantânea, $v(t)$ é a tensão instantânea, $i(t)$ é a corrente instantânea, T é o período e P é a potência ativa média.

Conforme definido na norma [4], e demonstrado na Equação (2.3), o produto da raiz média quadrática (RMS) da tensão, pela raiz média quadrática da corrente aplicadas a um elemento, resulta na grandeza elétrica denominada potência aparente (S), cuja sua unidade de medida é o Volt-Ampère (VA). Segundo [2], potência aparente, em analogia a circuitos de corrente contínua, é o produto da tensão pela corrente entregue a um elemento, e os valores de tensão e corrente RMS, equivalem aos valores que entregam a mesma potência em corrente contínua, a uma carga puramente resistiva, conforme Equações (2.4) e (2.5), definidas em [2].

$$S = V \cdot I \quad (2.3)$$

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T v(t)^2 dt} \quad (2.4)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i(t)^2 dt} \quad (2.5)$$

Onde, S é a potência aparente, V é a tensão RMS e I é a corrente RMS.

Em Melo [11] é definida a Equação (2.6), utilizada para o cálculo da potência reativa (Q). Melo também define sua utilização apenas para os casos em que potência ativa e potência aparente tenham sido obtidas através das respectivas Equações (2.2) e (2.3). A unidade de medida da potência reativa é o Volt-Ampère Reativo (VAR), correspondente a potência consumida por cargas reativas.

Conforme [2], a grandeza elétrica definida como fator de potência (FP), é o cosseno da diferença de fase entre a tensão e a corrente, sendo também, o ângulo da impedância de carga. Para o caso de fator de potência unitário, temos que o processo de transferência de energia é integral, ou seja, a potência ativa transmitida é equivalente a potência aparente, conforme demonstrado na Equação (2.7) definida em [4].

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.6)$$

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.7)$$

Onde Q é a potência reativa e FP é o fator de potência.

A forma mais comum utilizada para representação das potências, e do ângulo da impedância de carga, é denominada de triângulo de potências, cuja representação é demonstrada na Figura 2.1.

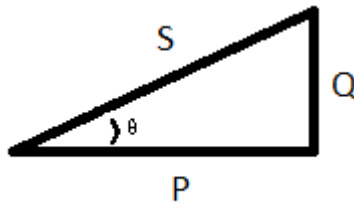


Figura 2.1. Representação do triângulo de potências.

Tornando possível a futura continuidade deste trabalho, visando o desenvolvimento do cálculo das componentes harmônicas do sistema, o trabalho tomou como base parâmetros definidos pela norma IEC 61000-4-7 [5], a qual trata de técnicas de medição a serem empregadas por equipamentos que mensuram tensão e corrente em faixas de frequências que variam de 0 Hz a 3000 Hz, espectro presente em sistemas que operam na faixa de frequência de 50 ou 60 Hz. No presente contexto, a norma define que equipamentos analisadores e medidores de energia devem levar em consideração até a quinquagésima harmônica presente na rede, a qual situa-se frequência de 3000 Hz. Conforme o teorema de Nyquist, para reproduzir fidedignamente um sinal analógico amostrado digitalmente, a frequência de amostragem do mesmo, deve ser no mínimo duas vezes superior à frequência do sinal original. Portanto, a frequência de amostragem mínima na qual opera o conversor analógico-digital (A/D) é 6000 Hz. Outra definição contida na norma, específica o número mínimo de ciclos a ser amostrado sobre a frequência fundamental, definindo que em um sistema operando a 50 Hz, 10 é o número mínimo de ciclos a ser amostrados. Para um sistema operante em 60 Hz, 12 é o número mínimo de ciclos. Visando tornar o analisador de energia desenvolvido versátil o suficiente para operar em ambas as frequências fundamentais, 12 é o número mínimo de ciclos a ser adotado.

A norma IEEE 1459-2000 [4], trata de sistemas monofásicos e trifásicos com tensões e correntes senoidais e não senoidais, além de sistemas trifásicos equilibrados e desequilibrados. Nela estão definidas as equações utilizadas para o cálculo do triângulo de potência demonstrado na Figura 2.1. As Equação utilizadas neste trabalho, conforme definido em Melo [11], e demonstradas em [4], pertencem ao grupo de análise combinada, ou seja, são consideradas conjuntamente, as influências das componentes harmônicas associadas a componente a fundamental. Segundo [11], outros grupos seriam o de análise fundamental, onde apenas a influência da componente fundamental é considerada. Existe também, o grupo não fundamental, onde apenas as influências das componentes harmônicas e contínuas são levadas em consideração.

Segundo manual de instruções [8] fornecido pelo fabricante NXP Semiconductor, o microcontrolador LPC2378 AMR7 utilizado no projeto, é baseado

na arquitetura *Reduced Instruction Set Computer* (RISC) de 32 bits. Este microcontrolador alia alto desempenho com baixo consumo de energia, por esta razão, pode ser alimentado pelo próprio circuito que está sendo aferido. O LPC2378 possui um conversor A/D de 8 canais com entradas de 0 V a 3,3 V, adequado para quantização dos sinais de corrente e tensão de sistemas elétricos trifásicos. O microcontrolador será utilizado integrado a plataforma de desenvolvimento fornecida pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Esta plataforma contém as interfaces necessárias para o correto funcionamento dos periféricos embarcados no microcontrolador.

Em [6], Tambara apresenta um projeto de instrumentação para medição de corrente alternada. Tambara [6] condiciona o sinal a ser discretizado, com a utilização de filtros passa baixa que inibem as frequências de maior ordem presentes no sinal. Este método pode ser utilizado em sistemas onde os componentes harmônicos não são considerados. Em [7], tem-se a proposta de implementação de um analisador de energia utilizando o circuito integrado (CI) ADE7756, fabricado pela empresa *Analog Devices*. Este CI é conectado a um microcontrolador PIC16C63, ele possui duas interfaces para entrada dos sinais de tensão e corrente. Internamente, o integrado realiza o cálculo da energia ativa consumida pelo sistema. O resultado pode ser acessado por meio de uma interface serial. Mello em [11], propõe o estudo e implementação da norma [4], calculando a intensidade de distorções harmônicas.

Neste contexto, este trabalho se difere de [7], por utilizar um microcontrolador para realizar os cálculos. Esta abordagem torna o protótipo mais flexível para possíveis melhorias no algoritmo, além de permitir a adição de novas funcionalidades ao projeto. A próxima seção deste trabalho aborda a metodologia utilizada, seguida por uma seção onde constam os resultados obtidos através da confecção de um protótipo. Por fim, serão apresentadas as conclusões do trabalho.

