

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

Departamento de Eletrônica e de Computação

**Multimedidor Eletrônico para Medição e Monitoração de  
Grandezas Elétricas em Sistemas Elétricos Residenciais**

Autor:

---

Saulo Avila Nunes

Orientador:

---

Prof. Joarez Bastos Monteiro, D. Sc.

Examinador:

---

Prof. Fernando Antônio Pinto Barúqui, D. Sc.

Examinador:

---

Prof. Carlos José Ribas D'Ávila, M.Sc.

DEL

Maio de 2009

## **DEDICATÓRIA**

*Aos meus pais, George e Marília.*

## AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais pelo apoio incondicional. Por sempre estarem ao meu lado, mesmo quando não concordavam com minhas decisões. Por serem parte fundamental da pessoa em que me tornei, enfim, por tudo.

À toda minha família por entender minhas ausências e esquecimentos nesses últimos 5 anos.

Agradeço ao meu orientador, professor Joarez Monteiro, a quem tenho como um amigo e que dividiu comigo um pouco da sua experiência através de suas histórias e conselhos. Também não poderia deixar de agradecer por sua compreensão, disponibilidade e conhecimentos fundamentais para conclusão deste trabalho.

Aos professores do departamento por todo conhecimento compartilhado, por me ajudarem a concretizar esse sonho.

À minha namorada, Ana Paula por dividir comigo minhas angústias e alegrias, por estar sempre ao meu lado me apoiando e por compreender minha ausência nesses últimos meses.

Aos meus amigos de faculdade, que trilharam comigo este longo caminho, com quem também pude compartilhar minhas vitórias e derrotas. Pelas noites de estudo nas bibliotecas e no alojamento. Pelas pizzas, de origem desconhecida, divididas nessas noites de estudo.

Um agradecimento especial aos amigos Alexandre Guazzi, Pedro Coelho, Hugo Haas e Ricardo Flach sem os quais, não só a graduação, mas também a conclusão deste trabalho, teriam sido muito mais difíceis.

## RESUMO

Com a crise energética sofrida pelo país em 2001 e as recorrentes ameaças de novos racionamentos de energia, os consumidores residenciais, responsáveis por grande parcela do consumo do país, no entanto, não possuem um meio eficaz de controlar e monitorar seu consumo de energia.

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um equipamento eletrônico capaz de medir e monitorar a energia e a potência consumida por um ou vários equipamentos eletro-eletrônicos, através da medição da tensão e da corrente que circulam por estes equipamentos.

Através de uma interface USB, que pode ser conectada a praticamente qualquer computador hoje em dia, é possível monitorar em tempo real o consumo de energia gerando arquivos compatíveis com as principais planilhas de cálculos existentes hoje.

Palavras-Chave:

- Medição de Energia
- Energia
- Medição de Potência
- Potência
- Sensor Hall
- PIC
- USB

## SIGLAS

**A/D** – Analógico-Digital.

**CEPEL** – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica.

**CI** – Circuito Integrado

**DC** – Sinal contínuo no tempo.

**DLL** – “*Dynamic-Link Library*”. Biblioteca de ligação dinâmica.

**DSP** – “*Digital Signal Processor*”. Microprocessadores especializados em processamento digital de sinais.

**ID** – Identificador.

**IDE** – “*Integrated Development Enviroment*”. Ambiente Integrado para desenvolvimento de *software*.

**LCD** – “*Liquid Crystal Display*”. *Display* de cristal líquido.

**MCHPFSUSB** – “Microchip Full Speed USB Framework”. Framework para o desenvolvimento de aplicações USB utilizando microcontroladores da Microchip.

**PIC** – Família de microcontroladores fabricados pela Microchip.

**RAM** – Random Access Memory. Memória de acesso aleatório que permite leitura e escrita.

**RMS** – “*Root Mean Square*”. Valor médio quadrático ou valor eficaz de um sinal.

**SPI** – “*Serial Peripheral Interface*”. Interface serial padronizada pela Motorola que opera em modo *full duplex*.

**USB** – “*Universal Serial Bus*”. Interface serial.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
	1.1 - Tema .....	1
	1.2 - Delimitação .....	1
	1.3 - Justificativa .....	2
	1.4 - Objetivos .....	3
	1.5 - Metodologia .....	4
	1.6 - Apresentação .....	4
<b>2</b>	<b>Circuitos</b>	<b>6</b>
	2.1 - Princípio de Funcionamento .....	6
	2.2 - Sinal de corrente .....	7
	2.3 - Sinal de tensão .....	15
	2.4 - Cálculo da potência .....	19
	2.5 - <i>Display</i> LCD .....	21
	2.6 - Fonte de Alimentação .....	23
<b>3</b>	<b>Microcontrolador</b>	<b>24</b>
	3.1 - A escolha do microcontrolador .....	24
	3.2 - <i>Framework</i> USB .....	25
	3.3 - Rotina de Inicialização do Medidor .....	26
	3.4 - Programa Principal .....	27
	3.5 - Cálculo da Energia .....	29

3.6 - Outros cálculos realizados pelo microcontrolador .....	31
3.7 - Controle do <i>display</i> LCD .....	32
3.7.1 – Escrita no <i>display</i> LCD .....	32
3.7.2 – Alterando o informação exibida no <i>display</i> LCD .....	34
<b>4      Comunicação USB</b>	<b>36</b>
4.1 - Biblioteca para Comunicação .....	36
4.2 - Programa para PC .....	36
4.3 - Interface do programa .....	37
<b>5      Resultados</b>	<b>39</b>
5.1 - Calibração .....	39
5.2 Testes .....	41
<b>6      Conclusão</b>	<b>48</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>49</b>
<b>Apêndice A – Diagrama de blocos detalhado</b>	<b>50</b>
<b>Apêndice B – Circuito esquemático completo</b>	<b>52</b>
<b>Apêndice C – Código fonte do <i>firmware</i> do Microcontrolador</b>	<b>54</b>
<b>Apêndice D – Código fonte do programa para computador</b>	<b>55</b>

# Lista de Figuras

1.1 – Consumo de energia elétrica no Brasil .....	2
2.1 – Diagrama em blocos do circuito do medidor .....	7
2.2 – Funcionamento do sensor de corrente por efeito Hall .....	9
2.3 – Sensor de corrente por efeito Hall ACS756 .....	10
2.4 – Amplificador de Instrumentação .....	10
2.5 - Relação entre o ganho do bloco Sensor de corrente e os 8 bits de configuração do MCP41010 .....	13
2.6 – Circuito do bloco Sensor de Corrente .....	13
2.7 – Circuito de conversão RMS-DC do sinal de corrente .....	14
2.8 – Erro de saída do AD636 vs tipos de filtros .....	14
2.9 – Circuito Sensor de Tensão .....	16
2.10 – Conversor RMS-DC para o sinal de tensão .....	17
2.11 – Circuito para medição da potência ativa .....	20
2.12 – Ligação entre o módulo LCD e o microcontrolador .....	22
2.13 – Ligação entre chaves e microcontrolador .....	22
2.14 - Fonte linear de tensão regulada .....	23
3.1 – Fluxograma de funcionamento da USB .....	26
3.2 – Sequência de inicialização do PIC .....	27
3.3 – Fluxograma de execução do programa principal .....	28
3.4 – Fluxograma de execução da interrupção ativada pelo TIMER0 .....	30
3.5 – Rotina de execução da interrupção disparada pelo TIMER1 .....	33
3.6 – Rotina de execução da interrupção disparada pela mudança na porta B ...	35
4.1 – Fluxograma de funcionamento do programa para computador .....	37
4.2 – Interface do programa para computador .....	37
4.3 – Campo para alteração do valor da tarifa .....	38



5.1 – Diagrama de ligação dos equipamentos para testes . . . . .	41
5.2 – Medição do fator de potência no primeiro teste . . . . .	42
5.3 – Diagrama de ligação dos equipamentos para teste com o variac . . . . .	42
5.4 – Medição do fator de potência no segundo teste para corrente de 1 A. . . . .	43
5.5 – Medição do fator de potência no segundo teste para corrente de 2,5 A . . . . .	44
5.6 – Medição do fator de potência no segundo teste para corrente de 5 A . . . . .	44
5.7 – Medição do fator de potência no terceiro teste . . . . .	46
5.8 – Sinais de tensão e corrente do quarto teste . . . . .	47

# Lista de Tabelas

1.1 – Composição setorial do consumo de energia elétrica no Brasil . . . . .	3
2.1 – Análise de resistores série para medição de corrente . . . . .	8
2.2 – Especificação do transformador . . . . .	15
5.1 – Resultados obtidos no primeiro teste . . . . .	41
5.2 – Potências calculadas no primeiro teste . . . . .	41
5.3 – Resultados obtidos no segundo teste . . . . .	43
5.4 – Potências calculadas no segundo teste . . . . .	43
5.5 – Resultados obtidos no terceiro teste . . . . .	45
5.6 – Potências calculadas no terceiro teste . . . . .	45
5.7 – Resultados obtidos no quarto teste . . . . .	46
5.8 – Potências calculadas no quarto teste . . . . .	47

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 – Tema

A proposta deste trabalho consiste no desenvolvimento de um equipamento capaz de realizar a medição de grandezas elétricas como tensão e corrente, permitindo a monitoração do consumo da potência dissipada por um equipamento ou conjunto de equipamentos

Além disso, o sistema também possibilitará ao usuário acompanhar o consumo de energia ao longo de um tempo por ele estipulado, permitindo-o saber o quanto de energia foi gasto e estimar o quanto será gasto dentro de um determinado intervalo de tempo, além de fornecer, em ambos os casos, o valor gasto em moeda corrente.

### 1.2 – Delimitação

Este trabalho foi desenvolvido tendo em vista sua utilização em instalações elétricas residenciais do tipo:

- Tensão fase - neutro de 127 V.

Com relação à corrente, este dispositivo é capaz de medir correntes de até 50 A, o que permite atender praticamente todos equipamentos de uso residencial, sendo possível até mesmo, monitorar todos os dispositivos conectados à uma fase.

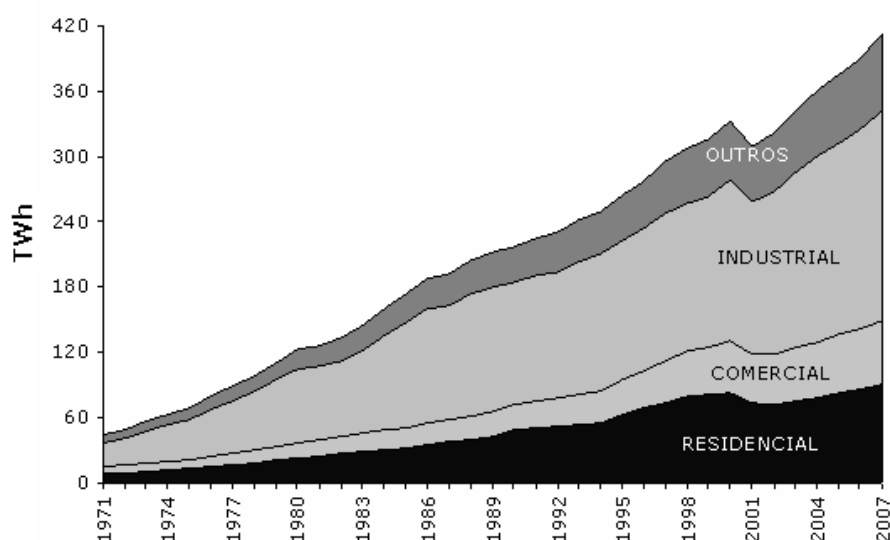
O equipamento possui uma interface USB para comunicação com um computador, mas deve operar de forma independente, sem que seja necessário conectá-lo a um computador. No entanto, por ter recursos, como processamento e memória, limitados, este equipamento não fornecerá sozinho todas as funcionalidades do sistema.

Nesse sentido, o software além de complementar o hardware, permitirá uma análise mais detalhada e de longo prazo das informações coletadas.

### 1.3 – Justificativa

O Brasil em 2001 passava por um bom momento com a economia aquecida e a produção industrial crescendo em ritmo acelerado, no entanto a matriz energética do país não acompanhou esse crescimento e por isso o país entrou em colapso e passou pela maior crise energética da sua história. Essa crise energética levou, não só consumidores do setor comercial e industrial, mas também os consumidores residenciais, que correspondem a 85% do total de consumidores de energia elétrica no Brasil [1], a passarem por um grande racionamento de energia.

No gráfico exibido na Fig. 1.1 e na Tabela 1.1 fica clara a importância dos consumidores residenciais e o grande consumo pelo qual são responsáveis.



**Figura 1.1 - Consumo de energia elétrica no Brasil**

Fonte: Ministério de Minas e Energia [2]

Desde então a preocupação com o desperdício de energia cresceu muito entre os consumidores residenciais que passaram a exercer um maior controle dos seus gastos com energia elétrica e várias alternativas para se reduzir o consumo de energia vêm sendo desenvolvidas, como por exemplo, a utilização de painéis solares. Mas a melhor e mais barata forma de economizar continua sendo através de um acompanhamento e controle do consumo.

UNIDADE: %								
IDENTIFICAÇÃO	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
SETOR ENERGÉTICO	3,2	3,6	3,6	3,5	3,7	3,6	3,7	4,2
RESIDENCIAL	25,2	23,8	22,6	22,3	21,8	22,2	22,0	22,1
COMERCIAL	14,3	14,4	14,2	14,1	13,9	14,3	14,2	14,2
PÚBLICO	8,8	8,8	8,8	8,7	8,4	8,7	8,5	8,2
AGROPECUÁRIO	3,9	4,0	4,1	4,2	4,1	4,2	4,2	4,3
TRANSPORTES	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4
INDUSTRIAL	44,2	45,0	46,2	47,0	47,8	46,7	47,0	46,7
<b>TOTAL</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

**Tabela 1.1 - Composição setorial do consumo de energia elétrica no Brasil**

Fonte: Ministério de Minas e Energia [2]

Além disso, as concessionárias de energia e até a própria Eletrobrás vêm desenvolvendo pesquisas e estudos de forma a desenvolver tecnologias que reduzam e até eliminem as chances de fraudes na tarifação dos usuários.

Dentre essas novas tecnologias, o SMC – Sistema de Medição Centralizada [3], desenvolvido pelo CEPEL e já posto em funcionamento pela empresa AMPLA Energia e Serviços S.A., realiza a medição do consumo de energia de cada usuário junto ao transformador, evitando assim que fraudes sejam feitas. No entanto este método priva os usuários do acesso ao Terminal de Consulta ao Consumo, que é ainda hoje, o único meio do usuário acompanhar o seu consumo.

Neste sentido, esse trabalho busca complementar a utilização de novas tecnologias para tarifação que privem o usuário de acompanhar a evolução do seu consumo além de permitir, através da interface USB um meio de fácil interação com o computador, permitindo a análise de uma série de dados de forma simples e fácil, possibilitando ao usuário exercer um controle mais eficaz do seu consumo.

