



CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA – UNICEUB
FATECS – FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADA
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

THIAGO RIDER AUGUSTO

**CONTROLADOR PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA COM
MICROCONTROLADOR**

Orientador: Professor MS José Julimá Bezerra Júnior

Brasília

Junho, 2010

THIAGO RIDER AUGUSTO

**CONTROLADOR PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA COM
MICROCONTROLADOR**

Trabalho apresentado ao Centro
Universitário de Brasília como pré-
requisito para a obtenção de
Certificado de Conclusão do Curso
de Engenharia de Computação.

Orientador: Professor MS José
Julimá Bezerra Júnior

Brasília

Junho, 2010

THIAGO RIDER AUGUSTO

**CONTROLADOR PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA COM
MICROCONTROLADOR**

Trabalho apresentado ao Centro
Universitário de Brasília como pré-
requisito para a obtenção de
Certificado de Conclusão do Curso
de Engenharia de Computação.

Orientador: Professor MS José
Julimá Bezerra Júnior

Este trabalho foi julgado adequado para a obtenção do Título de Engenheiro de Computação,
e aprovado em sua forma final pela Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas –
FATECS.

Prof. Abiezer Amarília Fernandez
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. José Julimá Bezerra Júnior, mestre em Eng. Elétrica – IME – RJ.
Orientador

Prof. Thiago de Miranda Leão Toribio, mestre em Física Teórica – UnB – DF.
UniCEUB

Prof. Gil Renato Ribeiro Gonçalves – Doutorado em Física – UnB – DF.
UniCEUB

*Dedico este trabalho aos meus pais
que sempre acreditaram em mim em todas as
situações e me apoiaram sempre, motivo pelo
qual consegui realizar tudo em minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde física e mental que me possibilitou chegar até este momento e também a família que tenho, pois sem ela nada disso seria possível.

Agradeço aos meus pais Carlos e Nádia, pelo seu amor incondicional, pela educação que me foi dada e por me mostrarem que o estudo de uma pessoa é um bem inestimável e que é algo que nunca se perde.

A minha irmã Thifanny pela admiração e reconhecimento da minha pessoa e trabalho que me manteve forte na luta.

A minha querida Maria Helena, por seu amor, companheirismo e confidencialidade a quem nos momentos difíceis pude desabafar e retomar forças.

Ao professor e orientador José Julimá por me mostrar o caminho para o mundo dos circuitos elétricos e me apoiar neste trabalho.

E finalmente aos meus amigos que me acompanharam, apoiaram e proporcionaram um ambiente descontraído durante esse período em minha vida. Em especial, agradeço ao Wilson por me mostrar o verdadeiro sentido da palavra “amigo”.

*“Conta certa lenda, que estavam duas crianças
patinando num lago congelado.*

*Era uma tarde nublada e fria, e as crianças brincavam
despreocupadas.*

*De repente, o gelo quebrou e uma delas caiu, ficando
presa na fenda que se formou.*

*A outra, vendo seu amiguinho preso, e se congelando,
tirou um dos patins e começou a golpear o gelo com
todas as suas forças, conseguindo por fim, quebrá-lo e
libertar o amigo.*

*Quando os bombeiros chegaram e viram o que havia
acontecido, perguntaram ao menino:*

*- Como você conseguiu fazer isso? É impossível que
tenha conseguido quebrar o gelo, sendo tão pequeno e
com mãos tão frágeis!*

*Nesse instante, um ancião que passava pelo local,
comentou:*

- Eu sei como ele conseguiu.

Todos perguntaram:

- Pode nos dizer como?

- É simples: - respondeu o velho.

*- Não havia ninguém ao seu redor para lhe dizer que
não seria capaz. ”*

Albert Einstein

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE QUADROS	xii
LISTA DE TABELAS	xiii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT	xv
Capítulo 1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 ESCOPO DO TRABALHO	17
1.2 RESULTADOS ESPERADOS	18
1.3 VISÃO GERAL DO PROJETO	18
1.4 TOPOLOGIA	19
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	20
Capítulo 2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	22
2.1 ENERGIA ELÉTRICA	22
2.2 CORRENTE CONTÍNUA X CORRENTE ALTERNADA	24
2.3 POTÊNCIAS: ATIVA, REATIVA E APARENTE	27
2.4 FATOR DE POTÊNCIA.....	31
2.4.1 Tarifação Brasileira Relativa ao Fator de Potência.....	33
2.4.2 Comparativo dos Diversos Modelos Tarifários	36
2.5 APLICAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA NA INDÚSTRIA E COMÉRCIO	38
2.5.1 Tipos de Cargas Industriais e Comerciais	39
2.5.1.1 Cargas resistivas	40
2.5.1.2 Cargas capacitivas.....	40
2.5.1.3 Cargas indutivas.....	41
2.5.2 Efeitos das Cargas na Energia Elétrica	41
2.5.3 Impacto Econômico e de Qualidade da Energia em Função das Cargas	42
2.6 CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.....	42
2.6.1 Dispositivos e Técnicas.....	44
2.6.2 Correção Carga Individual X Correção em Grupos.....	44
2.6.2.1 Dispositivos para correção individual.....	45
2.6.2.2 Dispositivos para correção em grupos	45
2.6.3 Correção Automática X Correção Fixa.....	46
2.6.3.1 Mudança da rotina de operações.....	46
2.6.3.2 Capacitores-derivação	47
2.6.3.3 Bancos de capacitores	49
2.6.3.4 Motores síncronos.....	52

Capítulo 3 REFERENCIAL TECNOLÓGICO	53
3.1 BLOCO DE ENTRADA E CONDICIONAMENTO	53
3.1.1 Medição das Grandezas Tensão e Corrente.....	54
3.1.2 Transformador de Potencial (TP)	55
3.1.3 Transformador de Corrente (TC).....	57
3.2 BLOCO DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO	58
3.2.1 O Amplificador Operacional	59
3.2.2 Filtragem	63
3.2.3 Filtragem Ativa utilizando Amplificador Operacional	64
3.2.4 Microcontroladores da Família 8051	65
3.2.4.1 Unidade Central de Processamento ou <i>Central Processing Unit (CPU)</i>	68
3.2.4.2 Memória RAM	71
3.2.4.3 Memória ROM	72
3.2.4.4 Portas de Entrada e Saída (E/S).....	73
3.2.4.5 Porta serial.....	74
3.2.4.6 <i>Timers</i> e contadores.....	76
3.2.4.7 Conversor Analógico/Digital (A/D).....	77
3.3 BLOCO DE COMUNICAÇÃO COM O PC.....	78
3.3.1 O protocolo RS-232.....	78
3.3.2 Níveis de Tensão da Lógica Digital TTL	80
3.3.3 Conversor de Nível RS-232/TTL	81
3.4 BLOCO DE CONTROLE.....	82
3.4.1 Driver de Potência para Acionamento dos Atuadores	83
3.4.2 Relés.....	84
3.4.3 Banco de Capacitores.....	86
3.5 BLOCO DE VISUALIZAÇÃO DE DADOS/RECONFIGURAÇÃO.....	87
3.5.1 Reconfiguração e Mudança de Firmware	87
3.5.2 A Plataforma de Desenvolvimento Microsoft Visual Studio e A Linguagem de Programação C#.....	88
Capítulo 4 Desenvolvimento	90
4.1 <i>HARDWARE</i>	90
4.1.1 O ambiente de Trabalho do Controlador do Fator de Potência	93
4.1.2 Bancada de Cargas.....	93
4.1.3 Bloco de Entrada e Condicionamento.....	97
4.1.4 Bloco de Aquisição e Processamento	101
4.1.5 Bloco de Comunicação com o PC	105
4.1.6 Bloco de Controle	106
4.2 <i>SOFTWARE</i>	109

4.2.1 Bloco de Visualização de Dados/Reconfiguração	110
4.2.2 <i>Firmware</i>	112
4.3 RESULTADOS	114
Capítulo 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
APÊNDICE A - Código-fonte “Monitoramento.cs”	123
APÊNDICE B - Código-fonte “configuraporta.cs”	126
APÊNDICE C - Código-fonte p/ microcontrolador 8051 “MAIN.c”	128

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1-TOPOLOGIA DO PROJETO	20
FIGURA 2.1-TRIÂNGULO DAS POTÊNCIAS.....	30
FIGURA 2.2-TRIÂNGULO DAS POTÊNCIAS INCREMENTADO DO ÂNGULO ENTRE P E S	31
FIGURA 2.3-MÉTODO ANALÍTICO DE CÁLCULO DE POTÊNCIA DOS CAPACITORES.....	50
FIGURA 2.4-MÉTODO TABULAR DE CÁLCULO DOS CAPACITORES DE CORREÇÃO	51
FIGURA 3.1-SÍMBOLO E SINAIS DO AMPLIFICADOR OPERACIONAL	60
FIGURA 3.2-CONFIGURAÇÃO INVERSORA DE UM AMPLIFICADOR OPERACIONAL	61
FIGURA 3.3-DIAGRAMA DE BLOCOS DO MICROCONTROLADOR ANALOG DEVICES ADUC814 ..	67
FIGURA 3.4-PINAGEM DO MICROCONTROLADOR ADUC814	67
FIGURA 3.5-FLUXOGRAMA DE UM CICLO DE INSTRUÇÃO	69
FIGURA 3.6-MAPA DOS REGISTRADORES DE FUNÇÕES ESPECIAIS	70
FIGURA 3.7-MAPA DA MEMÓRIA DO ADUC814	72
FIGURA 3.8-MAPA DA MEMÓRIA DE PROGRAMA	73
FIGURA 3.9-AMBIENTE TÍPICO DE APLICAÇÃO DO PROTOCOLO RS-232.....	78
FIGURA 3.10-PADRÃO DE NÍVEIS DE SINAL TTL.....	80
FIGURA 3.11-VISTA SUPERIOR DO CI MAX232 COM PINAGEM	82
FIGURA 3.12-NOTA DE APLICAÇÃO DO CI MAX232	82
FIGURA 3.13-UM DOS <i>DRIVERS</i> DO CI ULN2003	83
FIGURA 3.14-PINAGEM DO CI ULN2803.....	84
FIGURA 3.15-RELÉ ELETROMECAÂNICO PARA PCI	86
FIGURA 4.1- DIAGRAMA ESQUEMÁTICO GERAL DO PROJETO	92
FIGURA 4.2-SUPORTE PARA AS CARGAS.....	94
FIGURA 4.3-DIAGRAMA DE CARGAS DA BANCADA	95
FIGURA 4.4-TRANSFORMADOR DE CORRENTE	98
FIGURA 4.5-CONFIGURAÇÃO IDEAL DO FILTRO PASSA-BAIXA CONFIGURAÇÃO SALLEN-KEY	98
FIGURA 4.6-DIAGRAMA DE BODE PARA A RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO FILTRO	99
FIGURA 4.7-FILTRO DO SINAL DE CORRENTE DO TC.....	99
FIGURA 4.8-AJUSTE DA TENSÃO PARA O FILTRO	100
FIGURA 4.9-FONTE DE ALIMENTAÇÃO DE + 5V, - 5V E + 12 V	101
FIGURA 4.10-LIGAÇÃO COM FONTE SIMPLES	102
FIGURA 4.11-ADAPTAÇÃO DO INVÓLUCRO SSOP28 PARA DIP28 E CRISTAL	103

