



**UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL**  
**PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**



**JACKSON POPSIN**

**DESENVOLVIMENTO DE UM ANALISADOR E MEDIDOR**  
**MONOFÁSICO DE ENERGIA**

Canoas, Dezembro de 2010



**JACKSON POPSIN**

**DESENVOLVIMENTO DE UM ANALISADOR E MEDIDOR  
MONOFÁSICO DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Departamento de  
Engenharia Elétrica da ULBRA como um  
dos requisitos obrigatórios para a obtenção  
do grau de Engenheiro Eletricista

**Departamento:**  
Engenharia Elétrica

**Área de Concentração**  
Energia

**Professor Orientador:**

MSc. Eng. Eletr. Dalton Luiz Rech Vidor – CREA-RS: 079.005-D

Canoas

2010



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Nome do Autor:** Jackson Popsin

**Matrícula:** 031014569-4

**Título:** Desenvolvimento de um Analisador e medidor monofásico de energia

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da ULBRA como um dos requisitos obrigatórios para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

**Professor Orientador:**

MSc. Eng. Eletr. Dalton Luiz Rech Vidor

CREA-RS: 079.005-D

**Banca Avaliadora:**

Dra. Eng. Eletr. Marília Amaral da Silveira

CREA-RS: 50.909-D

Conceito Atribuído (A-B-C-D):

MSc. Eng. Eletr. Miriam N. Cáceres Villamayor

CREA-RS: 67.231-D

Conceito Atribuído (A-B-C-D):

**Assinaturas:**

---

Autor  
Jackson Popsin

---

Orientador  
Dalton Luiz Rech Vidor

---

Avaliador  
Marília Amaral da Silveira

---

Avaliador  
Miriam N. Cáceres Villamayor

Relatório Aprovado em:



## **DEDICATÓRIA**

Dedico aos meus pais e a minha família, que me deram todo o apoio para que eu pudesse chegar até aqui.



## **AGRADECIMENTOS**

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Ao Professor Dalton Vidor pelo estímulo, dedicação e esforço pessoal proporcionado.

Aos colegas Carlos Alves, Ely Cristófoli, Rodrigo Roveré, Thiago Veiga e Denizard pela parceria em horas de estudo. Ao colega André Oliveira pelas sugestões e observações valiosas.

Aos Professores do Curso de engenharia elétrica da ULBRA pelas valiosas contribuições durante todo o Curso.

A minha namorada pelo carinho e compreensão nesses momentos difíceis.



## **EPÍGRAFE**

*"A diferença entre o possível e o impossível está na vontade humana."  
(Louis Pasteur)*



## RESUMO

POPSIN, Jackson. **Desenvolvimento de um Analisador e medidor monofásico de energia**, 85 pág. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica - Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Luterana do Brasil. Canoas, RS. 2010.

Neste trabalho foi desenvolvido um medidor de energia elétrica monofásico, baseado no método de medição de energia com a relação de tensão e corrente disponibilizadas à unidade consumidora. O sistema utiliza transformadores de corrente e de potencial, circuito integrado especializado para a função e um microcontrolador. Os dados são disponibilizados ao usuário através do hyperterminal para análise do usuário. No sistema construído observou-se um erro da ordem de 1% nas medidas de energia efetuadas.

**Palavras chave:** Medidor de energia. Hyperterminal. Circuito Integrado.



## ABSTRACT

POPSIN, Jackson. **Development of an analyzer and single-phase power meter**, 85 p. Work of Conclusion of Course in Electrical Engineering - Electrical Engineering Department. Lutheran University of Brazil. Canoas, RS. 2010.

*We have developed a monophasic electricity meter, based on the method of measuring power with the ratio of voltage and current available to consumer. The system uses current transformers and potential, a integrated circuit for a specialized function and a microcontroller. Data are available to through the hyperterminal to user analyzes. In the system builded there was an error in the order of 1% in energy measurements realized.*

**Keywords:** *Power meter. Hyperterminal. Integrated Circuit.*





## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração 2-1 – Tarifas x Grupos.....	6
Ilustração 2-2 – Triângulo das potências.....	8
Ilustração 2-3 – Medidor de indução (tipo disco) .....	11
Ilustração 2-4 – Regra da mão direita.....	12
Ilustração 2-5 – Divisor Resistivo.....	20
Ilustração 2-6 – Determinação da corrente através do resistor <i>shunt</i> .....	21
Ilustração 2-7 – Bobina de <i>Rogowski</i> .....	22
Ilustração 2-8 – Representação de um sensor de efeito <i>Hall</i> . .....	23
Ilustração 2-9 – Transformador de corrente básico .....	23
Ilustração 3-1 – Circuito de Sensorização .....	26
Ilustração 3-2 – Circuito de Referencia .....	27
Ilustração 3-3 – Diagrama de Blocos do Medidor .....	28
Ilustração 3-4 – Placas modulares do sistema de medição.....	28
Ilustração 3-5 – Circuito de entrada da rede para medição da tensão .....	29
Ilustração 3-6 – Foto do TC utilizado.....	30
Ilustração 3-7 – Circuito de entrada da rede para medição da corrente .....	31
Ilustração 3-8 – Circuito Integrado ADE7753 .....	32
Ilustração 3-9 – Esquema em bloco da estrutura do CI ADE7753 .....	32
Ilustração 3-10 – Placa de Montagem do CI medidor ADE7753 .....	33
Ilustração 3-11 – Circuito do CI medidor ADE7753.....	33
Ilustração 3-12 – Modulo PIC .....	34
Ilustração 3-13 – Rede SPI .....	35
Ilustração 3-14 – Circuito da interface serial com o microcontrolador.....	36
Ilustração 3-15 – Fonte de Alimentação.....	36
Ilustração 3-16 – Kit Programador.....	37
Ilustração 3-17 – <i>Software</i> depurador de PIC .....	37
Ilustração 3-18 – Fluxograma das inicializações do programa principal .....	39
Ilustração 3-19 – Fluxograma principal.....	39
Ilustração 3-20 – Lendo dados do ADE7753 .....	40
Ilustração 3-21 – Escrevendo dados no ADE7753.....	40
Ilustração 3-22 – Exemplo de dado enviado ao ADE7753 .....	41
Ilustração 3-23 – Exemplo de dado sendo recebido do ADE7753 .....	42
Ilustração 3-24 – Analisador de qualidade de Energia.....	43
Ilustração 3-25 – Circuito do Módulo de Carga Linear .....	44
Ilustração 3-26 – Interface de coleta de dados.....	44
Ilustração 3-27 – Gráfico de medição de energia instantânea .....	46
Ilustração 3-28 – Medição no canal de corrente aberto (1,76mV) .....	47
Ilustração 4-1 – Gráfico de Erro nas medições .....	50
Ilustração 4-2 – Gráfico de Comparativo das medições .....	50



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Percentual de medidores adquiridos para baixa tensão por região .....	9
Tabela 2-2 – Principais características entre medidor eletromecânico e eletrônico.....	10
Tabela 2-3 – Classe de exatidão dos TP's.....	19
Tabela 2-4 – Classe de exatidão dos TC's .....	24
Tabela 3-1 – Comparativo dos CIs para medição de energia.....	27
Tabela 3-2 – Calibração dos fatores de conversão .....	45
Tabela 4-1 – Levantamento de dados do medidor padrão e o protótipo .....	49
Tabela 4-2 – Estatísticas de erro e desvio, para o medidor padrão e protótipo.....	49
Tabela 5-1 – Custo do protótipo .....	53



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

A/D: Analógico - Digital

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

bps: bits por segundo

BT: Baixa Tensão

CI: Circuito Integrado

ELETROBRAS: Centrais Elétricas Brasileiras

Fc: Fator de Carga

Fd: Fator de Demanda

Fp: Fator de Potência

In: Corrente Nominal

ICMS: Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

LSB: *Least Significant Bit* – Bit Menos Significativo

NBR: Norma Técnica Brasileira da ABNT

Res.: Resolução

RTC: Relação Transformador de Corrente

RTP: Relação Transformador de Potencial

SPI: *Serial Peripheral Interface* – Interface Serial de Periféricos

TC: Transformador de Corrente

TP: Transformador de Potencial

USB: *Universal Serial Bus*

Xc: Impedância Capacitiva



## LISTA DE SÍMBOLOS

- Ø – ângulo [°]  
B – Densidade de fluxo magnético [Tesla]  
Ci – Carga instalada [kW]  
D – Demanda [kW]  
E – Energia elétrica [kWh]  
F – Força [N]  
f – Frequência [Hz]  
I – Corrente elétrica [A]  
L – Comprimento [m]  
P – Potência ativa [W]  
Q – Potência reativa [VAr]  
R – Resistência elétrica [ $\Omega$ ]  
S – Potência aparente [VA]  
t – Tempo [s]  
V – Tensão [V]



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos Gerais.....	2
1.2. Estrutura Proposta.....	2
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>3</b>
2.1. Normatização do sistema elétrico Brasileiro .....	3
2.1.1. A Regulação do setor elétrico .....	3
2.1.2. Estrutura Tarifária .....	4
2.1.2.1. Grupos e Classes tarifárias .....	5
2.2. Energia Elétrica .....	6
2.2.1. Fatores.....	7
2.2.1.1. Fator de Potência .....	7
2.3. Medidores de Energia .....	8
2.3.1. Medidores Eletromecânicos .....	10
2.3.2. Medidores Eletrônicos .....	13
2.3.3. Hardware .....	15
2.3.3.1. Circuitos Integrados de Medição.....	15
2.3.3.2. Definição de Sensor .....	17
2.3.3.3. Sensores de tensão.....	18
2.3.3.3.1. Transformador de Potencial.....	19
2.3.3.3.1. Divisor Resistivo .....	20
2.3.3.4. Sensores de corrente .....	21
2.3.3.4.1. Resistor Shunt.....	21
2.3.3.4.2. Bobina de Rogowski.....	22
2.3.3.4.3. Sensor de Corrente Hall .....	22
2.3.3.4.4. Transformador de corrente.....	23
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>25</b>
3.1. Descrição Geral do Sistema.....	25
3.2. Hardware .....	26
3.2.1. Circuito integrado para medição de energia.....	26
3.2.2. Arquitetura de Hardware.....	27
3.2.3. Sensores de Medição.....	29
3.2.3.1. Sensor de tensão.....	29
3.2.3.2. Sensor de corrente.....	30
3.2.4. CI medidor de Energia ADE7753.....	31
3.2.5. Microcontrolador PIC 16F877A .....	34
3.2.6. Interface Serial (SPI e RS 232).....	35
3.2.7. Fonte de Alimentação .....	36
3.2.8. Kit Programador .....	37
3.3. Software .....	38
3.3.1. Redes e Protocolos .....	40
3.4. Calibração.....	42
<b>4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>48</b>
4.1. Testes .....	48
4.2. Análises Estatísticas .....	49
4.3. Comparações dos Resultados .....	50
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>52</b>
5.1. Orçamento do Projeto .....	53
5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros .....	54
<b>6. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>



<b>OBRAS CONSULTADAS .....</b>	<b>56</b>
<b>GLOSSÁRIO .....</b>	<b>57</b>
<b>APÊNDICE A – CÓDIGOS FONTES .....</b>	<b>58</b>
Apêndice A.1 MedidorMono.c .....	58
Apêndice A.2 LCD.c .....	61
Apêndice A.3 ADE7753.c .....	62
Apêndice A.4 ProtocoloSPIade7753.c.....	63
<b>APÊNDICE B – PESQUISA DE MERCADO .....</b>	<b>68</b>
<b>ANEXO A – DATA-SHEET ADE 7753.....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXO B – TABELA PARA O SISTEMA DE MEDIÇÃO.....</b>	<b>70</b>
<b>ANEXO C – ARQUITETURA PIC 16F877A .....</b>	<b>71</b>



## 1. INTRODUÇÃO

Os medidores de energia, instalados pelas concessionárias nos lares brasileiros, conferem pouca informação e clareza a respeito do consumo de energia realizado pela unidade consumidora. Isso por que, atualmente, a maioria dos sistemas de medição é eletromecânica (contador) e conferem ao usuário apenas uma contagem incrementada da energia consumida.

Mesmo os medidores eletrônicos com mais recursos de leitura, não permitem uma clareza nas informações obtidas, mantendo a leitura de energia apenas através de um contador. Com isso, o consumidor poderá comparar os dados no final do mês ao chegar a conta de energia elétrica em casa.

Resumindo, o atual sistema de medição é limitado em informações. Não possui: (1) entrada de dados que possibilite a inserção do valor cobrado por kWh, para que o usuário possa ler seu consumo em reais (R\$) instantaneamente; (2) registros de eventos de tensão (para queda de tensão ou sobre tensão); (3) interface gráfica para análise do consumo de energia; dentre outras informações que permitam ao usuário acompanhar e analisar o seu perfil de consumo.

Com base neste cenário, surgiu a idéia de desenvolver um medidor que pudesse gerar diversas informações detalhadas de um período determinado, como: quantidade de energia consumida, período de maior consumo, valor gasto até o presente momento, dentre outros recursos que os novos CIs de medição de energia disponibilizam.

Além disso, o medidor também servirá de supervisor para possíveis eventos no fornecimento da energia, como, por exemplo: queda de tensão e sobre tensão, que podem danificar os equipamentos, comprovando para fins legais de restituição no caso de danos aos mesmos.

Assim como disponibilizar um histórico do consumo de energia, para análise do consumidor a respeito do seu perfil de consumo, onde o mesmo se

beneficiará e poderá diagnosticar perdas em consumo de energia provenientes da instalação ou defeito de algum equipamento doméstico.

Portanto, uma alternativa de medidor de energia com mais detalhes e informações, permitirá um melhor controle no uso doméstico e poderá reduzir drasticamente os impactos futuros de um consumo deliberado e inconsciente da energia elétrica.

### **1.1. Objetivos Gerais**

Desenvolver um medidor de energia, para comunicação serial com um PC, que permita uma melhor visualização do consumo de energia, a fim de traçar o perfil do consumidor.

O trabalho tem por objetivos específicos:

- projetar um medidor eletrônico monofásico com capacidade de corrente de até 40A, para ser instalado em redes 110 ...127, e até 220 a 240V
- testar esse equipamento com cargas diferentes para fim de obter o resultado de medição na faixa de 0,1 a 40A, os testes devem ser realizado com equipamentos com precisão dez vezes melhor ao proposto pelo projeto, definido como 5,0%

### **1.2. Estrutura Proposta**

O medidor desenvolvido deverá possuir um microcontrolador que receberá os dados disponibilizados pelo CI medidor de energia ADE7753, o microcontrolador interpretará esses dados que devem ser na faixa de 0,01A até 40A para corrente, e entre as faixas de tensão de 110 a 127V, podendo ainda ser ligado entre 220 e 240V. O sistema deverá atender uma faixa de erro percentual de no máximo 5% do valor medido. Essa faixa de erro é justificada por que esse equipamento não terá como finalidade gerar dados para faturamento, mas sim para análise, no qual estará disponível através de sua interface de PC, a informação de custo mensal parcial. O que vai ao encontro da pesquisa realizada com usuários, que tem grande interesse em uma alternativa que informe o custo em R\$. Em suma, são estes os objetivos que este projeto busca atender.





## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

A medição de energia elétrica é realizada através de medidores eletromecânicos ou eletrônicos, pois são os únicos meios para as concessionárias de energia realizarem a medição do consumo doméstico, comercial e industrial. No entanto, esse processo básico de medição não possibilita maior controle e análise do consumidor sobre o seu consumo.

Conforme descrito na introdução deste projeto, o objetivo é desenvolver um medidor de energia mais inteligente e flexível, e para isso, é fundamental contextualizar o leitor a cerca de todo o universo no qual o processo de medição de energia elétrica está inserido.

Para isso, serão abordados temas como normatização do setor elétrico, método de cálculo de energia, sensores e dispositivos de medição, etc. Tais conhecimentos são indispensáveis tanto para a compreensão do equipamento desenvolvido no projeto, quanto para o uso do mesmo.

### ***2.1. Normatização do sistema elétrico Brasileiro***

#### **2.1.1. A Regulação do setor elétrico**

O fornecimento de energia elétrica, por parte das concessionárias, é condicionado ao pagamento de uma tarifa que representa o valor a pagar por um serviço, que apesar de essencial para o progresso, não é obrigatório.

A tarifação ocorre através de tabelas organizadas de acordo com as características de consumo e devem estar ao alcance de qualquer consumidor. A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), acompanhada pela ELETROBRAS (Centrais Elétricas Brasileiras), é a responsável por estabelecer as tarifas máximas de energia elétrica.

Segundo Costa (2006), o Brasil, realizou diversos estudos para definir qual formato de tarifação adotar, e, a exemplo de outros países, utiliza atualmente o conceito de custo marginal como critério para cálculo de tarifas.

O custo marginal corresponde ao custo de fornecimento para atender um consumo unitário adicional ao existente, quer num ponto da rede, quer numa hora determinada, quer num dado período do ano. Em termos econômicos custo marginal significa qual o valor a despendido para consumir mais um kWh. A venda do kWh pelo custo marginal permite que cada usuário conheça as conseqüências econômicas de seus hábitos de consumo, oferecendo-lhe um preço tal, que toda a sua decisão em aumento de consumo implique em saber o que custa para produzir este acréscimo. (Costa, 2006, p.109)

Ainda de acordo com Costa (2006), a neutralidade, igualdade e eficácia são os princípios que fundamentam a tarifação baseada no custo marginal. Estes critérios originaram as tarifas denominadas de convencionais e de horo-sazonais:

- a. Neutralidade: o preço deve ser o mais próximo possível do custo de produção;
- b. Igualdade: não deve haver discriminação entre consumidores
- c. Eficácia: racionalização do consumo e melhor uso dos excedentes sociais.

Fica, portanto, ao cargo das concessionárias de energia elétrica apenas, o fornecimento, a medição e tarifação das cargas consumidas na sua região de concessão. Para que as mesmas possam atuar, elas devem apresentar ao Governo Federal, de forma periódica, uma planilha com os custos regulamentados, a fim de comprovar seus custos marginais e desta forma, manter ou redefinir o valor de suas tarifas (Costa, 2006).

### **2.1.2. Estrutura Tarifária**

A diferenciação das tarifas de energia se dá pelos grupos de tensão de fornecimento e classe na qual o consumidor encontra-se. Desta forma a tarifação atende tanto princípios éticos, quanto técnicos e políticos.

É importante destacar que o custo da energia é inversamente proporcional a tensão de fornecimento. Ou seja, quanto maior a tensão, menor a tarifa, pois os custos da concessionária de energia em estrutura física, equipamentos, pessoal técnico para manutenção, entre outros, é muito maior para atender um cliente em



baixa tensão, se comparado com um cliente de maior tensão, o que define a tarifação de acordo com o custo marginal, que é tecnicamente justificável.

Para clientes classificados como residentes em zona rural, há um subsídio do governo em forma de tarifas especiais e descontos para serviços de utilidade pública como iluminação, água, esgoto e saneamento. Além disso, há diferenciação de alíquotas entre classes e subclasses devido a tributação estadual de ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços) embutido no preço final dos encargos de energia elétrica.

De acordo com a ANEEL (2010), o valor apresentado na fatura de conta de energia elétrica, recebida pelo consumidor ao final do período de medição, equivale à quantidade de energia elétrica consumida (kWh - quilowatt-hora) multiplicada por um valor unitário (R\$/kWh - reais por quilowatt-hora), que corresponde ao preço de um quilowatt consumido em uma hora.

A União, para viabilizar que todas as regiões do Brasil tenham acesso a energia elétrica, concede às empresas privadas ou públicas o direito de fornecer energia a uma determinada região geográfica. A partir de então, é de responsabilidade das concessionárias controlarem o serviço público de distribuição de energia elétrica local. No entanto, cabe à ANEEL garantir o equilíbrio econômico-financeiro da concessionária de distribuição para que ela possa oferecer um serviço com a qualidade, confiabilidade e continuidade necessária.