3. METODOLOGIA

Neste item será definida a abordagem tomada no desenvolvimento deste trabalho. Para facilitar a compreensão do projeto, a Figura 3.1 representa na forma de diagrama em blocos a estrutura do trabalho proposto.

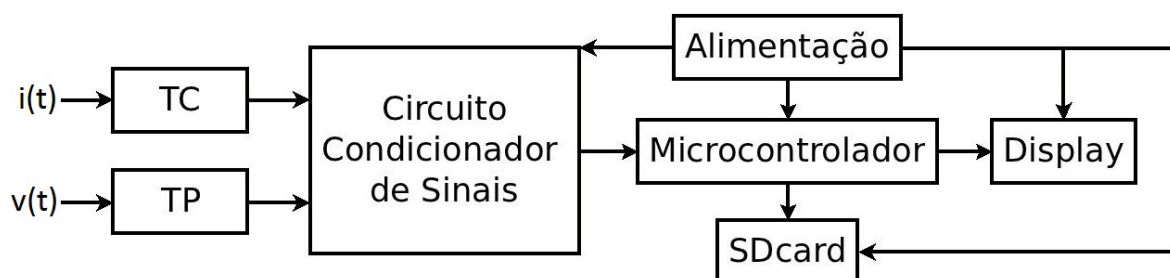


Figura 3.1. Diagrama em Blocos do Registrador de Grandezas Elétricas proposto.

3.1. Descrição do bloco Transformador de Corrente (TC)

O alicate transformador de corrente modelo 3ALIC-10/100, fabricado pela empresa RMS Sistemas Eletrônicos, é utilizado para obter o sinal de corrente e isolar o sistema da rede elétrica. Este modelo mede o campo magnético emitido pela corrente que percorre o condutor. Devido à instrumentação embutida, ele converte o sinal em tensão proporcionalmente a corrente que percorre o condutor. Através de

uma chave lateral é possível configurar seu modo de operação para 10/5, onde, um sinal de entrada de 10 A, gera uma saída de 1 V, ou para 100/5, onde um sinal de entrada de 100 A, gera um sinal de saída de 1 V. O software implementado, fornece um ambiente para configuração da relação de transformação do sensor. Na Figura 3.2 é apresentada uma imagem da sonda de corrente.



Figura 3.2. Imagem da sonda de corrente utilizada no projeto.

3.2. Descrição do bloco Transformador de Potencial (TP)

Um transformador de tensão com relação 22/1 (aplicando-se 22 V em sua entrada, tem-se 1 V em sua saída) é utilizado para obter o sinal de tensão. O transformador de tensão, além de isolar o circuito da rede elétrica, reduz os níveis de tensão a serem entregues no estágio condicionador de sinais. A tensão de pico nominal no enrolamento primário do transformador utilizado é 312 Vp, entregando em seu enrolamento secundário 14,2 Vp. Para mensurar redes de maior tensão, é possível substituir o transformador utilizado por um de maior porte, porém a relação de transformação deve ser mantida. É importante salientar que para o correto funcionamento do transformador de potencial, não deve ser ultrapassada a tensão de 580 Vp no enrolamento primário. Em um estágio posterior, um circuito divisor de tensão é ligado em série com o enrolamento secundário do transformador, reduzindo em 16 vezes os níveis de tensão a serem entregues ao microcontrolador. Na Figura 3.3, é apresentado o esquemático do circuito TP descrito, e estão definidos os valores dos componentes do divisor de tensão, calculados a partir da Equação (3.1).

$$V_{out} = \frac{V_{in} \cdot R_2}{22 \cdot R_2 + R_1} \quad (3.1)$$

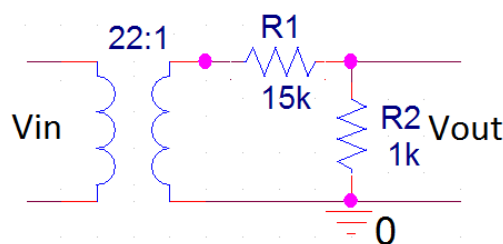


Figura 3.3. Esquemático do circuito Transformador de Potencial.

3.3. Descrição do bloco Circuito Condicionador de Sinais / Alimentação

Conforme descrito anteriormente, o microcontrolador utilizado possui um conversor A/D de 8 canais, e segundo seu manual de usuário [8], suas entradas podem variar de 0 V a 3,3 V. A Figura 3.4, retirada de um osciloscópio conectado junto ao TP e TC, apresenta os sinais a serem amostrados, variando entre níveis positivos e negativos de tensão. Para que a parte negativa do sinal seja

corretamente amostrada pelo conversor A/D, um deslocamento (*offset*) é acrescentado ao sinal pelo circuito condicionador de sinais.

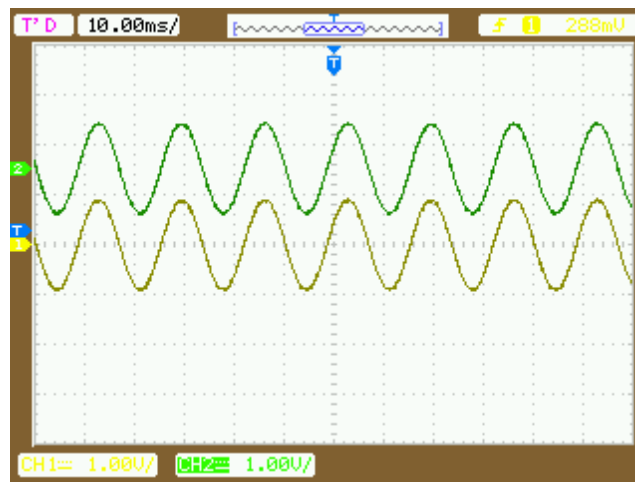


Figura 3.4. Imagem retirada do osciloscópio das saídas do TC e TP.

A técnica utilizada para deslocar os sinais recebidos pelos TC e TP, é baseada em circuitos subtratores utilizando amplificadores operacionais (AMP-OP). Devido ao seu baixo custo, o AMP-OP utilizado foi o TL082 fabricado pela empresa Texas Instrument. Conforme seu *datasheet* [9] deve ter alimentação simétrica de até +/- 18 V. Tendo em vista a necessidade de uma fonte de alimentação simétrica, a seção 3.3.1 aborda seu desenvolvimento, e a seção 3.3.2 aborda o desenvolvimento do circuito condicionador de sinais.