## 1.4 – Objetivos

O objetivo deste trabalho consiste em desenvolver um equipamento que seja capaz de medir a tensão, corrente, energia e potência elétrica consumidas por um ou mais equipamentos. Desta forma têm-se como objetivos específicos: (1) medir a potência consumida com boa precisão, a fim de calcular a energia consumida de forma correta; (2) Implementar em hardware uma série de funcionalidades que permitam uma visualização fácil e direta de informações obtidas pelo sistema; (3) permitir ao usuário armazenar o histórico das medições realizadas e (4) como todo projeto de engenharia, buscar soluções mais baratas.

## **1.5 – Metodologia**

Existem, basicamente, duas possíveis abordagens para se realizar a medição e monitoramento da potência, energia e todas as demais grandezas propostas neste trabalho: a digital e a analógica.

Na abordagem digital os sinais de tensão e corrente devem ser amostrados com pelo menos o dobro da frequência do sinal de interesse, de forma a permitir que um processamento mais sofisticado seja realizado por um DSP, possibilitando, desta forma, analisar a influência das componentes harmônicas dos sinais para obtenção de valores precisos na medição.

A adoção deste tipo de tratamento leva à necessidade de inclusão de outros periféricos externos, como por exemplo, um circuito para realizar a interface USB, além do DSP ser um processador mais complexo e por isso demandar um tempo maior no desenvolvimento da aplicação.

Um tratamento analógico dos sinais, por outro lado, retira do processador uma grande carga de trabalho, tornando possível a utilização de um microcontrolador para realizar o processamento necessário. Os microcontroladores atuais possuem um grande conjunto de periféricos integrados, são significativamente mais baratos que os DSPs e, devido a sua grande popularização, possuem um vasto conjunto de informação disponibilizado na internet.

Desta forma, neste trabalho, o processamento dos sinais será realizado, todo ele, de forma analógica, permitindo assim a utilização de um microcontrolador para digitalizar a informação dos sensores, permitindo calcular a tensão aplicada ao circuito, a corrente que por ele circula, as potências e energias ativas, reativas e aparentes consumidas pelo circuito e até mesmo obter o fator de potência [4] correspondente.

## **1.6 – Apresentação**

No capítulo 2 será abordado o funcionamento do circuito utilizado para condicionar os sinais de tensão e corrente da rede elétrica, permitindo que os sinais possam ser lidos pelo microcontrolador.

No capítulo 3 é descrito o funcionamento do microcontrolador, como os cálculos são realizados e também é feita uma breve abordagem sobre a interface USB do microcontrolador, que é utilizada para realizar a interface com o computador.

Um programa de teste é apresentado no capítulo 4. Este programa é o responsável por realizar a comunicação entre o computador e o hardware e também por armazenar os dados coletados permitindo um processamento posterior.

O capítulo 5 traz os resultados dos testes realizados, e no capítulo 6 temos a conclusão deste trabalho.

# Capítulo 2

## Circuitos

### 2.1 – Princípio de funcionamento

A energia consumida por um equipamento pode ser definida como a potência utilizada e/ou dissipada por ele ao longo de um intervalo de tempo, conforme Eq.(2.1).

$$E = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \quad (2.1)$$

onde a potência instantânea  $P(t)$  é dada por

$$P(t) = V(t) \times I(t) \quad (2.2)$$

Tanto no processamento analógico, quanto no digital, a utilização de sensores que permitam a monitoração da tensão e da corrente instantânea é necessária.

Como o processador adotado neste trabalho, pelos motivos expostos na seção 1.5, não é capaz de processar  $V(t)$  e  $I(t)$  em tempo real e desta forma calcular a potência e energia consumida pelo equipamento monitorado, um circuito eletrônico para o processamento adicional dos sinais obtidos pelos sensores se faz necessário.

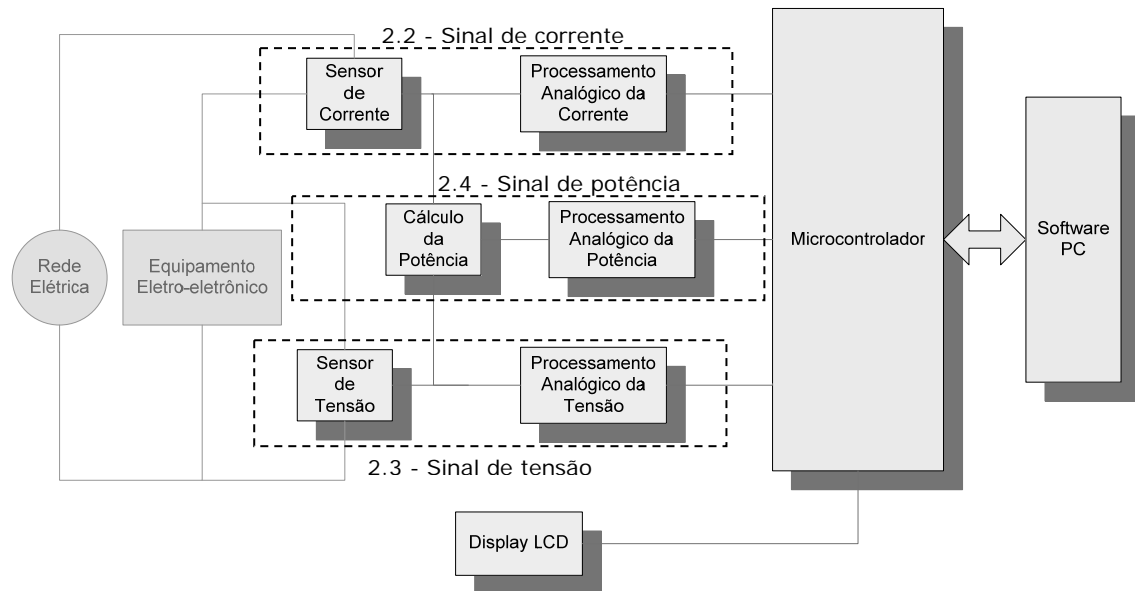
Outra questão que deve ser levada em conta é que hoje a grande maioria dos equipamentos eletro-eletrônicos é alimentada por fontes chaveadas, que possuem uma eficiência muito superior à das fontes lineares. Esse tipo de fonte, no entanto, como o seu próprio nome diz, trabalha com o chaveamento da tensão de entrada e por esse motivo a corrente que esse circuito retira da rede elétrica não tem forma senoidal, mas pulsante. Esse fato faz com que não seja trivial o cálculo do valor RMS da corrente e nem o cálculo da potência consumida pelo circuito, uma vez que ela depende diretamente do valor da corrente, como pode ser visto na Eq.(2.2).

Para calcular o valor RMS da tensão é assumido que a tensão da rede elétrica não possua distorções significativas, podendo ser, portanto, considerada uma senóide



perfeita. Essa consideração simplifica o cálculo da tensão RMS sem introduzir grandes erros na medição.

Diante dessas questões, o diagrama em blocos da Fig. 2.1 apresenta uma visão macro do circuito que será projetado e detalhado ao longo deste capítulo.



**Fig. 2.1 - Diagrama em blocos do circuito**

## 2.2 – Sinal de corrente

Nesta seção serão discutidos os blocos Sensor de Corrente e Processamento Analógico do Sinal de Corrente, representados na Fig. 2.1. Um diagrama em blocos mais detalhado do circuito é apresentado no Apêndice B e pode ser utilizado para auxiliar no entendimento do circuito apresentado nesta seção.

Para que seja possível medir a corrente RMS fornecida ao equipamento, é necessário que um transdutor realize o sensoriamento da corrente que circula por este equipamento e a converta em um sinal de tensão proporcional, de forma a permitir, tanto o processamento do sinal para o cálculo do valor RMS da corrente, quanto o processamento para cálculo da potência.

Existem alguns dispositivos que realizam a tarefa de fornecer um sinal de saída proporcional a uma corrente de entrada e o mais simples deles consiste na utilização de um resistor em série. Com a utilização de um resistor de valor conhecido em série com o dispositivo eletro-eletrônico, é possível determinar a corrente que por ele circula,

através da medição da queda de tensão em cima deste resistor. Esse é, possivelmente, o método mais simples para se medir a corrente em um circuito.

Na tabela 2.1, é possível visualizar o sinal de tensão obtido ao monitorar correntes de 1A e 50A para três valores distintos de resistores.

<b>Resistor</b>	<b>1mΩ</b>		<b>5mΩ</b>		<b>10mΩ</b>	
Corrente	1A	50A	1A	50A	1A	50A
$V_{out}$	1mV	50mV	5mV	0,25V	10mV	0,5V
Potência	1mW	2,5W	5mW	12,5W	10mW	25W

**Tabela 2.1 - Análise de resistores série para medição de corrente**

A partir dos dados apresentados na Tabela 2.1, concluímos que ao aumentar o valor do resistor temos o problema da dissipação de potência no circuito que se torna demasiadamente alta. Por outro lado, com o uso de resistores de valores mais baixos, o sinal de tensão de saída é bem pequeno. Note, por exemplo, que para uma corrente de 1A, que não é a menor corrente a ser medida por esse instrumento, o resistor de 1mΩ fornece uma tensão de apenas 1mV, ficando a medição muito sensível a interferências. Esta situação, no entanto, pode ser contornada com a utilização de um circuito amplificador de ganho alto, baixo *offset* e baixo ruído de entrada que certamente não é um circuito tão trivial de ser projetado.

No entanto a maior desvantagem deste tipo de medição está na falta de isolamento entre o circuito de potência e o instrumento.

Uma boa opção seria a utilização de um transformador de corrente que praticamente não apresenta dissipação de potência em forma de calor, tem excelente linearidade na frequência de operação e oferece isolamento entre equipamento e rede elétrica, mas apresenta dimensões relativamente grandes.

Um outro transdutor utilizado é o sensor de corrente por efeito Hall [5]. Este tipo de sensor apresenta baixas perdas por dissipação, boa linearidade e proporciona uma boa isolamento para o equipamento em relação ao circuito de potência e está disponível em forma de circuito integrado, inclusive SMD.

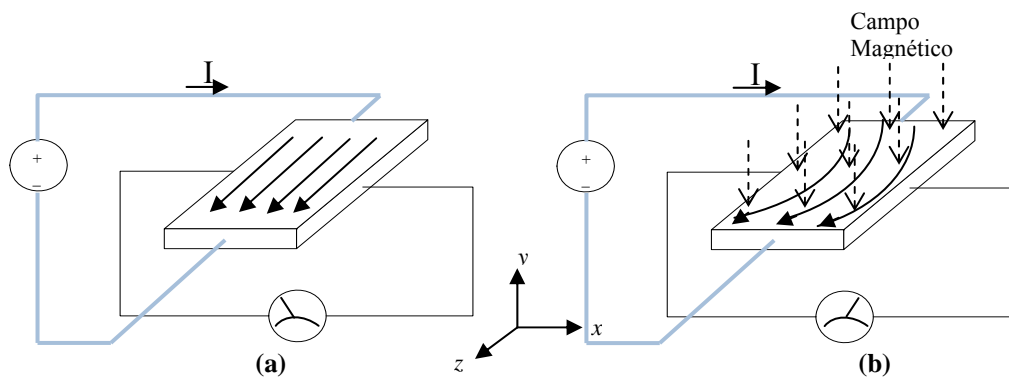
Embora o transformador de corrente seja uma solução clássica e o tamanho não seja um fator que inviabilize a sua utilização, o uso do sensor por efeito Hall será adotado neste trabalho, pois nos permitirá adquirir maior conhecimento sobre esta tecnologia que vem ganhando, cada vez mais, espaço no mercado.

De forma resumida, os sensores de efeito Hall têm seu princípio de funcionamento baseado na Equação de Forças de Lorentz (Eq.(2.3)).

$$\vec{F} = q\vec{E} + q_o\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.3)$$

Ao aplicar uma corrente  $I$  através de uma placa de metal, conforme Fig. 2.2(a), haverá uma força resultante devido a ação do campo elétrico que irá deslocar os elétrons, conferindo-lhes velocidade  $\vec{v}$  na direção  $z$ .

Ao aplicar um campo magnético na direção  $y$  uma componente de força devido a esse campo irá aparecer, modificando a força resultante que atua sobre os elétrons. Como a componente de força devida ao campo magnético é dada pelo produto vetorial entre  $\vec{v}$  e  $\vec{B}$ , a força devido ao campo magnético será perpendicular a estes dois vetores, portanto na direção  $x$ , forçando os elétrons a traçarem uma trajetória curvilínea, como pode ser visto na Fig. 2.2(b)



**Fig. 2.2 – Funcionamento do sensor de corrente por efeito Hall**

Com o acúmulo de elétrons na extremidade direita da placa, um campo elétrico será criado na direção  $x$ , gerando uma diferença de potencial dada pela Eq.(2.4).

$$V = -wvB \quad (2.4)$$

onde  $w$  corresponde à largura (dimensão na direção  $x$ ) da placa de metal.

O sensor Hall escolhido para este projeto foi o ACS756SCA-050B da Allegro MicroSystems que apresenta as seguintes características:

- Erro total de apenas 0.8% na saída;
- Isolação de 3kV dos pinos de alta potência para os pinos de sinal;

- Resistência interna de apenas  $130\mu\Omega$ ;
- Sensibilidade de  $40\text{mV/A}$ ;
- Corrente máxima de entrada de  $50\text{ A}$ ;
- Calibração de fábrica.

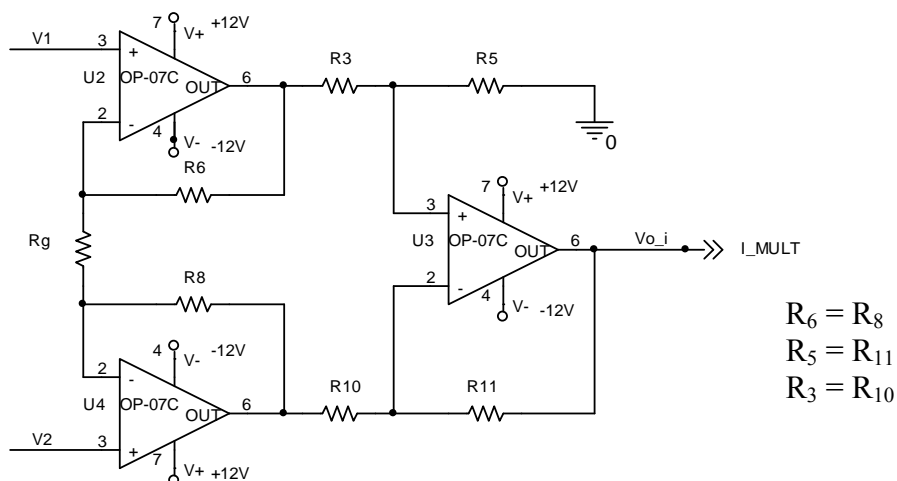


**Fig. 2.3 - Sensor de corrente por efeito Hall ACS756**  
 Fonte: Allegro Microsystems Inc.

Uma desvantagem deste sensor para os demais reside no nível DC inserido pelo sensor no sinal de saída. Por ser um sensor “single supply”, a tensão AC proporcional à corrente de entrada excursiona sobre um nível DC de amplitude igual a  $V_{cc}/2$ , conforme visto na Eq.(2.5), o que exigirá um melhor tratamento para remover o nível DC do sinal sem alterar a fase do mesmo, pois isso influenciaria no cálculo da potência do circuito.

$$V_{o_{hall}} = \frac{V_{cc}}{2} + 0,04 \times I_{rede} \quad (2.5)$$

Um circuito capaz de remover o nível DC do sinal sem alterar a fase desse sinal é o amplificador de instrumentação (Fig. 2.4), que tem o sinal de saída proporcional à diferença das tensões de entrada.