FIGURA 4.12-FILTRO DE TRANSIENTES NA ENTRADA ANALÓGICA DO CONVERSOR	104
FIGURA 4.13-DESACOPLAMENTO DE V_{REF} E C_{REF}	104
FIGURA 4.14-DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DO MICROCONTROLADOR E CONVERSOR AD	105
FIGURA 4.15- ESQUEMA DE LIGAÇÃO DO CI MAX 232 AO CONECTOR DA PORTA SERIAL	106
FIGURA 4.16 - RELÉS PARA PCI SOLDADOS NA PLACA DE CONTROLE.....	107
FIGURA 4.17-CAPACITOR COM CONECTOR FASTON	108
FIGURA 4.18-MONTAGEM FINAL DO BANCO DE CAPACITORES.....	109
FIGURA 4.19 - TELA DO SOFTWARE DE VISUALIZAÇÃO DE DADOS	111
FIGURA 4.20 - FLUXOGRAMA DO <i>FIRMWARE</i>	112
FIGURA 4.21 - ENTRADA E SAÍDA DO CIRCUITO AMPLIFICADOR SOMADOR.....	116
FIGURA 4.22 - EFEITO DO FILTRO PASSA-BAIXA.....	116
FIGURA 4.23 - PROCESSO DE AMOSTRAGEM DE UMA TENSÃO DC COM O <i>SOFTWARE WASP</i>	117

LISTA DE QUADROS

QUADRO 3.1-MODOS DA PORTA SERIAL DO ADUC814.....	74
QUADRO 3.2-PINOS E SINAIS DA LIGAÇÃO RS-232 EM CONECTORES DE-9.....	79
QUADRO 3.3-CONVERSÃO DE NÍVEIS RS-232 PARA TTL DO CI MAX232	81
QUADRO 4.1-CARGAS DA BANCADA	93
QUADRO 4.2-INFORMAÇÕES DE CARGAS DA BANCADA	95
QUADRO 4.3- GAMA DE VALORES DE CAPACITORES PPM PARA ATÉ 330V	108
QUADRO 4.4- POTÊNCIA DOS ESTÁGIOS DO BANCO	109

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1-ENSAIO EM BANCADA DE CARGAS COM ANALISADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA E ALICATE AMPERÍMETRO.....	96
TABELA 4.2 - RESULTADOS DO FP MEDIDOS PELO PROTÓTIPO E PELO EQUIPAMENTO PROFISSIONAL.....	118

RESUMO

O presente projeto tem por objetivo implementar um controlador do fator de potência utilizando microcontrolador da família 8051. O uso do microcontrolador visa manter o fator de potência dentro de limites aceitáveis, chaveando um banco de capacitores em um circuito monofásico de uma bancada de cargas construída para ensaio. Para isso, o protótipo deve: adquirir os sinais de tensão e corrente de uma fase, calcular o fator de potência a partir de um conjunto de amostras, atuar sobre um banco de capacitores e permitir visualizar um histórico do fator de potência na tela do computador. O projeto é dividido em 5 blocos modulares que funcionam em conjunto: Entrada e Condicionamento de Sinais, Aquisição e Processamento, Controle, Comunicação com o PC e Visualização de Dados/Reconfiguração. Também são abordados os diversos tipos de cargas e seus efeitos na linha de distribuição, uma vez que o fator de potência é intrinsecamente ligado a estes. O trabalho faz uso ainda de diversos conceitos e técnicas de engenharia como eletricidade, processamento de sinais, eletrônica, microcontroladores, programação de computadores e lógica digital.

Palavras-chave: fator de potência, análise, correção, microcontroladores, qualidade de energia.

ABSTRACT

The present project aims to implement a controller for the power factor by using a microcontroller of the 8051 family. The usage of a microcontroller seeks to maintain the power factor within acceptable limits, toggling a bank of capacitors in a monophasic circuit of a stand of loads built for testing. For this, the prototype should: acquire the voltage and the current signals from a phase in order to calculate the power factor from one set of samples, to act upon a bank of capacitors allowing a historical view of the power factor on computer screen. The project is divided into five building blocks that work together: Input and Signal Conditioning, Data Acquisition and Processing, Data Control, Communication between the computer and the Data Visualization / Reconfiguration. In addition, this project also intends to discuss various types of loads and their effect on the distribution line, since the power factor is intrinsically linked to these. The present work has also applied several concepts and techniques of engineering such as electricity, signal processing, electronics, microcontrollers, computer programming and digital logic.

key-words: Power factor, analysis, correction, microcontrollers, energy quality.

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

O problema da qualidade de energia elétrica vem aumentando a cada dia devido à inserção de cargas não lineares ou reativas nas redes de energia elétrica. O fator de potência é uma das anomalias quando se trata de qualidade da energia elétrica e o baixo valor para este fator é um indicativo do mau aproveitamento da energia em uma instalação. O uso incorreto das instalações elétricas nas indústrias ou comércios leva a desperdícios, riscos de acidentes por sobreaquecimento e outros impactos de ordem econômica, como acréscimos na fatura e diminuição do aproveitamento dos equipamentos e sua vida útil. Além disso, algumas questões técnicas devidas a um fator de potência baixo são:

- Aumento das perdas elétricas internas da instalação;
- Queda de tensão da instalação;
- Redução aproveitamento da capacidade dos transformadores; e
- Condutores aquecidos.

O impacto econômico causado pelo problema é tamanho que as empresas concessionárias de energia elétrica brasileiras têm projetos, que são incluídos nos seus programas de combate ao desperdício de energia elétrica. Esses programas envolvem a própria empresa e seus consumidores, adotando soluções nas redes de distribuição e também nas redes de repartição. Em concordância com essas ações, diversas são as indústrias e comércios que vêm se interessando na solução do problema, visto também que a legislação nacional sofreu diversas alterações ao passar dos anos, exigindo um cuidado maior dessas classes de consumidores quanto ao aproveitamento energético (Mamede Filho, 2007).

A tecnologia para a correção do fator de potência encontra-se em constante evolução dada a sua necessidade. O uso de técnicas automatizadas para a correção melhora a eficiência em relação à correção fixa, principalmente para ambientes com uma média variação na demanda por energia reativa. O emprego da correção do fator de potência pode economizar em custos e um controlador automático pode tornar essa economia mais evidente.

Um fator motivador deste projeto é o aumento nas pesquisas sobre qualidade da energia elétrica, área onde se inserem questões relativas ao fator de potência, que pode ser observado na última década, fruto da preocupação com os problemas decorrentes do mesmo e suas influências nos processos produtivos e comerciais. Um aumento no número de artigos

publicados sobre o tema é evidente e alguns constam da bibliografia, como (Cotrim, 2003), (Hafner, Lopes, & Lima, 2005) e (Martins, Couto, & Afonso, 2003). Além disso, a necessidade de se manter o fator de potência próximo ao valor unitário leva à proposta de projeto e construção de um controlador automatizado capaz de calcular e corrigir o fator de potência de forma eficiente e dentro de intervalos curtos como em (Noll, Fassheber, Bonacorso, & Schmidt, 2003) e (Noll, Fassheber Jr., Bonacorso, Mélo, & Schmidt).

O projeto tem como objetivo geral estudar e corrigir o fator de potência de uma bancada de cargas de ensaio, demonstrando a viabilidade do uso de microcontroladores para este propósito.

Para alcançar o objetivo geral, dão suporte os seguintes objetivos específicos:

- Projetar e construir a bancada de cargas para teste;
- Projetar e construir um protótipo modularizado para realizar a aquisição e cálculo do fator de potência;
- Projetar e construir um módulo de banco de capacitores; e
- Projetar e implementar um software de computador para visualização de dados.

A importância do trabalho deve-se à relevância do uso de microcontroladores em sistemas embarcados como plataformas de aquisição e processamento de dados em um único chip ou *System-On-a-Chip* (SoC) e sua aplicação em controladores digitais de satisfatório poder de processamento, no caso deste projeto para correção do fator de potência. A complexidade do tema da aplicação da tecnologia microcontrolada pode render diversos trabalhos acadêmicos na área de sinais e controle.

1.1 ESCOPO DO TRABALHO

O projeto contempla a implementação de um protótipo destinado a adquirir sinais de tensão e corrente em uma bancada de cargas ligada a somente uma fase (monofásico). Os ensaios são possíveis de se realizar acionando carga a carga. É avaliado o fator de potência dentro de um conjunto de amostras e realizada a atuação em um banco de capacitores visando corrigir esse valor. O protótipo deve ainda, possibilitar a visualização de um histórico dos valores na tela de um computador.

1.2 RESULTADOS ESPERADOS

Espera-se construir um protótipo demonstrativo do fator de potência, desde sua origem na escolha das cargas em operação até sua correção com o acionamento do banco de capacitores. Erros de medição são esperados já que o protótipo não tem todas as formas de proteção a interferências ambientais como em um produto comercial.