### **2.1.2.1. Grupos e Classes tarifárias**

Os consumidores de energia elétrica são enquadrados em dois grupos conforme o tipo de fornecimento: Grupo A (alta tensão) e Grupo B (baixa tensão). Como o presente projeto é destinado à medição de energia de sistemas monofásicos (baixa tensão), só irá se detalhar o Grupo B, conforme ANEEL (módulo 5, 2005).

A ANEEL (módulo 5, 2005) caracteriza o grupo “B” como unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, ou, ainda, atendidas em tensão superior a 2,3 kV, mas em situações especiais com distâncias muito longas com sistema de alimentação por uma linha de cabo apenas, e mesmo assim faturadas neste Grupo, caracterizado pela estruturação tarifária monômnia e subdividido nos seguintes grupos: (B1) residencial, residencial baixa renda; (B2)

rural, cooperativa de eletrificação rural, serviço público de irrigação; (B3) demais classes e (B4) iluminação pública.

A forma de tarifação do grupo B é denominada monômnia, conforme ilustração 2-1. O faturamento deste grupo é obtido pelo produto do consumo medido, observando os valores mínimos, pela respectiva tarifa.

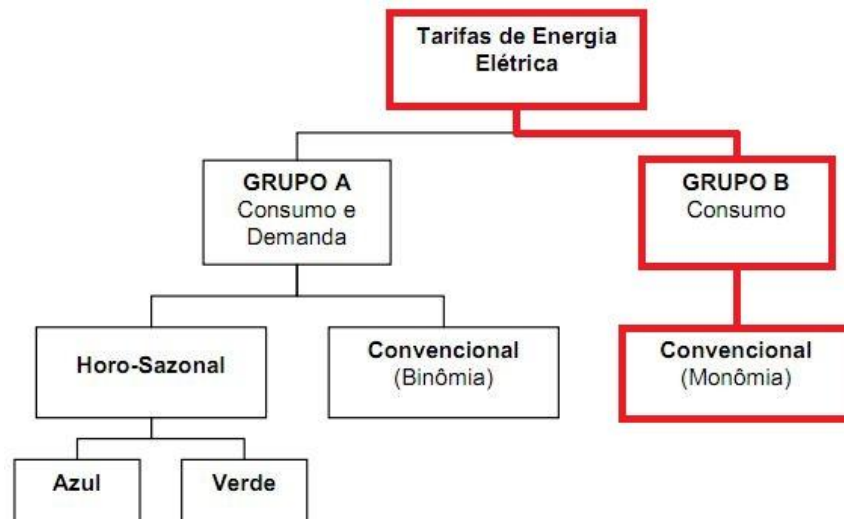


Ilustração 2-1 – Tarifas x Grupos

Fonte: Aneel, 2010

## 2.2. Energia Elétrica

A Energia elétrica é definida como a potência ativa consumida ao longo do tempo.

$$E = \int P \cdot dt \quad (1)$$

Onde: E é energia elétrica [kWh];

P é potência ativa instantânea [kW];

t é tempo [h];

A energia consumida num intervalo de tempo é o produto da potência (kW) da carga, pelo número de horas (h) que a mesma foi ligada. Sendo potência ativa:

$$P = I \times V \quad (2)$$

Onde: I é corrente elétrica [A];

V é tensão elétrica [V];

## 2.2.1. Fatores

### 2.2.1.1. Fator de Potência

A maioria das unidades consumidoras consome uma parte em energia reativa, como motores, transformadores, lâmpadas de descarga, fornos de indução, entre outros. As cargas indutivas necessitam de campo eletromagnético para seu funcionamento, por isso sua operação requer:

a) Potência ativa (medida em W): Potência que efetivamente realiza trabalho gerando calor, luz, movimento, etc.

b) Potência reativa (medida em VAr): Potência usada apenas para criar e manter os campos eletromagnéticos das cargas indutivas e capacitivas.

Assim, Mamede (2007) diz que enquanto a potência ativa é sempre consumida na execução de trabalho, a potência reativa, além de não produzir trabalho, circula entre a carga e a fonte de alimentação, ocupando um espaço no sistema elétrico que poderia ser utilizado para fornecer mais energia ativa.

O fator de potência indica a eficiência com a qual a energia esta sendo usada, e pode ser definida conforme equação 3.

$$Fp = \cos\phi = \cos \left[ \tan^{-1} \left( \frac{Q}{P} \right) \right] \quad (3)$$

Onde: Fp é fator de potência;

P é potência ativa [W];

Q é potência reativa [VAr];

$\phi$  representa o ângulo de defasagem [°].

O fator de potência também pode ser definido, de acordo com König (2003) *apud* Müller (2008), como a relação entre a potência ativa e a potência aparente. Sendo que um alto fator de potência indica uma eficiência alta e, inversamente, um fator de potência baixo indica baixa eficiência. A ilustração 2-2 apresenta o

triângulo das potências, comumente utilizado para representar as relações entre kW, kVAr, e kVA

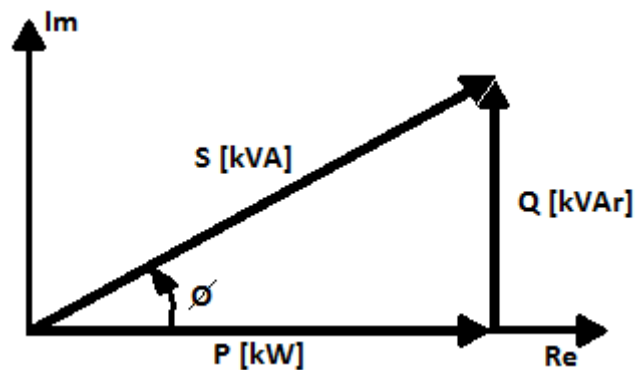


Ilustração 2-2 – Triângulo das potências

Fonte: Müller, 2008

Fisicamente, o fator de potência representa o cosseno do ângulo de defasagem ( $\phi$ ) entre a onda senoidal da tensão e a onda senoidal da corrente. Quando a onda de corrente está atrasada em relação à onda de tensão, o fator de potência possui mais carga indutiva, ao contrário de quando a carga capacitiva é maior, adiantado a corrente em função da tensão (Mamede, 2007).

$$Fp = \frac{P}{|S|} = \cos \phi$$

Então:

(4)

Onde: S é potência aparente [VA];

Existem alguns fatores relacionados aos medidores que devem ser considerados na medição de energia, porém, esses fatores serão mais bem definidos no próximo sub-capítulo que diz respeito aos medidores de energia.

### **2.3. Medidores de Energia**

A quantidade de energia elétrica consumida por cada usuário é obtida através de medidores de energia elétrica que, possibilitam, após medição, a conversão dos kW consumidos, em um valor a ser faturado, através da multiplicação dos kWh pela tarifa da concessionária local.

A base econômica das concessionárias e o seu faturamento baseiam-se na leitura dos medidores de energia, por este motivo, é de interesse destas concessionárias o preciso desempenho dos medidores, bem como a sua inviolabilidade.

A energia elétrica tem características bastante específicas na sua forma de medição e tarifação:

- a. O formato de pagamento é pós-pago, ou seja, o consumidor só paga aquilo que consumiu ao término do período de consumo;
- b. O medidor de energia fica na unidade consumidora, o que pode ocasionar muita fraude na hora de ler o consumo;
- c. A leitura do consumo é realizada, na grande maioria dos casos, de forma manual, através de um leiturista, que vai até o local do consumo e confere os dados atualizados no medidor.

No Brasil o tipo de medidor de energia mais utilizado é o medidor por indução (eletromecânico), algumas das características atribuídas a este tipo de medidor são a robustez e o baixo custo.

Já existem modelos eletrônicos instalados no Brasil, porém, com uma penetrância muito inferior aos eletromecânicos. O comparativo entre modelos por região geográfica é apresentado na tabela 2-1.

Tabela 2-1 – Percentual de medidores adquiridos para baixa tensão por região

Fonte: ANEEL, 2009

<b>Região</b>	<b>Eletromecânico</b>	<b>Eletrônico</b>
<b>Norte</b>	79,09%	20,91%
<b>Nordeste</b>	88,27%	11,73%
<b>Centro Oeste</b>	96,11%	3,89%
<b>Sudeste</b>	94,60%	5,40%
<b>Sul</b>	97,38%	2,62%
<b>BRASIL</b>	92,61%	7,39%

Com o avanço tecnológico dos medidores eletrônicos, os mesmos vêm substituindo os eletromecânicos, porém o processo é lento apesar das vantagens que os medidores eletrônicos possuem, conforme descrito na tabela 2-2.

Tabela 2-2 – Principais características entre medidor eletromecânico e eletrônico

Fonte: Autor

<b>Atributo</b>	<b>Eletromecânico</b>	<b>Eletrônico</b>	<b>Vantagem do medidor eletrônico</b>
<b>Classe</b>	2,00%	1,0% (ou melhor)	Maior exatidão
<b>Corrente de partida</b>	100 mA	10 mA	Maior sensibilidade a pequenas cargas
<b>Consumo próprio</b>	1,3W	0,5W (ou maior)	Menores índices de perdas técnicas
<b>Ângulo da instalação</b>	Vertical	Indiferente	Extingue uma possibilidade de fraude
<b>Rigidez Mecânica</b>	Baixa	Alta	Maior resistência a impactos no transporte ou manuseio
<b>Calibração</b>	Ajustes deslizantes	Rede resistiva	Inexistência de pontos móveis
<b>Auto Diagnóstico</b>	Inexistente	Existente	Auto Verificação
<b>Saída de pulso/ saída óptica</b>	Inexistente	Existente	Integração com outros dispositivos eletrônicos

### 2.3.1. Medidores Eletromecânicos

Como dito anteriormente, os medidores eletromecânicos do tipo por indução ainda são amplamente utilizados pelas concessionárias de energia para medição de consumidores em baixa tensão por sua simplicidade, robustez, exatidão, desempenho e baixo custo.

Por isso, é interessante entender como funcionam os medidores eletromecânicos de demanda. Muitos ainda encontram-se em funcionamento em unidades consumidoras com tarifação convencional binômia.

O modelo de medidor por indução mais usado é do tipo disco, constituído, essencialmente, das partes mostradas na ilustração 2-3, e citadas na seqüência.

BP: Bobina de tensão ou potencial, altamente indutiva, com grande número de espirais de fio fino de cobre, para ser ligada em paralelo com a carga.

BC: Bobina de corrente, com poucos espirais de fio grosso de cobre, para ser ligada em série com a carga; é dividida em duas meias bobinas enrolada em sentidos contrários.



Núcleo: lâminas de material ferromagnético, justapostas, mas isoladas umas das outras para reduzir as perdas por correntes parasitas (*Foucault*).

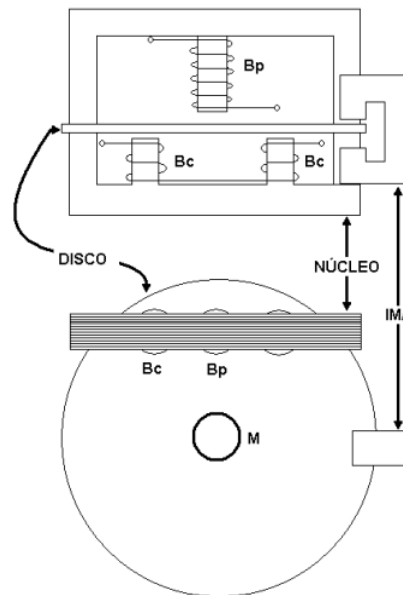


Ilustração 2-3 – Medidor de indução (tipo disco)

Fonte: Filho, 1997

M: conjunto móvel ou rotor constituído de disco de alumínio, de alta condutibilidade eletromagnética, com grau de liberdade de girar em torno do seu eixo de suspensão, onde acoplado a um parafuso de rosca sem fim aciona um sistema de engrenagem, que registra num mostrador mecânico a energia elétrica consumida.

Ímã: produz conjugado frenador ou de amortecimento sobre o disco.

Para apresentar o princípio de funcionamento deste tipo de medidor é interessante lembrar que: um condutor percorrido por uma corrente  $I$ , na presença de uma densidade de fluxo magnético  $B$ , fica submetido a uma força  $F$  cujo sentido é dado pela regra dos três dedos da mão direita, ilustração 2-4.

Este fenômeno é conhecido como interação eletromagnética.

O medidor tipo indução tem o conjunto motor originado no disco graças ao fenômeno da interação eletromagnética.

O fluxo alternado da bobina de potencial, ao atravessar o disco de alumínio, induz correntes de *Foucault*. A interação entre estas correntes e o fluxo, dá origem à outra força e, conseqüentemente, a outro conjugado em relação a  $M$ , fazendo girar o disco. Como o disco pode girar em torno do seu eixo  $M$ , a sua velocidade será proporcional a potência da carga.

Esta velocidade pode ser ajustada de tal modo que o número de rotações, durante um dado intervalo de tempo, seja proporcional a energia solicitada pela carga durante este mesmo intervalo de tempo, assim o disco dará certo número de voltas por kWh. O movimento do disco é transmitido, por meio de um sistema mecânico de engrenagem, ao mostrador do instrumento que indicará em kWh a quantidade de energia absorvida pela carga.

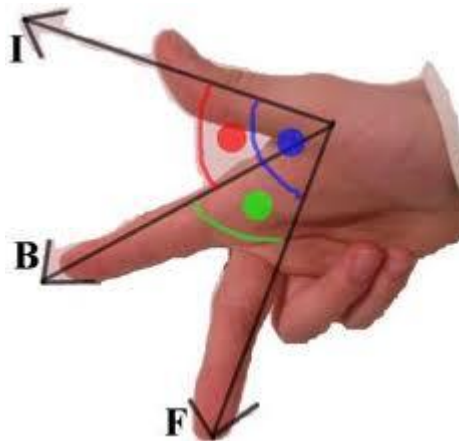


Ilustração 2-4 – Regra da mão direita

Fonte: Filho, 1997

E cujo módulo é dado por:

$$F = B.I.l.\text{sen}\varphi \quad (5)$$

Onde:

- F é força eletromagnética [N];
- l é comprimento do condutor sob a ação do campo magnético [m];
- B é a densidade de fluxo magnético [Tesla];
- $\varphi$  é ângulo entre o vetor  $\vec{B}$  e o vetor  $\vec{I.l}$  no espaço [°];
- I é corrente [A];

De acordo com a norma ABNT-PB-182/72 (Filho, 1997) os medidores eletromecânicos monofásicos fabricados no Brasil estão padronizados nas seguintes grandezas:

- Corrente nominal: 15A;
- Tensão nominal: 240V ou 120V;

Estes medidores nacionais, quanto aos mancais do conjunto móvel, são classificados em dois tipos:

- Mancal mecânico: vida útil em torno de 15 anos. Corrente máxima em regime permanente 60A. Suporta uma sobre corrente de 400%.
- Mancal magnético: vida útil prevista em torno de 30 anos. Corrente máxima em regime permanente de 100A. Suporta uma sobrecarga de 667%.

### 2.3.2. Medidores Eletrônicos

Os medidores eletrônicos são capazes de proporcionar uma quantidade significativa de informações e permitem a introdução de novos serviços e de novos acordos entre distribuidoras e consumidores, além disso, possibilitam a comunicação com sistemas de gerência de medição automática.

O conceito de medição eletrônica de energia elétrica pode ser explicado como a integração no tempo da multiplicação entre os valores de tensão e corrente medida, conforme equação 6.

$$E = \int V.I.dt \quad (6)$$

Onde: V é a tensão elétrica [V];  
I é a corrente elétrica [A];

Um medidor, normalmente contém um registrador e um display através do qual o consumo acumulado é lido. Em modelos mais modernos, ainda não disponibilizados no Brasil, também é possível gravar na memória do medidor o consumo atual e anterior, caso seja necessário a recuperação dos dados.

Para Lamin (2009) é importante que o instrumento de medição, tenha definido as grandezas elétricas que serão mensuradas. Diante dessa definição, torna-se necessária a fixação da periodicidade de coleta de dados e a capacidade de armazenamento de dados para que não ocorra a saturação da memória.

A interface desses medidores é analógica e é composta por uma entrada de tensão que normalmente é ligada a um transformador de potencial ou um divisor

resistivo a uma entrada de corrente que pode ser conectada a um resistor *Shunt*, um transformador de corrente, um sensor *Hall*, uma Bobina de Rogowski, etc.

A aplicação de sinais de tensão e a corrente de entrada dos conversores A/D é convertida em pulsos, e cada pulso representa a quantidade de energia consumida de forma análoga ao medidor eletromecânico, onde estes pulsos são representados na forma de rotação do disco e cada rotação representa uma quantidade de energia consumida.

Dentre essas relações do A/D para pulsos, há também as relações nominais dos transformadores de instrumentos empregados na medição de uma unidade consumidora de energia elétrica, como um fator presente nas faturas de energia elétrica e equivalem a Relação Total de Transformação (RTT).

$$RTT = R_{TP} \times R_{TC} \quad (7)$$

Onde: RTP é a relação de transformação do TP;  
RTC é a relação do TC;

O presente projeto utiliza sensores de medição indireta, por isso, sua RTT tem um fator multiplicador, que será mais bem detalhado no capítulo de metodologia. O protótipo contempla um transformador de corrente (TC) e um transformador de potencial (TP), que serão apresentados no capítulo de sensores.

Segundo Filho (1997), os transformadores de instrumentos são responsáveis pela alimentação de instrumentos elétricos de medição, controle ou proteção.

Diante de tantos recursos de medição e qualidade na mesma, os medidores eletrônicos de energia elétrica vêm se tornando um foco de muitos estudos e pesquisas, tendo em vista a necessidade cada vez maior da racionalização do uso desta, sendo estes equipamentos muito importantes no controle do uso desta energia.

Muitas empresas concessionárias de energia elétrica possuem programas para substituição dos medidores eletromecânicos existentes por equipamentos eletrônicos, seja por razões de faturamento ou por programas piloto que utilizam novas tecnologias como à venda de energia com cartões pré-pagos (LAMIN, 2009).

### **2.3.3. Hardware**

Com base nas informações apresentadas até o presente momento e por todas as vantagens descritas, o tipo de medidor piloto desenvolvido neste projeto é eletrônico e desta forma, espera-se que o mesmo atenda todos os objetivos propostos.

Para uma melhor compreensão do projeto, na próxima seção, serão abordados componentes característicos para medidores de energia eletrônicos utilizados no desenvolvimento do protótipo.

#### **2.3.3.1. Circuitos Integrados de Medição**

O rápido avanço da eletrônica vem contribuindo para soluções cada vez mais integradas de componentes para medição de energia, com muitas funcionalidades e características diversas.

Neste capítulo citam-se alguns desses componentes e apresenta-se o ADE7753 (AD, 2009) que é o foco principal deste estudo, pois é através dele que se construiu o protótipo de medição.

#### **STPM01 - ST Microelectronics**

Este circuito integrado foi desenvolvido especialmente para medição de energia ativa, reativa e aparente, em sistemas monofásicos de distribuição, utilizando bobina de *Rogowski* e/ou transformador de corrente e/ou *shunt* como sensor de corrente e transformador de potencial ou divisor de tensão resistivo como transdutores de tensão.

O STPM01 consiste essencialmente de duas partes: parte analógica e parte digital.

A parte analógica contém PGA's (Amplificadores de ganho programável) e conversores A/D tipo  $\Sigma\Delta$ . Enquanto a parte digital conta com um DSP encarregado de todos os cálculos necessários a obtenção dos valores das potências ativa, reativa e aparente, bem como, dos valores RMS de tensão e corrente.