**Fig. 2.4 – Amplificador de Instrumentação**

O uso de um capacitor em série para o cancelamento do nível DC ( $V_{cc}/2$ ) do sinal é inviável, pois esse capacitor além de defasar o sinal, eliminaria também o nível DC presente nas correntes monitoradas como, por exemplo, em circuitos com fontes chaveadas.

À entrada  $V_1$  do amplificador é conectado o terminal de saída do sensor ACS756-050B e o terminal  $V_2$  é conectado a uma tensão de referência de valor igual à tensão DC presente na saída do sensor Hall. Dessa forma o sinal de saída  $V_{0_i}$ , de acordo com a Eq.(2.6), terá o nível DC cancelado e o sinal de saída será então proporcional somente à corrente que se deseja medir.

$$V_{0_i} = \left(1 + \frac{2 \times R_6}{R_g}\right) \left(\frac{R_5}{R_3}\right) (V_1 - V_2) \quad (2.6)$$

Analisando ainda a Eq.(2.6) verifica-se que o Resistor  $R_g$  é o componente responsável por alterar o ganho do circuito e como o valor RMS da corrente pode variar de 0A a 50A neste circuito, um controle automático de ganho se faz necessário, levando a substituição de  $R_g$  por um potenciômetro digital integrado o que permite ao microcontrolador manter o nível do sinal dentro de limites seguros para o circuito.

O potenciômetro digital adotado foi o MCP41010 da Microchip que oferece uma resistência máxima de 10k $\Omega$  e uma interface SPI para controle.

A resistência entre o terminal central do potenciômetro e as extremidades é alterada de acordo com os 8 bits recebidos através da interface SPI.

Apesar deste potenciômetro, segundo o manual, só funcionar com tensões positivas aplicadas sobre os seus terminais, em testes realizados, verificou-se que, para níveis de tensão AC inferiores a 350mV, o resistor apresenta um comportamento completamente linear, condizente com o esperado de um resistor passivo.

Por este motivo, o sinal fornecido pelo sensor Hall é atenuado em 10 vezes por um divisor resistivo, limitando o sinal a uma amplitude máxima de 200mV e para compensar essa atenuação, os resistores  $R_5$  e  $R_3$  foram projetados para amplificar o sinal em 10 vezes

$$\frac{R_5}{R_3} = 10$$

fazendo com que o ganho do amplificador em relação ao sinal de saída do sensor ACS756-050B seja dado pela Eq. (2.7).

$$A_{v_{real}} = \left( 1 + \frac{2 \times R_6}{R_g} \right) \quad (2.7)$$

Como o sinal de saída do amplificador de instrumentação é utilizado como entrada, tanto no bloco Processamento Analógico do Sinal de Corrente quanto no bloco Cálculo da Potência, a faixa de ganho  $A_{v_{real}}$  do amplificador de instrumentação, e consequentemente o valor do resistor  $R_6$  só podem ser especificados com segurança, após conhecidos os níveis de tensão suportados nas entradas destes circuitos.

Contudo, para não haver uma interrupção no projeto deste circuito, considere que a tensão  $V_{0_i}$  de saída deve possuir uma tensão máxima de 5V RMS. O motivo da escolha deste valor ficará mais claro adiante, na seção 2.4, onde será discutido o circuito para tratamento do sinal da potência.

De acordo com a Eq.(2.5), quando a corrente que se deseja monitorar é igual a 50A (valor RMS), o sensor ACS756-050 fornece uma tensão AC, na saída, igual a 2V RMS, logo este amplificador deve ser capaz de reduzir o ganho para um valor menor ou igual ou a

$$A_{v_{real\_min}} = \frac{5}{2,0} \cong 2,5V/V$$

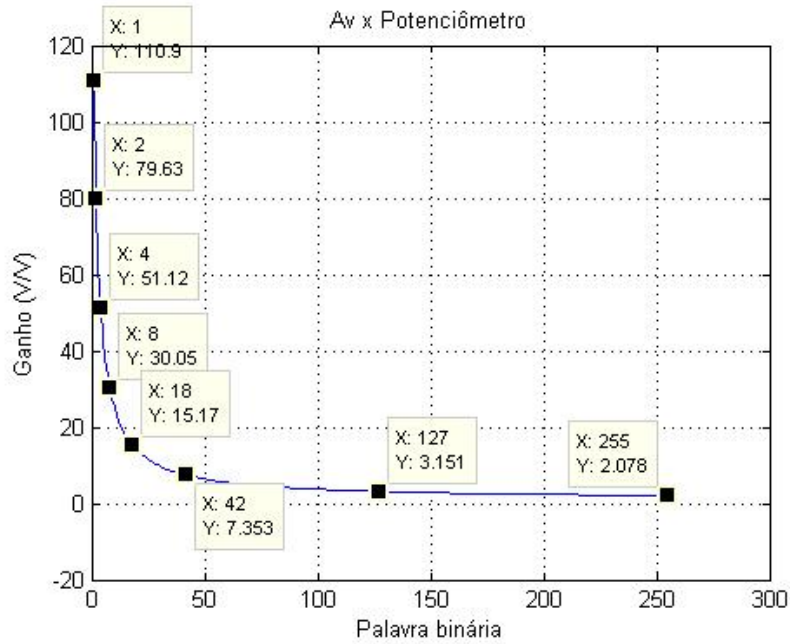
e, portanto

$$R_6 = 5k \rightarrow A_{v_{real\_min}} = 2V/V$$

Sendo o potenciômetro digital MCP41010, responsável por determinar o ganho, utilizar todas as 256 posições possíveis para o terminal central não constitui uma boa escolha devido ao fato de que o ganho do amplificador muda muito pouco de uma posição para outra, fazendo com que o ajuste da amplitude do sinal possa se tornar um processo demasiadamente demorado.

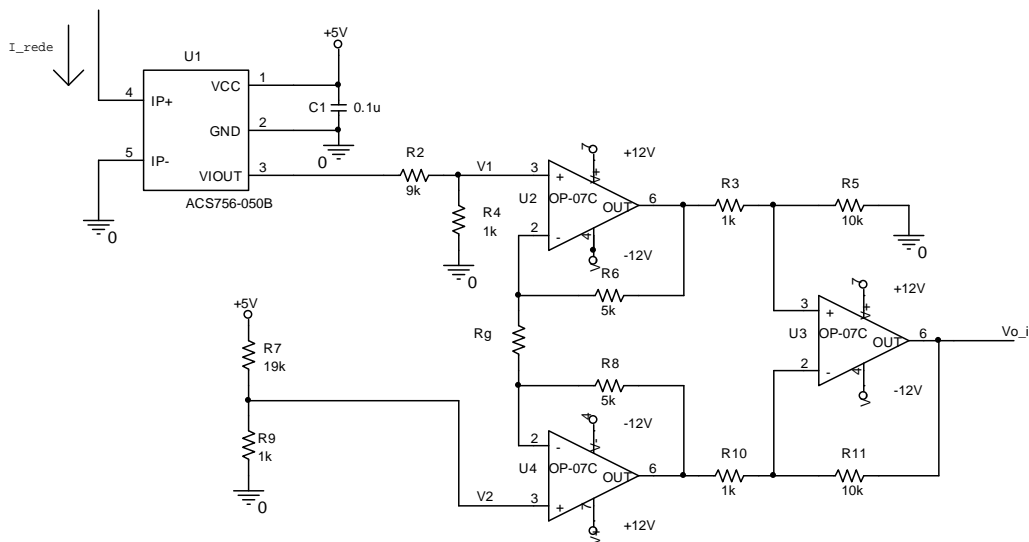
Por este motivo apenas 8 posições, das 256 possíveis, foram utilizadas para ajustar o ganho do amplificador, permitindo um escalamento rápido e eficiente do sinal. As 8 posições, escolhidas de acordo com o ganho obtido pelo circuito, são destacadas

na Fig 2.5 que mostra a relação entre a palavra de 8 bits enviada ao integrado e o ganho do bloco Sensor de Corrente.



**Fig. 2.5 - Relação entre o ganho do bloco Sensor de corrente e os 8 bits de configuração do MCP41010**

Utilizando amplificadores operacionais OP07, que possuem tensão de offset de apenas  $75\mu\text{V}$ , o circuito final é apresentado na Fig. 2.6.

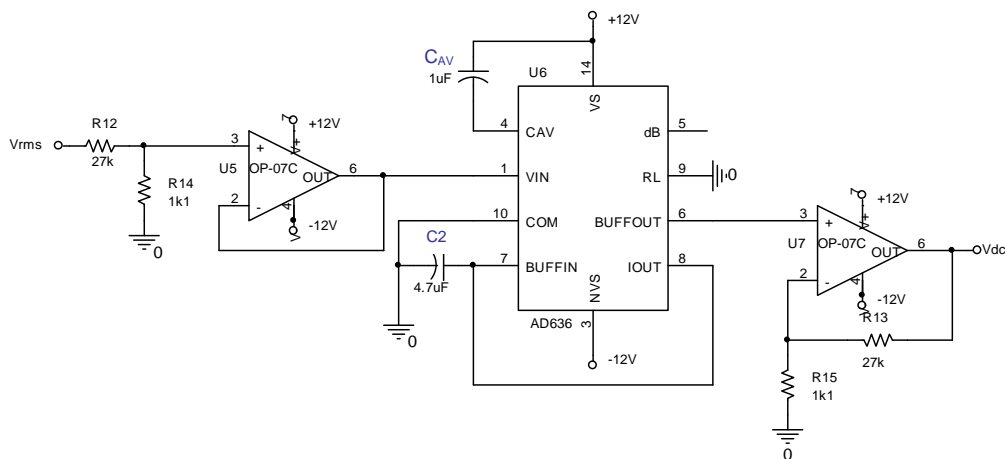


**Fig. 2.6 - Circuito do bloco Sensor de Corrente**

O bloco denominado Processamento Analógico do Sinal de Corrente é responsável por fornecer um sinal DC proporcional ao valor RMS da corrente

monitorada. Para este propósito será utilizado o circuito integrado AD636 da Analog Devices, que é um conversor True RMS-DC.

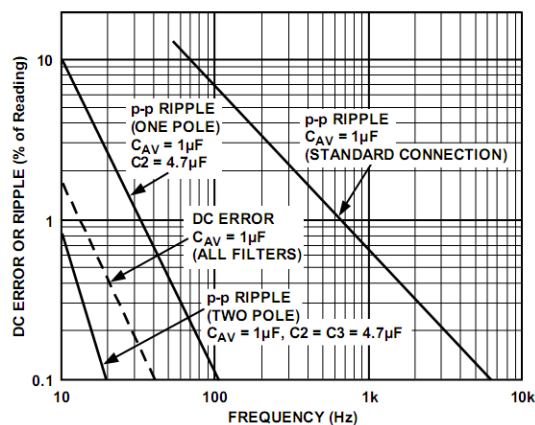
Este conversor, no entanto, aceita tensões de no máximo 200mV de pico na entrada e por isso será necessário atenuar o sinal (25 vezes), calcular o nível DC correspondente ao valor RMS (AD636) do sinal e em seguida amplificar novamente o sinal de saída (25 vezes), para permitir que o microcontrolador realize uma leitura mais precisa.



**Fig. 2.7 - Circuito de conversão RMS-DC do sinal de corrente**

O buffer na entrada foi utilizado porque o AD636 possui impedância de entrada de apenas 6,6kΩ.

Os capacitores foram projetados de acordo com orientações fornecidas pelo manual do integrado e na configuração utilizada temos um erro de 0,3% de erro para um sinal de 60Hz, conforme mostrado na Fig. 2.8.



**Fig. 2.8 - Erro de saída do AD636 vs tipos de filtros**  
Fonte: Analog Devices.



Após o processamento do sinal de corrente a saída do circuito de conversão RMS-DC fornece na sua saída um sinal de tensão DC, que está relacionado com a corrente monitorada, de acordo com a Eq.(2.8).

$$V_{DC} = I_{REDE} \times 0,04 \times \left( \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \times \left( 1 + \frac{2 \times 5k}{R_g} \right) \times \left( \frac{R_5}{R_3} \right) \times \left( \frac{R_{14}}{R_{12} + R_{14}} \right) \times \left( 1 + \frac{R_{13}}{R_{15}} \right) \quad (2.8)$$

onde  $I_{REDE}$  corresponde ao valor RMS da corrente monitorada.

### 2.3 – Sinal de tensão

Nesta seção serão discutidos os blocos funcionais Sensor de Tensão e Processamento Analógico do Sinal de Tensão, representados na Fig. 2.1. Um diagrama em blocos mais detalhado do circuito é apresentado no Apêndice B e pode ser utilizado para auxiliar no entendimento do circuito apresentado nesta seção.

O bloco Sensor de Tensão deve ser capaz de, assim como o sensor de corrente, fornecer uma cópia escalada do sinal medido.

Portanto, este sensor deve atender requisitos, tais como, boa linearidade, boa sensibilidade, baixa dissipação de potência térmica e, além disso, oferecer boa isolamento entre o equipamento de medição e a rede elétrica.

Um componente que atende a todas essas especificações é o transformador de tensão. Por ser utilizado apenas para medir a tensão da rede, não necessitará prover correntes maiores do que alguns poucos mili-ampéres, fazendo com que o transformador especificado seja de dimensões mais reduzidas.

Por estes motivos, foi utilizado um transformador como elemento sensor de tensão e sua especificação é apresentada na tabela 2.2.

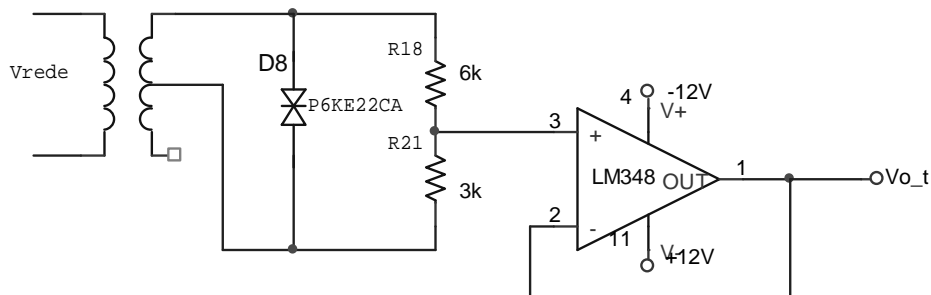
Parâmetro	Valor
Tensão Primário	127V/220V
Tensão Secundário	12V+12V
Corrente	50mA

**Tabela 2.2 – Especificação do transformador**

Para finalizar o projeto do bloco Sensor de Tensão é necessário adequar o sinal de saída do transformador, de 12V RMS, para um valor adequado para a utilização nos circuitos à ele conectados.