Um estudo no condicionamento e nivelamento do sinal também é contemplado, assim como amplo estudo sobre o fator de potência de forma teórica e sua correção com banco de capacitores.

1.3 VISÃO GERAL DO PROJETO

O projeto é dividido em 5 blocos modulares que funcionam em conjunto:

- Entrada e Condicionamento de Sinais: utiliza-se de um transformador de corrente e um transformador de potencial para a conexão à rede de ensaio, onde estão ligadas as cargas da bancada. Outros componentes são necessários para o nivelamento adequado do sinal que é entregue para o bloco de aquisição e processamento, como amplificadores operacionais polarizados de forma a fornecer amplitudes de tensão compatíveis com o conversor analógico-digital daquele bloco. É também realizada uma pequena filtragem do sinal para eliminar os ruídos provenientes da corrente.
- Aquisição e Processamento: dá-se pela correta configuração e integração do conversor analógico-digital e microcontrolador, capazes de, respectivamente, adquirir e processar os sinais provindos do bloco anterior. O firmware programado contempla a utilização de 2 canais de aquisição, sendo 1 para a tensão e 1 para a corrente. A partir destas medidas, tomadas em intervalos de tempo pequenos, pode-se calcular o fator de potência.
- Controle: consiste em lógica digital e componentes de eletrônica de potência, para acoplamento de capacitores na linha. O banco de capacitores é dividido em

estágios, otimizando a correção. O acoplamento é realizado à relé e tenta-se causar menor impacto na corrente possível.

- Comunicação com o PC: o microcontrolador empregado funciona com níveis de tensão compatíveis com TTL(Transistor-Transistor logic), e o computador através da porta serial apresenta níveis de tensão diferentes. Esse bloco consiste em sua maior parte, da adequação dos níveis através de um conversor de nível RS-232 para TTL. Outros aspectos incluem cabeamento e software para a comunicação.
- Visualização de Dados/Reconfiguração: apesar do funcionamento independente do controlador, faz-se necessário mostrar o que está se passando com o sistema. Assim, o computador está sempre pronto a receber os valores e apresentar isso em tela.

1.4 TOPOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos, a topologia ilustrada na Figura 1.1 é seguida:

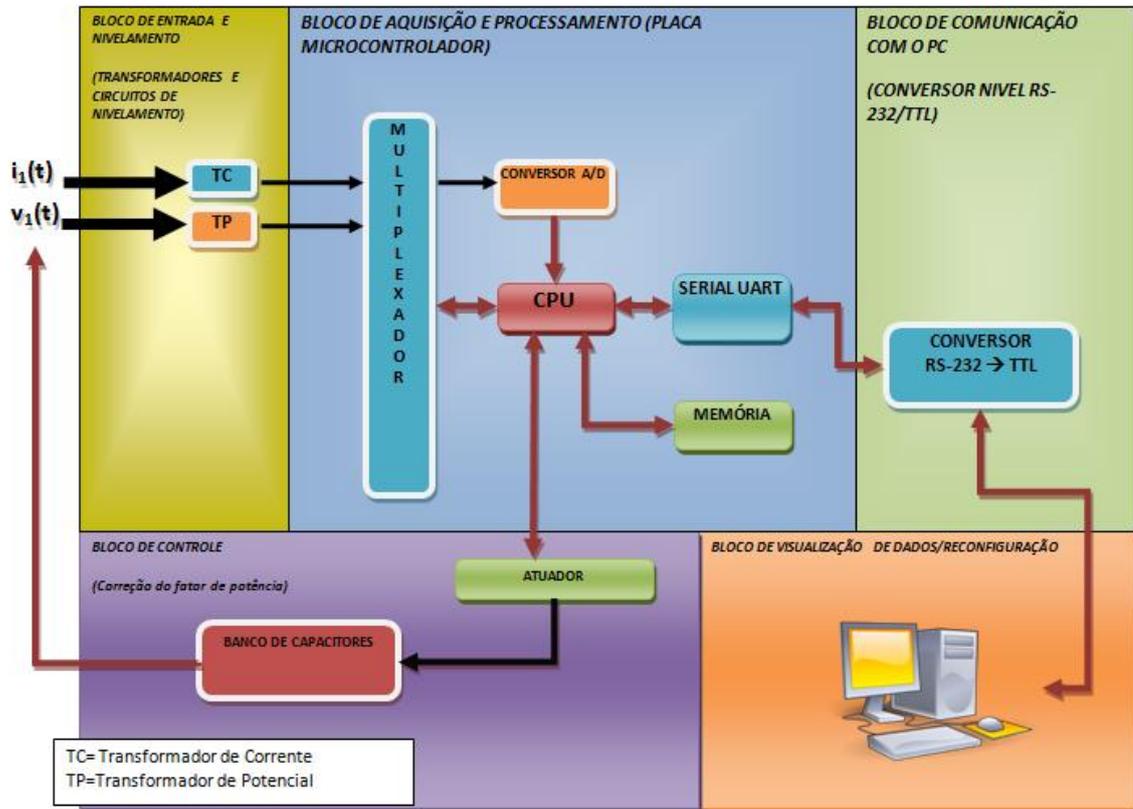


Figura 1.1-Topologia do projeto

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é dividido em 4 capítulos além da introdução. No capítulo 2 é apresentado o problema do baixo fator de potência e todo o referencial teórico e os fundamentos que possibilitam a compreensão dos diversos circuitos e do próprio fenômeno do fator de potência.

O capítulo 3 trata do referencial tecnológico, sendo indispensável para a compreensão do capítulo de desenvolvimento, pois traz informações sobre os diversos circuitos e métodos para os blocos do projeto, desde o condicionamento do sinal até a atuação no banco de capacitores e comunicação com o PC.

O capítulo seguinte destina-se ao desenvolvimento, sendo separado em hardware e software. Os componentes são agrupados em circuitos funcionais e estes são detalhados. O final do capítulo apresenta ainda, os resultados obtidos com a pesquisa.

O último capítulo encerra o trabalho, com as considerações finais, as suas contribuições e propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para o correto entendimento do projeto e seu desenvolvimento, são necessários alguns conhecimentos a respeito da teoria elétrica, legislações, normas e ainda, a parte específica de correção do fator de potência. Neste capítulo são apresentados ao leitor esses tópicos introdutórios e o seu relacionamento com o projeto. Especial atenção é dada à parte específica, pois se necessita saber, à priori, o que é fator de potência, problemas técnicos relacionados ao mau aproveitamento da energia, impactos econômicos, causas e como minimizar os prejuízos a ele relacionados.

2.1 ENERGIA ELÉTRICA

Para a análise básica de circuitos elétricos, alguns conceitos e definições precisam ser colocados, pois são o alicerce para a caracterização dos diversos elementos de circuitos e seu funcionamento.

Para caracterizar definitivamente esse conjunto, é primordial conhecer suas propriedades quantitativas sejam elas: tensão, corrente e suas quantidades derivadas.

A diferença de potencial entre dois pontos, medida em volts, é chamada de tensão. A tensão a que está submetido um elemento de circuito também pode ser definida como “o trabalho realizado para mover uma unidade de carga (+ 1 C) através do elemento, de um terminal ao outro”. (Johnson, Hilburn, & Johnny, 1994, p. 7)

A tensão é ainda o trabalho realizado sobre a carga de um Coulomb, ou:

$$1V = 1J/C \qquad 2.1$$

A diferença de potencial ou tensão causa um fluxo de carga elétrica, assim como a diferença de pressão em sistemas hidráulicos causa o escoamento de líquido através das

tubulações. A esse fluxo de cargas em sistemas elétricos dá-se o nome de corrente elétrica. A corrente elétrica é definida em (Tipler & Mosca, 2006, p. 144) como “fluxo de carga elétrica através da seção transversal de um condutor”. A unidade de corrente elétrica é o Ampère, cujo símbolo é (A), sendo $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$. Em análise de circuitos, é usual a definição na forma diferencial da corrente elétrica, representando a corrente instantânea, conforme apresentado em (Johnson, Hilburn, & Johnny, 1994, p. 5) e na Equação 2.2:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad 2.2$$

Nem só os conceitos apresentados até então são suficientes para a análise de circuitos em profundidade. Energia e Potência também fazem parte da avaliação quantitativa de circuitos elétricos e eletrônicos.

O conceito de energia está relacionado a trabalho, de forma que essa pode ser absorvida ou entregue ao circuito em que o elemento analisado se encontra. Para esta análise, deve-se saber a polaridade da tensão aplicada sobre este e também o sentido da corrente. Usando a convenção de polaridade da tensão, se uma corrente positiva entra pelo terminal positivo do componente, significa que o mesmo está absorvendo energia, e o contrário (corrente positiva saindo pelo terminal positivo) significa que o elemento está fornecendo energia ao circuito. Uma variação da energia Δw é função da tensão V aplicada ao elemento pela carga que atravessa o mesmo, denominada Δq , no sentido do terminal positivo para o negativo. Assim, um elemento absorve a energia dada pela Equação 2.3 (Johnson, Hilburn, & Johnny, 1994, p. 8):

$$\Delta w = V \Delta q \quad 2.3$$

Para alcançar o conceito de potência, deve-se considerar a velocidade com que o trabalho é realizado, ou ainda, com que a energia é dissipada. Logo, considerando um tempo $\Delta t \rightarrow 0$, esta é dada pela Equação 2.4:

$$p = \frac{dw}{dt} = v \frac{dq}{dt} \quad 2.4$$

Como

$$i = \frac{dq}{dt} \quad , \quad 2.5$$

tem-se que

$$p = vi, \quad 2.6$$

chamada também de potência instantânea por estar ligada a tensão e corrente medidas num dado instante, visto que tensão e corrente são grandezas definidas em função do tempo (Johnson, Hilburn, & Johnny, 1994, p. 8).

2.2 CORRENTE CONTÍNUA X CORRENTE ALTERNADA

Conhecidas as grandezas quantitativas e a representação dos elementos de circuitos, é essencial conhecer algumas características da corrente relacionadas ao seu sentido.