3.3.1. Fonte De Alimentação

Utilizou-se um transformador com tape central para alimentar o AMP-OP, uma vez que este necessita de alimentação simétrica. Considerando a tensão máxima utilizada no projeto 36 V (tensão necessária para alimentar o AMP-OP), o transformador adotado oferece em seu enrolamento secundário saídas de 18 V + 18 V.

O modelo de retificador utilizado na saída do transformador foi o de onda completa com 4 diodos. Conforme [3], este retificador se torna mais eficaz, pois ambas as partes da senoide são aproveitadas. Na Figura 3.5, está demonstrado o circuito desenvolvido para a fonte de alimentação, bem como os valores dos componentes utilizados na implementação da mesma. Os capacitores utilizados foram superdimensionados, reduzindo ao máximo o *ripple* de saída.

As saídas S1 e S2, do circuito da Figura 3.5, são destinadas a alimentar os AMP-OP, ou seja, S1 tem +18 V e S2 -18 V. Da saída S1 também derivamos a alimentação da plataforma de desenvolvimento que contém o microcontrolador. A plataforma possui um regulador de tensão LM7805, que conforme seu *datasheet* [10], com alimentação de entrada de 18 V entrega em sua saída 5 V.

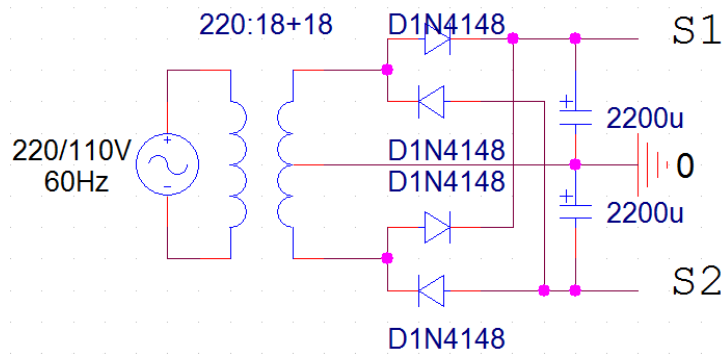


Figura 3.5. Circuito da fonte de alimentação.

3.3.2 Condicionador de Sinais

Os sinais obtidos através do TP e TC possuem níveis negativos de tensão. Considerando 3,3 V o nível máximo de tensão admitido pelo conversor A/D, um *offset* de 1,65 V é adicionado ao sinal de entrada. Logo o nível de 0 V passa a ser 1,65 V, e o nível de -1,65 V passa a ser 0 V, conforme representado pelo quadripolo da Figura 3.6. Para análise dos dados, o nível de tensão DC adicionado em hardware, será removido por meio de software, conforme descrito no decorrer do trabalho.

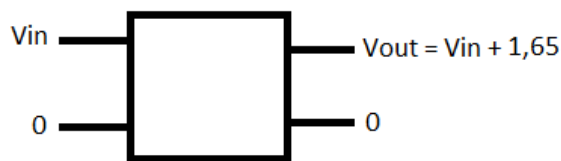


Figura 3.6. – Quadripolo representado Circuito condicionador de sinais.

A implementação do quadripolo apresentado na Figura 3.6, é composta por dois estágios, sendo o primeiro responsável pelo *offset* e o segundo responsável por inverter o sinal para sua forma original. Conforme a Equação (3.2) fornecida em [12], no primeiro estágio é implementado o circuito subtrator, sendo a tensão responsável pelo deslocamento do sinal a obtida no CI LM7905 de -5 V, e V_{in} o sinal de entrada recebido pelos circuitos TP e TC. Aplicando na Equação (3.2) os valores dos componentes que estão representados na Figura 3.7, é adicionado um deslocamento ao sinal de entrada de -1,65 V. Sendo que o primeiro estágio inverte o sinal original, conforme Equação (3.3) obtida em [12], o segundo estágio é implementado na configuração inversor com ganho unitário, este inverte o sinal de entrada V_{in} para sua forma original.

$$V_o = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_5 + R_6} \right) \cdot \frac{R_6}{R_1} \cdot (-5) - \frac{R_2}{R_1} \cdot V_{in} \quad (3.2)$$

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_o \quad (3.3)$$

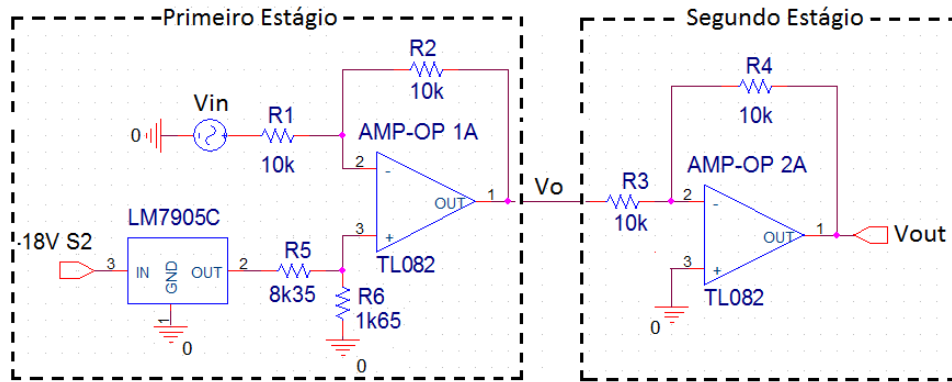


Figura 3.7. Circuito condicionador de sinais.

Quadripolos equivalentes são utilizados para instrumentar os sinais de corrente e tensão, sendo que o mesmo sinal de referência é utilizado em ambos. No circuito divisor de tensão composto por R5 e R6, é utilizado um *trimpot* no valor de 10 k Ω , permitindo um ajuste fino do deslocamento aplicado ao sinal.

3.4. Descrição do bloco Microcontrolador

O Microcontrolador é o responsável pela amostragem dos sinais, cálculo dos resultados e demonstração dos mesmos ao usuário. Utilizando C como linguagem de programação, baseado em algoritmos demonstrados em [13] e [14] e no manual de usuário do microcontrolador [8], o algoritmo foi desenvolvido visando a reutilização de códigos para futuras ampliações do projeto. As seguintes ferramentas foram utilizadas no ambiente de desenvolvimento: editor de textos Vim; sistema operacional Ubuntu 10.4; programador de memória flash lpc21isp e; compilador arm-elf-gcc. Todos os softwares são de livre utilização e distribuição.

Visando facilitar a compreensão do projeto, na Figura 3.8 é apresentado o fluxograma do algoritmo implementado e, nos itens seguintes o mesmo é explicado.