Este circuito, em conjunto com o bloco Processamento Analógico do Sinal de Tensão, é responsável por medir uma tensão de aproximadamente 127V de pico, e neste caso, a tensão DC de saída disponibilizada para a leitura do microcontrolador não deve ultrapassar 5V DC.

Para trabalhar com certa folga, principalmente devido a picos de tensão que podem surgir na rede elétrica, a saída do transformador será atenuada em 3 vezes, resultando no circuito apresentado na Fig. 2.9, que fornece uma tensão de aproximadamente 4,2V RMS quando a tensão da rede for 127V RMS.



**Fig. 2.9 - Circuito Sensor de Tensão**

O *buffer* na saída do circuito tem a função de isolar o sensor, permitindo que ele seja conectado a qualquer outro tipo de circuito. O componente P6KE22CA visto no circuito da Fig. 2.9, é um transil que tem a função de proteger o circuito contra surtos de tensão durante intervalos de tempo muito curtos, da ordem de microssegundos, na rede elétrica. Este transil garante que a tensão sobre o divisor resistivo não ultrapasse 23V.

Finalizado o projeto deste bloco, temos que a relação entre a tensão saída e a tensão da rede elétrica é dada pela Eq.(2.9)

$$V_{0\_t} = V_{REDE} \times \frac{1}{k} \times \frac{R_{21}}{R_{18} + R_{21}} \quad (2.9)$$

onde  $k = \frac{V_{prim}}{V_{sec}}$  e  $V_{REDE}$  é o valor RMS da tensão da rede elétrica..

O bloco denominado Processamento Analógico do Sinal de Tensão deve ser capaz de fornecer uma tensão DC ao microcontrolador, permitindo-o medir o valor da tensão da rede.

A tensão da rede elétrica, diferentemente da corrente, pode ser aproximada, com boa precisão, por uma senóide perfeita. Neste caso a conversão do valor RMS deste sinal para um valor DC é bem definido.

Ao retificar um sinal senoidal, seu valor RMS não é alterado e com um sinal retificado é possível calcular o seu valor DC.

O valor RMS de um sinal senoidal dado por

$$V_{RMS} = \frac{V_{pico}}{\sqrt{2}} \quad (2.10)$$

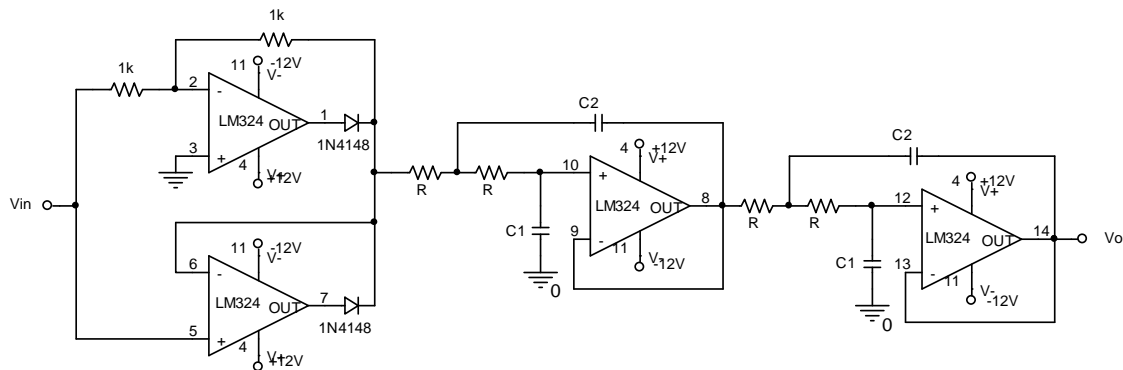
e seu valor médio por

$$V_{DC} = \frac{2 \times V_{pico}}{\pi} \quad (2.11)$$

Utilizando a Eq.(2.10) e a Eq.(2.11), é possível estabelecer uma relação entre o valor RMS de um sinal senoidal e o valor médio desse mesmo sinal retificado. Essa relação é dada por

$$V_{DC} = \frac{2\sqrt{2} \times V_{RMS}}{\pi} \quad (2.12)$$

O circuito responsável por fazer essa conversão pode ser visto na Fig 2.10 e é composto por um retificador e um filtro. O circuito retificador é formado por um retificador de precisão [6], que tem como principal vantagem o fato de o sinal de saída não sofrer com as quedas de tensão dos diodos, fornecendo, na saída, exatamente o módulo da tensão de entrada.



**Fig. 2.10 - Conversor RMS-DC para o sinal de tensão**

Depois de retificado o sinal deve ser filtrado para que seja obtido o seu valor médio. Para filtrar o sinal será utilizado uma estrutura composta por 2 filtros ativos de segunda ordem cascadeados, montados em uma configuração do tipo Sallen-Key [7], proporcionando uma atenuação total de 80dB/década.

A realimentação direta da saída para a entrada inversora determina o ganho unitário apresentado por esta configuração.

Para implementar uma aproximação de Butterworth neste filtro, é necessário que o fator de qualidade Q do filtro seja projetado de acordo com a Eq. (2.13).

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} = 0,707 \quad (2.13)$$

que resulta em

$$C_2 = 2C_1$$

Quando o sinal é retificado sua frequência dobra, portando o sinal que se deseja filtrar possui uma frequência de 120Hz. Ao projetar o filtro para uma frequência de corte uma década abaixo da fundamental, em 12 Hz, o sinal em 120Hz sofrerá uma atenuação de 10.000 vezes (-80dB), proporcionando um ripple máximo de 0,5mV.

$$V_{ripple} = V_{máx} \times A$$

$$V_{ripple} = \frac{5}{10000}$$

$$V_{ripple} = 500\mu V$$

A frequência de corte neste filtro é dada pela Eq.(2.14).

$$f = \frac{1}{2\pi R \sqrt{C_2 C_1}} \quad (2.14)$$

Escolhendo os valores dos capacitores, segundo a relação obtida através da Eq.(2.13), foi possível então determinar o valor dos resistores. Os valores obtidos foram:

$$R = 39k\Omega$$

$$C_2 = 470nF$$

$$C_1 = 220nF$$

Portanto, os circuitos das Fig. 2.8 e 2.9, em conjunto, fornecem para o microcontrolador um sinal DC relacionado ao sinal RMS através da Eq.(2.15).

$$V_{DC} = V_{REDE} \times \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \times \frac{1}{k} \times \left( \frac{R_{21}}{R_{21} + R_{18}} \right) \quad (2.15)$$

## 2.4 – Cálculo da potência

Nesta seção serão discutidos os blocos funcionais Sensor de Potência e Processamento Analógico do Sinal de Potência, representados na Fig. 2.1. O diagrama em blocos do Apêndice B pode ser utilizado para auxiliar no entendimento do circuito apresentado nesta seção.

Antes de iniciar o projeto do circuito, vejamos exatamente como a potência média é calculada. A potência média dada pelo produto de quaisquer sinais de corrente e tensão é dada por

$$P_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t)I(t)dt \quad (2.16)$$

Ou seja, o valor médio do produto dos sinais, corresponde à potência média, também conhecida como potência ativa. Considerando uma carga linear, por exemplo, a potência ativa consumida por este circuito pode ser calculada pela Eq. (2.16).

$$P_{ativa} = \frac{1}{T} \int_0^T V_p \text{sen}(wt) \times I_p \text{sen}(wt + \phi) dt \quad (2.17)$$

$$P_{ativa} = \frac{V_p I_p}{T} \int_0^T \frac{\cos(\phi)}{2} + \frac{\cos(2wt + \phi)}{2} dt$$

$$P_{ativa} = \frac{V_p I_p}{2} \left[ \cos(\phi) + \frac{1}{T} \int_0^T \cos(2wt + \phi) dt \right]$$

Neste projeto, para calcular o produto entre os sinais de corrente e tensão será utilizado um multiplicador analógico e o CI utilizado para realizar essa tarefa é o AD632A.

Este integrado tem a capacidade de realizar algumas operações matemáticas, dentre elas a operação de multiplicação e já é pré-calibrado para um erro máximo de 1%.

A relação entre saída e entrada deste integrado ao realizar a operação de multiplicação é dada pela Eq. (2.18).

$$S = \frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{10} \quad (2.18)$$

onde

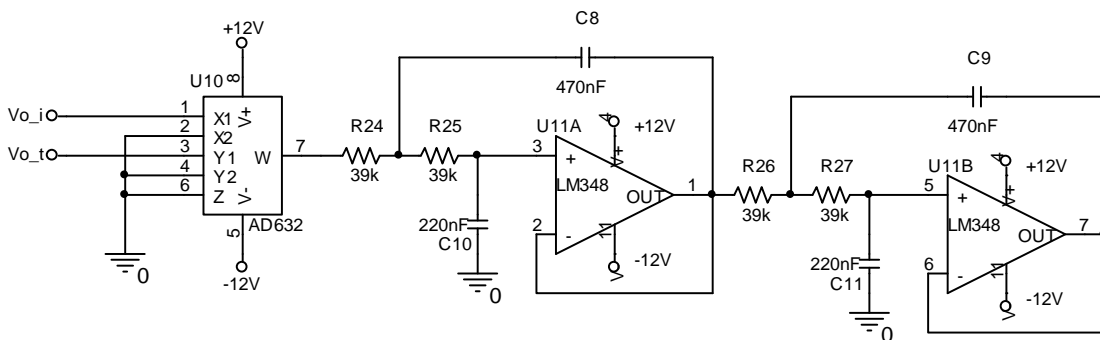
$X_1 - X_2$  = sinal de saída do bloco Sensor de Tensão

$Y_1 - Y_2$  = sinal de saída do bloco Sensor de Corrente

Portanto o bloco Sensor de Potência da Fig. 2.1 representa este circuito integrado que é o responsável por multiplicar os sinais, e desta forma, fornecer a potência instantânea do circuito.

O bloco funcional denominado Processamento Analógico do Sinal de Potência, deve ser capaz obter um valor DC, correspondente à potência ativa, do sinal de saída do multiplicador. Para isso basta extrair o valor médio do sinal, utilizando o mesmo filtro projetado na seção 2.3.

Deste modo o projeto do circuito para sensoreamento e processamento do sinal de potencia está finalizado e pode ser visto na Fig. 2.11.



**Fig. 2.11 - Circuito para medição da potência ativa**

A saída do multiplicador analógico é capaz de fornecer sinais de até 11V na saída, no entanto após ser filtrada, essa tensão será lida pelo conversor A/D do microcontrolador que suporta tensões de até 5V DC na entrada.

Portanto, é preciso que a saída do multiplicador a componente DC não ultrapasse 5V e para isso, segundo a Eq. (2.18), os sinais de entrada do multiplicador, não devem ultrapassar o limite de 7V de pico(considerando que os sinais X e Y possam atingir a mesma amplitude).

Sendo 7V de pico o limite superior, o valor máximo permitido para os sinais de saída dos blocos Sensor de Tensão e Sensor de Corrente é de 5V RMS, conforme foi exposto na seção 2.2.

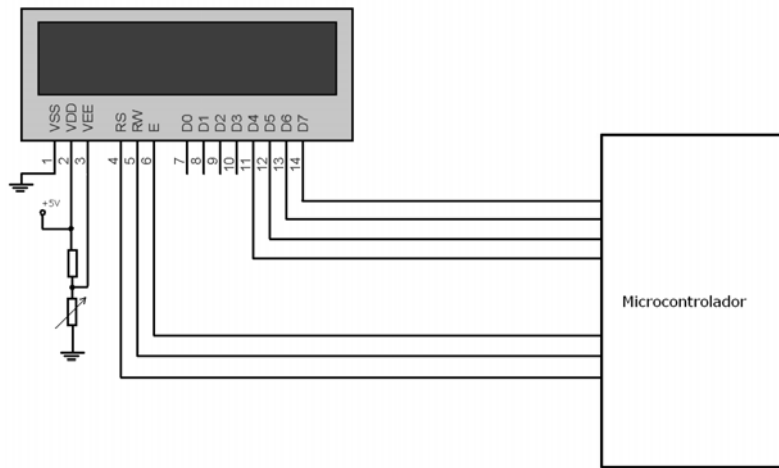
Após todas as considerações feitas, chegamos à Eq.(2.19) que relaciona o sinal DC convertido pelos blocos Sensor de Potência e Processamento Analógico do Sinal de Potência com a potência ativa consumida pelo equipamento monitorado.

$$P_{DC} = \frac{P_{ATIVA} \times \frac{1}{k} \times \left( \frac{R_{21}}{R_{18} + R_{21}} \right) \times 0,04 \times \left( \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \times \left( 1 + \frac{2 \times 5k}{Rg} \right) \times \left( \frac{R_5}{R_3} \right)}{10} \quad (2.19)$$

## 2.5 – Display LCD

O *display* LCD é um módulo composto pelo LCD propriamente dito e o controlador do LCD, o que simplifica muito a sua utilização pois apenas um circuito externo para controle de contraste, realizado através de um divisor resistivo, é necessário além do microcontrolador que é o responsável por enviar as informações que deverão ser mostradas no LCD.

Por ser um módulo de baixo custo e fácil de ser encontrado no mercado, o módulo LCD utilizado neste projeto foi o MGD1602B que possui 2 linhas de 16 caracteres e um controlador de LCD compatível com o HD44780 da Hitachi.

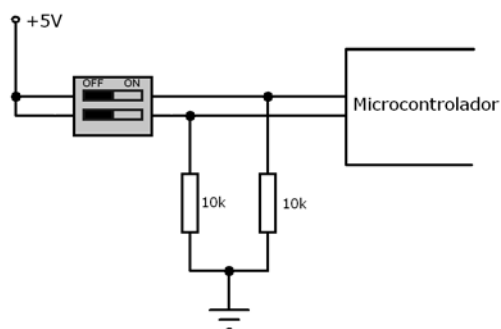


**Fig. 2.12 – Ligação entre o módulo LCD e o microcontrolador**

Este módulo LCD possui 3 bits de controle (RS, RW e E) e 8 bits de dados (D<sub>0</sub> a D<sub>7</sub>), mas possui um modo de funcionamento que permite utilizar apenas 4 bits para transferência de dados. Neste modo de 4 bits apenas os terminais referentes aos bits mais significativos (D<sub>4</sub> a D<sub>7</sub>) do *display* LCD são utilizados.

Devido à necessidade de visualização de um grande número de informações (tensão, corrente, potência, energia e outros) e à limitação do LCD em permitir apenas a apresentação de duas medidas por vez, é oferecida ao usuário a facilidade de seleção das medidas desejadas através de dois botões. A seleção da informação visualizada em cada linha é realizada de forma independente, permitindo que o usuário tenha a liberdade de escolher quais as duas medidas que deseja visualizar simultaneamente.

Neste caso, serão utilizados dois botões *on-off*, normal-abertos, ligados em *pull-down* e ao microcontrolador conforme mostrado na figura 2.13. Cada acionamento do botão altera o conteúdo do *display* na linha correspondente.