Os circuitos de corrente contínua apresentam a característica de terem correntes em um sentido somente, dado um ramo ou malha, e é convencionalizado o do fluxo das cargas positivas, os prótons, pois se acreditava que estas partículas que se moviam. Essa idéia foi difundida por Benjamim Franklin (1706-1790) e é chamada de *corrente convencional*. Logo se chegou à conclusão de que as partículas que se moviam, na verdade, são os elétrons livres dos cabos metálicos. A esse novo paradigma chamou-se de *corrente eletrônica*. Diversas aplicações utilizam corrente contínua, ou *cc*, sejam elas microcomputadores, calculadoras ou outros circuitos eletrônicos. A corrente contínua pode ser obtida por efeito químico, a partir de

diversas formas de pilhas e baterias. Pode ainda ser obtida pelo tratamento adequado de tensões alternadas em dispositivos denominados retificadores. Esses dispositivos transformam a tensão senoidal em onda pulsante positiva ou negativa, ou seja, já com as características de corrente contínua. Essa onda pulsante é então filtrada e acumulada em bancos de baterias para ser utilizada por equipamentos cuja alimentação seja em corrente contínua.

Apesar da grande utilização dos circuitos eletrônicos em corrente contínua, a geração de energia se dá por geradores, na forma de corrente alternada. Esse tipo de corrente apresenta a vantagem de poder “ser transportada ao longo de grandes distâncias com tensões muito elevadas e baixas correntes para reduzir as perdas de energia devido ao efeito Joule”. (Tipler & Mosca, 2006, p. 301). A geração dessa corrente envolve o artefato do gerador, uma máquina elétrica, de modo que insere algumas características importantes na formulação da corrente e tensão alternada.

Desta forma, a FEM gerada é senoidal, ou seja, é posta em função de seno no tempo. Em engenharia elétrica, geralmente a fórmula da tensão senoidal é dada como na Equação 2.7.

$$v(t) = V_m \text{sen}(\omega t + \phi) \quad 2.7$$

Sendo

$$\omega = 2\pi f \quad 2.8$$

onde f = frequência ou o inverso do período;

ω = frequência angular; e

ϕ = ângulo de fase.

Com bastante semelhança tem-se a formulação da corrente senoidal para cargas resistivas ou quando a tensão está em fase com a corrente (Equação. 2.9):

$$i(t) = I_m \text{sen}(\omega t + \phi) \quad 2.9$$

Assim, aplicando-se uma tensão $v(t) = V_m \text{sen}(\omega t + \phi)$ a um elemento puramente resistivo R , a corrente que por ele passa será $i(t) = I_m \text{sen}(\omega t + \phi)$ e sempre em fase com a tensão $v(t)$, isto é, não há defasagem entre a tensão aplicada e a corrente.

Nos circuitos puramente indutivos, a uma indutância L quando aplicada uma tensão $v(t) = V_m \text{sen}(\omega t + \phi)$, a corrente $i(t)$ está atrasada de 90° em relação à tensão $v(t)$.

A equação 2.10 representa a tensão:

$$V_m \text{sen}(\omega t + \phi) = L \frac{di}{dt} \quad 2.10$$

A corrente $i(t)$ será obtida pela solução da diferencial e valerá

$$i(t) = \int \frac{V_m \text{sen}(\omega t + \phi)}{L} = (V_m / \omega L) \text{sen}(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad 2.11$$

Na equação anterior a parcela $\omega L = X_L$ é denominada reatância indutiva e sua unidade de medida é o ohm (Ω), unidade de resistência elétrica.

O valor da corrente máxima será $I_m = V_m / 2\pi f L$ e depende da frequência.

Supondo-se agora que uma tensão $V_m \text{sen}(\omega t + \phi)$ seja aplicada a um capacitor C , e sabendo-se que $V_m \text{sen}(\omega t + \phi) = q/C$, é possível calcular a corrente máxima:

$$I_m = \omega C V_m \cos(\omega t + \phi) = \omega C V_m \text{sen}(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad 2.12$$

Nesse caso, conforme mostrado, a corrente está adiantada de 90° em relação à tensão e depende da frequência f .

Nesse circuito, $\frac{1}{\omega C}$ é chamada de impedância capacitiva e representada como X_C . Sua unidade de medida é o ohm (Ω), unidade de resistência elétrica.

2.3 POTÊNCIAS: ATIVA, REATIVA E APARENTE

A expressão $p(t) = v(t)i(t)$ indica a potência instantânea em determinado circuito.

Para os circuitos puramente resistivos, $i(t) = \left(\frac{V_m}{R}\right) \text{sen } \omega t$, verifica-se o valor máximo da corrente quando

$$I_m = \frac{V_m}{R} \quad 2.13$$

Na ausência de tensão aplicada a corrente será nula e quando a tensão aplicada for máxima a corrente será também máxima. Verifica-se então que não há defasagem entre a tensão e a corrente (Flarys, 2006, p. 82).

A potência instantânea $p(t) = v(t)i(t)$ será calculada como na Equação 2.14.

$$P(t) = (V_m \text{sen} \omega t)(I_m \text{sen} \omega t) = V_m I_m \text{sen}^2 \omega t = \frac{V_m I_m}{2} (1 - \cos 2\omega t) \quad 2.14$$

Sendo

$$\frac{V_m I_m}{2} = V_{ef} I_{ef} \quad 2.15$$

A expressão fornece o valor da potência instantânea e seu valor médio chama-se **potência ativa**. A sua unidade de medida é o watt (W).

Para circuitos indutivos calcula-se a potência instantânea $p(t) = v(t)i(t)$ como na Equação 2.16:

$$\begin{aligned} P(t) &= (V_m \text{ sen } \omega t) \left[I_m \text{ sen } \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right] = V_m I_m \text{ sen } \omega t \text{ sen } \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) & 2.16 \\ &= \frac{V_m I_m}{2} \left[\cos \left(-\frac{\pi}{2} \right) - \cos(2\omega t - \frac{\pi}{2}) \right] \\ &= -V_{ef} I_{ef} \cos \left(2\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned}$$

A última expressão acima indica que a potência dissipada é nula, mas seu valor instantâneo não é zero. Uma parte da energia desloca-se da fonte para a carga e retorna à fonte. Essa potência não é consumida e é denominada de **potência reativa indutiva**. Sua unidade é o VAR (volt ampère reativo) (Flarys, 2006, p. 84).

Essa potência reativa representa-se por Q_L e pode ser calculada como na Equação 2.17:

$$Q_L = X_L I_{ef}^2 \quad 2.17$$

onde $X_L = 2\pi fL$

Para circuitos com característica capacitiva a potência instantânea vale (Eq. 2.18) e é dada pela (Eq. 2.19) sendo seu valor médio nulo.

$$p(t) = v(t)i(t) \quad 2.18$$

$$p(t) = -V_{ef} I_{ef} \cos\left(2\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad 2.19$$

Da mesma forma que nos circuitos indutivos, a energia fica oscilando entre a fonte de tensão e o capacitor. Essa potência denomina-se potencia reativa capacitiva e é medida em VAR (volt ampère reativo). Representa-se a potência reativa capacitiva por Q_c e pode ser calculada como na Equação 2.20 (Flarys, 2006, p. 86).

$$Q_c = X_c I_{ef}^2 \quad 2.20$$

Onde

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad 2.21$$

A potência ativa P caracteriza-se por ser a parte consumida pela carga para realizar trabalho. Parte dissipada dessa potência ocorre na forma de calor. O seu valor médio é dado pela Equação 2.22, tendo como unidade o watt (W).

$$P = V_{ef} I_{ef} \cos \varphi \quad 2.22$$

A potência reativa Q é a parte da energia que fica oscilando entre a fonte de tensão e a carga. Nos motores e circuitos indutivos, como transformadores, a potência reativa é responsável pela magnetização. Representa-se pela Equação 2.23 e sua unidade é o VAR. A potência reativa Q também pode ser calculada como na Equação 2.24.

$$Q = V_{ef} I_{ef} \sin \varphi \quad 2.23$$

$$Q = (X_L - X_C) I^2 \quad 2.24$$

A potência aparente S é a resultante vetorial da soma das potências ativa e reativa e sua unidade é em VA (volt ampère).

As potências ativa, reativa e aparente podem ser representadas na forma vetorial num triângulo retângulo chamado triângulo de potências. O cateto P simboliza a potência ativa, O cateto Q a potência reativa e a hipotenusa S a potência aparente. Pelo Teorema de Pitágoras tem-se que (Mamede Filho, 2007):

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad 2.25$$

Portanto

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad 2.26$$

Esta propriedade pode ser visualizada na Figura 2.1.

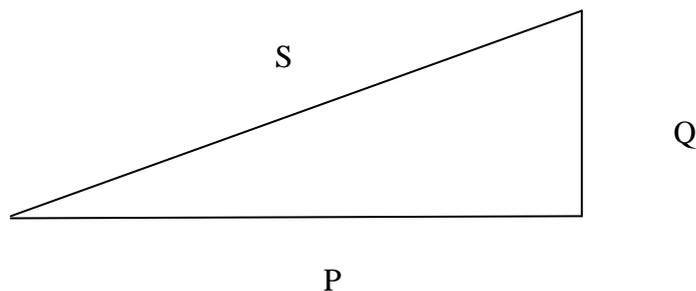


Figura 2.1-Triângulo das potências

Para cálculo da potência reativa, adota-se a Equação 2.27.

$$Q = (X_L - X_C)I^2 \quad 2.27$$

Se $X_L > X_C \rightarrow Q$ será positivo e o circuito tem característica indutiva;

Se $X_L < X_C \rightarrow Q$ será negativo e o circuito tem característica capacitiva; e

Se $X_L = X_C$, Q será nulo e a potência reativa tem valor zero.

Diz-se então que há ressonância naquela frequência, fazendo com que a característica do circuito seja resistiva, pois não temos nem potência reativa nem aparente (Flarys, 2006, p. 93).

Os valores para cálculo devem sempre considerar L em henry(H) e C em farad(F).

2.4 FATOR DE POTÊNCIA

Para que se possa analisar o que se denomina como *fator de potência*, toma-se como referência novamente o triângulo de potências, desta vez incrementado de novo dado. Entre a potência ativa P e a potência aparente S forma-se o ângulo φ , conforme Figura 2.2.