Os resultados dos cálculos são disponibilizados via interface SPI ou por meio de pulsos em saída digital para acionamento de motor de passo. Através da interface SPI é possível a calibração do medidor e também a leitura de todas as variáveis por meio de um microcontrolador.

Com uma resolução de 0,01 kWh os registradores internos do microcontrolador (em 32 bits) têm capacidade para armazenar a medição por 980 anos, levando em conta uma carga contínua de 5 kWh (23 A \* 220 V).

O processo de calibração do medidor segue orientações do fabricante e se resume simplesmente ao ajuste de três registradores internos no medidor STPM01. Esses registradores atuam como compensadores de ganho, no caminho do processamento dos sinais de tensão e corrente no interior medidor. A compensação é capaz de corrigir desvios de até +/- 12 % que ocorrem em razão da tolerância dos componentes utilizados nos canais analógicos de entrada, formados pelos transdutores de tensão e corrente e filtros *anti-aliasing* (é o nome que se dá ao efeito de se amostrar de forma insuficiente um sinal contínuo qualquer).

### **CS5460A - Cirrus Logic**

Este é outro circuito que integra uma solução para medição de potência, combinando dois conversores A/D  $\Sigma\Delta$ , funções de alta velocidade para cálculo de potência consumida e interface serial para comunicação. É projetado para medir valores eficazes (RMS) de tensão e corrente e energia elétrica consumida de aplicações que utilizam uma rede monofásica a dois ou três fios.

A interface de aquisição para os circuitos de tensão pode ser realizada com transformadores de potencial ou divisor de tensão resistivo. Já para corrente pode-se utilizar *shunt* resistivo ou transformador de corrente.

O CS5460A tem interface serial bidirecional que permite sua comunicação com um microcontrolador onde pode estar implementado rotinas para exibição dos valores medidos em *display* LCD ou acionamento de motor de passo para *display* eletromecânico. Tem ainda a funcionalidade de facilitar a calibração dos níveis AC e DC.

O procedimento de calibração é efetuado pela interface serial com o envio de comandos com os valores a serem alterados os registradores de calibração para os valores de tensão, corrente e pulsos de energia.

## **ADE7753 – Analog Devices**

Este circuito possui uma mescla das características apresentadas pelos modelos anteriores, porém cabe se destacar as seguintes especificações.

Especialmente dedicado para medição de energia ativa, reativa e aparente, é possível medir os valores eficazes (RMS) de tensão e corrente elétrica para sistemas monofásicos a dois fios, seus canais de entrada permitem a utilização de bobinas de *Rogowski*, TC e/ou *shunt* como sensor de corrente e transformador de potencial ou divisor de tensão resistivo como transdutor de tensão.

As entradas analógicas possuem PGA's e conversores A/D 16 bits, com uma função selecionável para a integração digital no caso da utilização de sensores tipo Rogowski, eliminando a necessidade de um integrador externo, resultando em uma excelente estabilização e precisão entre a corrente e a tensão.

Os resultados medidos são disponibilizados através da Interface SPI em diversos registradores, que podem ser lidos pelo comando de leitura e ou somente a medição da energia ativa através da saída de frequência (CF) proporcional.

O circuito possui diversas funções para níveis de supervisão como níveis de tensão abaixo do recomendado, detecção de picos de tensão, frequência da linha, além de possuir um sensor de temperatura interno para verificar a temperatura e condição de operação do mesmo.

O processo de calibração é efetuado via registradores pela interface serial com o envio de comando e valores a serem alterados para calibração de tensão, corrente e pulsos de energia.

Através da tabela 3-1 tem-se o comparativo das principais características dos dispositivos citados, mas devido à grande similaridade de funções de ambas as soluções se optaram pela solução mais disponível no mercado nacional, neste caso o ADE7753.

### **2.3.3.2. Definição de Sensor**

Segundo Thomazini (2004) os sensores são dispositivos que convertem uma grandeza física em um sistema de medição e são geralmente definidos como um dispositivo que recebe e responde a um estímulo ou a um sinal.

Muitas vezes um sensor é composto de um transdutor - dispositivo que converte um tipo de energia em outra e não necessariamente em um sinal elétrico - e outra parte que converte a energia resultante em um sinal elétrico.

São funções características de um elemento sensor:

a. Função de transferência: estabelece a relação entre o sinal de entrada (grandeza a ser medida) e o sinal de saída, sendo sempre possível determinar uma função de transferência ideal para um sensor.

b. Saturação: todos os sensores têm limites de funcionamento a partir dos quais perdem sua linearidade.

c. Impedância: para uma saída em tensão, a impedância de saída ( $Z_{out}$ ) deve ser baixa e a impedância de entrada ( $Z_{in}$ ) deve ser alta. Por outro lado, para saída em corrente, a impedância de saída deve ser alta e a entrada deve ser baixa.

d. Excitação: especifica quais as grandezas necessárias ao funcionamento de um sensor. Para alguns tipos de sensores é importante saber a especificação da resposta, frequência e qual a estabilidade necessária ao sinal de excitação. A resposta em frequência específica qual a sensibilidade do sensor às variações de frequência do sinal de entrada.

As características da aplicação também podem influenciar na escolha dos sensores a utilizar. Fatores como desenho, peso, dimensões e preço são determinantes na escolha dos sensores.

### **2.3.3.3. Sensores de tensão**

Os níveis de medida de tensão elétrica muitas vezes não podem ser aplicados diretamente aos circuitos que realizam o processamento desta grandeza. Neste caso se faz necessária a utilização de dispositivos ou métodos para adequar estes níveis de tensão que estão sendo medidos aos níveis que a instrumentação condiciona.

Dentre os dispositivos ou métodos de medição destacam-se os relacionados a seguir.



### 2.3.3.3.1. Transformador de Potencial

Para Filho (2007), um transformador de potencial (TP) é um transformador para instrumentação cujo enrolamento primário é ligado em derivação com um circuito elétrico e cujo enrolamento secundário se destina a alimentar bobinas de potencial de instrumentos elétricos de medição, controle ou proteção.

Na prática o TP é considerado um redutor de tensão, pois a tensão no seu circuito secundário é normalmente menor que a tensão no seu enrolamento primário.

Os TP's são baseados em relações, sendo as principais destas:

- Relação Nominal: é definida entre os valores nominais das tensões primárias e secundárias, respectivamente, tensões estas para as quais o TP foi projetado e construído;
- Relação Real: é definida entre o valor exato de uma tensão qualquer aplicada ao primário do TP e o correspondente valor exato da tensão verificada no secundário do TP.
- Fator de correção: é a razão entre a relação nominal e a relação real do TP. Na prática mede-se o valor da tensão no secundário do TP com um voltímetro e multiplica este valor pela relação nominal. Este valor representa o valor medido da tensão primária, e não seu valor exato.

Para aplicação dos TP's, as normas técnicas definem certas condições de uso baseadas em um valor determinado de "classe de exatidão" que é definida pelos valores 0,3, 0,6 e 1,2 e as aplicações são especificadas conforme a tabela 2-3.

Tabela 2-3 – Classe de exatidão dos TP's

Fonte: Thomazini, 2004

Classe de Exatidão	Aplicação
Melhor do que 0,3	TP padrão; Medições e laboratório; Medições especiais;
0,3	Medição de energia elétrica para faturamento ao consumidor
0,6 ou 1,2	Medição de energia elétrica sem finalidade de faturamento ao consumidor; Alimentação de relés; Alimentação de instrumentos de controle: voltímetro, Wattímetro, Varímetro, frequencímetro, etc.

Onde a classe de exatidão quantifica a concordância entre o valor da medida e o valor ideal da medida quando o transformador é estimulado com um padrão de comparação.

### 2.3.3.3.1. Divisor Resistivo

A utilização de um divisor de tensão resistivo é outra alternativa de realizar a interface de entrada de tensão para adequar os níveis do circuito a ser medido com o circuito de condicionamento.

Este divisor - associação de resistores - tem como finalidade interpretar a tensão aplicada à entrada de um circuito, para que a mesma possa ser dividida entre os componentes do circuito. Indicando na saída do circuito uma tensão nos níveis adequados à entrada do circuito de medição.

A ilustração 2-5 representa um circuito onde a tensão da rede é aplicada ao resistor paralelo ( $R_M$ ), que possui maior valor, e a maior parte da tensão é aplicada sobre este resistor. Desta forma sobre o resistor série ( $R_C$ ) aplica-se a menor parcela da tensão da rede.

Neste piloto, o divisor de tensão resistivo é utilizado apenas para complementar a aplicação do TP, principal tipo de sensor para leitura da tensão neste projeto.

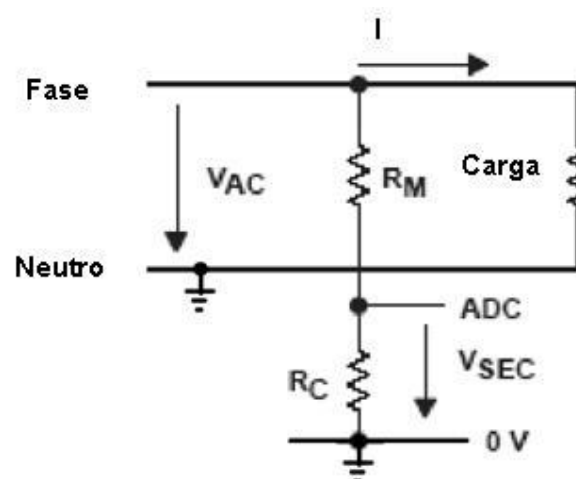


Ilustração 2-5 – Divisor Resistivo

Fonte: Autor

É importante salientar que os sistemas de medição possuem uma referência do sinal a ser medido. No caso da ilustração 2-5, é possível verificar que o neutro está aterrado, assim como 0 V da entrada de medição ADC, com isso se elimina pontos de referência flutuante, que permite a entrada de interferências externas não desejadas.

#### 2.3.3.4. Sensores de corrente

Para realizar a medição de forma adequada, é necessário disponibilizar os níveis de corrente elétrica que circulam pelo circuito, conforme as características de entrada do circuito de medição.

Para realizar a medição de corrente existem diversos dispositivos. Para fins de conhecimento do leitor, apresentaremos de forma muito breve, apenas os mais utilizados e daremos destaque ao Transformador de Corrente que foi o modelo de sensor utilizado neste projeto.

##### 2.3.3.4.1. Resistor *Shunt*

Segundo Higashi (2006), o resistor *Shunt* mede a intensidade de corrente obtida pela lei de *Ohm*. Apesar de ser um dos métodos de medição mais utilizados, o mesmo apresenta alguns inconvenientes, como: (a) em caso de alta corrente provoca um aquecimento do resistor, (b) a tensão causa problemas de isolamento elétrica do sistema de medida e (c) a alta frequência produz o efeito pelicular.

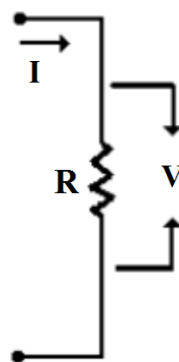


Ilustração 2-6 – Determinação da corrente através do resistor *shunt*

Fonte: Higashi, 2006

Onde:  $I$  é a corrente elétrica eficaz, em ampéres [A];

$V$  é a tensão elétrica eficaz, em volts [V];

$R$  é o valor da resistência, nesse caso o valor do resistor *shunt* [ $\Omega$ ].

### 2.3.3.4.2. Bobina de Rogowski

A Bobina *Rogowski* representada na ilustração 2-7 consiste de um núcleo toroidal, que é colocado em torno do condutor. O campo magnético produzido pela corrente alternada no condutor induz uma tensão na bobina.

Segundo Higashi (2006) a faixa de leitura da Bobina *Rogowski* vai desde mA até alguns kA. A bobina não apresenta histerese, pois seu núcleo é de material não magnético. Possui boa linearidade, um formato que facilita as medidas em lugares com acesso limitado, não possui contato físico com o circuito, um baixo consumo e uma baixa variação do sinal da saída com a temperatura. Além disso, a indutância mútua não depende da corrente nem da frequência do sinal a medir. A única limitação em frequência vem determinada pela ressonância da bobina, a qual depende do projeto.

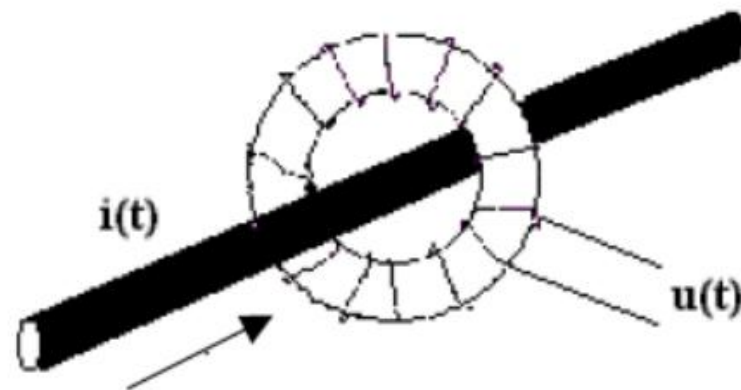
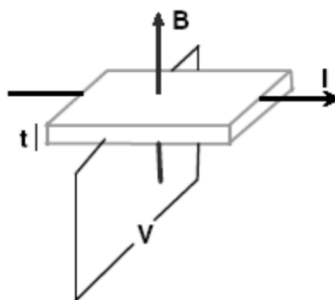


Ilustração 2-7 – Bobina de *Rogowski*

Fonte: Higashi, 2006

### 2.3.3.4.3. Sensor de Corrente *Hall*

Um sensor de efeito *Hall* é basicamente uma pastilha retangular de material condutor conduzindo corrente, posicionado em uma região de campo magnético para medir a densidade de fluxo magnético, conforme ilustração 2-8.

Ilustração 2-8 – Representação de um sensor de efeito *Hall*.

Fonte: Wikipédia

#### 2.3.3.4.4. Transformador de corrente

O transformador de corrente ou simplesmente TC, dispositivo de medição utilizado neste projeto, transforma a corrente que circula em um enrolamento primário, através de um acoplamento magnético, em uma corrente induzida no secundário, conforme ilustração 2-9.

Segundo Filho (1997), os transformadores de corrente, também chamados de transformadores de instrumentos, são utilizados em aplicações de alta corrente e têm a função de fornecer correntes proporcionais às medidas no circuito primário de potência, mas suficientemente reduzidas e isoladas galvanicamente de forma a possibilitar a medição por equipamentos de proteção e medição.

Os tipo de TC's são classificados em primeiro nível de acordo com o modelo do enrolamento primário - normalmente constituído por poucas espiras feitas por condutor de cobre de elevada secção - e em segundo nível pelo enrolamento secundário - constituído por uma bobina com derivações ou múltiplas bobinas ligadas em série e/ou paralelo.

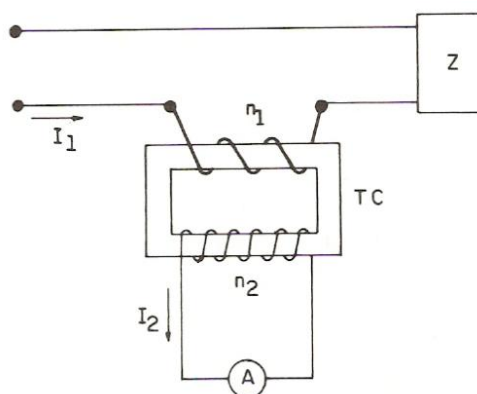


Ilustração 2-9 – Transformador de corrente básico

Fonte: Filho, 1997

No presente projeto foi utilizado o tipo enrolado, pois o mesmo atende os requisitos necessários e tem uma aplicação bastante simples. Este tipo é usado quando são requeridas relações de transformações inferiores a 2000/5. Possui isolamento limitada e, portanto, se aplica em circuitos até 15kV. Construtivamente o enrolamento primário, constituído de uma ou mais espiras, envolve mecanicamente o núcleo do transformador.

Porém, existem outros modelos de TC's utilizados, como: tipo barra, tipo bucha, tipo janela, tipo núcleo dividido, tipo com vários enrolamentos primários, tipo com vários núcleos, entre outros.

Assim como os TP's, os TC's também são padronizados por classe de exatidão, de acordo com sua aplicação. A tabela 2-4 apresenta estas classes e suas aplicações.

Os conjuntos de informações citadas durante o capítulo 2 subsidiam o desenvolvimento do restante do projeto, conforme descrito no próximo capítulo de métodos e materiais.

Em resumo, dentre as possibilidades disponíveis para a execução do projeto, optou-se pelas alternativas de melhor custo x benefício, sendo considerado custo, inclusive a dificuldade das aplicações. No entanto, ainda que escolhidas as opções mais otimizadas, muitas melhorias e adaptações foram necessárias na concepção e desenvolvimento do projeto.

Tabela 2-4 – Classe de exatidão dos TC's

Fonte: Filho, 1997

<b>Classe de Exatidão</b>	<b>Aplicação</b>
Melhor do que 0,3	TC padrão; Medições e laboratório; Medições especiais;
0,3	Medição de energia elétrica para faturamento ao consumidor
0,6 ou 1,2	Medição de energia elétrica sem finalidade de faturamento ao consumidor; Alimentação de instrumentos de controle: voltímetro, Wattímetro, Varímetro, frequencímetro, etc.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada na execução do projeto, onde se destaca as principais características do medidor de energia, proposto:

- Registro do consumo de energia a cada minuto.
- Interface de coleta de dados para PC.
- Medição de correntes até 40A.
- Registro dos eventos de tensão.

#### 3.1. *Descrição Geral do Sistema*

O trabalho teve por objetivo projetar um protótipo capaz de coletar os valores da energia elétrica consumida em uma residência e registrar essas informações para que os dados possam ser enviados para um PC através de um software de supervisão. Com isso, facilmente pode-se gerar um relatório diário, semanal e mensal de consumo. Outra característica do protótipo é registrar os eventos que podem acontecer na tensão. Para isso, os padrões que devem ser fornecidos pela concessionária servirão de parâmetros. O sistema registra evento de variação no valor de tensão e o período em que ocorreu, se houver variação dos valores de tensão em relação aos valores considerados padrões.

Apontam-se também neste capítulo, as características de *hardware*, *software* e montagem do protótipo, tendo como base a nota de aplicação da *Analog devices* AN-564 “A Power Meter Reference Design Based on the ADE7756” (AD, 2001).

### 3.2. Hardware

O *hardware* desenvolvido apresentado a seguir foi montado em duas partes, o sistema de sensorização apresentado pela ilustração 3-1 e o circuito medidor que será apresentado posteriormente.