**Fig.2.13 - Ligação entre chaves e microcontrolador**

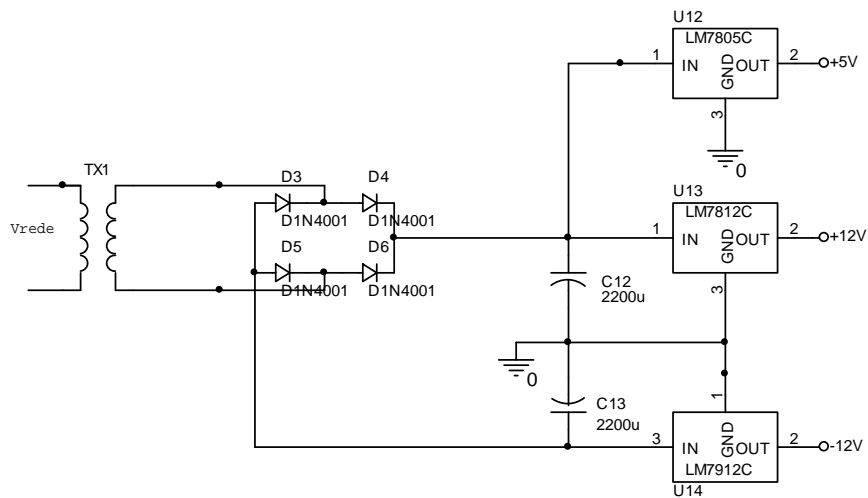


## 2.6 – Fonte de Alimentação

A fonte de alimentação não está representada no diagrama em blocos apresentado na Fig.2.1, mas é essencial para o funcionamento de todo circuito.

Neste projeto foi feita a opção pela utilização de uma fonte linear devido à facilidade e à simplicidade do projeto da mesma.

O esquema completo da fonte é mostrado na Fig. 2.14.



**Fig. 2.14 - Fonte linear de tensão regulada**

Vale observar que o transformador aqui utilizado não é o mesmo citado na seção 2.3, pois a utilização dos reguladores lineares da série LM78XX e LM79XX causa a distorção do sinal no secundário do transformador.

Para construção da fonte foi utilizado um retificador de onda completa em ponte (D<sub>3</sub> a D<sub>6</sub>) com filtro capacitivo convencional (C<sub>12</sub> a C<sub>13</sub>). Para regulagem das tensões +12V, -12V e +5V, foram usados CIs reguladores de tensão, respectivamente, LM7812C, LM7912C e LM7805C.

# Capítulo 3

## Microcontrolador

### 3.1 – A Escolha do Microcontrolador

Existe hoje no mercado um grande número de fabricantes de microcontroladores, e cada um desses fabricantes, normalmente, disponibiliza no mercado algumas famílias de microcontroladores, cada uma destinada a um ramo de aplicação específico, com os mais diversos tipos de periféricos integrados e com os mais variados preços.

Diante deste cenário, é natural que o projetista adote microcontroladores já conhecidos ou que pelo menos utilizem linguagens de programação com as quais o projetista está familiarizado, reduzindo assim o tempo de desenvolvimento.

Por estes motivos, um microcontrolador da Microchip foi adotado neste trabalho. Dentre as diversas famílias de microcontroladores disponíveis, a série PIC18F composta por microcontroladores de 8 bits de alto desempenho e baixo custo, se mostrou a mais adequada a este projeto.

O PIC, como é mais conhecido o microcontrolador da Microchip, utilizado neste projeto foi o PIC18F4550, que dentre suas diversas características, podemos destacar:

- Interface USB 2.0 Full-Speed;
- Velocidade da CPU de 12 MIPS;
- 35 pinos de entrada e saída;
- 1 conversor A/D de 10 bits @ 100Ksps, multiplexado em 13 entradas;
- 2KB de memória RAM;
- Interface serial SPI;
- 4 temporizadores digitais;
- Multiplicador em hardware de 8 bits (ciclo único de clock)

Outra vantagem na escolha dos microcontroladores da Microchip é a extensa lista de compiladores desenvolvidos para seus microcontroladores. A própria Microchip

disponibiliza, na sua homepage, compiladores para as linguagens Assembly e C, sendo que o compilador C é disponibilizado em versão de avaliação.

Além do compilador, a Microchip também fornece gratuitamente uma IDE chamada MPLAB, para auxiliar no gerenciamento e organização dos projetos, além de permitir a gravação e até mesmo a depuração dos microcontroladores com o uso do gravador/depurador ICD2, utilizado neste trabalho.

Diante das vantagens apresentadas e do fato desses softwares possuírem grande aceitação entre os projetistas e conseqüentemente um vasto conjunto de fóruns e listas de discussão na internet, o uso dessas ferramentas será adotado para o desenvolvimento deste projeto.

### **3.2 – *Framework* USB**

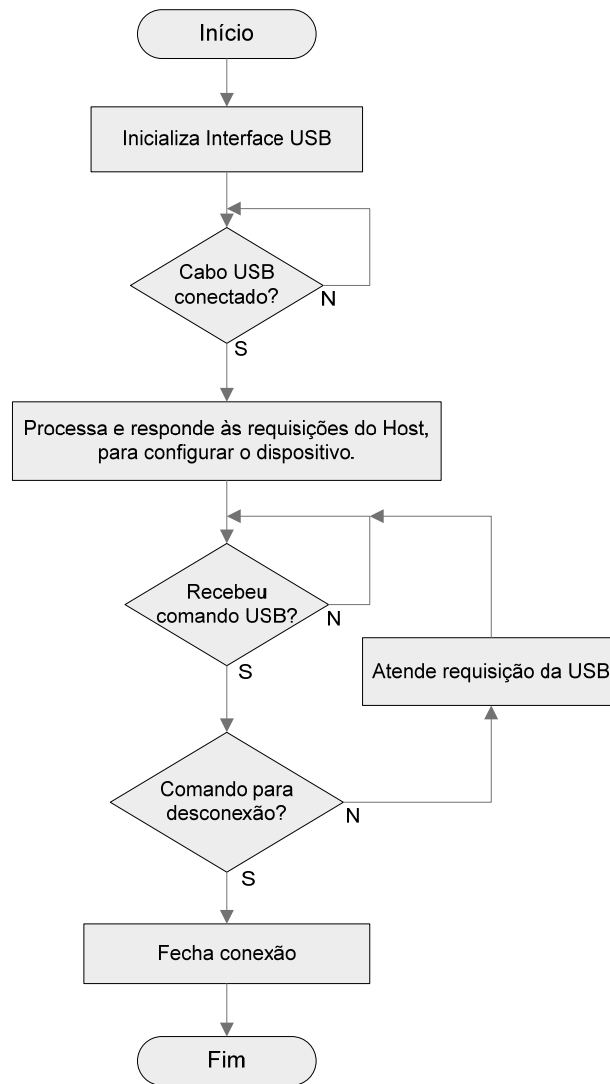
A Microchip disponibiliza em sua página na internet um *framework* bastante extenso, uma vez que o protocolo USB possui um elevado nível de complexidade, para o MPLAB. Este *framework* implementa as rotinas e protocolos descritos na Especificação USB 2.0 [8].

Este *framework*, também chamado de MCHPFSUSB, pode ser obtido gratuitamente através do site da Microchip.

O ponto fraco desta implementação do *framework* USB é a escassa documentação fornecida pela Microchip. Por este motivo foi necessário um tempo maior que o planejado para entender o seu funcionamento básico, de forma a adequá-lo a esta aplicação.

De forma simplificada, o funcionamento da USB se dá de acordo com fluxograma da Fig. 3.1. Esta estrutura é a sugerida na implementação feita pela Microchip e para se comunicar através da USB são utilizadas, basicamente, as funções USBGenWrite e USBGenRead para escrever e ler, respectivamente, na interface USB.

Na inicialização, os registradores e variáveis relacionadas ao funcionamento do módulo USB são inicializados. Se não houver um cabo USB conectado, o PIC opera como se a interface USB não existisse e realiza normalmente as demais funções que devem ser realizadas pelo microcontrolador.

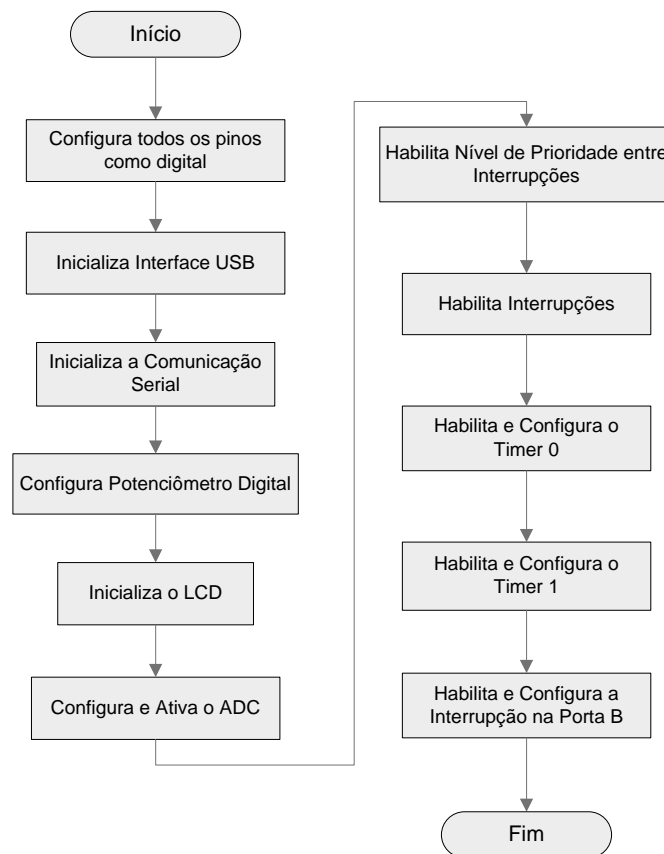


**Fig. 3.1 - Fluxograma de funcionamento da USB**

### **3.3 – Rotina de Inicialização do Medidor**

A rotina de inicialização constitui uma etapa importante na execução do firmware do PIC, pois é neste momento que os periféricos são devidamente configurados e ativados, preparando o medidor para a execução das suas tarefas.

A seqüência de inicialização é mostrada no fluxograma da Fig 3.2.



**Fig. 3.2 - Sequência de inicialização do PIC**

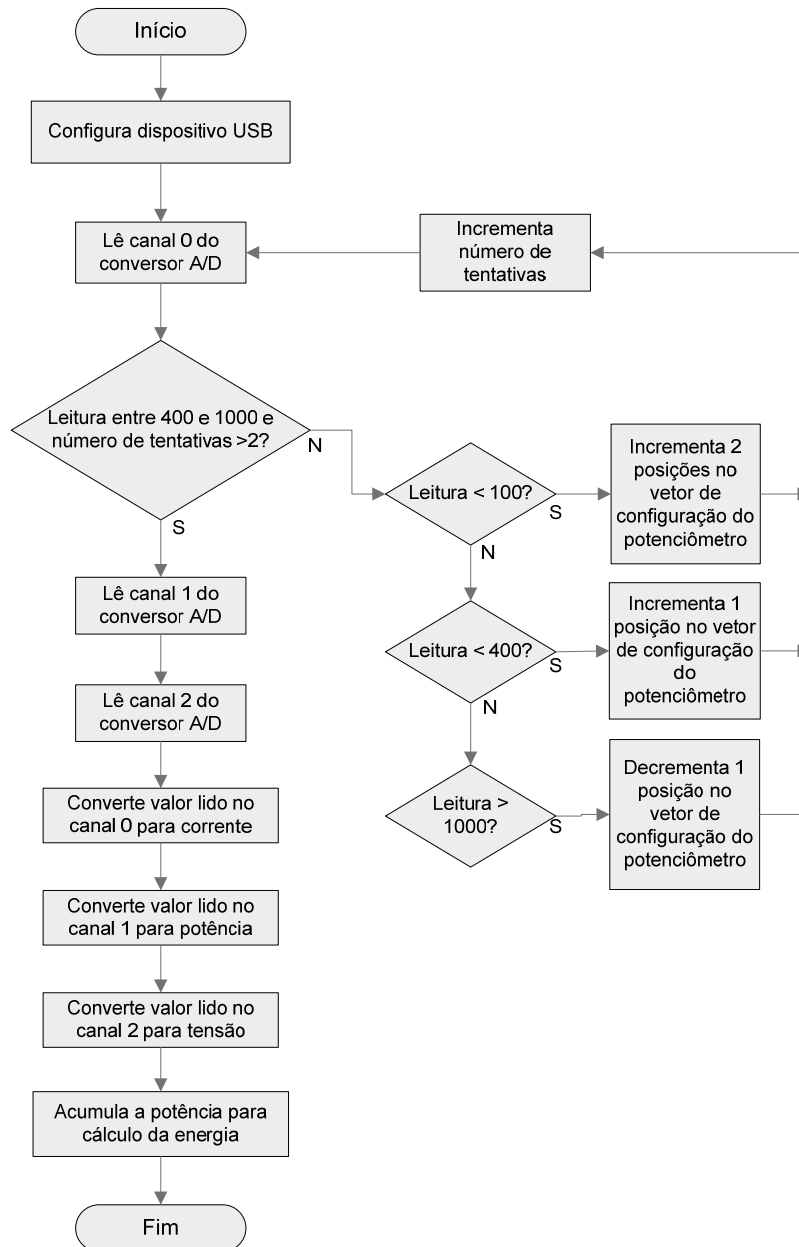
### 3.4 – Programa principal

Após inicializar todos os periféricos necessários, o microcontrolador, através da leitura do conversor analógico-digital, passa então a realizar o monitoramento dos equipamentos conectados.

O primeiro requisito a ser considerado está no fato de que a corrente deve ser medida antes da potência. Essa necessidade decorre do fato de que para medir a corrente é necessário adequar, através do ajuste do potenciômetro digital, a amplitude do sinal a ser medido de acordo com as especificações do A/D. Sendo este ajuste o mesmo para a medição da corrente e da potência, será poupado tempo, poder de processamento e memória do microcontrolador, já que não haverá a necessidade de armazenar os ajustes realizados para cada uma das medidas.

Dessa forma ao converter primeiro o sinal de corrente, temos um menor tempo entre a conversão desse sinal e os demais, o que faz com que eles tenham uma maior “correlação” entre eles.

O algoritmo de ajuste do ganho pode ser visto com detalhes no fluxograma da figura 3.3 e a comunicação com o potenciômetro digital é realizada através da interface SPI, utilizando a biblioteca *spi.h* fornecida em conjunto com o compilador C18 da Microchip.



**Fig. 3.3 - Fluxograma de execução do programa principal**

O vetor de configuração do potenciômetro, ao qual se refere a figura 3.3, nada mais é do que um vetor contendo os oito valores pré-selecionados para o potenciômetro digital, definidos na seção 2.2.

Após a aquisição dos sinais, as variáveis monitoradas são calculadas e ficam armazenadas na memória RAM do microcontrolador à disposição do usuário para consultas.

Caso o medidor esteja conectado a um computador executando um software apropriado, os dados obtidos pelo microcontrolador serão enviados para o computador que os armazenará, permitindo assim que o usuário tenha um histórico completo do monitoramento realizado pelo medidor.

Estando somente a aquisição e conversão dos dados no escopo do programa principal, o PIC realiza uma grande quantidade de medições por segundo, em média, 1000 medições. Com este grande conjunto de dados, o PIC é capaz de realizar os cálculos de forma mais precisa.