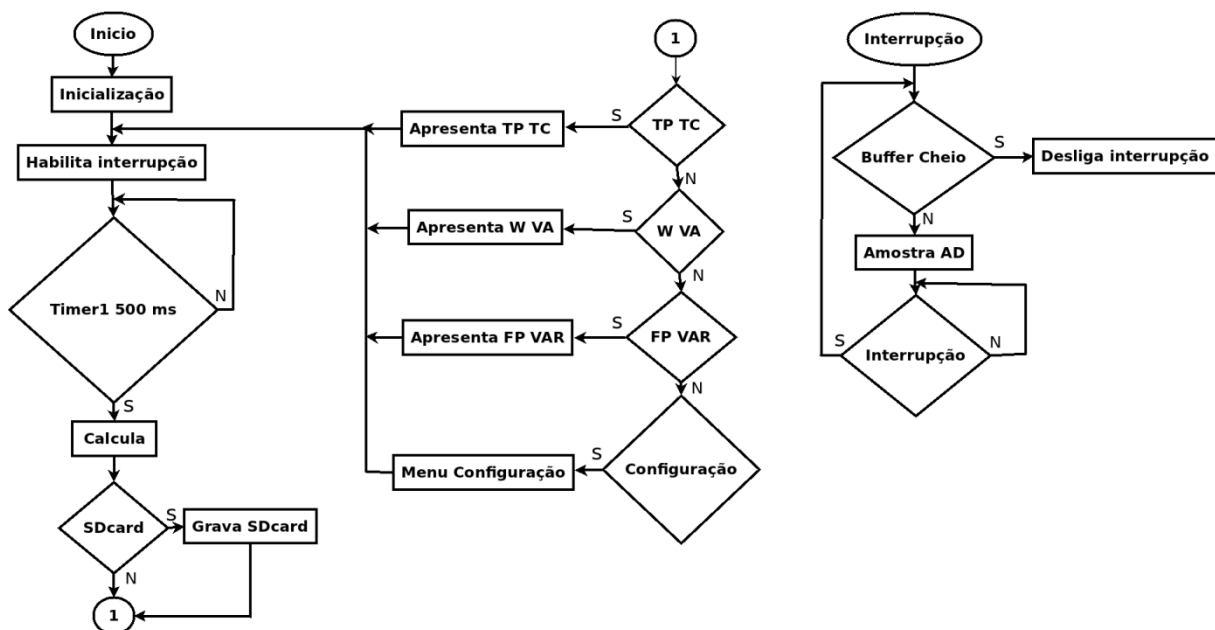


Figura 3.8. Fluxograma do algoritmo implementado.

3.4.1. Inicialização

Ao alimentar o microcontrolador seus periféricos permanecem configurados no modo padrão. No bloco inicialização, estes periféricos são configurados conforme as necessidades do projeto.

Microcontrolador e periféricos são configurados para operar na frequência de 18 MHz, utilizando como referência de tempo o oscilador externo ao microcontrolador de 12 MHz. O *timer* 1, utilizado como gatilho da interrupção de amostragem do sinal, é configurado para operar na frequência de 6.060 MHz. Os *timers* 0 e 2 são configurados para operar na frequência de 1 kHz. O *timer* 0 é utilizado nas rotinas de gravação no cartão de memória SDcard e na interface serial, e o *timer* 2 utilizado para as demais tarefas do algoritmo.

O conversor A/D é configurado para operar utilizando 10 bits de resolução, e frequência de conversão de 9 MHz. O terminal serial, utilizado para depuração do algoritmo, é configurado com *baudrate* de 19200 bits/s.

3.4.2 Interrupção e Amostragem

Após a inicialização do algoritmo, a cada 0,5 s o *timer* 1 é posto em modo ativo disparando a interrupção de amostragem do sinal, ou seja, a cada incremento do *timer* 1 uma interrupção é gerada e uma amostra de corrente e de tensão são lidas através dos canais do conversor A/D. Como este é o ponto do software que requer maior precisão, a interrupção é configurada para ser tratada com a máxima prioridade do microcontrolador. O microcontrolador deixará outras interrupções para serem tratadas em um segundo instante.

O *timer* 1 é configurado para operar na frequência de 6.060 Hz, dentro da taxa de amostragem mínima descrita em [5]. Dividindo a frequência de amostragem (6.060 Hz) pela frequência fundamental do sinal (60 Hz), tem-se 101 amostras a cada ciclo da frequência fundamental. Conforme [5], para frequência fundamental de 60 Hz, deve ser amostrado um período contínuo de 12 ciclos sobre a frequência fundamental. Multiplicando o número de amostras em um ciclo (101) pelo número de ciclos analisados (12), são amostrados 1212 valores sobre o período de 12 ciclos da frequência fundamental. Considerando a frequência de amostragem de 6.060 Hz, entre cada interrupção tem-se o intervalo de 165 μ s. Multiplicando o intervalo (165 μ s) pelo número de amostras (1212), 200 ms são necessários para amostrar os 12 ciclos. Ao final dos 1212 valores amostrados, o *timer* 1 é desabilitado.

O microcontrolador utilizado trata os canais do A/D de forma multiplexada, ou seja, no primeiro instante amostra o sinal de corrente e no segundo instante amostra o sinal de tensão. Para converter cada amostra, o microcontrolador leva 11 ciclos de *clock*. Com o A/D configurado para operar em sua taxa máxima (4,5 MHz) um intervalo de 2,44 μ s é necessário entre as amostras de corrente e tensão. O intervalo entre amostras de corrente e tensão impacta diretamente no resultado do fator de potência, que é justamente a métrica responsável por mensurar o ângulo de defasagem entre tensão e corrente. Para reduzir o erro imposto pelo medidor, um *overclock* foi aplicado no conversor A/D, fazendo com que o mesmo opere na frequência de 9 MHz, duas vezes a frequência nominal, assim reduzindo o intervalo entre amostras para 1,22 μ s. Para maior precisão, é necessário utilizar um microcontrolador específico para processamento digital de sinais (DSP), o qual possui maior capacidade de processamento dos sinais mediante o uso de técnicas de paralelismo de instruções.

3.4.3. Cálculo das Métricas

O *timer 2* está configurado para operar na frequência de 1 kHz. Após habilitar o *timer 1*, responsável pelas interrupções, o algoritmo fica preso em um laço de repetição aguardando o *timer 2* ser incrementado 500 vezes, equivalente a 500 ms. Sabendo que o período de amostragem do sinal leva 200 ms, o microcontrolador tem 300 ms para realizar os cálculos. Para uma futura ampliação do trabalho onde as intensidades de distorções harmônicas seriam calculadas, o número de incrementos do *timer 2* poderia ser elevado para 1000 vezes, deixando um tempo de 800 ms para cálculos.