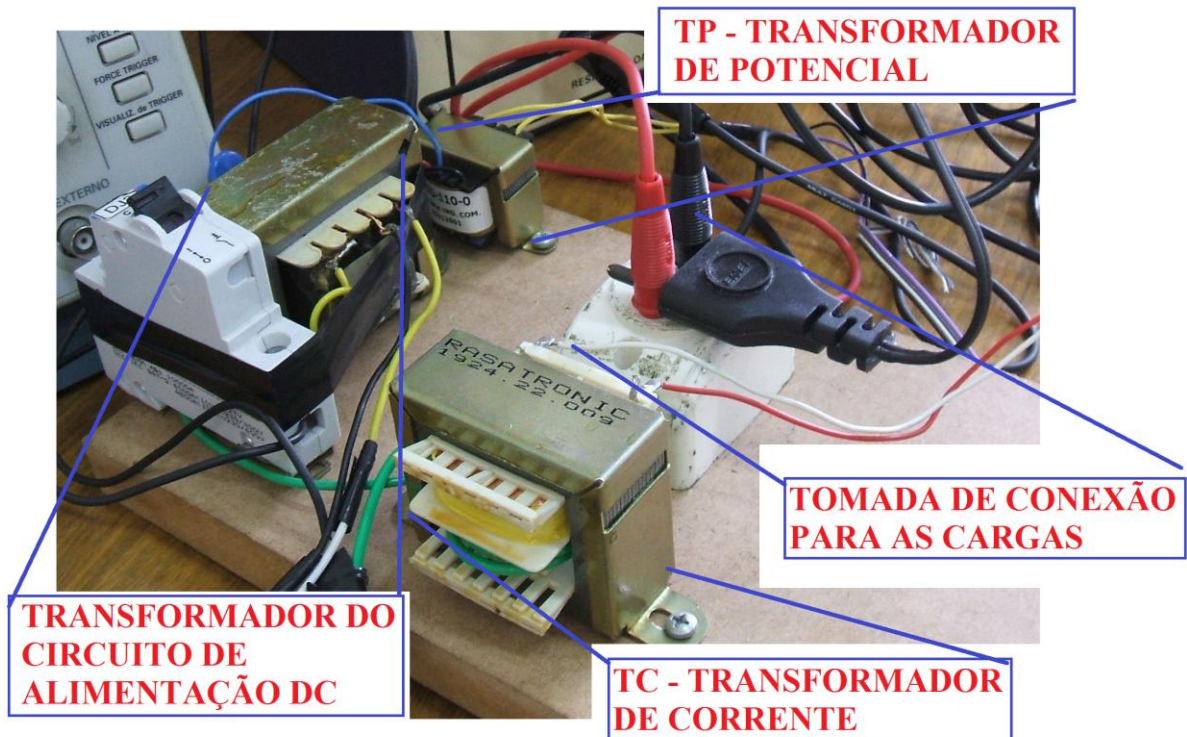


Ilustração 3-1 – Circuito de Sensorização

Fonte: Autor

#### 3.2.1. Circuito integrado para medição de energia

Através da tabela 3-1 tem-se o comparativo das principais características dos dispositivos citados, mas devido à grande similaridade de funções de ambas as soluções, optou-se então pela solução mais disponível no mercado nacional, neste caso o ADE7753.



Tabela 3-1 – Comparativo dos CIs para medição de energia

Fonte: Autor

Dispositivo	Periféricos	Tecnologia	Quant. Pinos	Preço Unitário
<b>STPM01</b>	2 A/D $\Sigma\Delta$ , SPI	SMD	20	R\$ 19,40
<b>CS5460 A</b>	2 A/D $\Sigma\Delta$ , SPI	SMD	24	R\$ 13,50
<b>ADE7753</b>	2 A/D $\Sigma\Delta$ , SPI	SMD	20	R\$ 14,61

### 3.2.2. Arquitetura de Hardware

Tendo como base a nota de aplicação AN-564 (AD, 2001) da *Analog Devices*, utilizou-se o circuito de referencia da ilustração 3-2, com algumas adaptações para a realização deste trabalho, como por exemplo, a utilização de um PIC 16F877A sem memória auxiliar, além da utilização de um transformador de potencial na entrada analógica de tensão, ao invés da ligação direta.

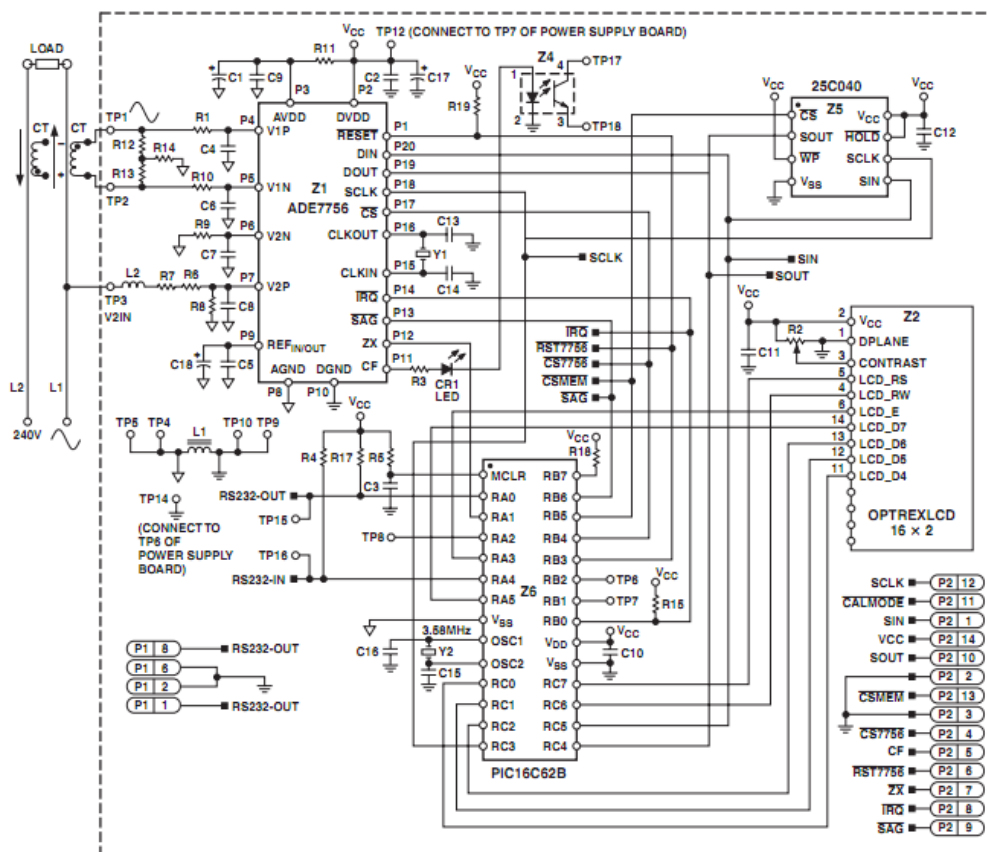


Ilustração 3-2 – Circuito de Referência

Fonte: AnalogDevices, 2001

O diagrama de blocos da ilustração 3-3 apresenta o protótipo construído de forma mais macro, que será descrito nas próximas seções, divididas em 5 partes:

- Sensores de tensão e corrente;
- CI medidor de energia ADE7753;
- Microcontrolador;
- Interface serial (SPI e RS-232);
- Fonte de Alimentação.

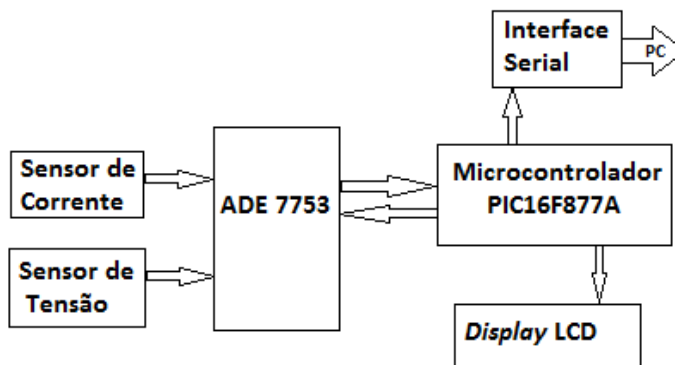


Ilustração 3-3 – Diagrama de Blocos do Medidor

Fonte: Autor

O sistema eletrônico do circuito de medição é composto do PIC, ADE 7753 e interface serial, que foram construídos em um sistema de três placas montadas uma sobre a outra conforme ilustração 3-4, dando uma maior intercambialidade no sistema no período de realização de testes no protótipo

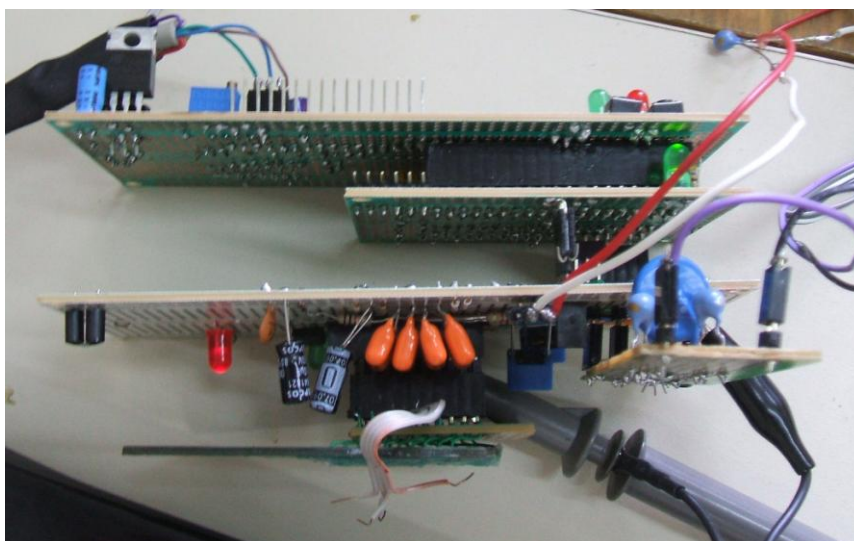


Ilustração 3-4 – Placas modulares do sistema de medição

Fonte: Autor

### 3.2.3. Sensores de Medição

#### 3.2.3.1. Sensor de tensão

A aplicação do circuito de medição se dá pela conexão direta do circuito à rede de energia elétrica, isto é, 110 ou 220V entre fase e neutro. Como o nível de entrada de sinal do conversor A/D no ADE7753 é da ordem de milivolts (mV) é necessário que se adéqüe estes níveis de tensão.

Esta função é realizada pelo circuito da ilustração 3-5 que consiste em uma solução tipo TP que transforma os 110V/220V da rede para 9V isolado, que depois de condicionado pelo circuito divisor resistivo, pode chegar no máximo a 500 mV, valor este adequado para entrada de sinal no canal de medição de tensão do conversor A/D do CI medidor.

Na bobina secundária do TP, e antes do divisor resistivo dois indutores de 1uH atuam como filtro para bloqueio de ruídos de alta freqüência, provenientes da rede elétrica, e após o circuito divisor, conforme recomendado na nota de aplicação AN-564, a colocação de filtros *anti-aliasing* com o objetivo de evitar influências ao sinal de conversão dos canais A/D do CI medidor. A Proteção deste circuito é realizada com a colocação de um varistor 275V na entrada da tensão da rede.

Conforme tabela 2-3 da classe de exatidão dos TP's, definiu-se a utilização do modelo 1924.22.09 da RASATRONIC, pois se pretende a utilização de medição de energia elétrica sem finalidade de faturamento.

No circuito de condicionamento, definiu-se por usar um resistor potenciométrico (200K $\Omega$ ) para fins de ajuste de tensão, onde foi possível fazer a seguinte relação, para 220V na rede, 220mV estará disponível na entrada do ADE.

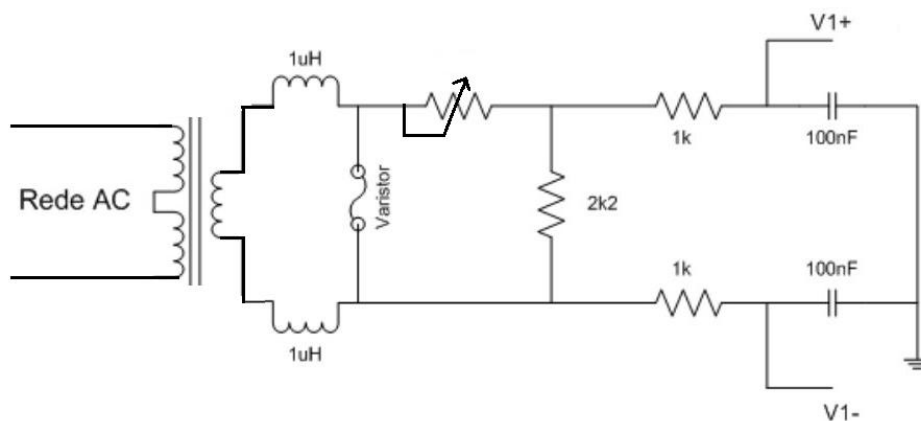


Ilustração 3-5 – Circuito de entrada da rede para medição da tensão

Fonte: Autor

### 3.2.3.2. Sensor de corrente

A entrada do sinal de corrente ao circuito de medição, assim como a tensão, também precisa ser ajustada aos níveis do conversor A/D. Para isto utilizou-se um sensor transformador de corrente – TC tipo núcleo com relação 2000:1 que pode operar na faixa alternada de  $-40\text{A}$  a  $+40\text{A}$ , com seu sinal variando proporcionalmente, a entrada entre  $0\text{mV}$  à  $500\text{mV}$ .

Conforme tabela de exatidão do TC, adotou-se o modelo com classe de exatidão 0,6 para medição de energia elétrica sem finalidade de faturamento ao consumidor.

O sensor tipo TC, construtivamente é a solução mais simples, pois pode ser feito artesanalmente com a desmontagem de um transformador convencional, usando seu núcleo e construindo um enrolamento primário feito por poucas espiras de condutor de cobre com seção elevada, neste caso o condutor do próprio circuito de carga, fazendo um enrolamento de espiras finas e uma relação bem grande de voltas, como neste caso, ilustração 3-6.

O sensor de tipo TC, possui algumas vantagens principalmente no que diz respeito a aplicações com altas correntes, que não é o caso deste projeto, mas sua viabilidade econômica e de confecção permite a sua utilização para um sistema de medição que não tem caráter de faturamento.

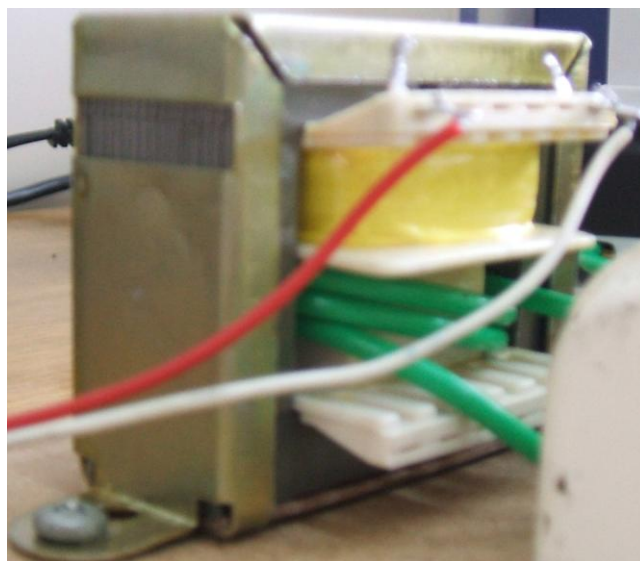


Ilustração 3-6 – Foto do TC utilizado

Fonte: Autor

O circuito de condicionamento para a utilização de um sensor tipo TC possui algumas particularidades, onde o resistor  $R_B$  é definido de acordo com o ganho para a entrada do canal que pode ser se 1 ou 8, onde o valor do resistor para ganho unitário dever ser de  $10\Omega$  e  $1,21\Omega$  para ganho igual a 8; é importante destacar que este resistor tem como principal função servir como filtro para frequências muito altas, onde um sistema isolado (flutuante) pode servir como antena, veja a ilustração 3-7 onde representa o circuito utilizado.

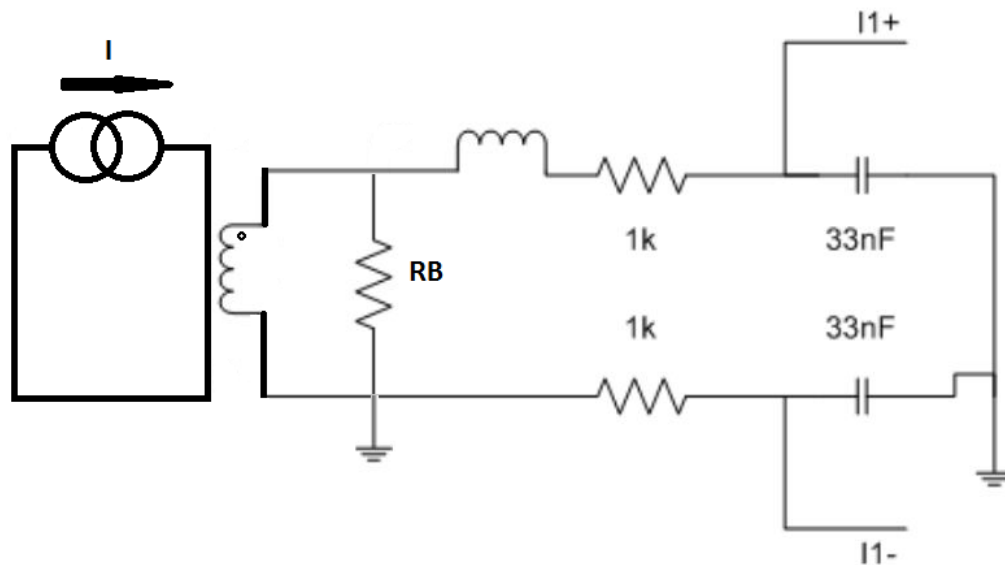


Ilustração 3-7 – Circuito de entrada da rede para medição da corrente

Fonte: Autor

### 3.2.4. CI medidor de Energia ADE7753

Para fabricação de um medidor eletrônico, vários CIs com medição de tensão e corrente já existem, porém de pouca comercialização nacional, o que restringe a utilização de outros modelos e a optar pelos modelos disponíveis no mercado. Nesta pesquisa por circuitos integrados de medição de energia, o modelo ADE 7755 e ADE 7753 atendem o proposto no projeto, porém a escolha pelo modelo ADE 7753, ilustração 3-8, foi definida pela disponibilidade de comunicação SPI, que permite uma calibração por software e o acesso a mais informações do medidor, como eventos de pico ou queda de tensão, verificados com o acesso aos registros do CI.



Ilustração 3-8 – Circuito Integrado ADE7753

Fonte: Autor

O CI medidor possui 2 entradas, uma para medição de corrente e outra para tensão, ambas as entradas possuem uma resolução de 16bits, exatidão 0,5%, atendendo os requisitos de qualidade de energia, conforme (módulo 8 - ANEEL, 2005).

Para se ter uma idéia do funcionamento deste CI de forma mais abrangente, a ilustração 3-9 apresenta-o em blocos com a representação elétrica, funções de cálculos, indicações dos registros responsáveis por cada função até a obtenção do sinal via CF (*frequency counter*) ou SPI.

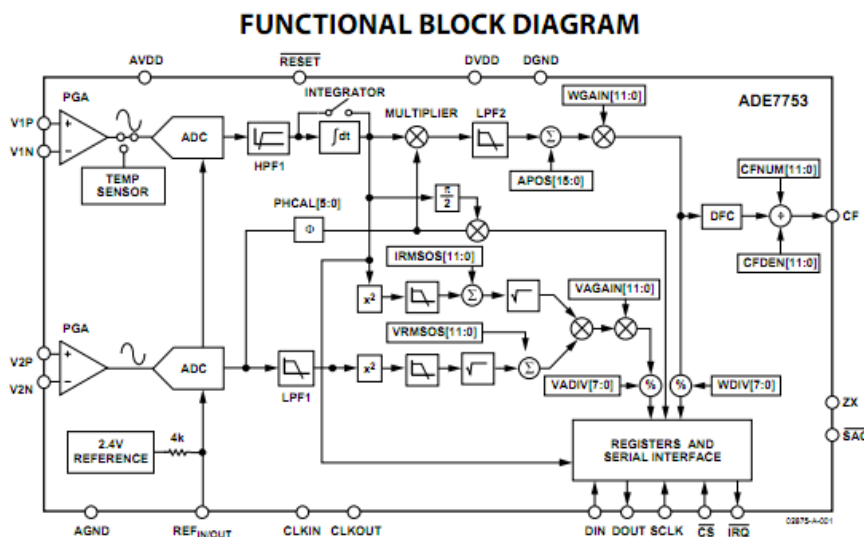


Ilustração 3-9 – Esquema em bloco da estrutura do CI ADE7753

Fonte: *Data Sheet* ADE 7753

Para o funcionamento do CI, o circuito da ilustração 3-11 deve ser confeccionado usando os capacitores e resistores específicos, pois possuem funções



de filtros importantes para a coleta do sinal de entrada, assim como o cristal deve ser montado muito próximo aos pinos do CI como pode ser visto na ilustração 3-10.