As demais atividades realizadas pelo PIC são acionadas através de temporizadores e interrupções e serão abordadas de forma mais detalhada nas seções seguintes.

### **3.5 – Cálculo da Energia**

A potência de um circuito expressa em Watts (W) é, por definição, o fluxo de energia, em Joules, fornecido a um equipamento durante 1 segundo.

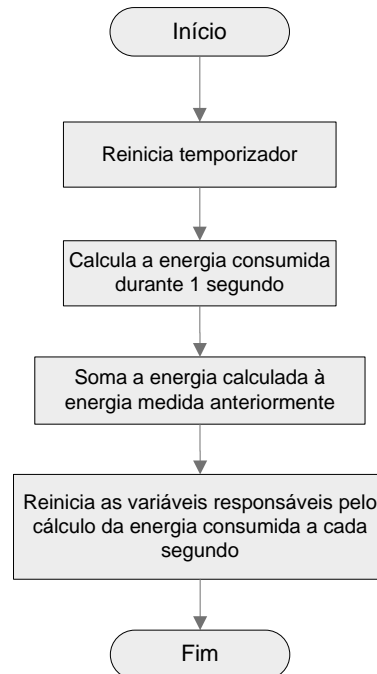
$$P = \frac{dE}{dt} \quad (3.1)$$

Como pode ser visto no fluxograma da Fig. 3.3, a cada medição realizada, a potência é acumulada em uma variável, permitindo, após 1 segundo de acumulações, calcular a potência, em Watts, requerida pelo circuito.

Conhecido o fluxo de energia (potência) fornecido ao circuito a cada segundo, basta acumular esses valores durante o intervalo de tempo desejado para se obter a quantidade de energia consumida pelo equipamento monitorado.

No entanto é preciso lembrar que a energia calculada dessa maneira é dada em Joules e para convertê-la em Watt-hora (Wh), é necessário dividir o resultado pelo número de segundo existentes em 1 hora, ou seja, por 3600.

O fluxograma da figura 3.4 apresenta o algoritmo executado para medir a energia consumida, que é calculada e armazenada em Joules e convertida para Watt-hora somente no momento em que o resultado for exibido para o usuário.



**Fig. 3.4 – Fluxograma de execução da interrupção ativada pelo TIMER0**

Para realizar este cálculo de forma precisa, foi necessário utilizar um dos temporizadores fornecidos pelo microcontrolador para realizar, a cada segundo, os cálculos necessários descritos acima. Os temporizadores são periféricos do microcontrolador que, quando alcançam a condição de *overflow*, são capazes de disparar uma interrupção que irá executar o fragmento de código desejado.

Como o microcontrolador trabalha a uma frequência interna de 48Mhz, foi necessário utilizar o TIMER0, pois este é o único temporizador que, por possuir um *prescaler* de 1:256 e ser de 16 bits, é capaz de temporizar 1 segundo de forma direta. Utilizando a Eq.(3.2) verifica-se que através deste timer é possível temporizar até 1,398 segundos.

$$t = \frac{\text{valor\_timer} \times \text{prescaler}}{F_{osc}/4} \text{segundos} \quad (3.2)$$



Por este ser o cálculo mais crítico realizado pelo microcontrolador, o TIMER0 foi configurado como interrupção de alta prioridade, fazendo com que, no momento em que a interrupção for disparada, qualquer atividade que esteja sendo executada pelo microcontrolador seja interrompida para atender a interrupção e somente após esse atendimento, as atividades que estavam sendo realizadas, são retomadas.

### 3.6 – Outros cálculos realizados pelo microcontrolador

Até aqui já foram apresentadas as equações e os métodos que o medidor utiliza para calcular a tensão, a corrente, potência ativa e energia consumida. No entanto o medidor fornece outras medidas, todas calculadas através dos valores tensão, corrente e potência ativa.

A fim de esclarecer como são feitos os cálculos, as demais equações utilizadas pelo microcontrolador serão apresentadas, começando pelo cálculo do fator de potência que é calculado através da Eq.(3.3).

$$fp = \frac{P_{ativa}}{V_{rms} \times I_{rms}} \quad (3.3)$$

O denominador da Eq.(3.3), dado pelo produto da tensão e da corrente RMS monitorada, fornecem o valor da potência aparente do equipamento, e é desta forma que ela é calculada pelo medidor, como observado na Eq.(3.4)

$$P_{aparente} = V_{rms} \times I_{rms} \quad (3.4)$$

E por fim, a potência reativa é obtida de acordo com a Eq.(3.5)

$$P_{reativa} = P_{aparente} \times \text{sen}(\cos^{-1}(fp)) \quad (3.5)$$

### 3.7 – Controle do *display* LCD

Existem 2 tipos de controles exercidos sobre o *display* LCD: o controle responsável por realizar a escrita no *display* e o controle que define o que será impresso no *display*.

#### 3.7.1 – Escrita no *display* LCD

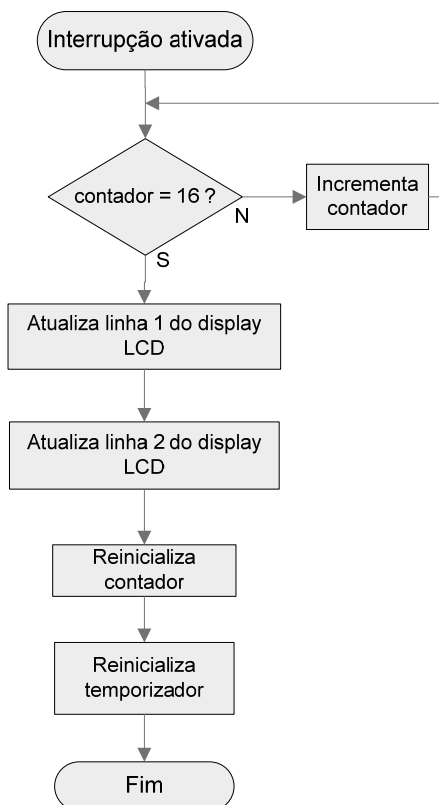
A Microchip fornece, em conjunto com o compilador C18, uma biblioteca (*xlcd.h*) capaz de se comunicar com o controlador de LCD HD44780 da Hitachi ou compatível.

A biblioteca *xlcd* define por padrão o uso da porta B do PIC. No entanto 2 pinos dessa porta são utilizados pela interface SPI que já está sendo utilizada para realizar o controle do circuito integrado MCP41010. Por este motivo foi necessário alterar os pinos de controle do LCD, o que, no caso desta biblioteca, não pode ser feito através de atribuições no programa ou um arquivo de configuração e por isso foi necessário fazer as alterações desejadas diretamente na biblioteca e recompilá-la de acordo com as instruções fornecidas no manual [9]. Para realizar o controle do LCD, foi utilizada a porta D do microcontrolador.

As funções que realizam o controle do *display* são funções que demandam um tempo relativamente grande para serem executadas, pois o controlador HD44780 pode levar até 15ms para processar alguns comandos recebidos.

Por este motivo, a atualização do *display* será realizada através de uma interrupção configurada em baixa prioridade, também ativada por um temporizador, que permitirá que o *display* seja atualizado periodicamente, mas sem sobrecarregar o microcontrolador, deixando-o livre durante a maior parte do tempo para realizar as medições e cálculos necessários.

O temporizador utilizado para este propósito foi o TIMER1 que possui um prescaler de 1:8 e pode ser configurado para 16 bits. Utilizando a Eq.(3.2) verifica-se que o tempo máximo temporizado é de 43,7ms, tornando necessária a utilização de um contador que irá executar a rotina de atualização do LCD quando o contador atingir o valor desejado



**Fig.3.5 - Rotina de execução da interrupção disparada pelo TIMER1**

Para escrever no *display* LCD, a biblioteca *xlcd* fornece as funções *putsXLCD* e *putcXLCD* que escrevem *strings* e caracteres, respectivamente, no LCD ou a função *WriteDataXLCD* que é capaz de escrever tanto *strings* quanto caracteres.

No entanto o que se deseja é escrever no *display* são *strings* compostas por um texto estático, que é a identificação do está sendo mostrado no *display*, e o conteúdo de uma variável, que armazena o valor medido, e nenhuma das três funções apresentadas permitem imprimir no LCD o conteúdo de uma variável.

A função *printf* da biblioteca *stdio*, é capaz de imprimir na saída padrão (*stdout*) *strings* compostas por texto e conteúdo de variáveis, porém a saída padrão definida por esta biblioteca é a interface serial USART. O que a função *printf* faz na prática é concatenar o texto com o conteúdo das variáveis desejadas, transformando tudo em uma única string. Terminado este processo, a função *printf* chama uma outra função responsável por enviar caractere por caractere para a saída definida por esta função.

Para redirecionar a saída padrão para o LCD, foi necessário fazer a seguinte atribuição à variável global *stdout* da biblioteca *stdio*:

```
stdout = _H_USER
```

Dessa forma, agora toda informação enviada para a saída padrão será redirecionada para a função `_user_putc` e não mais para a função `_usart_putc` que é a função definida por padrão. A função `_user_putc` é declarada na biblioteca `stdio`, mas implementada pelo programador de acordo com a sua necessidade.

Como o próprio nome evidencia, a função `_user_putc` deve enviar 1 caracter para a saída desejada e por este motivo ela foi implementada da seguinte forma:

```
int _user_putc (char c)
{
    while( BusyXLCD() ); //aguarda o controlador do LCD ficar desocupado
    WriteDataXLCD( c ); //envia um caracter para a saída
    return (c);
}
```

Agora a função `printf` pode ser utilizada diretamente para imprimir as informações desejadas no `display` LCD.

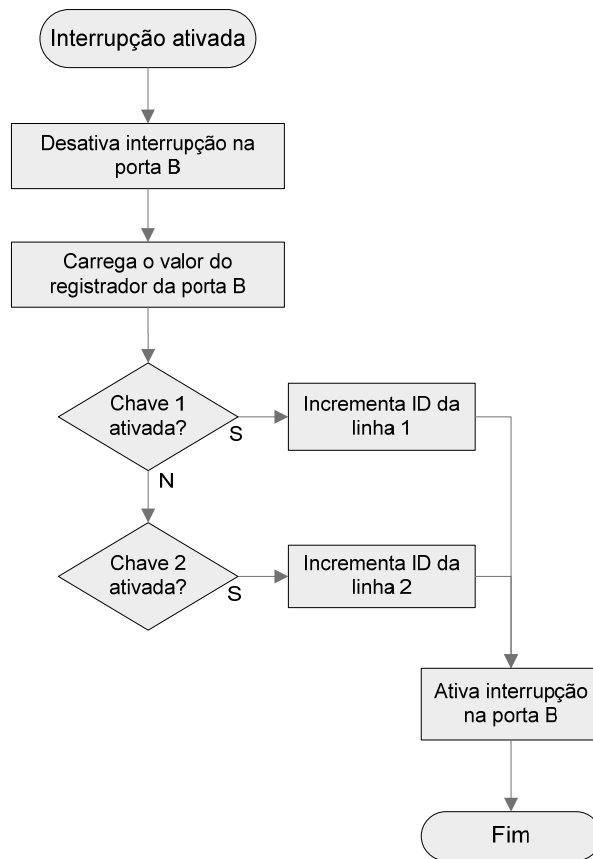
### 3.7.2 – Alterando a informação exibida no `display` LCD

Para que o PIC não necessite ficar monitorando as chaves mostradas na seção 2.5, elas serão conectadas na porta B do microcontrolador.

O microcontrolador, devidamente configurado, é capaz de disparar uma interrupção quando qualquer um dos bits B<4:7> mudam de nível lógico. Uma vez disparada essa interrupção, na rotina de tratamento é verificado o bit que foi alterado para que a interrupção possa ser tratada.

Cada variável que pode ser impressa no `display` LCD possui um número identificador (ID) e cada linha do `display` possui um atributo que é o ID da variável que ela deve exibir. Ao pressionar a chave 1, o ID, que a linha 1 deve exibir, é incrementado até chegar ao último ID possível. Ao chegar ao último ID, se a chave for novamente pressionada, a linha um recebe então o primeiro ID, fazendo com que a alteração da variável mostrada em uma linha seja feita em *loop*. O mesmo vale para a chave 2 em conjunto com a linha 2 do LCD.

No fluxograma da Figura 3.6 é mostrada a rotina executada quando um dos botões é pressionado.



**Fig. 3.6 - Rotina de execução da interrupção disparada pela mudança na porta B**

# Capítulo 4

## Comunicação USB

### 4.1 – Biblioteca para comunicação

Para realizar a comunicação entre o PIC e o computador a Microchip disponibiliza, em conjunto com o MCHPFSUSB, uma biblioteca (DLL) capaz de prover a comunicação entre o dispositivo USB e o computador.

Esta biblioteca exporta 11 funções utilizadas, não só na manipulação de dados através da USB, mas também na configuração de dispositivos USBs. Uma descrição detalhada de cada uma dessas funções pode ser encontrada no arquivo `mpusbapi.h` também distribuído em conjunto com o MCHPFSUSB.

Neste projeto apenas 4 funções deste conjunto serão utilizadas, e uma descrição sucinta, apenas para facilitar o entendimento do projeto, será feita, uma vez que o objetivo aqui não é descrever o funcionamento da interface USB [10] ou da biblioteca em questão. Dessa forma as funções utilizadas são:

- MPUSBOpen – Estabelece um *link* de comunicação entre o dispositivo USB e o Host.
- MPUSBClose – Fecha o *link* de comunicação entre o dispositivo USB e o Host
- MPUSBRead – Realiza a leitura da porta USB.
- MPUSBWrite – Transfere dados através da porta USB.

### 4.2 – Programa para PC

O programa desenvolvido para o computador tem a função de fazer a leitura dos dados do microcontrolador e exibi-los na tela para o usuário. O programa desenvolvido foi escrito em C++, utilizando a IDE Visual Studio 2005 da Microsoft.

No fluxograma da Fig 4.1 é descrito o funcionamento do programa desenvolvido. A rotina que executa todas essas funções é chamada, a cada segundo, através do disparo de um temporizador.

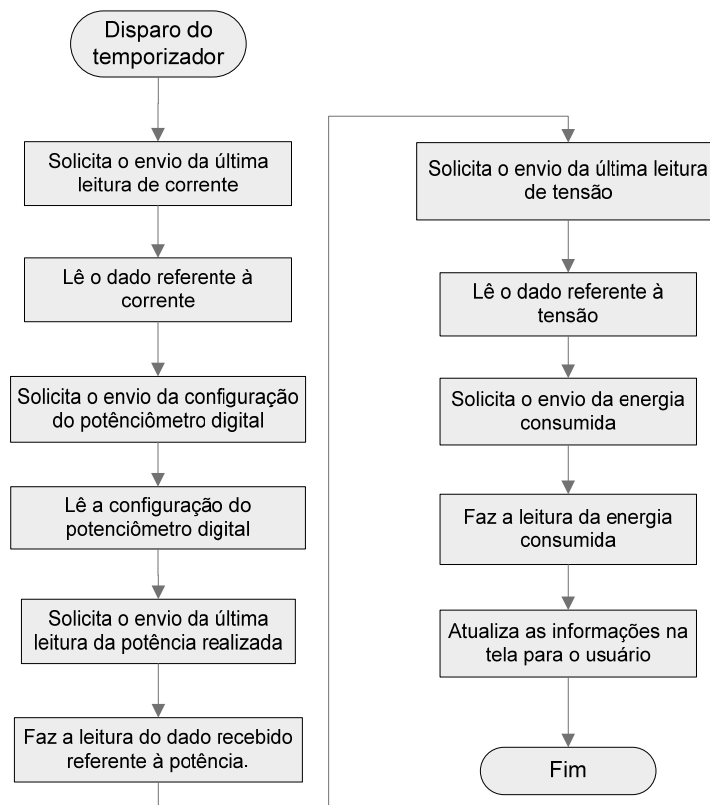


Fig. 4.1 - Fluxograma de funcionamento do programa para computador

### 4.3 – Interface do programa

O programa desenvolvido possui uma interface simples, onde todas as informações são apresentadas. Essa interface pode ser vista na Figura 4.2.