Durante os 200 ms em que a interrupção de amostragem está ativa, o laço principal do software permanece ocioso. Quando o *timer 2* alcança 500 ms, o período de amostragem do sinal já terá sido finalizado, tendo preenchido um *buffer* com as 1212 amostras capturadas pelo A/D. Sendo 10 bits a resolução configurada no conversor A/D, a faixa de valores decimais que podem ser representados varia de 0 a 1023, sendo 0 equivalente a 0 V na entrada do A/D e 1023 equivalente a 3,3 V na entrada do A/D. Utilizando a Equação (3.5) o deslocamento de 1,65 V, adicionado ao sinal no estágio condicionador de sinais, é removido diminuindo em cada amostra o valor decimal 512, equivalente a 1,65 V na entrada do A/D.

$$\text{Valor} = \text{Valor} - 512 \quad (3.5)$$

A primeira operação realizada nas Equações (2.2), (2.4) e (2.5) se trata de uma multiplicação de amostras. Na Equação (2.2) multiplica-se a amostra de corrente pela de tensão, resultando na Equação (3.6). Na Equação (2.4), a amostra de tensão é elevada ao quadrado, resultando na Equação (3.7). Na Equação (2.5) ocorre o mesmo que na Equação (2.4), porém utilizando a amostra de corrente, resultando na Equação (3.8). A segunda operação realizada nas Equações (2.2), (2.4) e (2.5) é a integração dos resultados das Equações (3.6), (3.7) e (3.8). Sendo que a integral em um sistema discreto é equivalente à somatória das amostras em um determinado período, percorrendo os *buffers* das amostras de corrente e tensão somando os resultados das Equações (3.6), (3.7) e (3.8) por eles mesmos, são satisfeitas as Equações (3.9), (3.10) e (3.11).

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (3.6)$$

$$v(t)^2 = v(t) \cdot v(t) \quad (3.7)$$

$$i(t)^2 = i(t) \cdot i(t) \quad (3.8)$$

$$P_{\text{parcial}} = \int_0^T p(t) dt \quad (3.9)$$

$$V_{\text{parcial}} = \int_0^T v(t)^2 dt \quad (3.10)$$

$$I_{\text{parcial}} = \int_0^T i(t)^2 dt \quad (3.11)$$

Para concluir a Equação (2.2), que retorna o valor da potência ativa consumida pelo sistema, o resultado *Pparcial* da Equação (3.9) é dividido pelo número de amostras T (1212), conforme Equação (3.12). Para as Equações (2.4) e

(2.5), que retornam o valor de tensão e corrente RMS, é extraída a raiz quadrada da divisão dos resultados $V_{parcial}$ e $I_{parcial}$ retornados das Equações (3.10) e (3.11) pelo número de amostras capturadas T (1212), conforme Equações (3.13) e (3.14).

$$P = \frac{P_{parcial}}{T} \quad (3.12)$$

$$V = \sqrt{\frac{V_{parcial}}{T}} \quad (3.13)$$

$$I = \sqrt{\frac{I_{parcial}}{T}} \quad (3.14)$$

O conversor A/D retorna resultados decimais que equivalem aos valores lidos em sua entrada analógica. Na etapa de recepção do sinal de tensão (TP), o sinal é reduzido em 22 vezes no transformador de tensão e 16 vezes no divisor de tensão. Um deslocamento de 1,65 V também é adicionado na etapa de condicionamento do sinal, sendo equivalente ao valor decimal 512 na saída do A/D, aplicando o resultado da Equação (3.13) na Equação (3.15), são compensadas as relações de transformação aplicadas ao sinal de tensão. Na etapa de recepção do sinal de corrente (TC), o sinal é reduzido conforme relação de transformação configurada no alicate (10/1 ou 100/1), também recebendo o deslocamento de 1,65 V na etapa de condicionamento do sinal, sendo que a relação de transformação do alicate é variável, o usuário terá a opção de alterar a mesma no menu de configurações. A relação de transformação (RelTC) padrão na inicialização do medidor é 10/1 (RelTC igual a 10). Aplicando o resultado da Equação (3.14) na Equação (3.16), são compensadas as relações de transformação aplicadas ao sinal de corrente. Para a compensação da relação de transformação na Equação (2.2), utilizada para o cálculo da potência ativa, o resultado da Equação (3.12) é aplicado na Equação (3.17) que considera as relações aplicadas aos sinais de tensão e corrente.

$$V = \frac{V \cdot 22 \cdot 16 \cdot 1,65}{512} \quad (3.15)$$

$$I = \frac{I \cdot RelTC \cdot 1,65}{512} \quad (3.16)$$

$$P = P \cdot \frac{RelTC \cdot 1,65}{512} \cdot \frac{22 \cdot 16 \cdot 1,65}{512} \quad (3.17)$$

O resultado da potência aparente é obtido aplicando os resultados das Equações (3.15) e (3.16), na Equação (2.3). A potência reativa é obtida aplicando os resultados das Equações (2.3) e (3.17), na Equação (2.6). O Fator de potência é obtido aplicando o resultado das Equações (3.17) e (2.3), na Equação (2.7).

3.4.4. Demonstração dos Resultados e Configurações

Para disponibilizar ao usuário um histórico das medições realizadas, tornando possível realizar uma análise mais apurada de seu sistema, adicionou-se ao projeto um modulo de armazenamento de dados em cartões de memória. Pela sua padronização, tamanho reduzido, baixo custo e alta capacidade de armazenamento, o modelo de cartão de memória utilizado foi o SDcard. Os resultados são gravados

em formato de arquivo texto (.txt). Este é um formato de livre utilização e grande compatibilidade com softwares de mercado, como por exemplo, o software de livre distribuição OpenOffice.

Através de um menu de configurações, o usuário seleciona a gravação dos resultados em cartão de memória. Após receber uma mensagem no *display* de cristal líquido (LCD) alertando que sua configuração foi realizada com sucesso, os dados são gravados no cartão de memória na mesma taxa em que são calculados (0,5 s). Em [14] é disponibilizada uma biblioteca desenvolvida em C para trabalhar com cartões de memória do tipo SDcard, esta foi adaptada e utilizada neste trabalho.

Além de serem gravados em memória, os resultados são apresentados instantaneamente em um visor LCD. Através dos botões de entrada apresentados na Figura 3.9, a métrica a ser apresentada no visor é selecionada. É possível alternar a apresentação dos resultados entre: botão 1 - tensão e corrente; botão 2 - potência aparente e potência ativa; botão 3 - potência reativa e fator de potência e; botão 4 - hora, data e temperatura ambiente.