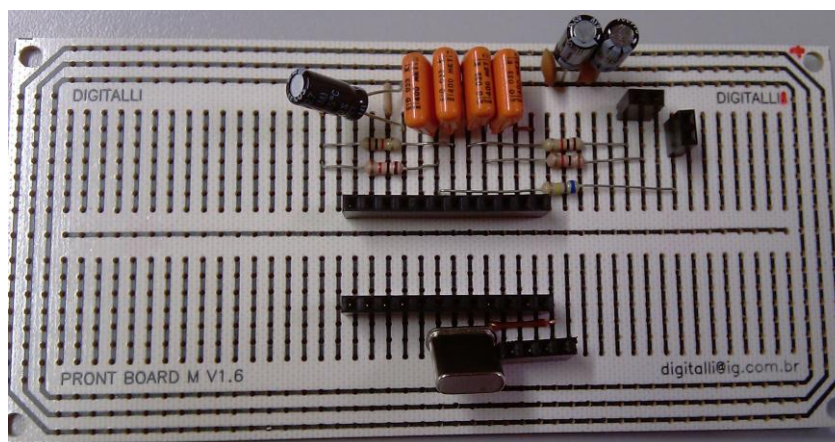


Ilustração 3-10 – Placa de Montagem do CI medidor ADE7753

Fonte: Autor

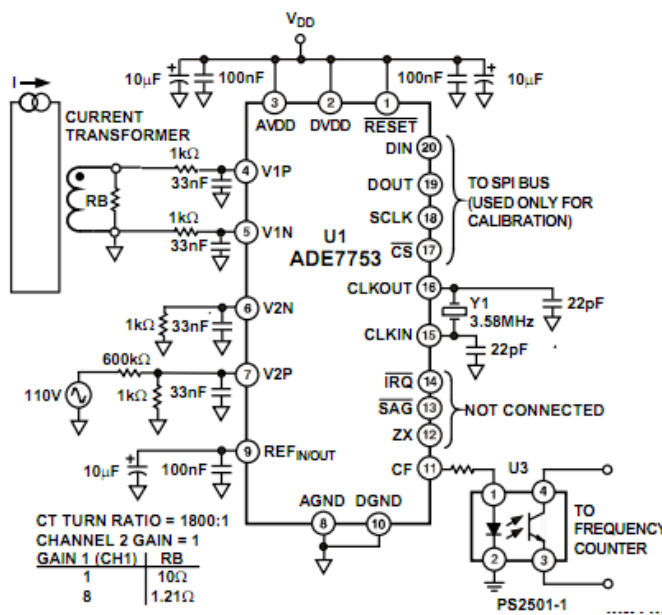


Ilustração 3-11 – Circuito do CI medidor ADE7753

Fonte: *Data Sheet* ADE 7753

Os valores padrão dos registradores do CI são definidos após um reset (pino 1) ou alimentação do mesmo, onde os mesmo estabelecem valores padrões de fabrica, conforme tabela de registro que podem ser verificadas no manual do mesmo, no sub-capitulo de comunicação será possível verificar o quão importante foi utilizar esses valores padrões para estabelecer o protocolo de comunicação.

### 3.2.5. Microcontrolador PIC 16F877A

O Microcontrolador PIC 16F877A é uma alternativa de grande popularidade no mercado, a sua escolha para esse projeto foi definida por possuir comunicação SPI, que é a rede disponibilizada no ADE7753 para leitura e escrita de seus registradores, com isso é possível facilmente através de um protocolo de comunicação desenvolvida, acessar os registros do ADE 7753.

As principais características desse controlador de 8 bits são 4 portas de 8 bits cada, disponibilizando no mínimo 32IOs configuráveis, onde temos pinos para comunicação serial e SPI. Possui uma memória flash de 8K, memória de dados de 368Bytes, EEPROM de 256Bytes, 2 entradas analógicas de comparação de 10bits, sua arquitetura em bloco é destacado no anexo C.

O mesmo foi montado em uma placa dedicada, com o objetivo de ter um inter cambialidade com os demais circuitos ao qual será conectado, na ilustração 3-12 é possível verificar os elementos mínimos para seu funcionamento, como a alimentação 5 volts e a ligação com cristal de 10MHz.

O PIC terá a função de fazer as solicitações dos registradores do CI medidor de energia ADE 7753, com isso o gerenciamento dos dados e envio pela porta serial será possível através de um banco de dados a leitura dos sinais solicitados. Basicamente o PIC serve como um conversor SPI para RS-232, se tornando um gerenciador.

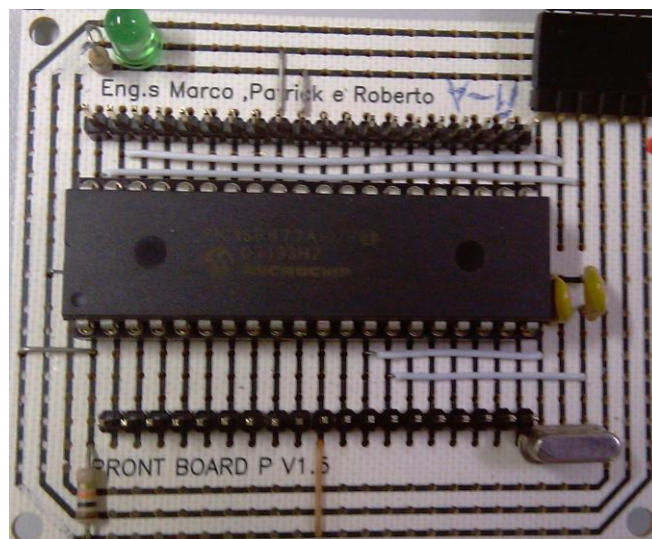


Ilustração 3-12 – Modulo PIC

Fonte: Autor



### 3.2.6. Interface Serial (SPI e RS 232)

#### SPI

A Interface Periférica Serial *Bus* ou SPI é um barramento síncrono de dados serial padrão nomeado pela Motorola, que opera em *full duplex mode*. Dispositivos de comunicação em *master / slave* modo que o dispositivo mestre inicia o frame de dados. Múltiplos dispositivos escravos são permitidos com o indivíduo escravo selecionado (*chip select - S*) conforme ilustração 3-13. Às vezes a comunicação SPI é chamada de "quatro fios", contrastando com três, dois e um fio de barramentos seriais. Como as portas SPI usadas no PIC não são padrão de programação, devem definir as mesmas, se entrada ou saída.

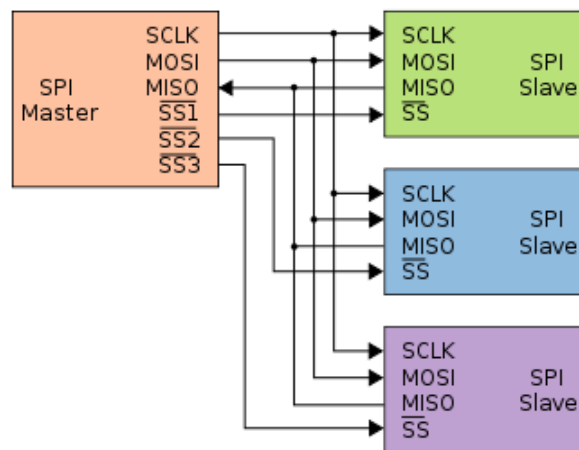


Ilustração 3-13 – Rede SPI

Fonte: Wikipédia

#### RS232

A saída dos dados medidos pelo ADE 7753 e calculados pelo microcontrolador será realizada através da interface serial assíncrona disponível no mesmo.

Como se apresentam os dados medidos via microcomputador, precisa-se adequar o sinal da interface serial ao padrão da norma EIA232, para isso utiliza-se o circuito integrado MAX232, ilustração 3-14.

A implementação deste protocolo é simples, orientado pelas diretivas do compilador CCS (compilador do programa C para o PIC) e conforme Pereira (2007).

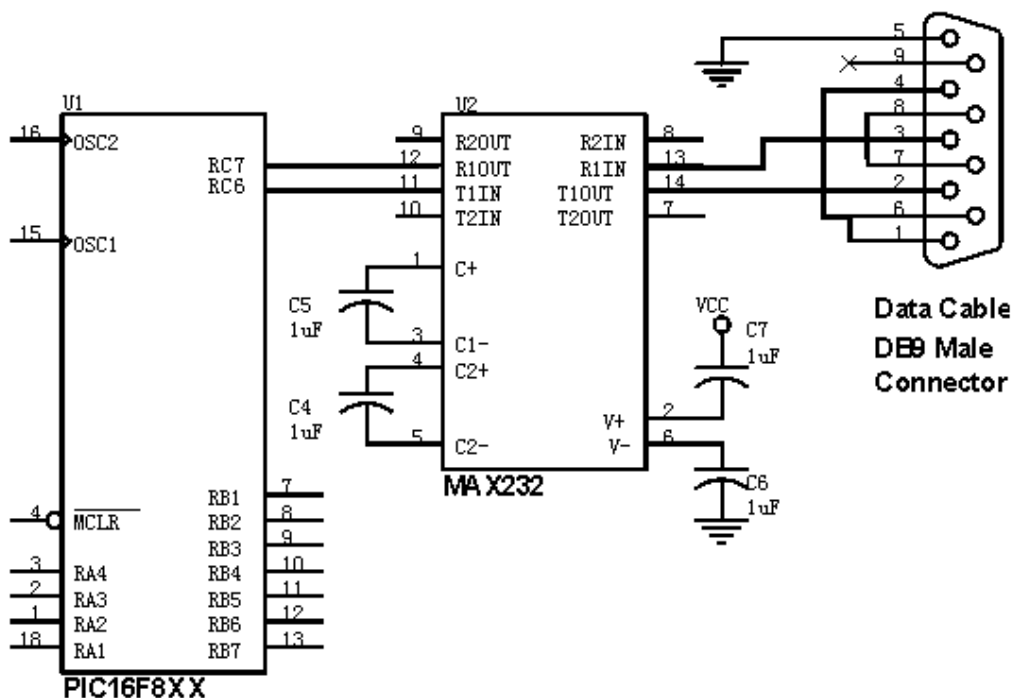


Ilustração 3-14 – Circuito da interface serial com o microcontrolador

Fonte: Pereira, F., 2007

### 3.2.7. Fonte de Alimentação

Para alimentação eletrônica de um medidor de energia, é necessário que o nível de alimentação esteja corretamente dimensionado e controlado, por isso, utilizou-se as recomendações *do application note 564 da Analog Devices*, onde sugere a utilização de uma fonte linear de 5Vcc com entrada 220V/110V, ilustração 3-15.

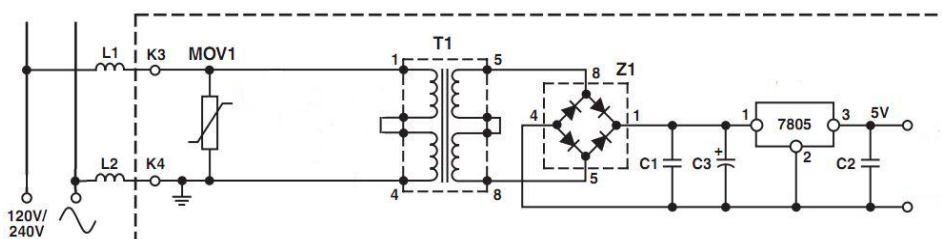


Ilustração 3-15 – Fonte de Alimentação

 Fonte: *AnalogDevices*, 2001

### 3.2.8. Kit Programador

O medidor foi desenvolvido usando um kit programador de PIC, ilustração 3-16 com comunicação USB, que serve para transferir o programa para o PIC, usando o *software* PICkit 2 da própria Microchip para depurar e gravar o programa na memória do microcontrolador, ilustração 3-17.

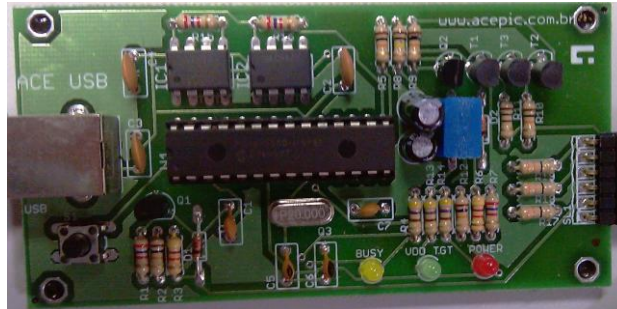


Ilustração 3-16 – Kit Programador

Fonte: Autor

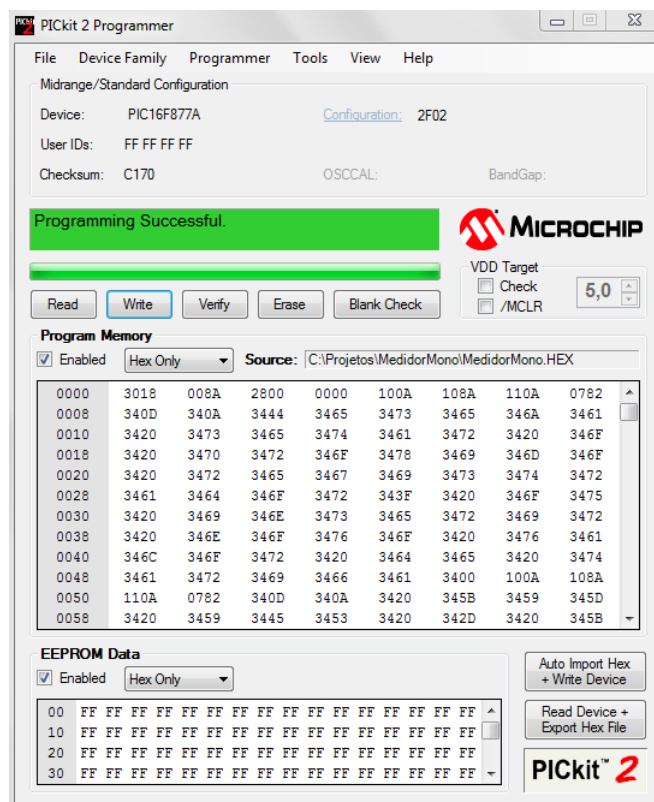


Ilustração 3-17 – Software depurador de PIC

Fonte: Autor

### 3.3. Software

A Programação é estruturada em linguagem C, onde se usou o PIC C *compiler* versão 4.057 da CCS.

A ilustração 3-18 mostra o fluxograma básico do programa principal (MedidorMono.c) apresentado no apêndice A.1 que consiste na inicialização do sistema com os seguintes diretivas do compilador PIC C *compiler*, iniciando pela inclusão do cabeçalho (`#include <16F877A.h>`) que trás as definições do PIC16F877A, na seqüência a diretiva (`#use delay`)), que determina ao compilador o valor de 10MHz para freqüência de *clock*, este valor é utilizado em rotinas de atraso conforme pode ser visto nos arquivos fontes, ainda é importante especificar os estados dos “fusíveis” (`#fuses`) neste caso selecionados da seguinte forma: HS = *High Speed Oscilador* (>4MHz), NOWDT = *Watch Dog Timer* Desligado, PUT = *Power-up Timer* Ligado, NOBROWNOUT = *reset por Brown-out* Desligado, NOLVP = *Low Voltage Programming*, sendo essas as definições básicas para funcionamento do microcontrolador.

Conforme a utilização de interfaces e/ou estruturas de *software*, novos comandos devem ser considerado inicialmente no programa principal, como temos através da diretiva para comunicação serial assíncrona padrão rs232 (`#use rs232`) onde estão parametrizado os seguintes parâmetros: velocidade de comunicação em bps (`baud=9600`), sem paridade (`parity=N`), pino de saída dos dados transmitidos (`xmit=PIN_C6`), pino de entrada de dados recebidos (`rcv=PIN_C7`) e o numero de bits utilizados nessa comunicação (`bits=8`).

Dentro das diretivas do programa principal alguns subprogramas foram chamados:

```
#include "C:\Projetos\LCD\LCD.c"
```

```
#include "C:\Projetos\MedidorMono\ADE7753.c"
```

```
#include "C:\Projetos\MedidorMono\ProtocoloSPIade7753.c"
```

Têm eles as seguintes funções, inicializar os parâmetros de comandos do LCD (LCD.c), detalhado no Apêndice A.2, definição dos endereços dos registradores do CI medidor de energia (ADE7753.c) declarado no apêndice A.3 e o protocolo de comunicação entre o CI medidor de energia e o microcontrolador pela interface SPI (ProtocoloSPIade7753.c) apresentado no apêndice A.4

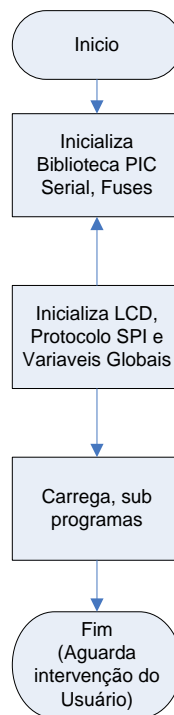


Ilustração 3-18 – Fluxograma das inicializações do programa principal

Fonte: Autor

Com as inicializações e diretivas de programação, o programa entra na função de medição de energia realizando a totalização de energia nos registradores apropriados, a cada grandeza medida, o CI medidor fica aguardando uma requisição para as rotinas associadas ao envio de dados pela interface serial, na ilustração 3-19 é possível verificar essa ordem de função.

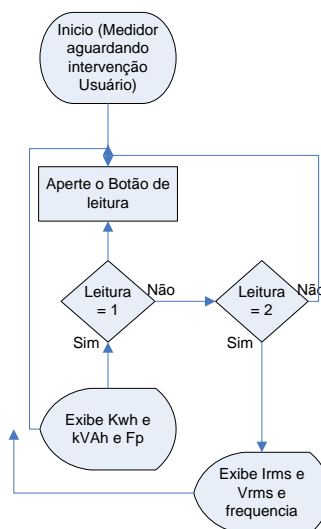


Ilustração 3-19 – Fluxograma principal

Fonte: Autor

### 3.3.1. Redes e Protocolos

#### SPI

O Protocolo de comunicação SPI, caracterizado como síncrono e de alta de velocidade (até 3 megabits por segundo), utilizado muito em conversores A/D, potenciômetros digitais, memórias seriais e outros, possuem as seguintes características no protocolo de comunicação.

O sistema habilita o pino de seleção de chip (CS) para envio dos dados ao chip selecionado, com os comandos de leitura ou escrita, seguido do endereço a ser lido ou escrito, e posteriormente o envio e/ou recebimento dos dados. Porém o protocolo de comunicação deste CI medidor de energia possui uma característica diferente, onde seu comando e endereço são enviados em um mesmo momento, como pode ser verificado nas ilustrações 3-20 e 3-21.

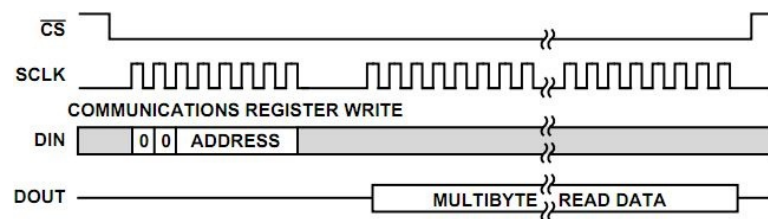


Ilustração 3-20 – Lendo dados do ADE7753

Fonte: *Data Sheet*, ADE 7753

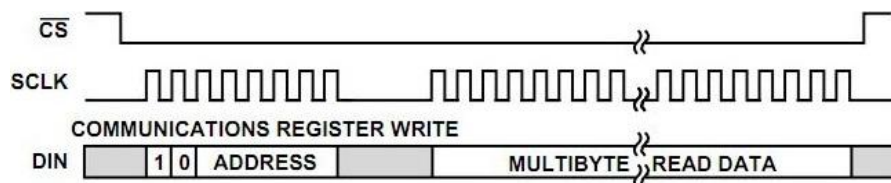


Ilustração 3-21 – Escrevendo dados no ADE7753

Fonte: *Data Sheet*, ADE 7753

Com essa pequena diferença no protocolo de comunicação, foi necessário desenvolver um protocolo dedicado, como pode ser visto no apêndice A.3, onde foram incorporadas algumas condições de verificação, como por exemplo: o tipo de dados antes mesmo do envio, pois alguns registradores possuem dados de 8, 16 e até 24 *bits*. A leitura e escrita dos dados é realizada conforme o tamanho do registrador para que não haja nenhuma perda de informação. Desta forma, é verificado o endereço antes da leitura ou envio dos dados.