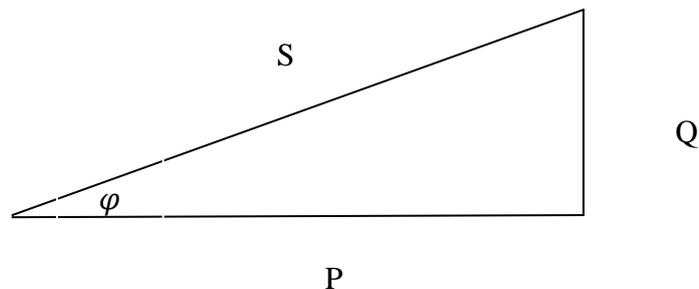


Figura 2.2-Triângulo das potências incrementado do ângulo entre P e S

Analisando a figura, vê-se que conforme há um aumento da potência reativa Q , aumenta também o valor da potência aparente bem como o ângulo φ . Na prática, deseja-se que o ângulo φ seja o menor possível.

A potência tem como valor médio $P = V_{ef} I_{ef} \cos\varphi$, medido em Watt tanto para circuitos indutivos como para capacitivos. **Denomina-se fator de potência ao cosseno do ângulo φ** (Mamede Filho, 2007).

Um circuito com característica indutiva possui um valor de potência reativa e um fator de potência representativo. Para que se consiga baixar o valor da potência reativa coloca-se no circuito capacitores que baixam o valor da potência reativa.

Como $0 \leq \cos\varphi \leq 1$, calcula-se o capacitor que aproxime $\cos\varphi$ do valor 1.

Atenção especial deve ser dada no que se refere ao fator de potência baixo. O fator de potência baixo pode trazer sérios problemas numa instalação, como por exemplo, aquecimento dos condutores devido à maior corrente demandada, por isso pode ser corrigido com a instalação de capacitores (Flarys, 2006).

Na realidade, toda instalação fica afetada por valores baixos do fator de potência. Não somente a instalação do consumidor, mas também toda rede de distribuição necessita estar dimensionada para transportar essa energia.

Numa instalação em que várias cargas fazem parte do sistema do consumidor, essas cargas aparecem em paralelo. Nesse caso, a potência aparente total S é a soma de todas as potências aparentes das cargas (Flarys, 2006, p. 108) e para cálculo do $\cos\varphi$ utiliza-se a Equação 2.28:

$$\cos\varphi = \frac{\sum P}{\sqrt{\sum P^2 + \sum Q^2}} \quad 2.28$$

Com a colocação adequada de capacitores, ligando-os em paralelo, consegue-se alterar o fator de potência de uma instalação. Como as instalações normalmente são indutivas, o fator de potência é indutivo e Q terá sinal +. Com a instalação de capacitores há a compensação, porém os capacitores não devem ficar conectados à rede sem que a carga esteja ligada. Do

contrário passa-se a ter um fator de potência capacitivo e Q de sinal “-“ . Nesse caso o consumidor passa a fornecer potência reativa à rede, o que é indesejável (Flarys, 2006).

2.4.1 Tarificação Brasileira Relativa ao Fator de Potência

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) através da Resolução nº 456, de 29 de novembro de 2000 estabelece disposições relativas às condições gerais de fornecimento de energia elétrica a serem observadas tanto pelas concessionárias e permissionárias quanto pelos consumidores (Mamede Filho, 2007).

No parágrafo relativo à correção do fator de potência é definido o fator de potência de referência “ fr ”, indutivo ou capacitivo, tendo como limite mínimo permitido, para as instalações elétricas das unidades consumidoras, o valor de $fr = 0,92$.

Tanto a energia reativa como a capacitiva excedentes são medidas e faturadas. O fator de potência deve permanecer controlado dentro dos limites estabelecidos de 0,92 indutivo e 0,92 capacitivo durante 24 horas. A avaliação é feita da seguinte maneira:

- Mede-se Energia reativa indutiva medida de 6 às 24 horas, a cada hora;
- Mede-se Energia reativa capacitiva de 0 às 6 horas, a cada hora;
- Das 0 às 4 horas paga-se o excedente de energia reativa capacitiva inferior a 0,92;
- Das 6 às 11 horas paga-se o excedente de energia reativa indutiva inferior a 0,92;
- Das 11 às 13 horas, independente do valor capacitivo, o excedente de energia capacitiva não é pago;
- Das 13 às 20 horas paga-se o excedente de energia reativa indutiva inferior a 0,92; e
- Das 20 às 24 horas, independente do valor capacitivo, o excedente de energia capacitiva não é pago.

Ainda segundo a legislação, para cada kWh de energia ativa consumida a concessionária permite utilização de 0,425 kVARh sem acréscimo. Os dias de sábado, domingo e feriados não são considerados na avaliação do faturamento (Mamede Filho, 2007, p. 179).

A avaliação do fator de potência pode, ainda, ser feita de duas formas:

- a) Avaliação horária: durante o ciclo de faturamento o fator de potência é calculado de hora em hora.

O faturamento da demanda e do consumo de energia reativa excedente é determinado pelas Equações 2.29 e 2.30 (Mamede Filho, 2007):

$$F_{drp} = \left[\max_{t=1}^n \left(D_{at} \cdot \frac{0,92}{F_{pp}} \right) - D_{fp} \right] \cdot T_{dap} \quad 2.29$$

$$F_{erp} = \sum_{t=1}^n \left[C_{at} \cdot \left(\frac{0,92}{F_{pp}} - 1 \right) \right] \cdot T_{eap} \quad 2.30$$

onde:

F_{drp} é o faturamento da demanda de potência reativa excedente;

F_{erp} é o faturamento de consumo de energia reativa excedente;

D_{at} é a demanda de potência ativa (kW) a cada intervalo de uma hora;

D_{fp} é a demanda de potência ativa (kW) faturada;

T_{dap} é a tarifa de demanda de potência ativa em R\$/kW;

C_{at} é o consumo de energia ativa medido (kWh) a cada intervalo de uma hora;

T_{eap} é a tarifa de energia ativa em R\$/kW;

\max é a função que indica maior valor da expressão $D_{at} \cdot \frac{0,92}{F_{pp}}$ no período de uma hora;

t é o período de uma hora;

n é o número de períodos de uma hora por posto horário; e

p é o posto tarifário.

Para cálculo do fator de potência horário usa-se a Equação 2.31:

$$F_{pp} = \cos \operatorname{arctg} \left(\frac{E_{rh}}{E_{ah}} \right) \quad 2.31$$

sendo:

E_{rh} a energia reativa indutiva ou capacitiva medida no período de uma hora; e

E_{ah} a energia ativa medida no período de uma hora.

- b) Avaliação mensal: o cálculo é feito pelos valores de energia ativa e reativa medidos durante o ciclo de faturamento, de 30 dias.

Para essa forma de avaliação o faturamento pode ser calculado pelas Equações 2.32 e 2.33:

$$F_{dr} = \left(D_{am} \cdot \frac{0,92}{F_p} - 1 \right) \cdot T_{da} \quad 2.32$$

$$F_{er} = C_{am} \cdot \left(\frac{0,92}{F_p} - 1 \right) T_{ea} \quad 2.33$$

onde:

F_{dr} é o faturamento da demanda de energia reativa excedente;

F_{er} é o faturamento do consumo de energia reativa excedente;

D_{am} é a demanda de potência ativa máxima no mês;

C_{am} é o consumo de energia ativa no mês;

D_f é a demanda de potência ativa faturável no mês;

T_{da} é a tarifa de demanda de potência ativa;

T_{ea} é a tarifa de energia ativa; e

F_p é o fator de potência médio mensal.

F_p pode ser calculado pela Equação 2.34:

$$F_p = \frac{C_{am}}{\sqrt{C_{am}^2 + C_{rm}^2}} \quad 2.34$$

em que:

C_{am} é o consumo de energia ativa no mês; e

C_{rm} é o consumo de energia reativa no mês.

(Mamede Filho, 2007, p. 179/184)

2.4.2 Comparativo dos Diversos Modelos Tarifários

Em algumas atividades industriais, o consumo de energia elétrica é elevado e representa significativamente a parcela de maior peso na composição dos preços. Dessa maneira a economia de energia elétrica torna-se imperativa e o preço médio da tarifa é um dado importantíssimo.

A legislação estabelece ao longo do ano quatro horários diferenciados para cálculo da tarifa. Esses períodos são (Mamede Filho, 2007):

- Horário de ponta de carga: No período entre 17 e 22 horas de cada dia de semana, com exceção de sábados, domingos e feriados, definida pela concessionária conforme características da carga do sistema elétrico;

- Horário fora de ponta de carga: O restante das outras 21 horas diárias, adicionadas as 24 horas de sábados, domingos e feriados. Os horários mencionados estão também inseridos nos períodos definidos a seguir, em função do nível pluviométrico das regiões onde se localizam as bacias hidrográficas e usinas hidrelétricas:
 - a) Período úmido: Período entre 1º de dezembro e 30 de abril em que são efetuadas leituras de consumo e demanda durante os sete meses; e
 - b) Período seco: Período entre 1º de maio e 30 de novembro quando são feitas leituras de consumo e demanda durante os sete meses.

A partir das definições desses períodos, a estrutura tarifária do Grupo A com tensão igual ou superior a 2,3 kV ficou segmentada nas seguintes classificações:

- Tarifa azul: aplicação de preços diferenciados de demanda e consumo de energia de acordo com as horas do dia e períodos do ano, obedecendo a segmentos horo-sazonais. No cômputo da demanda preços diferenciados para horário de ponta e fora de ponta. O valor faturado é o maior dentre a demanda contratada e a registrada. O consumo considera horário de ponta em período seco e úmido e horário fora de ponta em período seco e úmido;
- Tarifa verde: aplicação de preços diferenciados para consumo e demanda conforme a tensão e características do consumidor. Para a demanda um preço único para horário de ponta e fora de ponta. O faturamento da demanda considera o maior valor entre demanda contratada e registrada. O consumo considera horário de ponta em período seco e úmido e horário fora de ponta em período seco e úmido;
- Tarifa convencional: Aplicação de preços diferenciados para demanda e consumo. Para a demanda um preço único para horário de ponta e fora de ponta. A demanda faturada é o maior valor entre demanda contratada, demanda faturada e 10% da maior demanda dos últimos 11 ciclos faturados anteriormente. O consumo considera preço único para horário de ponta e fora de ponta; e
- Tarifa de ultrapassagem: Aplicada à parcela que supera as demandas contratadas no segmento horo-sazonal da tarifa azul ou demanda única contratada na tarifa verde.