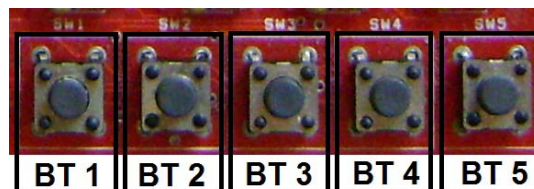


Figura 3.9. Botões de entrada para configurações.

Pressionando o botão 5 apresentado na Figura 3.9, o menu de configurações é apresentado ao usuário. No menu de configurações, os botões 1 e 2 são utilizados para navegação entre os sub-menus. O botão 5 é utilizado também para selecionar um sub-menu. O botão 4 é utilizado para sair do menu. As seguintes características são alteradas no menu de configurações: relação de transformação do TC, ajuste da hora, ajuste da data e configurações referentes a gravação dos resultados em cartão de memória.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Visando a validação do projeto, desenvolveu-se um protótipo do equipamento proposto. Neste tópico será abordada a construção do protótipo, testes realizados, análise de erros e estimativas de custos.

4.1. Desenvolvimento do Protótipo

A plataforma de desenvolvimento, apresentada na Figura 4.1, contendo o microcontrolador LPC2378, fornecida pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), foi utilizada como base para o desenvolvimento do projeto.

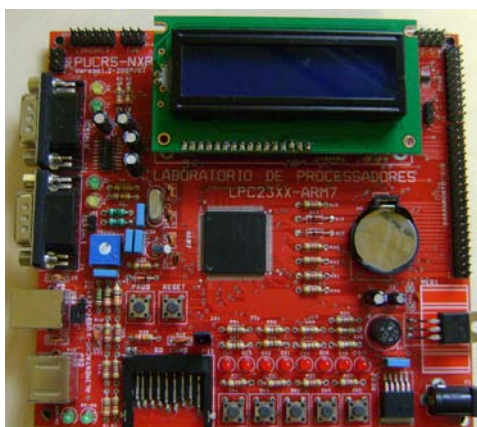


Figura 4.1. Plataforma de Desenvolvimento PUCRS.

O circuito condicionador de sinais, fonte de alimentação e divisor de tensão foram prototipados em uma placa de circuito impresso, o *layout* do circuito impresso foi desenvolvido utilizando o software Layout Plus, da plataforma Orcad versão 9.1, conforme *layout* e protótipo apresentados na Figura 4.2.

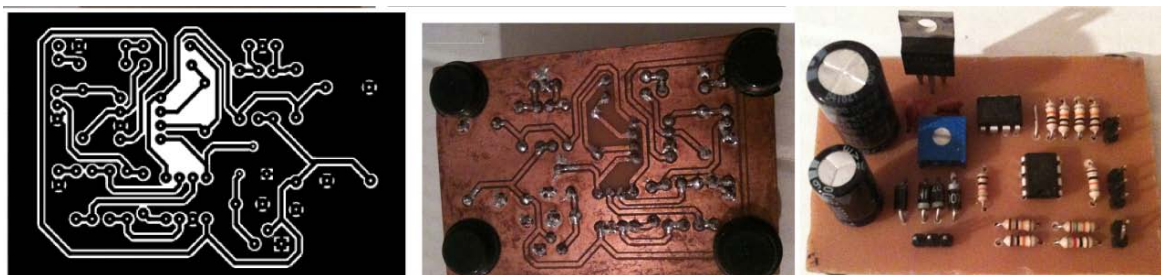


Figura 4.2. *Layout* e protótipo da fonte de alimentação, condicionador de sinais e divisor de tensão.

A imagem do protótipo, apresentando todos seus periféricos, como: transformador de alimentação; transformador de aquisição do sinal de tensão; sonda de corrente; circuito condicionador de sinais e; plataforma de desenvolvimento é apresentado na Figura 4.3.

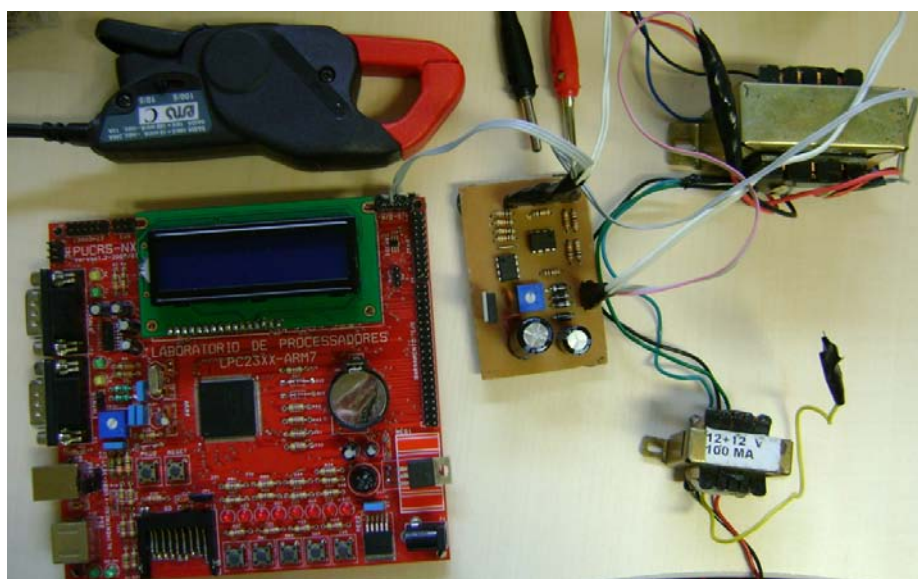


Figura 4.3. Protótipo Completo.

4.2. Análise de Erros

Para alcançar o máximo nível de tensão suportado pelo conversor A/D, é necessário aplicar 1160 V pico-a-pico na entrada do TP ou 3,3 V pico-a-pico na saída do TC. Utilizando o conversor AD configurado para converter com 10 bits de resolução, através da Equação (4.1) tem-se a resolução máxima de 1,13 V apresentada para o sinal de tensão, e através da Equação (4.2), utilizando relação de transformação do TC igual a 10, tem-se a resolução máxima de 32 mA para o sinal de corrente.

$$V_{\text{resolução}} = \frac{1160}{1023} \quad (4.1)$$

$$I_{\text{resolução}} = \frac{3,3 \cdot \text{relTC}}{1023} \quad (4.2)$$

Devido aos componentes utilizados no protótipo do circuito condicionador de sinais não serem de precisão, o *offset* adicionado ao sinal, por meio de hardware, necessita de um ajuste fino em software para compensar o erro no deslocamento. Com as entradas dos circuitos TP e TC aterradas, através do terminal serial do microcontrolador, os dados entregues pelo conversor A/D são enviados a um computador. Verificando os dados convertidos pelo conversor A/D, tendo entrada analógica em 0 V, é possível verificar o real *offset* atribuído ao sinais. A partir desta análise, a Equação (3.5), foi alterada para Equação (4.3) para o sinal de tensão e (4.4) para o sinal de corrente.

$$Valor = Valor - 500 \quad (4.3)$$

$$Valor = Valor - 511 \quad (4.4)$$

4.3. Testes

Na etapa de validação do equipamento foram realizadas duas baterias de testes. Na primeira o equipamento foi posto em comparação com um similar disponível no mercado. Já na segunda, o equipamento permaneceu medindo o ramal de entrada de energia elétrica em um imóvel residencial durante o período de 24 horas.