Esse processo de validação foi verificado passo a passo, através de envio de dados para registradores com valores padrão, para que o protocolo pudesse ser validado, como pode ser visto na ilustração 3-22 e 3-23.

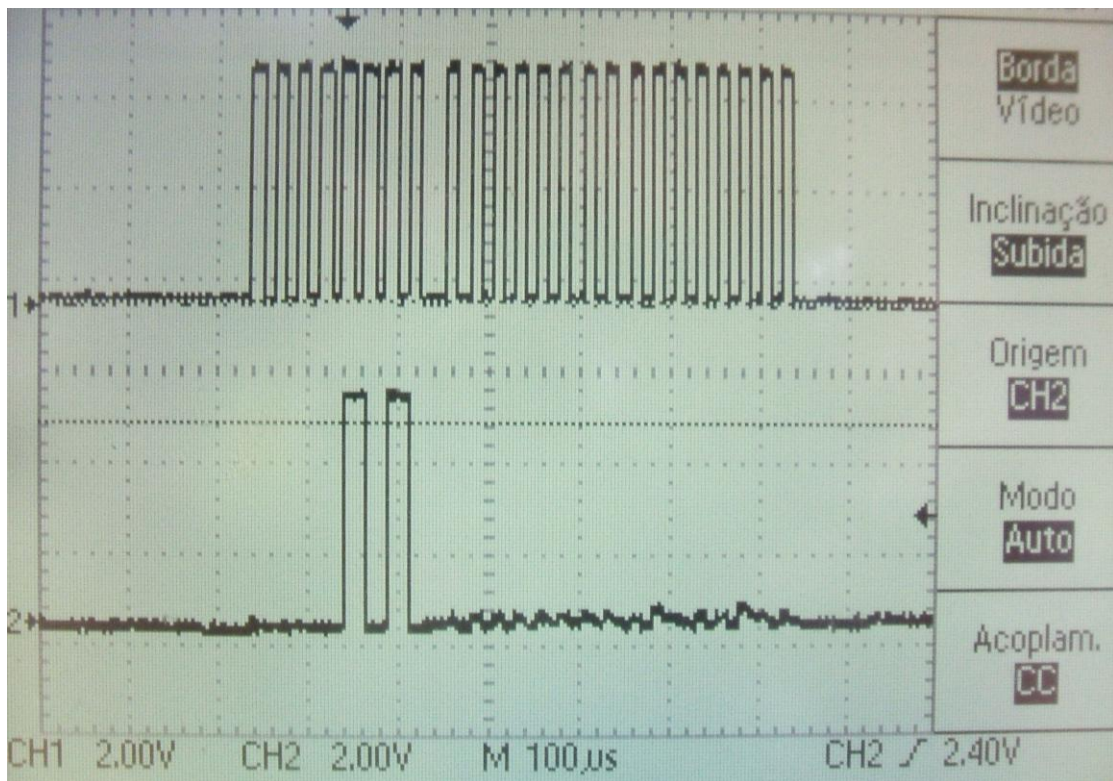


Ilustração 3-22 – Exemplo de dado enviado ao ADE7753

Fonte: Autor

Neste exemplo da ilustração 3-22 um dado é enviado pelo sistema, que foi verificado utilizando um osciloscópio, linha do DO (*dado output*) e CLK (*Clock*).

Na ilustração 3-23, pode ser verificado um dado sendo recebido pela linha DI (*Dado Input*) e CS (*Chip Select*), que mostra o dado sendo recebido pelo PIC, após um envio de comando de leitura pelo DO de \*bits, retornando um valor de 24 bits.

Porém, no primeiro teste ao protocolo de comunicação SPI, mesmo em um tempo de leitura de 20ms, o CI medidor não enviava dados, mesmo estando com os valores acima dos 50ns entre o início do  $\overline{CS}$  e CLK, portanto foi realizado um aumento em 10x no tempo do  $\overline{CS}$  (*Chip Select*) sendo possível estabelecer a comunicação. Além disso, fatores como ruídos citados no teste estáticos, inicialmente, também não contribuíram muito, visto que não são consumidos pela carga, mas sim gerados de qualquer fonte externa.

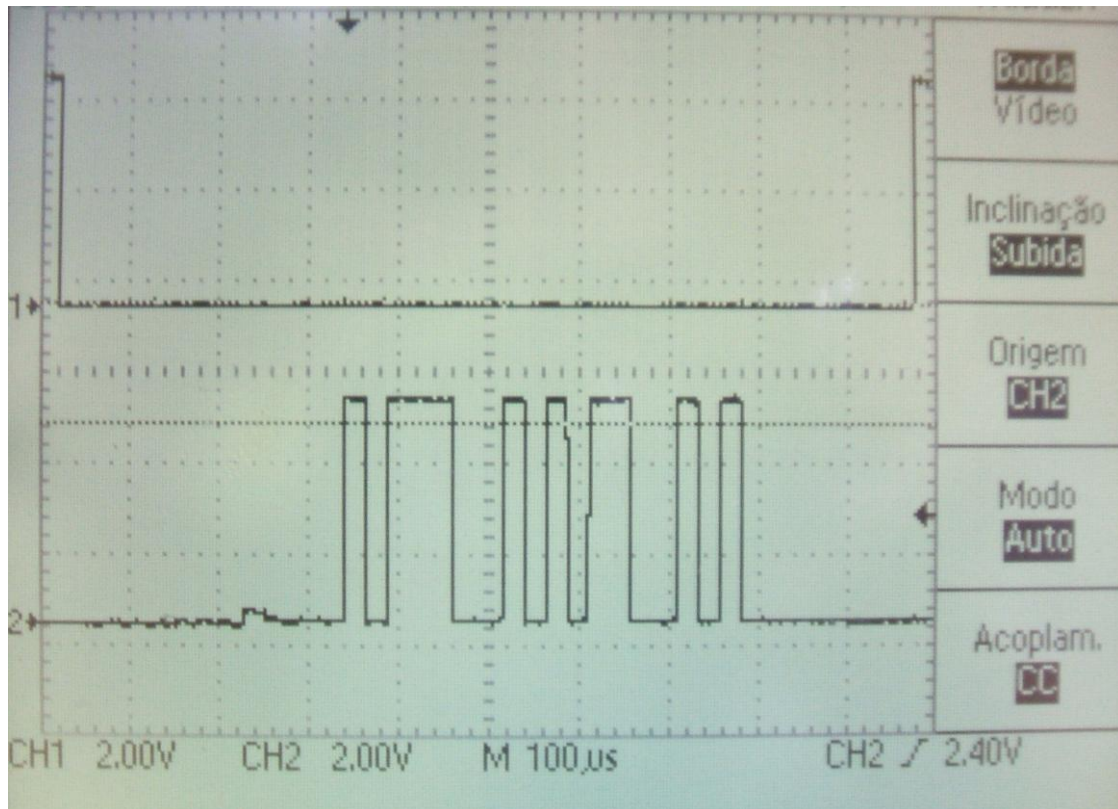


Ilustração 3-23 – Exemplo de dado sendo recebido do ADE7753

Fonte: Autor

### 3.4. Calibração

Dentre as premissas básicas, o processo de calibração seguiu as recomendações do módulo 5 – sistemas de medição, e módulo 8 – qualidade de energia (ANEEL, 2005).

Em um primeiro momento, trabalhou-se na verificação dos valores de tensão e corrente utilizando de cargas padrão, e equipamentos de medição com classe de precisão maior aos utilizados para os medidores convencionais monofásicos, que ficam na faixa de 2,0%, dentre esses equipamentos, utilizou-se um analisador de qualidade de energia, modelo 43B da fluke, ilustração 3-24.

Que possui as seguintes características:

- Precisão:             $\pm 1\%$  para valores de tensão;  
                          $\pm 1\%$  para valores de corrente;  
                          $\pm 2\%$  para valores de energia (Watt, VA e VAR);



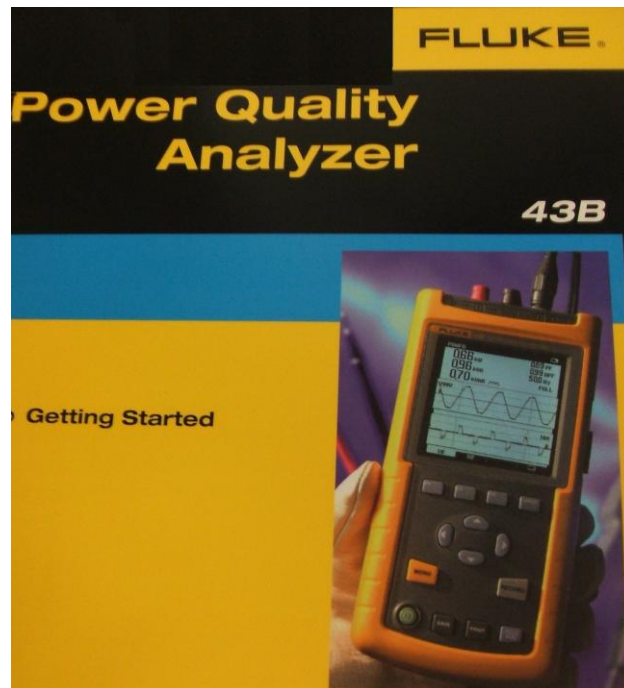


Ilustração 3-24 – Analisador de qualidade de Energia

Fonte: Manual Fluke 43B

É um multimedidor da eletromar, modelo DIRIS A40, com as seguintes características:

- Precisão das correntes: 0,2 % de 10 a 110 % de In
- Precisão das tensões: 0,2 % de 140 a 700 V AC
- Precisão das potências: 0,5 % da escala completa ( $-90^\circ$  a  $+90^\circ$ )
- Precisão do Fp: 0,5 % para  $0,5 < FP < 1$
- Precisão na contagem de energia ativa:  $\pm 0,5\%$  de 0,02 a 1,2 In com FP = 0,5 Indutivo ou 0,8 Capacitivo (classe 0,5S IEC 62053-22)
- Precisão na contagem de energia reativa:  $\pm 2\%$  de 0,2 a 1,2 In com FP = 0,5 Indutivo ou Capacitivo (classe 2 IEC 62053-23)

O equipamento possui uma taxa de atualização no display de 1 segundo.

Considerando as duas grandezas lidas pelo medidor como corrente e tensão, partiu-se do ajuste destas grandezas para determinar a energia medida. Assim, foi adotado o procedimento descrito a seguir.

Utilizando cargas padrão de um laboratório de eficiência energética, conforme ilustração 3-25 levantou-se os parâmetros de relação entre tensão da rede

X entrada de tensão do ADE 7753, o qual pode ser lido através do registrador \_VRMS, pela interface SPI, assim como se verificou os valores de corrente de entrada e do ADE7753 através do registrador \_IRMS.

Para a aquisição das medições do ADE 7753, utilizou-se a interface desenvolvida para o hyper terminal conforme ilustração 3-26, acessando os valores medidos na entrada do ADE X valores medidos pelo analisador Fluke 43B, coletando no mínimo uns 20 pontos de medição em cada de teste, para fins de avaliar a estabilidade do ponto de medição e da carga padrão.

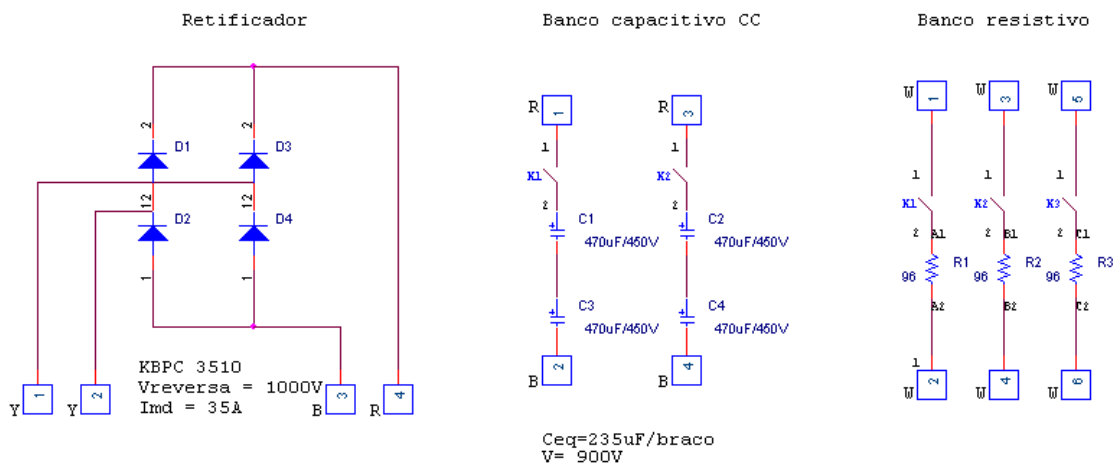


Ilustração 3-25 – Circuito do Módulo de Carga Linear

Fonte: Laboratório de Eficiência do SENAI - Assis Brasil/POA

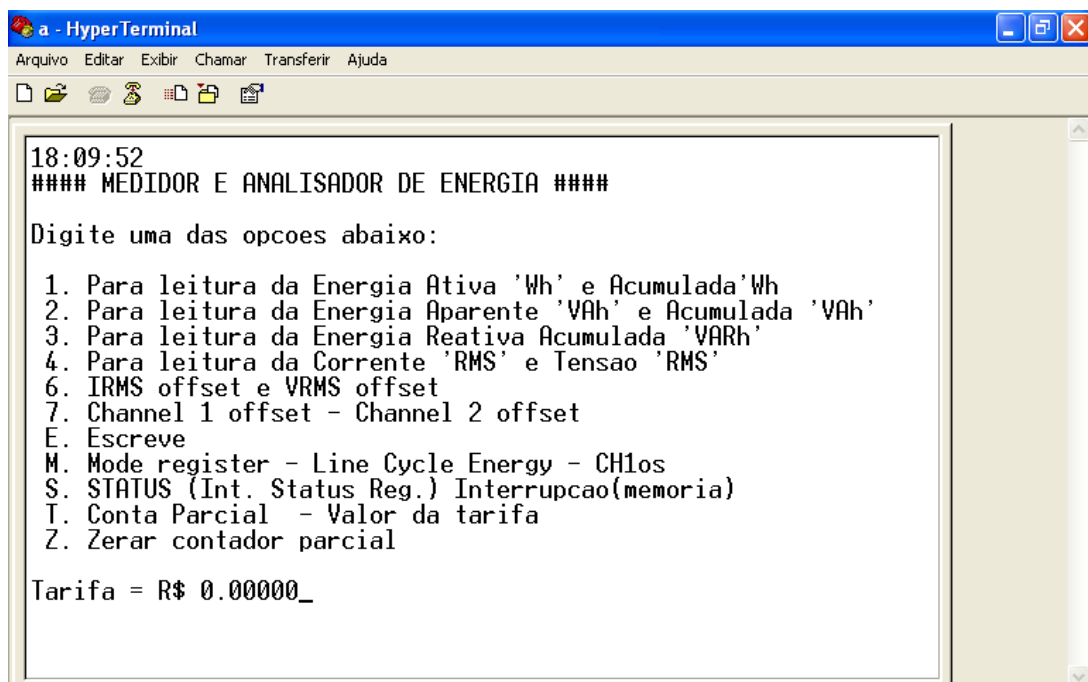


Ilustração 3-26 – Interface de coleta de dados

Fonte: Autor

Para calibração de corrente e tensão foram realizados quatro medições em condições diferentes, conforme tabela 3-2.

Tabela 3-2 – Calibração dos fatores de conversão

Fonte: Autor

Valores medidos			Fator de Conversão	
Teste	IRMS (A)	VRMS (V)	IRMS	VRMS
1	1,33	129,25	1,2455E-05	0,000104609
2	2,636	128,6	1,26622E-05	0,000105815
3	3,96	127,75	1,26481E-05	0,000106327
4	1,2725	128,90	1,27889E-05	0,000105747
		<b>Media =&gt;</b>	<b>1,26385E-05</b>	<b>0,000105625</b>

Estes valores de conversão são enviados aos registradores para estabelecer a relação do valor de entrada do ADE com relação ao valor de saída enviado pelo mesmo para os registros de tensão e corrente.

A metodologia utilizada nessa etapa baseou-se nas ferramentas adotadas pelo do fabricante do CI de medição energia, onde é possível através de registradores do CI, corrigir fatores externos não eliminados através do circuito, ou até mesmo causados pelo tipo de sensor usado, como é o caso deste protótipo, que utiliza um TC, onde se tem uma defasagem devido ao efeito indutivo do transformador. As condições de teste nesta calibração foram as seguintes:

Teste 1 = Carga resistiva Padrão de  $96\Omega$

Teste 2 = Carga resistiva padrão de  $192\Omega$

Teste 3 = Carga resistiva padrão de  $288\Omega$

Teste 4 = Carga resistiva padrão de  $96\Omega$  em série com uma carga capacitiva de  $940\mu\text{F}$ ,  $X_c = 11,28\Omega @ 60\text{Hz}$ .

Para a carga padrão resistiva de  $96\Omega/500\text{W}$ , matematicamente nas condições de testes proposto, com tensão de  $129,25\text{V}$  e o valor de resistência  $96\Omega$ , obtem-se  $1,34\text{A}$  de corrente na carga, o valor medido com o analisador de energia ficou em  $1,33\text{A}$  que se deve a precisão percentual da carga que fica em torno de  $1,2\%$ . Conseguem-se perceber que vários fatores de precisão estarão envolvidos nesse processo de calibração, por isso os recursos de calibração do CI medidor são necessários.

O processo de calibração da medição de energia ativa (W), foi realizado utilizando o “*Calibration the ADE 7753 for WATT, VAR, RMS and VA measurement*” documento da *Analog Devices* para calibração do ADE 7753, onde sugere as seguintes etapas: definição do ciclo limite de passos, definido pelo registrador `_LINCYC`, que depois de finalizado, seta um bit que será indicado através do pino de interrupção, informando que aconteceu um evento, do qual o registrador de eventos foi selecionado. Neste caso a energia é lida no ponto de cruzamento do zero, realizando a medida de potencia exata, sem valores de oscilação conforme ilustração 3-27.