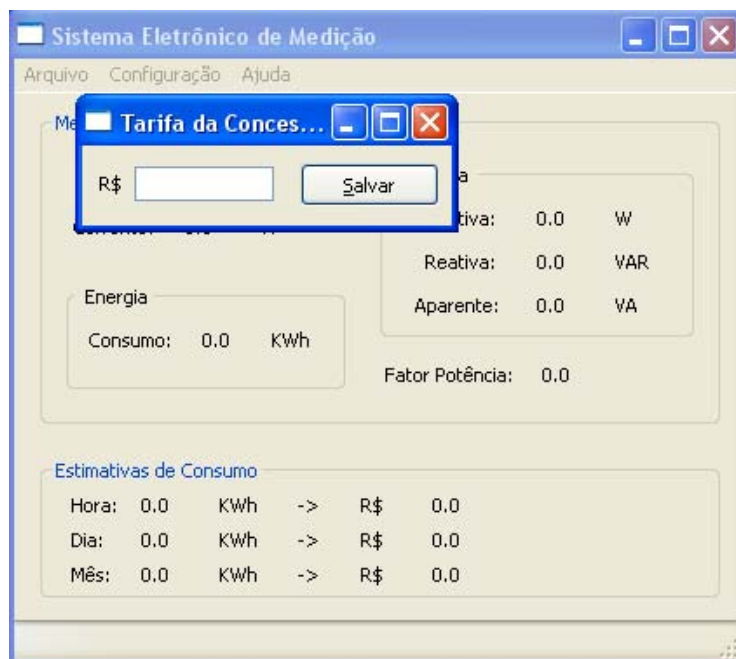


Fig.4.2 - Interface do programa para computador

Nesta interface existem duas áreas bem distintas: uma com os valores medidos e enviados pelo microcontrolador e outro com as estimativas de consumo.

Todos os valores visualizados na área denominada Medição, são valores lidos diretamente do microcontrolador e atualizados a cada segundo para o usuário. No campo Estimativas de Consumo, a taxa de atualização é a mesma, porém estes dados são calculados apenas por este programa, não tendo o microcontrolador acesso a esses dados.

Em menu Configuração > Tarifa é possível alterar o valor da tarifa de acordo com o valor praticado pela concessionária de energia local, como pode ser visto na Fig. 4.3.



**Fig. 4.3 - Campo para alteração do valor da tarifa**



# Capítulo 5

## Resultados

### 5.1 – Calibração

O primeiro passo para obtenção dos resultados, consiste na calibração do equipamento. Apesar dos cuidados tomados no projeto dos circuitos eletrônicos, como por exemplo, utilização de resistores de 1% e projeto de atenuadores (divisores resistivos) e amplificadores com razão ideal dada pela Eq.(5.1) existe um erro devido à variação do valor nominal dos componentes.

$$A_{\text{atenuador}} = \frac{1}{G_{\text{amplificador}}} \quad (5.1)$$

onde A é atenuação dada pelo atenuador (divisor resistivo) e G é o ganho fornecido pelo amplificador operacional.

Uma forma para calibrar o instrumento seria por meio da utilização de *trimpots* que permitissem ajustar as constantes desses sub-circuitos (amplificadores e atenuadores) para os valores desejados. Porém esse ajuste exigiria que em cada um desses sub-circuitos fosse inserido ao menos um *trimpot*, além do fato de que o erro do ajuste manual desses elementos é muito dependente da sensibilidade manual e da paciência do indivíduo que estiver realizando a calibração do instrumento.

Por este motivo a calibração será realizada através do firmware do microcontrolador. Os fatores de ganho e atenuação serão medidos e alterados diretamente no firmware do microcontrolador, não sendo, portanto, necessária nenhuma modificação no circuito.

Dessa forma, sinais conhecidos de tensão e corrente foram aplicados à entrada do circuito medidor e a tensão de entrada e saída de cada bloco amplificador/atenuador foi medida, e assim, determinadas as constantes de ganho/atenuação.

Como sinal de entrada para calibragem do circuito medidor, foi produzida uma corrente de 500mA com o uso do variac e de um reostato de 2,8Ω/12,3A e a tensão de entrada utilizada foi a tensão da rede elétrica. Utilizando este sinal, foram medidas as

constantes de ganho e atenuação mostradas na Eq.(2.8) e o resultado pode ser visto a seguir:

$$\frac{R_4}{R_2 + R_4} = 0,1075030$$

$$\frac{R_5}{R_3} = 10,3201581$$

$$\frac{R_{14}}{R_{12} + R_{14}} = 0,0392156$$

$$1 + \frac{R_{13}}{R_{15}} = 24,7104273$$

O circuito responsável por medir a tensão aplicada sobre o equipamento monitorado também foi calibrado utilizando a mesma metodologia, e as constantes de ganho e atenuação mostradas na Eq.(2.15) podem ser visualizadas a seguir:

$$K = 8.8971$$

$$\left( \frac{R_{21}}{R_{18} + R_{21}} \right)^{-1} = 3.0195$$

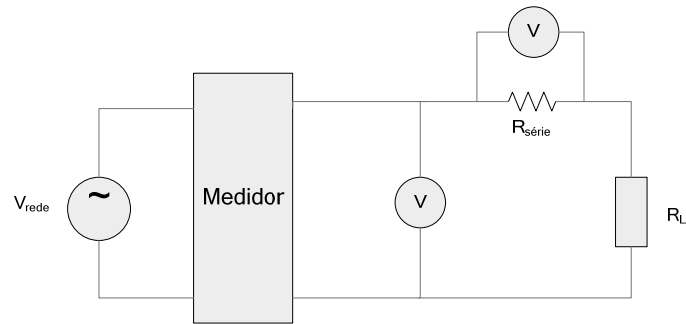
Dessa forma, as constantes acima podem ser substituídas nas Eq.(2.8), (2.15) e (2.19) para um cálculo mais preciso da corrente, tensão e potência, respectivamente.

As constantes medidas são inseridas no arquivo HardwareProfile.h, um dos arquivos que compõe o firmware do PIC. Neste arquivo existe uma constante definida para cada um dos fatores de ganho e atenuação medidos acima.

Para realizar a medição foram utilizados multímetros da Tektronics®. Esse mesmo multímetro foi utilizado durante os testes, descritos na seção 5.2. Uma dificuldade observada foi o fato de que os valores indicados pelo multímetro variavam cerca de 30mV, necessitando um longo tempo de observação para a realização de uma medida mais confiável. É possível que isso tenha inserido algum erro na calibragem do equipamento.

## 5.2 – Testes

Para realizar os testes, os equipamentos foram ligados de acordo com a configuração vista no diagrama da Fig 5.1.



**Fig. 5.1 - Diagrama de ligação dos equipamentos para testes**

Como visto no diagrama da Fig. 5.1, a corrente será calculada através da queda de tensão obtida sobre o resistor  $R_{série}$  de resistência conhecida.

Neste primeiro teste, foram utilizados:  $R_{série} = 4,7\Omega$  e  $R_L = 175 \Omega$  e os resultados são apresentados na tabela 5.1.

		Medidor				Equipamentos		
Corrente	Tensão	Potência Ativa	Potência Reativa	Potência Aparente	FP	Corrente	Tensão	FP
0,673 A	125,5 V	81,8 W	21 VAR	84,3 VA	0,97	0,676 A	125,1 V	0,99

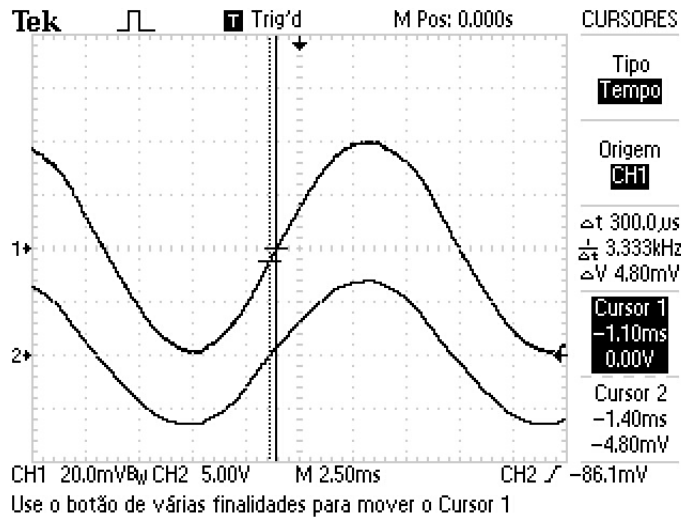
**Tabela 5.1 - Resultados obtidos no primeiro teste**

O fator de potência foi medido utilizando o osciloscópio para medir o atraso entre os sinais de tensão e corrente como pode ser visto na Figura 5.2.

Através das medidas obtidas pelos equipamentos (voltímetro e osciloscópio) as potências ativa e aparente foram calculadas (Tabela 5.2) para comparar com os resultados indicados pelo medidor:

Potência Ativa	Potência Aparente
83,71 W	84,56

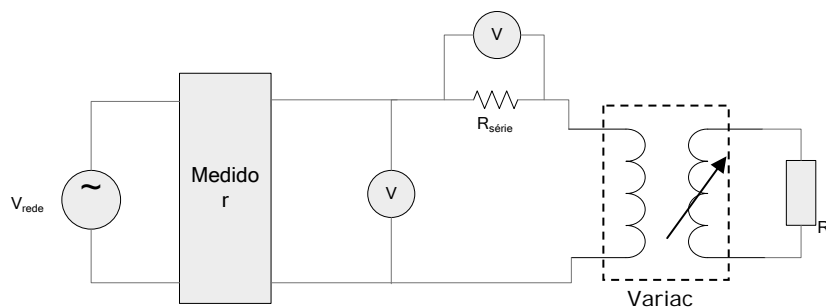
**Tabela 5.2 - Potências calculadas no primeiro teste**



**Fig. 5.2 - Medição do fator de potência no primeiro teste**

De acordo com os dados apresentados, o que chama mais atenção é a diferença entre as potências ativas medidas e, conseqüentemente, entre os fatores de potência já que estes são calculados utilizando o resultado da medida da potência ativa, como exposto na seção 3.6. Essa discrepância provavelmente se deve a alguma flutuação na rede no momento em que as medidas foram feitas, ou até mesmo à variações dos valores apresentados no multímetro (conforme exposto na seção 5.1). Outra possível justificativa é a falta de resolução do osciloscópio para fornecer uma leitura mais precisa, já que o canal 1 estava na sua menor resolução (20mV/divisão), como pode ser visto na Figura 5.2.

Para o segundo teste, como carga foi utilizado um variac e um reostato de 2,8Ω/12,3A. Este reostato foi escolhido porque suporta uma alta corrente e com o uso do variac é possível fazer testes com uma corrente de até 6A. Como a corrente também passará pelo resistor  $R_{série}$ , foi necessário substituí-lo por um resistor de 0,22Ω/10W. A ligação entre os componentes e equipamentos é apresentada na figura 5.3.



**Fig. 5.3 - Diagrama de ligação dos equipamentos com variac**

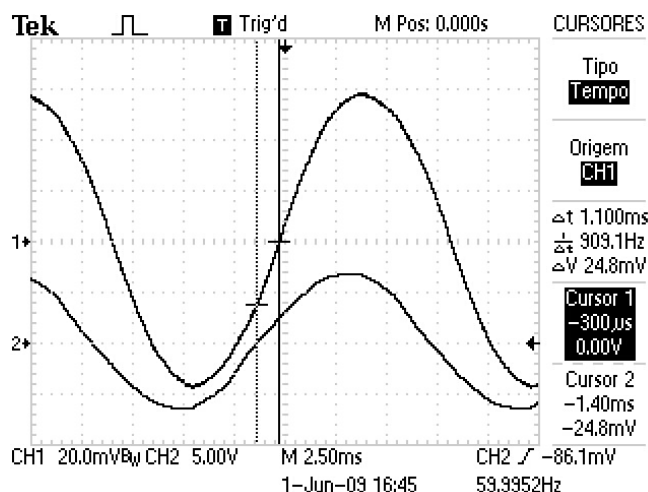
Os resultados são apresentados na Tabela 5.3, as potências calculadas na Tabela 5.4 e telas do osciloscópio utilizadas para medir o fator de potência são apresentadas a seguir nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6.

Medidor						Equipamentos		
Corrente	Tensão	Potência Ativa	Potência Reativa	Potência Aparente	FP	Corrente	Tensão	FP
1 A	125,8 V	115,6 W	51 VAR	125 VA	0,91	1,013 A	125,65 V	0,915
2,5 A	125,8 V	288 W	132 VAR	313 VA	0,91	2,518 A	125,4 V	0,915
5 A	124,8	563,8 W	260 VAR	623 VA	0,90	5,181 A	123,9	0,907

**Tabela 5.3 - Resultados obtidos no segundo teste**

Potência Ativa	Potência Aparente
116,12	126,9
289,15	316
581	640,56

**Tabela 5.4- Potências calculadas no segundo teste**



**Fig. 5.4 - Medição do fator de potência no segundo teste para corrente de 1A**

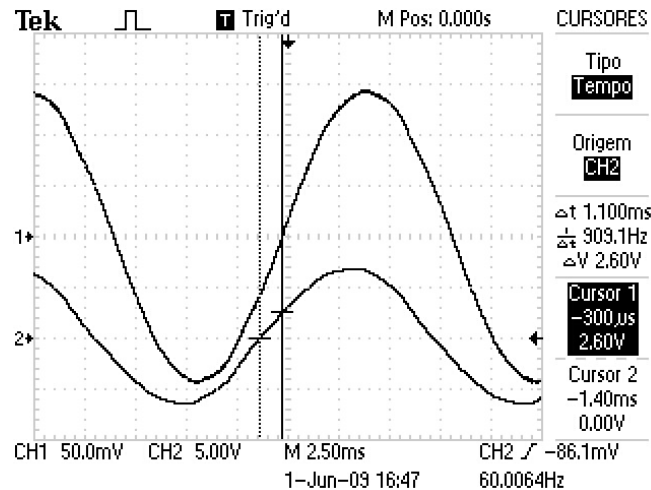


Fig. 5.5 - Medição do fator de potência no segundo teste para corrente de 2,5A

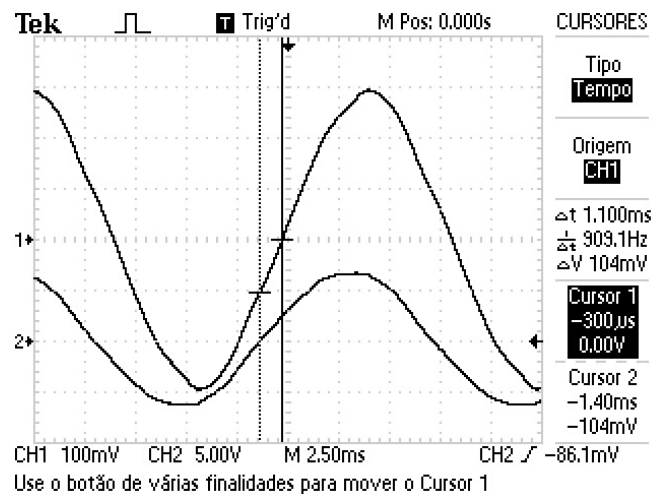


Fig. 5.6 - Medição do fator de potência no segundo teste para corrente de 5A

Com a ligação do variac, funcionando como carga, uma queda no fator de potência era esperada e foi confirmada como visto na Tabela 5.3.