4.3.1 Comparação com Equipamento Similar

O teste de comparação foi realizado mensurando um banco de cargas resistivas em paralelo a um banco de cargas indutivas, estas alimentadas a uma rede de 220 V nominal. O equipamento utilizado como padrão de comparação foi o modelo MARH-21, fabricado pela empresa RMS Sistemas Eletrônicos. Em cada configuração de cargas resistivas e indutivas foram coletadas 5 amostras de cada métrica.

A Tabela 4.1 apresenta as médias das amostras coletadas. O campo Num. R da Tabela 4.1 representa o número de cargas resistivas acopladas em paralelo no ensaio, sendo que cada carga possui aproximadamente 460 Ω , o campo Num. L representa o número de cargas indutivas acopladas em paralelo no ensaio, sendo que cada carga possui aproximadamente 0,7 H.

Tabela 4.1. Resultados de testes aplicados ao equipamento projetado e a um equipamento similar do mercado.

| Num. R / Num. L | Tensão (V) | | Corrente (A) | | Fator de Potência | | Potência Ativa (kW) | |
|--------------------|------------|---------|--------------|---------|-------------------|---------|---------------------|---------|
| | Protótipo | MARH-21 | Protótipo | MARH-21 | Protótipo | MARH-21 | Protótipo | MARH-21 |
| 9 / 0 | 210,3 | 210,2 | 4,08 | 4,08 | 1 | 1 | 0,86 | 0,86 |
| 9 / 2 | 210,4 | 210,3 | 4,51 | 4,52 | 0,93 | 0,93 | 0,88 | 0,89 |
| 9 / 6 | 209,4 | 209,4 | 6,60 | 6,62 | 0,67 | 0,68 | 0,92 | 0,95 |
| 4 / 0 | 210,5 | 210,5 | 1,85 | 1,85 | 1 | 1 | 0,39 | 0,39 |
| 4 / 2 | 211,0 | 211,0 | 2,61 | 2,61 | 0,76 | 0,77 | 0,42 | 0,42 |
| 4 / 4 | 210,9 | 210,8 | 3,91 | 3,91 | 0,53 | 0,55 | 0,44 | 0,45 |

Analisando a Tabela 4.1 nota-se a similaridade nos resultados obtidos a partir do equipamento comercial com os obtidos a partir do protótipo projetado. Devido aos resultados terem sido coletados manualmente, os resultados não são lidos no mesmo instante em ambos equipamentos, este fator pode acarretar em erros na comparação.

4.3.2. Teste no Ramal de Entrada de Energia Elétrica de uma Residência

No segundo teste imposto ao protótipo, este permaneceu durante o período de 24 horas conectado ao ramal de entrada de um imóvel residencial, enquanto o proprietário realizava suas tarefas diárias normalmente. Durante o período de registro dos resultados, o usuário utilizou os seguintes eletrodomésticos: computador portátil, televisor, geladeira, lavadora de roupas, ferro de solda, aparelho de som e lâmpadas incandescentes. A partir dos resultados registrados no cartão de memória, e através do software OpenOffice, traçou-se a curva de carga apresentada na Figura 4.4, a qual representa a potência elétrica consumida pelo proprietário do imóvel no período de 20 horas, conforme [15].

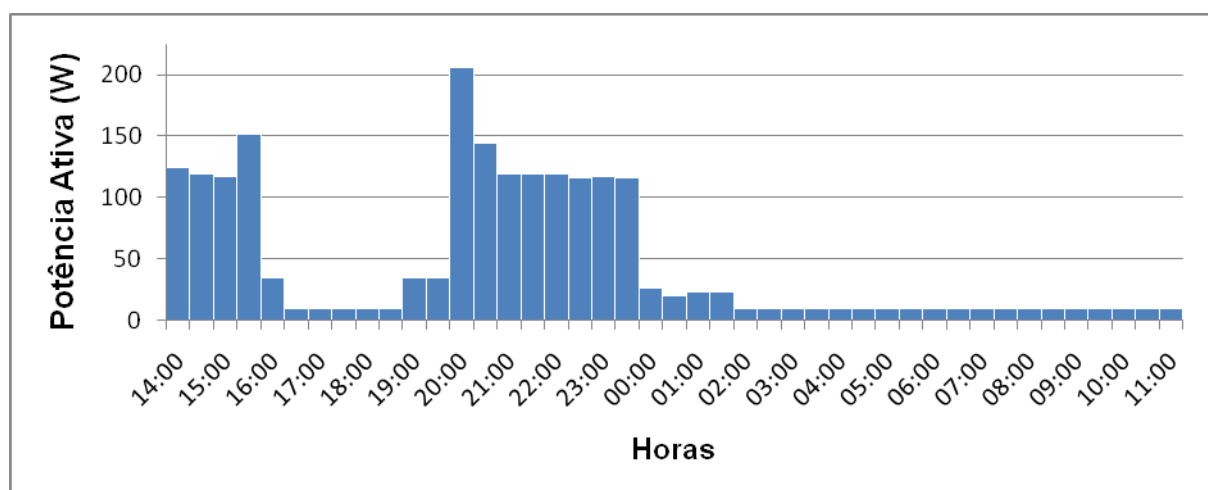


Figura 4.4. Curva de carga reproduzida através de dados capturados do protótipo.

Sendo que os dados são armazenados no cartão de memória em uma resolução de 0,5 segundos, com o auxílio do software OpenOffice, é possível aumentar a resolução do gráfico apresentando na Figura 4.4, tornando possível visualizar detalhes sobre a potência consumida em determinados períodos. Na curva

de carga apresentada na Figura 4.5, o gráfico é traçado utilizando todos os pontos armazenados durante o período de uma hora. No gráfico da Figura 4.5, traçado em maior resolução, é possível visualizar o período em que o refrigerador permanece em funcionamento.