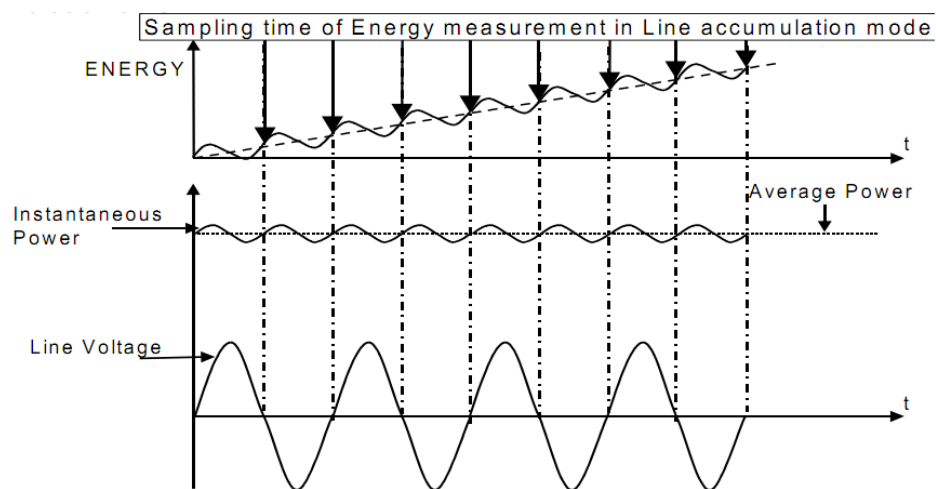


Ilustração 3-27 – Gráfico de medição de energia instantânea

Fonte: *Calibration and use of ADE7753*, 2003

Porém em condições normais no processo de calibração, diagnosticou-se que em um período sem carga o sistema incrementava um valor de kWh, no qual foi analisado realizando um teste estático da seguinte forma, com o medidor desconectado da carga, com os terminais em circuito aberto onde não há circulação de corrente, o sistema respondeu realizando uma medição na faixa de 0,001kWh, desta forma, verificou-se que há interferências externas no processo de medição, que mesmo utilizando os filtros não são possíveis de serem eliminados devido a interferências do ambiente, como pode ser verificado na ilustração 3-28, sendo o nível muito baixo de sinal, que atrelado a sensibilidade do CI medidor de 1,61mV/LSB, acabava incrementando valores no CI medidor.

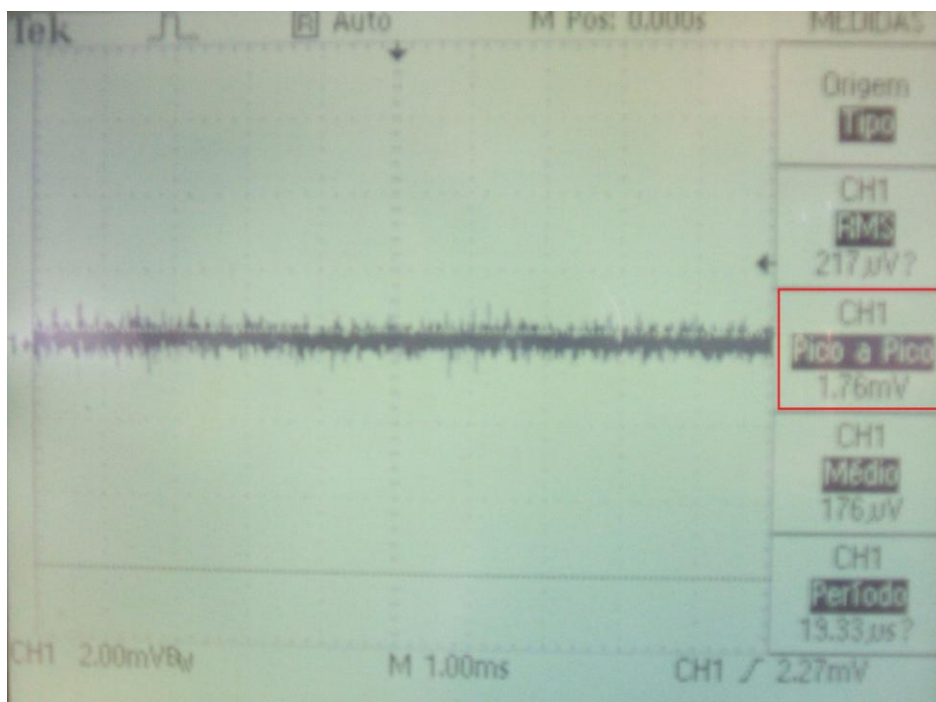


Ilustração 3-28 – Medição no canal de corrente aberto (1,76mV)

Fonte: Autor

Para tentar corrigir esse problema, utilizou-se os registradores `_CH1OS` e `_IRMSOS`, que são registradores responsáveis pelo *offset* nos canais de entrada do canal de corrente.

Basicamente todo o processo de calibração, ajustes de offset, dentre outros parâmetros são realizáveis conforme registradores do CI medidor ADE7753, obtendo os resultados que serão apresentados no próximo capítulo.

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As verificações de resultados seguiram a seguinte ordem: obtenção de valores de carga padrão, ferramentas de medição com classe de precisão maior aos que os medidores convencionais e definição de período mínimo para testes.

### 4.1. Testes

O processo de verificação se deu através dos valores calculados inicialmente pela metodologia de calibração e a partir da equação 1, realizando testes com vários valores diferentes, para fim de verificação de linearidade em toda a faixa de medição, desta forma o primeiro teste foi realizado com uma carga de potencia de 107,3W ligada a um rede 115V, onde foi possível obter os resultados das ilustrações 4-1 e 4-2.

Para obtenção de resultado das medições, erros e comparativos, foram levantados valores entre o protótipo e o medidor padrão DIRIS A40, conforme tabela 4-1.

Basicamente, assim como no processo de leitura convencional de medidores, anotou-se o valor do medidor no inicio da medição e valor do medidor ao final da medição, para o calculo do consumo, que neste caso foi considerado 40 minutos para realização de cada um dos testes.

É possível analisarmos a tabela 4-1 que os valores medidos pelo protótipo, comparada ao medidor de referência disponibilizado, apresentam um erro muito pequeno, na casa de décimos de Wh.

Tabela 4-1 – Levantamento de dados do medidor padrão e o protótipo

Fonte: Autor

Teste 1	Inicial	Final	Diferença
protótipo (Wh)	13,76	83,55	69,79
medidor (Wh)	148,92	219,27	70,34
Teste 2			
protótipo (Wh)	83,61	154,24	70,63
medidor (Wh)	219,27	290,36	71,10
Teste 3			
protótipo (Wh)	154,27	225,53	71,26
medidor (Wh)	290,36	362,17	71,81
Teste 4			
protótipo (Wh)	225,54	296,44	70,91
medidor (Wh)	362,17	433,55	71,38
Teste 5			
protótipo (Wh)	296,61	367,90	71,29
medidor (Wh)	433,55	505,18	71,64

## 4.2. Análises Estatísticas

Quando se realiza varias medidas de uma grandeza, utilizando um mesmo instrumento, as medidas obtidas terão valores que poderão não coincidir na maioria das vezes. Isso se deve aos erros experimentais inerentes a qualquer processo de medida, neste caso é possível verificar que a tensão e corrente variam. Com isso, já temos um primeiro desvio, porém, todas essas variações foram consideradas em cada teste realizado. Desta forma é fácil analisar esses efeitos, através da tabela 4-2, com erros e desvio.

Tabela 4-2 – Estatísticas de erro e desvio, para o medidor padrão e protótipo

Fonte: Autor

Testes	Tensão nominal (Volts)	Corrente Nominal (Ampéres)	Teórico x Padrão			Padrão x Protótipo			Teórico x Protótipo		
			Energia Teórica (Wh)	Desvio Médio	erro	Energia Padrão (Wh)	Desvio Médio	erro	Energia Protótipo (Wh)	Desvio Médio	erro
T1	116,0	0,918	70,953	-0,584	0,609	70,345	-0,908	0,557	69,788	-0,987	1,165
T2	116,9	0,920	71,699	0,162	0,601	71,098	-0,155	0,469	70,629	-0,146	1,070
T3	117,0	0,924	72,041	0,504	0,235	71,806	0,553	0,548	71,258	0,483	0,783
T4	116,7	0,921	71,654	0,117	0,279	71,375	0,123	0,469	70,906	0,131	0,748
T5	116,2	0,921	71,339	-0,198	0,301	71,640	0,387	0,346	71,294	0,519	0,045

Além da tabela 4-2, é possível visualizar o erro de medição através da ilustração 4-1, onde o padrão e o protótipo não ultrapassam o erro percentual de 0,6%.

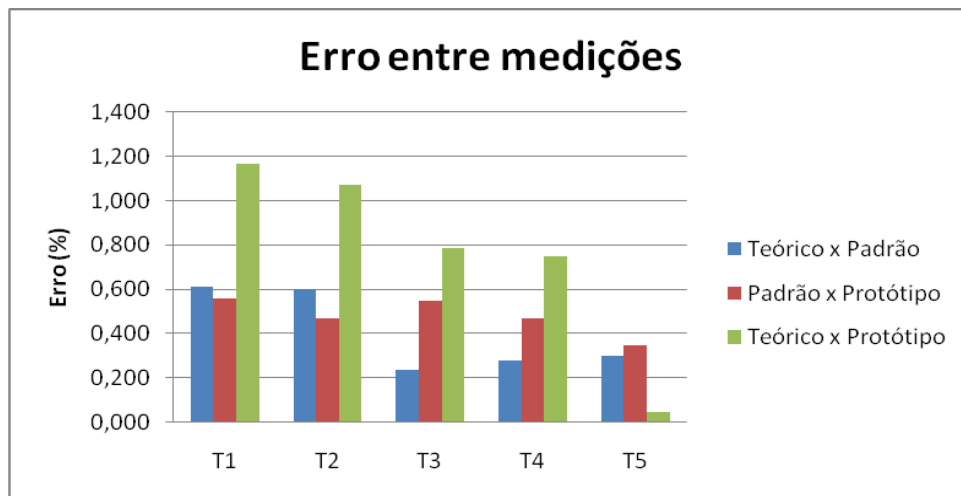


Ilustração 4-1 – Gráfico de Erro nas medições

Fonte: Autor

### 4.3. Comparações dos Resultados

O processo de análise para essas comparações, conforme ilustração 4-2, permite avaliar que os erros percentuais existentes no medidor padrão, assim como no protótipo, definem o desvio existente, sendo menor que 1W do valor medido.

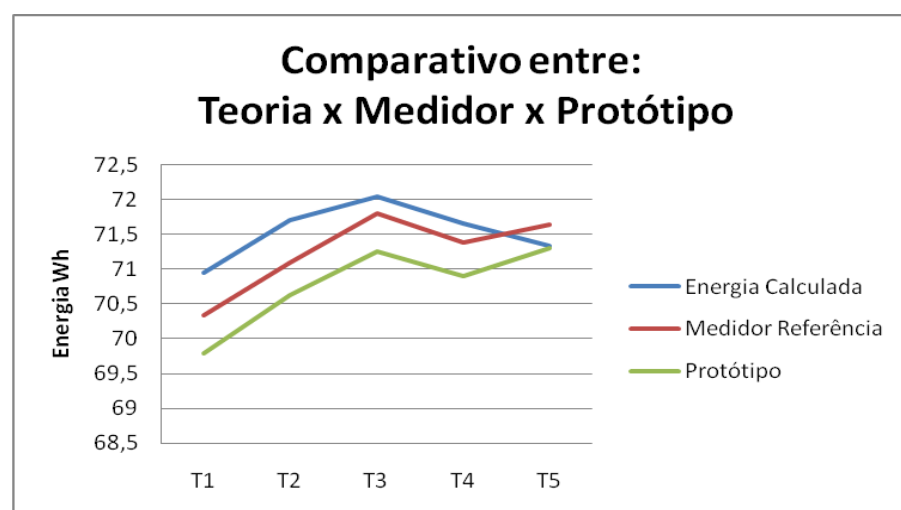


Ilustração 4-2 – Gráfico de Comparativo das medições

Fonte: Autor





Conforme módulo 5 (ANEEL,2005) o erro total do medidor é dado pela equação:

$$e\% = \sqrt{M^2 + TC^2 + TP^2} + 0,05 \quad (8)$$

Onde:

- e% é o erro total do medidor;
- M é a erro do CI medidor;
- TC é o erro do Transformador de corrente;
- TP é o erro do Transformador de potencial;
- 0,05 é o erro imposto pelo cabo do TP;

Considerando as características do TC e TP de classe de precisão 2% e o medidor ADE7753 de 0,1% temos o erro total de medição teórico de 2,88%, porém comparando aos valores obtidos, percebe-se que nas condições de testes realizadas o erro foi bem menor, na faixa de 1,0%.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que é possível fazer um medidor que disponibilize maiores recursos de informação ao usuário, além de uma variada faixa de grandezas elétricas. Assim é possível disponibilizar a informação de valor de custo instantâneo, conforme proposto inicialmente, permitindo ao usuário um maior controle sobre seu consumo. As soluções de circuitos integrados medidores de energia elétrica e microcontroladores já existem no mercado, bastando integrar os mesmos. O fator mais importante a ser destacado, é que se pode chegar a valores de precisão maiores que os equipamentos convencionais, basta aumentar a resolução de leitura e ter um sistema de leitura dos dados em um período menor, não estourando a memória e a capacidade de armazenamento que é de 30 anos para medidores eletrônicos fabricados atualmente.

Nos testes realizados em laboratórios, verificou-se eficiência nas medidas realizadas e o confronto dessas com um medidor comercial foi de grande importância. O medidor desenvolvido neste projeto apresentou um erro percentual de 1,0%, inferior ao que foi inicialmente objetivado (5%). Este resultado deve-se ao fato da realização de verificações iniciais nas entradas analógicas de ruído, linearidade no sinal de entrada, dentre outras. Estas verificações prévias permitiram ao CI medidor a leitura de um sinal confiável.

Porém, é importante salientar o período de teste utilizado: 40min. O ideal seria que o medidor fosse testado em períodos mínimos de 30 dias, para que fosse possível uma comparação mais real aos sistemas e período de medições que são realizados atualmente pelos medidores convencionais.

Com a realização deste projeto, colocaram-se em prática muitos conhecimentos adquiridos no decorrer do curso de engenharia elétrica, dando ênfase a parte de programação, assim como cálculos, metodologia de tratamento de dados, eletrônica analógica e digital, que foram de grande importância para execução deste projeto.

## 5.1. Orçamento do Projeto

No que diz respeito aos custos para execução, não foi previsto nenhum orçamento inicialmente, pois não foi possível verificar o valor de um medidor de energia eletrônico convencional (o equipamento é comprado diretamente pelas concessionárias). Para que fosse possível uma comparação, avaliou-se um equipamento de medição de energia eletrônico da Eletromar modelo A20 que custa em torno de R\$ 525,00 e disponibiliza apenas a informação de energia consumida. Nesta comparação é possível afirmar que os valores encontrados foram bastante acessíveis, conforme tabela 5-1.

Tabela 5-1 – Custo do protótipo

Fonte: Autor

Item	Qtd.	Preço Unitário
PIC 16F887A	1	R\$ 13,50
ADE7753	1	R\$ 14,61
MAX 232	1	R\$ 3,00
LCD	1	R\$ 18,00
Tomada 2P+T	1	R\$ 8,00
TC	1	R\$ 35,00
TP	1	R\$ 10,50
Fonte 5V	1	R\$ 22,00
Placas, e demais componentes	1	R\$ 30,00
	<b>Total</b>	<b>R\$ 154,61</b>

É importante salientar que na comparação não foi considerado o custo de desenvolvimento nem mesmo a possibilidade de redução de custos dos materiais utilizados para a produção em série do protótipo.

Para avaliar uma possível aceitação de mercado, foi realizada uma pesquisa com 54 pessoas (apêndice B) para entender se os valores e características do produto seriam viáveis e interessantes para comercialização. Através desta pesquisa foi possível identificar que a grande maioria das pessoas não tem o hábito de verificar a leitura no medidor de energia, assim como também não confiam nos medidores que possuem em sua residência, ou que tem dúvidas com relação a qualidade do medidor.

Os resultados desta pesquisa apresentam uma visão otimista quanto a comercialização deste tipo de medidor de energia. Houve uma grande aceitação pelos entrevistados, principalmente no que diz respeito às informações disponibilizadas pelo medidor, em destaque o fato de possibilitar o acompanhamento do consumo de energia convertido em reais (R\$). Outra informação relevante foi a disponibilidade dos entrevistados em investir R\$ 200,00 (duzentos reais) na aquisição do medidor.

Estes resultados permitem analisar, que, em caso de produção em escala, este seria um produto de grande aceitação no mercado. No entanto, para viabilizar o uso destes medidores, é fundamental a aceitação das concessionárias.

## **5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros**

Em relação a melhorias no *hardware*, é imprescindível um estudo mais aprofundado de filtros para medição e instrumentação, como: inclusão de uma memória para armazenamento sem necessidade de PC; melhoria na placa do circuito (preferencialmente uma placa para todo o projeto); utilização de um sistema ligado direto a entrada analógica, sem a utilização de TP e a utilização de outros modelos de sensores para tensão e corrente.

No quesito *software*, sugere-se: inclusão de uma interface gráfica mais amigável ao usuário, permitindo a verificação de mais informações disponíveis pelo medidor; rotinas separadas de cálculos, preferencialmente diretamente no PC, devido a limitação destas operações através do PIC; considerar um microcontrolador de maior capacidade de memória e processamento, criando uma interface somente com um LCD e um tecla de membrana para navegação e entrada de valores, sem necessidade de PC.

## 6. REFERÊNCIAS

- AD – ANALOG DEVICES. **ADE7753 Single-Phase Multifunction Metering IC with di/dt Sensor Interface**. Revisão B, Norwood, USA 2009. [Online: acessado em agosto de 2009] Disponível em: [HTTP://www.analog.com](http://www.analog.com)
- AD – ANALOG DEVICES. **AN-564 A Power Meter Reference Design Based on the ADE7756**. USA, 2001. [Online: acessado em setembro de 2009] Disponível em: [HTTP://www.analog.com](http://www.analog.com)
- AD – ANALOG DEVICES. **Calibration the ADE7753 for Watt, VAR, RMS and VA measurements**. USA, Fev. 2003. [Online: acessado em outubro de 2010] Disponível em: [HTTP://www.analog.com](http://www.analog.com)
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (BRASIL) [Online: acessado em outubro de 2010] Disponível, <http://www.aneel.gov.br/ANEEL>, 2010
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (BRASIL), Módulo 5 - **Sistemas de Medição** ANEEL, 2005
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (BRASIL), Módulo 8 - **Qualidade da Energia Elétrica**. ANEEL, 2005
- COSTA, G.J.C. da – **Iluminação Econômica: Cálculo e Avaliação**. 4ª ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2006.
- CUSINATO, L.J. - **Tarifação da Energia Elétrica no Brasil**. São Leopoldo: Unisinos, 2004.
- FILHO, S. de M. – **Medição de Energia elétrica**. 7º Ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1997.
- HIGASHI, E. M. – **Modelagem da Bobina de Rogowski para medidas de pulsos de Corrente Elétrica**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.
- LAMIN, Hugo – **Medição Eletrônica em Baixa Tensão: Aspectos Regulatórios e Recomendações para a Implantação**. Dissertação de Mestrado de Engenharia Elétrica – Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília - UnB, Brasília - DF, 2009
- MÜLLER, Eder F - **Desenvolvimento de um Controlador de Demanda e Fator de Potência Indutivo**. 62 p. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica – Departamento de Engenharia Elétrica. ULBRA. Canoas, RS.2008
- MAMEDE Fº, J. – **Instalações Elétricas Industriais**. 7ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- PEREIRA, F. – **PIC Programação em C, Baseado nos compiladores CCS**. 6ª Ed. Rio de Janeiro: Érica, 2007.
- THOMAZINI, P.U.B.d.A.D. – **Sensores industriais – Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Editora Erica, 2004



## OBRAS CONSULTADAS

AD – ANALOG DEVICES. **Multi-functional Energy Metering IC**. USA, Abril. 2003. [Online: acessado em outubro de 2010] Disponível em: [HTTP://www.analog.com](http://www.analog.com)

ANDREOLI, A. L. – **Controlador de Demanda de Baixo Custo para unidades Consumidoras de Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado. Bauru: UNESP, 2005.



## GLOSSÁRIO

*Foucault*: correntes parasitas.

*Anti-aliasing*: nome que se dá ao efeito de se amostrar de forma insuficiente um sinal contínuo qualquer.