Existem opções para os consumidores com tensão de fornecimento a partir de 69 kV e conforme os volumes de demandas. Estes podem optar pelas tarifas azul, verde e convencional, conforme critérios estabelecidos.

As tarifas de energia elétrica no Brasil não são padronizadas e cada região apresenta tarifas diferenciadas.

Para cálculo da tarifa média no grupo convencional usa-se a Equação 2.35:

$$P_{me} = \frac{TD}{F_{cm} \times 730} + TC \quad 2.35$$

sendo:

TC – tarifa de consumo de energia elétrica; e

TD – tarifa de demanda de energia elétrica.

2.5 APLICAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA NA INDÚSTRIA E COMÉRCIO

A energia elétrica faz parte de praticamente todas as atividades, tanto nas residências como na indústria e no comércio. Mesmo atividades, outrora artesanais, hoje se utilizam da energia elétrica não só para acelerar o processo como também automatizá-lo.

Na indústria as aplicações são amplas:

- Indústria automotiva – processos automatizados;
- Processos industriais sofisticados com máquinas dotadas de motores, compressores e máquinas especiais;
- Iluminação especial de galpões e instalações de produção;
- Controle de temperatura e umidade de processos de produção;
- Fabricação de ligas metálicas e artigos metálicos;
- Fabricação de tecidos, roupas e processos de estamparia;
- Emissoras de Rádio e TV;
- Processos industriais na produção de alimentos;

- Fabricação de artigos de limpeza em geral e cuidados pessoais;
- Indústrias Químicas fabricantes de matéria prima;
- Indústrias Farmacêuticas;
- Fabricação de componentes e acessórios para instalações eletroeletrônicas;
- Fabricação de eletrodomésticos;
- Fabricação de móveis e utensílios domésticos; e
- Impressão gráfica (jornais, revistas e serviços gráficos).

Várias outras aplicações podem ser citadas com grande aplicação da energia elétrica na indústria tanto nos processos de produção de bens, como nos processos de controle de qualidade e condições ambientais.

No comércio temos também oportunidade de observar muitas aplicações da energia elétrica:

- Shopping Centers onde se localizam centenas de lojas, restaurantes e serviços. A própria iluminação e o sistema de elevadores e escadas rolantes são prova da grande utilização de energia elétrica.
- Supermercados – setores de refrigeração, iluminação e controle.
- Comércio do gênero alimentício com padarias, açougues, bares e restaurantes.
- Comércio de lazer e diversões – parques de diversão, boates, lan houses, cinemas.
- Comércio formal: papelarias (máquinas copiadoras), escritórios de advocacia, engenharia, locadoras e empresas administradoras de imóveis.
- Lojas de departamentos com comércio de artigos pessoais.

2.5.1 Tipos de Cargas Industriais e Comerciais

A indústria em geral utiliza-se de equipamentos elétricos acoplados a dispositivos mecânicos tais como motores acoplados a máquinas participantes de processos de produção. São ainda utilizados fornos industriais, ventiladores nos processos de produção, centrais de climatização, câmaras frigoríficas e equipamentos de iluminação e compressores utilizados em larga escala nos processos de pintura e também nas ferramentas a ar comprimido.

No comércio, os equipamentos de ar condicionado e iluminação contribuem bastante para o consumo da energia elétrica. Equipamentos frigoríficos, escadas rolantes, elevadores e pequenos fornos elétricos fazem parte também dos equipamentos consumidores de energia elétrica.

As cargas utilizadas tanto pela indústria como pelo comércio são de três tipos:

- Cargas resistivas;
- Cargas capacitivas; e
- Cargas indutivas.

Cada equipamento pode apresentar um ou mais tipos de cargas.

2.5.1.1 Cargas resistivas

Responsáveis pela potência ativa, as cargas resistivas são as que consomem energia elétrica e a transformam em trabalho e outra parte perde-se sob forma de calor. Determinados equipamentos indicam prontamente o tipo de carga presente. Como exemplo desse tipo de carga tem-se as lâmpadas incandescentes. Pequenos fornos e aquecedores de ambiente a resistência elétrica também se enquadram nesse tipo de carga.

Entretanto, entende-se que nenhum condutor tem resistência zero. Por essa razão, todos os equipamentos que utilizam enrolamentos tais como motores, compressores, transformadores também têm a sua carga resistiva perdendo parte da energia consumida sob forma de efeito Joule.

Nesse tipo de carga não há defasagem entre a tensão aplicada e a corrente.

2.5.1.2 Cargas capacitivas

Cargas capacitivas são comuns em motores síncronos superexcitados (compensadores síncronos), banco de capacitores e em situações onde há condutores elétricos enterrados. Tais cargas são mais comumente encontradas na indústria. Apresentam impedância reativa tipo capacitiva. Sua característica é o avanço da corrente em relação à tensão aplicada.

2.5.1.3 Cargas indutivas

As cargas indutivas são as mais encontradas tanto na indústria como no comércio. São constituídas de enrolamentos. Na grande maioria dos casos são motores, compressores e transformadores os responsáveis por esse tipo de carga. Apresentam uma impedância reativa do tipo indutiva e podem ser compensadas. Sua característica é o atraso da corrente em relação à tensão aplicada.

2.5.2 Efeitos das Cargas na Energia Elétrica

Os efeitos das cargas na energia elétrica podem ser descritos e classificados por tipo de carga:

- Carga resistiva: caracteriza-se por transformar a potência absorvida e transformá-la em trabalho e parte em calor. A parte da energia transformada em calor geralmente não é utilizada.
- Carga capacitiva: a carga capacitiva deve ser evitada por comprometer a rede interna e de distribuição. Capacitâncias parasitas podem provocar alterações e mesmo defeitos em equipamentos. A potência absorvida pela carga capacitiva é devolvida prontamente à rede de alimentação. Pode causar também aumento de tensão nas cargas em paralelo, ocasionando defeito nas mesmas.
- Cargas indutivas: a carga indutiva é a mais comum dentre todas. Sempre que temos um enrolamento, teremos uma carga indutiva. Sua característica é o atraso da corrente em relação à tensão aplicada. A potência desenvolvida é reativa indutiva. Há oscilação da energia entre a carga e a fonte de tensão. Isso trás prejuízos para a distribuição, uma vez que essa energia não é consumida, mas circula pelos condutores. Esse tipo de carga acarreta perda Joule elevada (aquecimento) no sistema de transmissão e

distribuição por estarem distantes da fonte geradora de tensão (Mamede Filho, 2007, p. 176).

2.5.3 Impacto Econômico e de Qualidade da Energia em Função das Cargas

Sendo a energia reativa indesejável, pois não realiza trabalho, avalia-se que instalações mal projetadas e com baixo fator de potência causam prejuízo operacional e também impacto econômico e de qualidade da energia. Os sistemas de transmissão e distribuição necessitam ser superdimensionados para poder suprir essa energia e perdem em termos de qualidade, pois deixam de atender a outros clientes que necessitam de energia estável, que será utilizada para realizar trabalho.

Se a correção do fator não for providenciada, o consumidor passa a ter despesas maiores, pois a empresa fornecedora de energia fatura valores para o excedente em potência reativa.

A qualidade da energia também fica comprometida, pois a energia reativa não é consumida, mas a concessionária tem que dispor condutores na rede de distribuição com capacidade para transporte dessa energia. Com o transporte dessa energia há o aquecimento de cabos com a perda Joule e conseqüentemente outros consumidores poderão não ser atendidos.

2.6 CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

O mínimo aceitável para o fator de potência é de 0,92 capacitivo ou 0,92 indutivo, devendo ser corrigido caso seja menor que esses valores.

Para correção do fator de potência é necessário estudo da instalação, com medições para coleta dos valores. Após coleta dos dados e através da análise verifica-se a necessidade da correção do fator de potência para valores mais adequados.

Como causa do baixo fator de potência temos (Mamede Filho, 2007, p. 178/179):

- Motores de indução trabalhando a vazio durante longos períodos;
- Motores superdimensionados para as máquinas a eles acoplados;

- Transformadores operando a vazio ou em carga leve;
- Muitos reatores com baixo fator de potência;
- Fornos a arco;
- Forno de indução eletromagnética;
- Máquina de solda a transformador;
- Equipamentos eletrônicos; e
- Grande número de motores de pequena potência operando por longo período.

Estuda-se a solução mais adequada a ser adotada em cada caso, sempre com o objetivo de se obter um compromisso não oneroso e que também atenda à legislação.

Para medida do fator de potência pode-se fazer a medição de maneira direta ou indireta.

A medição direta pode ser feita com instrumento apropriado para essa finalidade denominado “analisador de energia”, que fornece dados e armazena informações em períodos de até dez dias. Esse instrumento tem interface para ser utilizado em conjunto com microcomputador. Dessa forma podem-se acompanhar as variações dos parâmetros (Mamede Filho, 2007).

Pode-se também efetuar a medição indireta, com dois instrumentos, um wattímetro e kVAmetro.

Com as medidas de kVAR e kW efetuadas substituem-se os valores na Equação 2.36:

$$tg\varphi = \frac{kVAR}{kW} \quad 2.36$$

Esse valor é da tangente de φ .

Pode-se então, entrar na tabela trigonométrica e localizar o ângulo φ e o coseno φ

É possível também efetuar as medidas de kW e kVA e entrar com os valores diretamente na Equação 2.37:

$$\text{fator de potência} = \frac{kW}{kVA} \quad 2.37$$

2.6.1 Dispositivos e Técnicas

Para aumento do fator de potência pode-se recorrer, de forma mais prática, a dois dispositivos:

- Motores síncronos superexcitados; e
- Instalação de banco de capacitores.