Figura 4.5. Curva de carga reproduzida através de dados capturados do protótipo, focando período durante a noite, onde apenas equipamentos em modo *standby* e refrigerador permanecem ligados.

Desta forma, o protótipo em questão também pode ser utilizado para análise de eficiência energética, onde é possível mensurar se os equipamentos analisados encontram-se operando no seu melhor desempenho para o qual foram projetados.

4.4. Estimativa de Custos

Além dos custos em recursos humanos, não contabilizados nesta estimativa, os componentes apresentados na Tabela 4.2 foram adquiridos, totalizando um custo médio de R\$ 1.315,00.

Tabela 4.2. Estimativa de custos do projeto.

| Equipamento | Custo Unitário (R\$) |
|-------------------------------|----------------------|
| Plataforma de desenvolvimento | 100,00 |
| Transformador Alimentação | 30,00 |
| Transformador Sinal Tensão | 20,00 |
| Transformador de Corrente | 1.100,00 |
| Cartão de Memória | 35,00 |
| Condicionador de Sinais | 30,00 |
| TOTAL | 1.315,00 |

Considerando a sonda de corrente o componente com custo unitário mais elevado do projeto, é sugerido o desenvolvimento da mesma para futuras continuidades do projeto.

5. CONCLUSÃO

O equipamento registrador de grandezas elétricas apresentado neste trabalho possibilita, de maneira fácil e rápida, realizar um levantamento do consumo de potência elétrica da rede. Através dos resultados obtidos a partir do protótipo proposto, dentre outras aplicações, é possível realizar um estudo de eficiência energética no caso analisado, como também, detectar falhas e descumprimento de normas no sistema. Sendo que o equipamento não necessita que as formas de onda, da corrente e tensão, sejam puramente senoidais, é possível medir em pontos da rede onde ruídos e distorções nas formas de onda seja apresentados.

A gravação dos dados em cartão de memória é de suma importância neste trabalho, visto que é possível analisar detalhadamente os resultados de cada período de medição, mantendo também um histórico do sistema elétrico em análise. Substituindo o cartão de memória do equipamento em campo, enquanto os dados coletados podem ser analisados em um computador, o mesmo continua registrando as grandezas elétricas atuais.

O algoritmo desenvolvido toma como base normas internacionais [4] e [5] de equipamentos medidores de energia elétrica, aumentando sua credibilidade. O protótipo, após passar por duas rotinas de validação, se demonstrou estável e confiável, podendo ser utilizado para mensurar grandezas elétricas.

O estudo e ampliação do projeto são de grande valia para a engenharia elétrica. No trabalho proposto são englobadas diferentes áreas de atuação do engenheiro eletricitista, como por exemplo: eletrônica analógica; sistemas de energia; sistemas embarcados e; processamento digital de sinais. Como continuidade deste projeto, sugere-se: a ampliação do mesmo para medição de sistemas trifásicos; o desenvolvimento e prototipagem de uma sonda de corrente, com o objetivo de reduzir os custos do projeto, bem como tornar o equipamento independente da sonda de corrente atualmente utilizada; a implementação do algoritmo da transformada rápida de Fourier, possibilitando o cálculo das componentes harmônicas do sistema; o desenvolvimento de alarmes de sistema e; por fim, com a finalidade de coletar os dados remotamente sugere-se o desenvolvimento de uma interface de comunicação por telefonia móvel.

Agradecimentos

Sou especialmente grato aos meus familiares pelo carinho, compreensão e paciência, no decorrer destes últimos meses, os quais nosso contato foi limitado.

Gostaria de expressar minha gratidão a todas as pessoas que colaboraram na execução deste trabalho e, de forma especial, agradecer meus amigos Carlos E. Kroth, Davi E. França, Eliana Machado, Gabriel C. S. Simioni, Guilherme Schallenberger, Kleber H. Stangherlin, Lucas Bondan, Odilon F. P. Duarte, Tallis H. Costa, Vicente M. Canalli, William I. R. Lautenschläger e amigos em geral, pelas diferentes formas de apoio dadas por todos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GOLDEMBERG, José. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento**. São Paulo: Edusp. 1998. 234p.
- [2] SADIKU, N. O. Matthew; Alexander, K. Charles. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. Tradução de Gustavo Guimarães Parma. Porto Alegre, editora Bookman, 2003.
- [3] BOYLESTAD, Robert; Nashelsky, Louis. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. Tradução de Roberto Moura Sales. 3.ed. Rio de Janeiro, editora Prentice Hall do Brasil, 1984.
- [4] IEEE Std 1459-2000. **Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions-IEEE Trial-Use Standard. Power System Instrumentation and Measurements Committee of the IEEE Power Engineering Society- Approved 30 January 2000**. New York, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000.
- [5] IEC. IEC 61000-4-7. **Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: testing and measurement techniques – general guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto**. Genebra, Suíça: EMC, 2002.
- [6] TAMBARA, V. Rodrigo; FLORA, D. Leandro; GRUNDLING, A. Hilton. Projeto de Implementação de Instrumentação para Medição de Corrente Elétrica em uma Máquina de Vibração Eletrodinâmica. **Disc. Scientia. Série: Ciências Naturais e Tecnológicas**, S. Maria, v. 6 , n. 1, p.41-52, 2005.
- [7] MOULIN, Etienne. RMS Calculation for Energy Meter Applications Using the ADE7756, Analog Devices, 2003.
- [8] LPC23xx, User Manual, Rev. 03, NXP Semiconductors, August 2009.
- [9] TL082, JFET-INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS, Rev. February 1999, Texas Instrument, February 1977.
- [10] LM7805, 3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator, Rev 1.0.1, Fairchild Semiconductor Corporation, February 2001.
- [11] Melo, W; Líbano, F. Estudo e Aplicação da Norma IEEE 1459-2000 para Medidores Digitais de Energia Elétrica. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande Do Sul**, Porto Alegre, 2006.
- [12] AN-31, Op Amp Circuit Collection, Application Note 31, National Semiconductors, September 2002.

[13] Stemmer, M. Programação do LPC2478 Usando o arm-elf-gcc. Disponível em: <<http://www.ee.pucrs.br/~stemmer/sistembarcados/apostila2478/index.html>>. Acesso em: 01 março 2011.

[14] How to Use MMC/SDC. Disponível em: <http://elm-chan.org/docs/mmc/mmc_e.html>. Acesso em: 01 março 2011.

[15] MAMEDE, F. João. **Instalações Elétricas Industriais**. 8.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2011.