Dando seqüência na análise dos dados da Tabela 5.3, é possível observar que o valor da potência aparente indicado pelo medidor é de 125 VA, apesar do produto entre a tensão e a corrente também apresentadas pelo medidor ser igual a 125,8VA. A razão desta diferença e outras que certamente aparecem nas tabelas acima, mas são menos evidentes, reside na forma como os resultados são impressos no *display*; pois os dados apresentados para o usuário são truncados e não arredondados.

Ainda na mesma tabela, para a corrente de 5A ocorre a maior discrepância entre o valor de corrente fornecido pelo medidor e o valor medido pelo equipamento. Essa

diferença, possivelmente, decorre do excessivo aquecimento do resistor  $R_{série}$ , provocado pela alta corrente que por ele circula, levando a uma ligeira mudança no valor desse resistor, e por esse motivo a corrente calculada através da relação entre a queda de tensão sobre o resistor e sua resistência ôhmica, apresentou um maior desvio percentual que as demais.

Com relação à medida do fator de potência, nos três casos os valores apresentados pelo medidor e os calculados com o auxílio do osciloscópio são muito próximos, o que mostra que o medidor está realizando os cálculos de forma coerente e correta, mesmo neste caso, onde há um elemento que explicitamente reduz o fator de potência.

Como pode ser observado na Figura 5.3, a menor escala do osciloscópio foi utilizada no canal 1 e os resultados obtidos estão coerentes com os calculados. Este resultado enfraquece a hipótese apresentada na análise dos resultados do primeiro teste onde a resolução do osciloscópio foi levantada como possível causa para a diferença entre os fatores de potência da Tabela 5.1.

No terceiro teste realizado, foi utilizado o diagrama de ligação da Figura 5.1 e a carga  $R_L$  foi substituída por uma lâmpada incandescente de 60W/127.

O resistor  $R_{série}$  utilizado neste teste foi o resistor de  $4,85 \Omega$ , pois como a corrente a ser medida é baixa, a queda de tensão produzida sobre esse resistor será mais alta e menos suscetível a ruídos e erros de medida. Os resultados obtidos neste teste são mostrados nas tabelas 5.5 e 5.6 e na Figura 5.7.

Medidor						Equipamentos		
Corrente	Tensão	Potência Ativa	Potência Reativa	Potência Aparente	FP	Corrente	Tensão	FP
0,464 A	127,3 V	57,63 W	13 VAR	59,1 VA	0,976	0,469 A	127,2 V	1

**Tabela 5.5- Resultados obtidos no terceiro teste**

Potência Ativa	Potência Aparente
59,65 W	59,65 W

**Tabela 5.6 - Potências calculadas no terceiro teste**

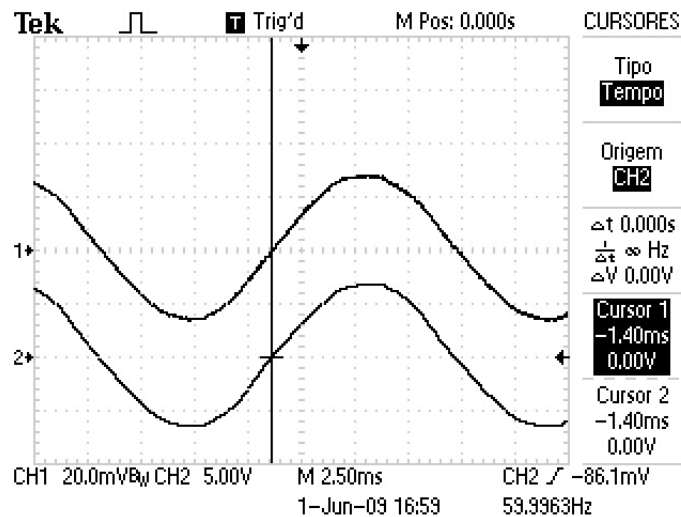


Fig. 5.7 - Medição do fator de potência no terceiro teste

Novamente é possível observar certa discrepância no fator de potência.

A hipótese do osciloscópio estar influenciando na medição do fator de potência foi descartada pelo teste anterior e novamente uma diferença significativa entre os fatores de potência é observada, o que enfraquece também a hipótese de flutuações na rede serem as causadoras dessas diferenças nos valores obtidos.

E por último, utilizando também o diagrama de ligação da Figura 5.1, foi realizado um teste com uma lâmpada eletrônica do fabricante OSRAM cujas especificações são:

- 13W
- 110-130V
- 175mA
- FP > 0,5

A Tabela 5.7 e 5.8 mostram os resultados deste teste.

		Medidor				Equipamentos		
Corrente	Tensão	Potência Ativa	Potência Reativa	Potência Aparente	FP	Corrente	Tensão	FP
0,176 A	128,4 V	14,07 W	17 VAR	22,5 VA	0,634	0,174 A	128.0 A	?

Tabela 5.7- Resultados obtidos no quarto teste



Potência Ativa	Potência Aparente
?	22,3

Tabela 5.8- Potências calculadas no quarto teste

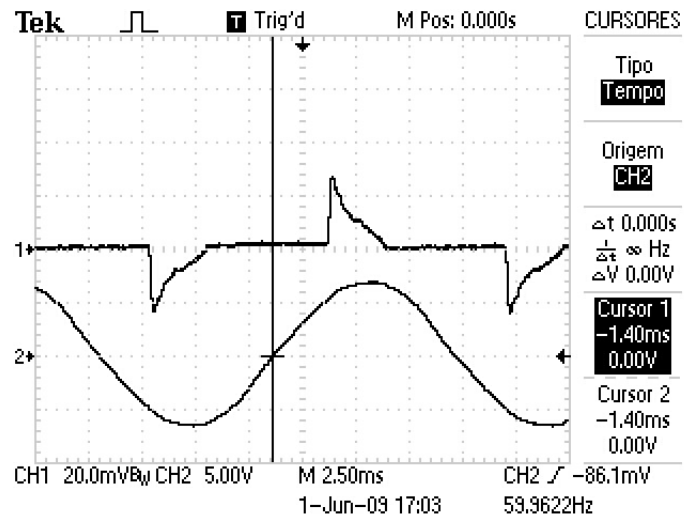


Fig. 5.8 - Sinais de tensão e corrente do quarto teste

O fator de potência, devido à forma de onda pulsante da corrente, não pode ser calculado e, conseqüentemente, a potência ativa da Tabela 5.6 também não. No entanto as medidas exibidas pelo medidor proposto neste trabalho apresentam uma diferença percentual muito baixa em relação às medidas obtidas pelos equipamentos, mostrando a coerência e correção dos resultados obtidos.

# Capítulo 6

## Conclusão

Como pode ser observado, existe uma pequena diferença entre os valores de tensão e correntes fornecidos pelo medidor proposto neste trabalho e o equipamento de medição. Essas pequenas diferenças, em geral menores que 1%, poderiam decorrer das dificuldades apresentadas durante a calibração do equipamento.

No entanto os erros só são observados em alguns testes e erros oriundos do processo de calibração alterariam todas as medidas feitas.

Desta forma, as justificativas para os erros encontrados ficam limitadas a duas possibilidades: a primeira possibilidade consiste no fato de que o multímetro não foi observado tempo suficiente de modo a permitir que a medida apresentada estabilizasse no valor correto. No entanto, durante a tomada das medidas essa necessidade já era conhecida e, portanto, os devidos cuidados foram tomados. A segunda possibilidade apontaria para o ruído presente no sinal medido, pois durante os testes foi observado que a cada atualização do *display* os valores eram alterados no *display*. Com exceção da energia consumida, todas as medidas apresentadas representam valores instantâneos medidos e ao apresentar esses valores instantâneos, o ruído presente no sinal também aparece na medida, gerando as pequenas diferenças observadas nas tabelas.

Apesar destas diferenças observadas, os resultados se mostraram consistentes e atestam o correto funcionamento do trabalho apresentado.

Como proposta futura é sugerida uma alteração no modo como os dados são apresentados no *display*. Apresentar os valores médios, e não instantâneos, das medidas realizadas possivelmente irá ocasionar em menos erros nas leituras, pois o ruído presente nas medidas mostradas no *display* será minimizado.

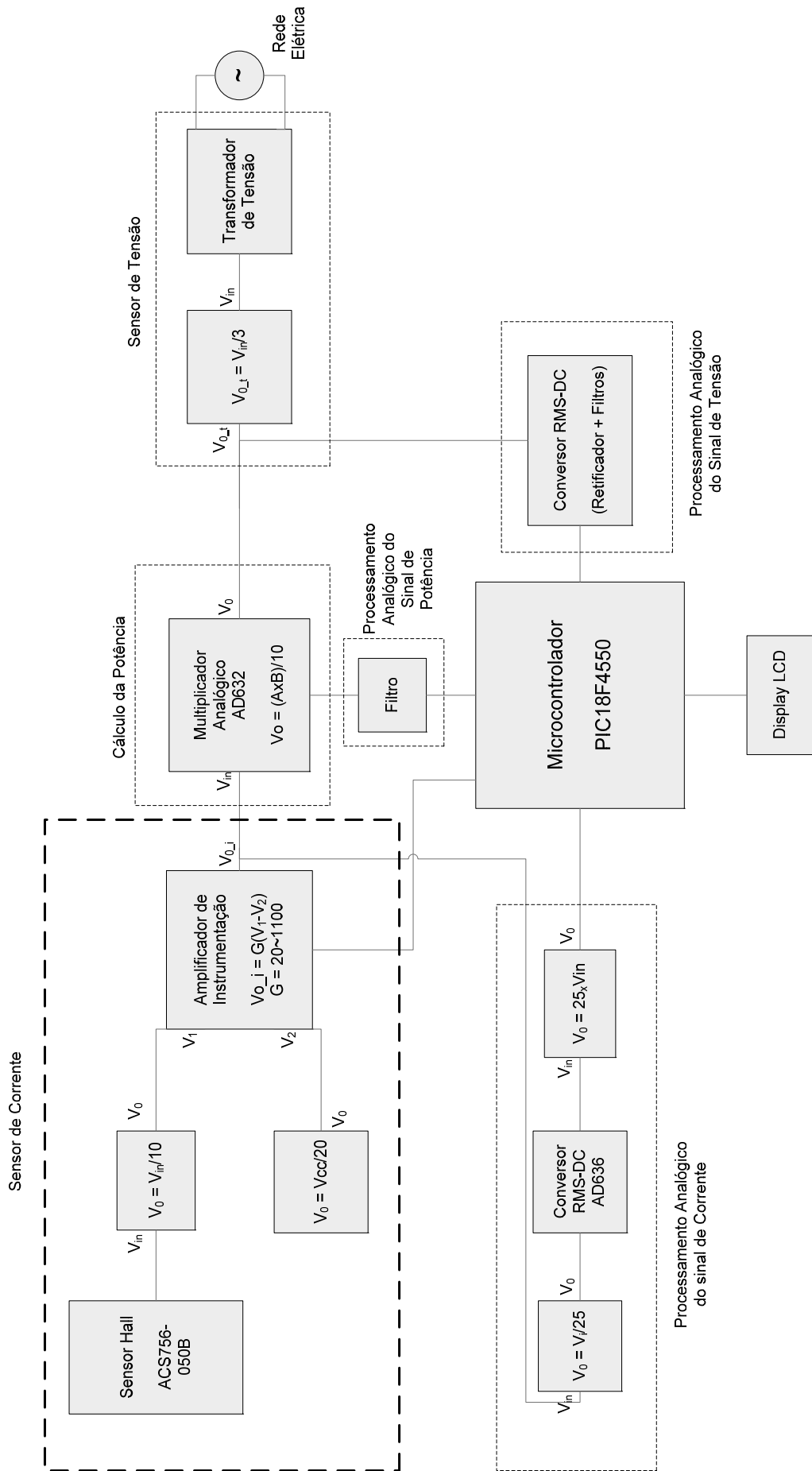
Outra parte do projeto que pode evoluir bastante é o software para o computador. Devido ao tempo limitado para finalização deste trabalho, o software teve apenas a função de demonstrar que a comunicação USB está corretamente implementada no microcontrolador e que aplicativos podem ser facilmente desenvolvidos para o computador com o uso da DLL apresentada.

# Bibliografia

- [1] ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, <http://www.aneel.gov.br>, 2009, (Acesso em 30 de Abril de 2009).
- [2] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, Balanço Energético Nacional 2008 (Ano Base 2007), <http://www.mme.gov.br>, 2009, (Acesso em 30 de Abril de 2009).
- [3] OLIVEIRA, SUZANA C. G, Proposta de Arquitetura do Demodulador Digital para o Terminal de Consulta ao Consumo Individual do Sistema de Medição Centralizada, Projeto Final, 2008.
- [4] WULDART, L., AN-523 – Understanding Power Factor, Application Note, STMicroelectronics.
- [5] RAMSDEM E., Hall Effect Sensors – Theory and Application, Second Edition, Newnes, 2006.
- [6] SEDRA, SMITH, Microelectronics Circuits, Four Edition, Makron Books, 2000.
- [7] ROBERGE, J.K., Operational Amplifiers – Teory and Praticce, Massachusetts Institute of Tecnology, John Wiley & Sons, 1975.
- [8] PHILIPS, COMPAQ, HP, INTEL, LUCENT, MICROSOFT, NEC, Universal Serial Bus Specification – Revision 2.0, 2000.
- [9] MICROCHIP, DS51297F - MPLAB® C18 C Compiler Libraries, 2005.
- [10] AXELSON, J., USB Complete: Everything You Need to Develop Custom USB Peripherals, Third Edition, Lakeview Research, 2005.

# **Apêndice A**

## **Diagrama em blocos detalhado**



## **Anexo B**

### **Circuito esquemático completo**



## **Anexo C**

# **Código fonte do firmware do Microcontrolador**

Código completo incluído no CD anexo.



## **Anexo D**

# **Código fonte do firmware do Microcontrolador**

Código completo incluído no CD anexo.