Logicamente a análise da instalação serve para se adotar a opção mais correta para o caso. Qualquer que seja a opção, a instalação do dispositivo deve ser a mais próxima possível da carga a ser corrigida.

A utilização de motor síncrono superexcitado é solução adotada em muitas instalações, pois o motor síncrono além de suprir suas próprias necessidades em kVAr, ainda fornece à rede parte da potência reativa necessária. O presente trabalho não contempla a correção do fator de potência através do motor síncrono.

Os capacitores por sua vez, armazenam energia durante a fase de crescimento positivo do ciclo e devolvem-na à rede quando da inversão do mesmo.

Para cálculo dos valores dos capacitores, após a medição estipula-se a correção necessária em função da potência reativa, adotando-se o $\cos \varphi$ escolhido.

2.6.2 Correção Carga Individual X Correção em Grupos

Na instalação pode-se efetuar a correção carga-a-carga ou em grupos de equipamentos (Mamede Filho, 2007):

- Correção carga-a-carga: Na correção carga-a-carga verifica-se a potência reativa a ser corrigida para cada equipamento e procede-se ao cálculo do valor do capacitor, que deve estar instalado o mais próximo possível de

cada carga. Dessa forma, cada carga quando em operação estará com o fator de potência corrigido; e

- Correção em grupos: pode ser feita também a correção em grupos de equipamentos. Nesse caso, após as medições estudam-se horários em que a operação concomitante de grupos de equipamentos compromete o valor mínimo permitido do fator de potência. Verifica-se então a possibilidade de efetuar a inserção de capacitores corrigindo grupos de equipamentos em horários críticos.

Tanto para a correção carga-a-carga como para a correção em grupo, o capacitor ou banco de capacitores deve estar desconectado da rede após o desligamento da carga como forma de se evitar que o mesmo comece a fornecer energia reativa capacitiva.

2.6.2.1 Dispositivos para correção individual

Dependendo da característica de operação dos equipamentos, a correção individual pode ser adotada em casos onde haja vantagem nesse tipo de instalação. Há casos onde a substituição de motor de indução por motor síncrono pode ser vantajosa, pois ao mesmo tempo em que o motor síncrono desempenha a mesma função, ainda fornece potência reativa à rede. A substituição há que ser analisada também pelo aspecto financeiro (Mamede Filho, 2007).

Para correção através de capacitor ou banco de capacitores, procede-se à medição e cálculo do valor capacitivo mais adequado.

Os capacitores podem se colocados na configuração em série ou paralelo para atender o valor calculado.

2.6.2.2 Dispositivos para correção em grupos

De acordo com a operação do sistema, podem-se estabelecer grupos de equipamentos que conjuntamente necessitem de correção. Calcula-se então o valor do capacitor para correção.

Esse valor capacitivo fixo corrige somente os equipamentos daquele grupo em particular. Pode ser providenciada a energização e desligamento do capacitor na mesma chave do motor (Mamede Filho, 2007).

2.6.3 Correção Automática X Correção Fixa

A correção automática é feita com base em circuito microcontrolado. Previamente são feitas medições e análise das instalações e equipamentos. A seguir já com os valores a serem corrigidos são calculados os valores dos capacitores que compoem o banco de capacitores. O circuito microcontrolado faz análise e insere/retira os capacitores do banco à medida que a potência reativa oscila na rede. Dessa forma obtém-se o fator de potência dentro de valores permitidos pela legislação sem problemas maiores para a operação da indústria.

Na correção fixa estudam-se quais equipamentos necessitam de correção e qual valor adequado dos capacitores. Os capacitores são então montados de forma a atender somente os equipamentos especificados no projeto. Nesse tipo de correção os capacitores entram em operação na energização do circuito a ser controlado e não podem permanecer conectados após a desconexão dos equipamentos da rede.

2.6.3.1 Mudança da rotina de operações

A partir da constatação dos períodos diários em que o valor do fator de potência atinge limites da situação crítica, podem-se estabelecer rotinas diárias de operação visando controlar dessa maneira os valores. Assim, a operação de grupos de determinadas máquinas pode ser desvinculada de outras, conseguindo estabilizar naquele horário um valor do fator de potência que seja satisfatório.

O fator de potência só pode se corrigido após providencias administrativas, como a seguir (Mamede Filho, 2007, p. 213):

- Desligar da rede motores operando em vazio;

- Na condição de carga leve, manter energizados os transformadores que mantém a carga; e
- Substituir motores superdimensionados.

2.6.3.2 Capacitores-derivação

Capacitor-derivação é o capacitor instalado em paralelo com a carga.

A função de um capacitor derivação é fornecer a potência reativa necessária ao funcionamento de máquinas e equipamentos. Eles fornecem a corrente necessária para compensar a componente defasada nas cargas indutivas (Mamede Filho, 2007).

Os capacitores-derivação, quando instalados em sistemas industriais, corrigem o fator de potência, com suas vantagens financeiras, além de benefícios adicionais de liberação de capacidade, diminuição de perdas e melhoria da tensão. Os capacitores-derivação instalados funcionam como uma fonte de potência reativa localizada, utilizando a energia acumulada ao invés de utilizar energia do sistema supridor, evitando perdas na geração e transmissão (Mamede Filho, 2007, p. 213). Com a instalação dos capacitores-derivação verificam-se melhorias em equipamentos elétricos e circuitos.

Alguns fatores influem na escolha da localização dos capacitores, como:

- Os circuitos da instalação;
- Comprimento dos cabos;
- As variações da carga;
- Os tipos de motores; e
- Distribuição das cargas.

Sempre que possível, os capacitores devem ser instalados o mais próximo da carga. Porém, nem sempre esse tipo de ligação é viável física ou economicamente.

Os capacitores podem ser instalados nas configurações (Mamede Filho, 2007):

- Correção na entrada da energia de alta tensão: em função do custo unitário (por kVAr) dos capacitores para baixa tensão ser maior que os de alta tensão, pode haver alguma vantagem econômica inicial na instalação de capacitores no lado primário dos transformadores, embora, neste caso, não haja liberação de capacidade nos

transformadores. Normalmente, os bancos de capacitores em alta tensão são fixos ou de acionamento manual devido ao alto custo dos bancos automáticos;

- Correção na entrada da energia de baixa tensão: permite uma correção bastante significativa, normalmente com bancos automáticos de capacitores. Utiliza-se este tipo de correção em instalações elétricas com elevado número de cargas com potências diferentes e regimes de utilização pouco uniformes. A principal desvantagem consiste em não haver alívio sensível dos alimentadores de cada equipamento;
- Correção por grupos de cargas: o capacitor é instalado de forma a corrigir um setor ou um conjunto de pequenas máquinas. É instalado junto ao quadro de distribuição que alimenta esses equipamentos. Tem como desvantagem não diminuir a corrente nos circuitos de alimentação de cada equipamento. Para que se possa aplicar a correção por grupo, é necessário que os capacitores (ou bancos de capacitores) sejam dotados de dispositivos de proteção e manobra, como fusíveis e chaves e que a carga a corrigir apresente um mínimo de uniformidade;
- Correção localizada: tecnicamente, é a melhor solução. Os capacitores devem ser instalados o mais perto possível das cargas, ou nas extremidades dos circuitos alimentadores, por três razões:
 - a) Redução das perdas nos circuitos entre as cargas e os pontos de medição.
 - b) Elevação da tensão perto da carga, melhorando as condições de trabalho desta.
 - c) Liberação de capacidade nos transformadores.
- Correção mista: é a solução que atende aspectos técnicos, práticos e financeiros.

Para correção mista utilizam-se os seguintes critérios:

 - a) Um capacitor fixo é instalado no secundário do transformador;
 - b) Motores de aproximadamente 10 CV ou mais, são corrigidos localmente;
 - c) Motores com menos de 10 CV são corrigidos por grupos;
 - d) Redes próprias para iluminação usando reatores de baixo fator de potência a correção é feita na entrada da rede; e
 - e) Na entrada instala-se um banco automático de pequena potência para equalização final.

Por vezes é necessário ligar ou desligar automaticamente capacitores a fim de que sejam evitadas sobretensões durante os períodos de carga leve. Isto acontece com mais frequência quando os capacitores estão localizados nas extremidades de linhas longas ou quando ocorrem consideráveis flutuações de carga ou tensão.

Os capacitores podem ser acionados em função da tensão da rede, da corrente de carga ou da energia reativa (kVAr) da carga. Os modernos controladores microprocessados permitem a verificação de diversos parâmetros do sistema para o acionamento correto dos capacitores.

A necessidade de operar os capacitores em estágios, assim como o número de estágios, é determinada pelo tamanho dos capacitores com relação ao circuito e à carga, e o efeito total dos capacitores.

As medições da potência ativa (kW), potência reativa (kVAr) e tensão, durante um período típico, determinarão:

- A potência reativa necessária em carga máxima;
- A potência reativa necessária em de carga mínima;
- A potência reativa a ser ligada; e
- A potência reativa máxima que pode ser ligada concomitantemente.

Ao contrário da maioria dos equipamentos elétricos, os capacitores-derivação, quando energizados, funcionam permanentemente a plena potência. A sobrecarga e o aquecimento diminuem sua vida útil e conseqüentemente as condições de funcionamento.

Uma capacitância instalada num sistema pode produzir condições insatisfatórias de funcionamento como, por exemplo, amplificação de harmônicas, autoexcitação das máquinas, sobretensão de manobra, funcionamento insatisfatório dos equipamentos de telecomando, portanto, devem-se considerar esses fatos quando da sua utilização.

2.6.3.3 Bancos de capacitores

O banco de capacitores é uma configuração de vários capacitores com a finalidade de corrigir o fator de potência de determinado equipamento ou grupo de equipamentos e é a solução mais empregada para correção (Flarys, 2006).

No período de 0 h até 6 h, a manobra do banco não deve permitir fator de potência capacitivo para evitar faturamento de energia capacitiva excedente. A partir das 6 h até 24 h, o banco deve ser conectado para evitar-se faturamento de energia reativa indutiva.