## APÊNDICE A – CÓDIGOS FONTES

### Apêndice A.1 MedidorMono.c

```
/*  
Hardware  
Porta A = A0, A1, A2 e A3 = Comunicação SPI [A4 e A5 Livres]  
Porta B = B5 - LED, B4 - Switch [B7, B6, B3 a B0 livres]  
Porta C = Livres  
Porta D = Usado LCD  
Porta E = usado LCD  
  
Autor : Jackson Popsin  
*/  
#include <16F877A.h>  
#use delay (clock=10000000)  
#use rs232 (baud=9600, parity=N, xmit=PIN_C6, rcv=PIN_C7, bits=8)  
#fuses HS, NOWDT, PUT, NOBROWNOUT, NOLVP  
#include "C:\Projetos\LCD\LCD.c"  
#include <input.c> // get_string  
#include <stdlib.h> // para atoi32  
#include "C:\Projetos\TCCjackson\ADE7753.c"  
/////variáveis globais/////  
BYTE endereco;  
long int sinal;  
int i,count,cmd;  
////////////////////////////////////  
#include "C:\Projetos\TCCjackson\ProtocoloSPIade7753.c"  
  
void main()  
{  
    lcdinit(); // Inicia LCD  
    ADE(); // Inicialização ADE  
    printf("\r\n#### MEDIDOR E ANALISADOR DE ENERGIA ####\r\n");  
    printf("\r\nDigite uma das opcoes abaixo:\r\n");  
    printf("\r\n 1. Para leitura da Energia Ativa 'Wh');  
    printf("\r\n 2. Para leitura da Energia Ativa Acumulada'Wh");  
    printf("\r\n 3. Para leitura da Energia Aparente 'VAh");  
    printf("\r\n 5. Reserva");  
    printf("\r\n 4. Para leitura da Energia Aparente Acumulada 'VAh");  
    printf("\r\n 6. Para leitura da Energia Reativa Acumulada 'VARh");  
    printf("\r\n 7. Para leitura da Corrente 'RMS");  
    printf("\r\n 8. Para leitura da Tensao 'RMS");  
    printf("\r\n 9. Para verificacao da Frequencia ");  
    printf("\r\n 0. set Mode register");  
    printf("\r\n G. Power Gain Adjust");
```



```
printf("\r\n I. IRMS offset");
printf("\r\n K. Para setar um 'DADO'");
printf("\r\n L. Line Cycle Energy");
printf("\r\n M. Mode register");
printf("\r\n O. Channel 1 offset");
printf("\r\n P. Channel 2 offset");
printf("\r\n S. Para verificacao do Status Interrupção");
printf("\r\n T. Para verificacao do Status Interrupção(memória)");
printf("\r\n V. VRMS offset");
printf("\r\n W. Waveform");
printf("\r\n Q. Sair do modo PC");
printf("\r\n");
while(true)
{
    do
    { cmd=getc();
      cmd=toupper(cmd);
      printf("\t\t"); // tabulação para o caractere lido no teclado
      putchar(cmd);
    }while
((cmd!='1')&&(cmd!='2')&&(cmd!='3')&&(cmd!='4')&&(cmd!='5')&&(cmd!='6')&&(cmd!=
'7')&&(cmd!='8')&&(cmd!='9')&&(cmd!='0')&&(cmd!='G')&&(cmd!='I')&&(cmd!='K')&&(c
md!='L')&&(cmd!='M')&&(cmd!='O')&&(cmd!='P')&&(cmd!='S')&&(cmd!='T')&&(cmd!='
V')&&(cmd!='W'));

    if(cmd=='1')
    { float aenergy;
      endereco = _aenergy; // Define o registrador
      spi_le_ADE (endereco); // Lê ADE
      //aenergy = informacao * 0.000012502 * 0.00022;
      // Converte valor decimal em valor real
      //printf("\r\nAENERGY:%1.3f Wh", aenergy); // Joga na serial
      printf("\r\nAENERGY:%lu Wh", informacao); // Joga na serial
    }
    if(cmd=='2')
    { endereco = _laenergy;
      spi_le_ADE (endereco);
      printf("\r\nLAENERGY:%lu Wh", informacao);
    }
    if(cmd=='3')
    { endereco = _vaenergy;
      spi_le_ADE (endereco);
      printf("\r\nVAENERGY:%lu VAh", informacao);
    }
    if(cmd=='4')
    { endereco = _lvaenergy;
      spi_le_ADE (endereco);
      printf("\r\nLVAENERGY:%lu VAh", informacao);
    }
    if(cmd=='5')
    { printf("\r\nComando reservado");
    }
    if(cmd=='6')
    { endereco = _lvarenergy;
      spi_le_ADE (endereco);
    }
```



```
    printf("\r\nLVARENERGY:%lu VARh", informacao);
}
if(cmd=='7')
{ float irms;
  int16 offset = 2000;
  endereco = _irms;
  spi_le_ADE (endereco);
  printf("\r\nIRMS-:%lu A", informacao);
  if(informacao < offset)
  { informacao = offset;
  }
  irms = (informacao - offset) * 0.00001296 ;
  // Converte valor decimal em valor real da corrente medida 0,00001295
  printf("\r\nIRMS:%1.3f A", irms);
}
if(cmd=='8')
{ float vrms;
  endereco = _vrms;
  spi_le_ADE (endereco);
  vrms = informacao * 0.000095;
  // Converte valor decimal em valor real da corrente medida
  printf("\r\nVRMS:%1.1f V", vrms);
  printf("\r\nVRMS-:%lu A", informacao);
}
if(cmd=='9')
{ endereco = _period;
  spi_le_ADE (endereco);
  printf("\r\nPeriod:%lu Hz", informacao);
}
if(cmd=='0')
{ endereco = _mode;
  spi_le_ADE (endereco);
  printf("\r\nMode:0x%lx", informacao);
}
if(cmd=='G')
{ endereco = _wgain;
  spi_le_ADE (endereco);
  printf("\r\nWgain:0x%lx", informacao);
}
if(cmd=='I')
{ endereco = _irmsos;
  spi_le_ADE (endereco);
  printf("\r\nIRMSOS:0x%lx", informacao);
}
if(cmd=='L')
{ endereco = _linecyc;
  spi_le_ADE (endereco);
  printf("\r\nLynecyc:0x%lx", informacao);
}
if(cmd=='M')
{ endereco = _mode;
  spi_le_ADE (endereco);
  printf("\r\nMode:0x%lx", informacao);
}
if(cmd=='O')
```

```
{ endereco = _ch1os;
  spi_le_ADE (endereco);
  printf("\r\nCH1OS:0x%lx", informacao);
}
if(cmd=='P')
{ endereco = _ch2os;
  spi_le_ADE (endereco);
  printf("\r\nCH2OS:0x%lx", informacao);
}
if(cmd=='S')
{ endereco = _status;
  spi_le_ADE (endereco);
  printf("\r\nStatus:0x%lx", informacao);
}
if(cmd=='T')
{ endereco = _rststatus;
  spi_le_ADE (endereco);
  printf("\r\nRSTStatus:0x%lx", informacao);
}
if(cmd=='V')
{ endereco = _vrmsos;
  spi_le_ADE (endereco);
  printf("\r\nVRMSOS:0x%lx", informacao);
}
if(cmd=='W')
{ endereco = _waveform;
  spi_le_ADE (endereco);
  printf("\r\nWAVEFORM:0x%lx", informacao);
}
if(cmd=='K')
{ set_dado();
  spi_escreve_ADE (endereco + _write, dado);
  printf("\r\n dado:0x%lx", dado);
}
if(cmd=='Q')
{ printf("\r\nSaindo do Modo PC");
}
} // Limitador While
}
```

### Apêndice A.2 LCD.c

```
#define rs pin_e2
#define en pin_e1
#define delay(clock=1000000)

void lcd(char dado){
  output_d(dado); //coloca dado na porta
  output_high(rs); //modo dados
  output_high(en); //subida do clock
  delay_ms(1);
  output_low(en); //descida do clock
```

```
    delay_ms(1);
}

void lcdcmd(char comando){
    output_d(comando);    //coloca o comando na porta
    output_low(rs);      //modo comando
    output_high(en);     //subida do clock
    delay_ms(1);
    output_low(en);      //descida do clock
    delay_ms(1);
}

void lcdinit(){
    lcdcmd(0x38);        //8bits matriz 7x5
    lcdcmd(0x38);
    lcdcmd(0x06);        //escreve esquerda para direita
    lcdcmd(0x0c);        //cursor piscando=0x0f cursor desligado 0x0c
    lcdcmd(0x01);        //limpa
}
```

### Apêndice A.3 ADE7753.c

//Localizações dos registros conforme datasheet do ADE7753

```
#define _WAVEFORM 0x01    //24
#define _AENERGY 0x02    //24
#define _RAENERGY 0x03    //24 Reseta quando lido
#define _LAENERGY 0x04    //24
#define _VAENERGY 0x05    //24
#define _RVAENERGY 0x06    //24 Reseta quando lido
#define _LVAENERGY 0x07    //24
#define _LVARENERGY 0x08    //24
#define _MODE 0x09        //16 R/W
#define _IRQEN 0x0A        //16 R/W    default:0x40
#define _STATUS 0x0B        //16
#define _RSTSTATUS 0x0C    //16
#define _CH1OS 0x0D        //8 R/W
#define _CH2OS 0x0E        //8 R/W
#define _GAIN 0x0F          //8 R/W
#define _PHCAL 0x10        //6 R/W    Leitura feita em 8 bits
#define _APOS 0x11        //16 R/W
#define _WGAIN 0x12        //12 R/W
#define _WDIV 0x13        //8 R/W
#define _CFNUM 0x14        //12 R/W
#define _CFDEN 0x15        //12 R/W
#define _IRMS 0x16        //24
#define _VRMS 0x17        //24
#define _IRMSOS 0x18        //12 R/W
#define _VRMSOS 0x19        //12 R/W
#define _VAGAIN 0x1A        //12 R/W
#define _VADIV 0x1B        //8 R/W
#define _LINECYC 0x1C        //16 R/W
#define _ZXTOUT 0x1D        //12 R/W
```



```
#define _SAGCYC 0x1E //8 R/W
#define _SAGLVL 0x1F //8 R/W
#define _IPKLVL 0x20 //8 R/W
#define _VPKLVL 0x21 //8 R/W
#define _IPEAK 0x22 //24
#define _RSTIPEAK 0x23 //24 Reseta quando lido
#define _VPEAK 0x24 //24
#define _RSTVPEAK 0x25 //24 Reseta quando lido
#define _TEMP 0x26 //8
#define _PERIOD 0x27 //16
// 0x28 a 0x3C reserva
#define _TMODE 0x3D //8 R/W
#define _CHKSUM 0x3E //6
#define _DIEREV 0x3F //8

#define _WRITE 0x80 // Comando escrita
```

#### Apêndice A.4 ProtocoloSPIade7753.c

```
// Protocolo de comunicação SPI
#ifndef spi_clk
// Definições dos pinos de comunicação
#define spi_cs pin_A0 // pino de seleção
#define spi_clk pin_A1 // pino de clock
#define spi_di pin_A3 // pino de entrada PIC ->> Do do ADE
#define spi_do pin_A2 // pino de saída PIC ->> Di do ADE
#define testeIO pin_A5 // pino de seleção
#endif
int32 informacao, dado;
//int32 MMSB;

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
// FUNÇÃO ESCREVER Jackson Popsin
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

void spi_escreve_bit (boolean bit) // escreve um bit na interface SPI
{ output_high (spi_clk); // ativa a linha de clock. Mudança na ordem,
habilitar o clk antes de mandar o dado
output_bit (spi_do,bit); // coloca o dado na saída
delay_us(10);
output_low (spi_clk); // desativa a linha de clock
delay_us(2); // Delay para melhorar o tempo em nível mínimo
}
void spi_escreve_endereco (byte dado) // escreve um byte na interface SPI
{ int conta = 8; // envia primeiro o MSB
while (conta)
{ spi_escreve_bit ((shift_left(&dado,1,0)));
conta--;
}output_float (spi_do); // coloca a linha de dados em alta impedância
}
void spi_escreve_dado (int16 dado) // escreve um byte na interface SPI
```



```
{ int conta = 8;                // envia primeiro o MSB
  while (conta)
  { spi_escreve_bit ((shift_left(&dado,1,0)));
    conta--;
  }output_float (spi_do);        // coloca a linha de dados em alta impedância
}
void spi_escreve_ADE ( byte endereco, int16 dado)    // Escreve um dado em um
registorador determinado pela variável endereco
{ output_low (spi_cs);          // Habilita a leitura do ADE
  delay_us(50);                 // testar tempo para usar o CS
  spi_escreve_endereco (endereco);    // envia comando para escrever no
endereco
  delay_us(5);                 // tempo para iniciar nova leitura
  if (endereco >=0x89 && endereco <=0x8A)
  { spi_escreve_dado (dado >>8);    // envia dado MSB
    spi_escreve_dado (dado);        // envia dado LSB
  }
  if (endereco >=0x91 && endereco <=0x92)
  { spi_escreve_dado (dado >>8);    // envia dado MSB
    spi_escreve_dado (dado);        // envia dado LSB
  }
  if (endereco >=0x94 && endereco <=0x95)
  { spi_escreve_dado (dado >>8);    // envia dado MSB
    spi_escreve_dado (dado);        // envia dado LSB
  }
  if (endereco >=0x98 && endereco <=0x9A)
  { spi_escreve_dado (dado >>8);    // envia dado MSB
    spi_escreve_dado (dado);        // envia dado LSB
  }
  if (endereco >=0x9C && endereco <=0x9D)
  { spi_escreve_dado (dado >>8);    // envia dado MSB
    spi_escreve_dado (dado);        // envia dado LSB
  }
  else
  { spi_escreve_dado (dado);        // envia dado LSB
  }
  delay_us(50);                 // testar tempo para usar o CS
  output_high (spi_cs);        // desativa linha CS e inicia a escrita
  dado = 0;
}                                // lembre-se de aguardar 5ms antes de realizar outra
escrita ou leitura
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
//      FUNÇÃO LER      [JP] Jackson Popsin
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
boolean spi_le_bit (void)      // le um bit na interface SPI
{ boolean bit;
  output_high (spi_clk);
  delay_us (8);
  bit = input (spi_di);        // printf(lcd,"%u", bit); //Teste do sinal recebido
  output_low (spi_clk);
  delay_us(2);                 // Delay para melhorar o tempo em nivel mínimo
  return bit;
}
}
```



```
int16 spi_le_vintequatrobits (void) // lê 3 bytes na interface SPI
{ int conta = 8, LSB = 0; // Declaração das variáveis de leitura.
  int16 dado = 0, MSB = 0; // Criei a variável dado para ser 16bits
  int32 MMSB = 0;
  output_float (spi_do); // coloca a linha de dados em alta impedância
  while (conta)
  { shift_left (&dado, 1, spi_le_bit());
    conta--;
  }
  MMSB = dado * 65536;
  conta = 8;
  while (conta)
  { shift_left (&dado, 1, spi_le_bit());
    conta--;
  }
  MSB = dado * 256;
  conta = 8;
  while (conta)
  { shift_left (&dado, 1, spi_le_bit());
    conta--;
  }
  LSB = dado;
  informacao = MMSB + MSB + LSB;
}

int16 spi_le_dezesseisbits (void) // lê 2 bytes na interface SPI
{ int conta = 8, LSB = 0; // Declaração das variáveis de leitura.
  int16 dado = 0, MSB = 0; // Criei a variável dado para ser 16bits
  output_float (spi_do); // coloca a linha de dados em alta impedância
  while (conta)
  { shift_left (&dado, 1, spi_le_bit());
    conta--;
  }
  MSB = dado * 256;
  ////////////////////////////////////////////////////////////////////teste de otimização de linha de programas/// substitui por
  spi_le_oitobits();

  conta = 8;
  while (conta)
  { shift_left (&dado, 1, spi_le_bit());
    conta--;
  }
  LSB = dado;
  ////////////////////////////////////////////////////////////////////
  informacao = MSB + LSB;
}

int spi_le_oitobits (void) // lê um byte na interface SPI
{ int conta = 8, LSB = 0; // Declaração das variáveis de leitura.
  int16 dado = 0; // Criei a variável dado para ser 16bits
  output_float (spi_do); // coloca a linha de dados em alta
  impedância
  while (conta)
  { shift_left (&dado, 1, spi_le_bit());
    conta--;
  }
  LSB = dado;
```

```
informacao = LSB;
}
byte spi_le_ADE (byte endereco) // lê um dado de uma determinada
posição da memória SPI
{
    //byte dado; // Define a variável "dado" como sendo 1
byte.
    output_low (spi_cs); // habilita o chip select (seleção do chip)
    delay_us(50); // testar tempo para usar o CS
    spi_escreve_endereco (endereco); // envia comando de leitura
    delay_us(5); // tempo para iniciar nova leitura
    // Leitura 24bits [ok]
    if (endereco <=0x08) spi_le_vintequatrobits ();
    if (endereco >=0x16 && endereco <=0x17) spi_le_vintequatrobits ();
    if (endereco >=0x22 && endereco <=0x25) spi_le_vintequatrobits ();
    // Leitura 16bits
    if (endereco >=0x09 && endereco <=0x0C) spi_le_dezesseisbits ();
    if (endereco == 0x11) spi_le_dezesseisbits ();
    if (endereco == 0x12) spi_le_dezesseisbits (); //dados 12bits
    if (endereco >=0x14 && endereco <=0x15) spi_le_dezesseisbits (); //dados
12bits
    if (endereco == 0x1c) spi_le_dezesseisbits ();
    if (endereco == 0x1D) spi_le_dezesseisbits (); //dados 12bits
    if (endereco == 0x27) spi_le_dezesseisbits ();
    if (endereco >=0x18 && endereco <=0x1A) spi_le_dezesseisbits (); //dados
12bits
    // Leitura 8 bits
    if (endereco >=0x0D && endereco <=0x0F) spi_le_oitobits ();
    if (endereco == 0x10) spi_le_oitobits ();
    if (endereco == 0x13) spi_le_oitobits (); //if (endereco ==
0x13|0x1B|0x26|0x3D|0x3F) spi_le_oitobits ();
    if (endereco == 0x1B) spi_le_oitobits ();
    if (endereco >=0x1E && endereco <=0x21) spi_le_oitobits ();
    if (endereco == 0x26) spi_le_oitobits ();
    if (endereco >=0x3D && endereco <=0x3F) spi_le_oitobits ();
    delay_us(50); // testar tempo para usar o CS
    output_high (spi_cs); // desativa linha CS e termina leitura
}

void ADE ()
{
    spi_escreve_ADE (_MODE + _WRITE, 0x8080);
}
void set_dado() // Função utilizada para setar dado em registrador
{
    printf("\r\nDeseja setar o próximo registrador?");
    printf("\r\n [Y] YES - [N] NO");
    do{
        cmd=getc();
        cmd=toupper(cmd);
        printf("\t\t"); // Quebra de linha apos comando selecionado
        putc(cmd);
    } while ((cmd!='Y')&&(cmd!='N'));
```





```
    if(cmd=='Y')
    {
        char x[6];
        printf("\r\nDigite o DADO em decimal 5 unid.:");
        //isxdigit();
        get_string(x,6); // X é a string de caracteres, 6 é a quantidade definido na
string de caracteres
        dado = atoi32(x);
        printf("\n\novo valor em DADO:%lu",dado);
    }
    if(cmd=='N')
    {
        printf("\n\nr");
    }

}
```



## **APÊNDICE B – PESQUISA DE MERCADO**



## **ANEXO A – DATA-SHEET ADE 7753**



## **ANEXO B – TABELA PARA O SISTEMA DE MEDIÇÃO**



## **ANEXO C – ARQUITETURA PIC 16F877A**