O dimensionamento do banco de capacitores pode ser feito para operação fixa e controlada. O banco fixo atende em geral a cargas que não tem grandes variações ao longo do

dia ou também como o reativo capacitivo mínimo diário. Pode ser determinado pelos métodos (Mamede Filho, 2007):

- Analítico: método do triângulo de potências - Através da Equação 2.38 e ilustrado na Figura 2.3.

$$P_c = P_{at}(tg\varphi_1 - tg\varphi_2) \quad 2.38$$

onde

P_c é a potência reativa a ser inserida com o banco de capacitores.

P_{at} é a potência ativa da carga.

$tg\varphi_1$ é a tangente do ângulo depois da correção.

$tg\varphi_2$ é a tangente do ângulo antes da correção.

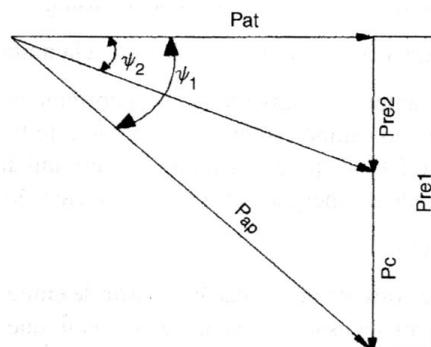


Figura 2.3-Método analítico de cálculo de potência dos capacitores
(FONTE: Mamede Filho, 2007, p. 214)

- Tabular: semelhante ao analítico. Este método ilustrado na Figura 2.4. A partir do valor do fator de potência original obtém-se numa tabela específica o valor do fator de potência a ser corrigido. Aplica-se o valor encontrado (Δtg) diretamente na Equação 2.39:

$$P_c = P_{at}\Delta tg$$

2.39

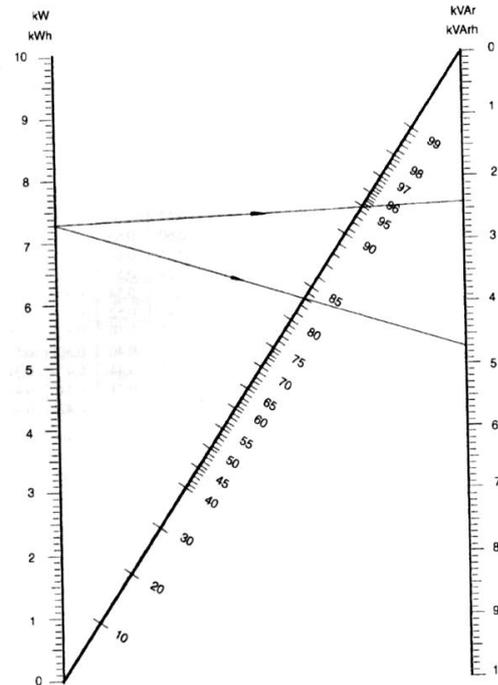


Figura 2.4-Método tabular de cálculo dos capacitores de correção
(FONTE: Mamede Filho, 2007, p. 216)

O banco de capacitores automático é calculado da mesma maneira que o banco fixo. É utilizado em instalações industriais que tem razoável variação da potência reativa ou em processos onde o fator de potência tem que ser mantido numa faixa muito estreita. Existe limitação na potência capacitiva chaveada em bancos automáticos com o objetivo de reduzir correntes de surto quando da energização de cada célula capacitiva. A capacidade dos capacitores tem limite como forma de se evitar sobretensões e defeitos transitórios quando seu emprego junto de motores formando uma unidade. A corrente do capacitor não deve exceder a corrente de magnetização do motor em vazio (Creder, 2000, p. 316).

A ligação dos capacitores em sistemas trifásicos pode ser em triângulo-série ou paralelo ou também estrela-série ou estrela-paralelo.

2.6.3.4 Motores síncronos

Um motor síncrono pode ser instalado acoplado a uma carga ou para correção do fator de potência por fornecer potência reativa capacitiva à rede. Nessa função ele deve funcionar para correção com uma carga constante. O custo e a dificuldade operacional restringem seu uso.

Na função de correção do fator de potência, pode operar em três condições (Mamede Filho, 2007, p. 213):

- Motor subexcitado: Baixa corrente de excitação. A corrente no estator fica defasada em relação à tensão, consumindo potência reativa da rede para formação do campo magnético
- Motor excitado para condição de fator de potência 1: Aumentando-se a corrente de excitação há um aumento da f.e.m. no estator e corrente fica em fase com a tensão.
- Motor sobreexcitado: Aumentando mais a corrente de excitação o motor irá fornecer potência reativa à rede, em virtude do adiantamento da corrente do estator em relação à tensão.

CAPÍTULO 3 REFERENCIAL TECNOLÓGICO

Todo grande progresso da ciência resultou de uma nova audácia da imaginação.

John Dewey

Nem só de teoria se faz um projeto funcional, portanto é necessário o conhecimento prévio de alguns componentes tecnológicos, dado que eles são a interface teórico-prática, e seguem modelagens lógicas e matemáticas correspondentes às teorias empregadas no capítulo anterior. Neste capítulo, são abordados genericamente alguns componentes e modelagens utilizadas ao longo de todo o texto.

A aplicação de diversas partes da engenharia, pelo menos no ramo da elétrica e computação, envolve ainda, o conhecimento fundamental de sinais e sistemas. Os sinais estão presentes diariamente em nossas vidas, representados nas mais diversas formas, como a fala, batimentos do coração, pressão atmosférica, etc. Segundo (Haykin & Van Veen, 2001, p. 22), um sinal é definido formalmente por “uma função de uma ou mais variáveis, a qual veicula informações sobre a natureza de um fenômeno físico”.

Num sistema de automação e controle, área de concentração deste trabalho, alguns blocos de mais alto nível podem ser definidos como subsistemas, agrupando, desta forma, os diversos componentes nesses conjuntos, que em sinergia trabalham cooperativamente para executar uma função. Em (Haykin & Van Veen, 2001, p. 22) define-se ainda, sistema como sendo “uma entidade que manipula um ou mais sinais para realizar uma função, produzindo, assim, novos sinais”. Essa organização tem por finalidade facilitar a pesquisa e compreensão de algum aspecto tecnológico de forma a entender não só um componente, mas também a sua função em todo o sistema e não de forma avulsa.

3.1 BLOCO DE ENTRADA E CONDICIONAMENTO

É neste bloco que se dá a conexão de todo o sistema à rede de distribuição. No Brasil temos os sistemas monofásicos, bifásicos e trifásicos de energia elétrica. Grande parte da população brasileira é atendida pelo sistema monofásico pelas concessionárias, por se tratar de consumidores domésticos e de baixa renda. Outros tantos são atendidos com duas fases e

outra parcela bastante importante, onde se tem a maior parte do consumo, e na categoria que se encontram as indústrias e comércios, tem-se o sistema trifásico.

Em um sistema monofásico pode-se ter ligações feitas com dois ou três condutores. No caso de dois condutores, tem-se um denominado “Fase” e outro, “Neutro”. Esse é o sistema F-N. A três condutores uma derivação central do secundário do transformador de distribuição cria dois pontos distintos de potenciais, cada um com metade da diferença de potencial total do secundário referenciados à derivação central do secundário do transformador.

Já no sistema trifásico podem-se ter três tipos de ligações: a três condutores (3F), a quatro condutores (3F-N) e a cinco condutores (3F-N-T). No sistema 3F, geralmente utilizado em instalações industriais onde existe grande carga de motores, as ligações podem ser em Y(estrela) ou Δ (delta ou triângulo), e entre cada condutor Fase pode-se ter os potenciais 220 V, 380 V ou 440 V. No sistema 3F-N, utilizado nas instalações elétricas comerciais e industriais de pequeno porte, o ponto neutro costuma ser aterrado e utiliza-se uma configuração estrela. Já no sistema 3F-N-T, sistema para médio e grande porte, vê-se a configuração estrela com ponto neutro aterrado e um condutor de proteção denominado PE (Mamede Filho, 2007).

3.1.1 Medição das Grandezas Tensão e Corrente

As propriedades as quais se tem interesse ao se falar de energia elétrica em corrente alternada podem ser conhecidas a partir da obtenção de duas principais grandezas e suas formas de onda, que definem os diversos valores dessas grandezas em relação ao tempo.

A corrente alternada, desde sua geração até o consumo, passa por linhas de transmissão, e por causa desse fato, são realizadas diversas conversões de nível de tensão, visando diminuir a perda no transporte de toda a energia por essas longas distâncias. Aliado a isso, tem-se que as linhas de transmissão, muitas vezes são percorridas por correntes bastante altas, o que dificulta a medição, pois elementos de alta potência teriam de ser inseridos na linha para medir o que se pretende. Porém, a corrente elétrica alternada, através da sua propriedade de geração de campo eletromagnético em bobinas, permite a transformação de corrente elétrica em campo magnético e também o caminho de volta, possibilitando ainda, a transformação de frações dessa energia. O elemento que realiza tal operação é o transformador, que pode ser de

vários tipos: de potencial, corrente, acoplamento, etc. Dessa forma se dão as conversões citadas anteriormente (de Medeiros Filho, 1997).

Uma tensão considerada bastante alta, ou ainda, uma corrente, pode através das técnicas de medição utilizando transformadores, vir a serem medidas de forma segura e com amplitudes adequadas aos instrumentos, sejam eletromecânicos ou puramente eletrônicos. Para isso, os elementos magnéticos precisam ser estudados e se ter conhecimento das suas capacidades, sejam elas: relação de transformação, corrente nominal, corrente de saturação, etc.

As relações de transformação, assim como outras características, são propriedades intrínsecas aos métodos, formas e materiais de construção dos elementos magnéticos, e logo, não se pretende aqui descrever como projetar um elemento magnético, mas sim, utilizando as informações disponibilizadas por seus fabricantes, projetar o bloco do sistema que possa aproveitar as suas características. Os elementos de circuitos magnéticos utilizados nesse trabalho são descritos a seguir, e são dois tipos de transformadores: Transformador de Potencial e Transformador de Corrente.

3.1.2 Transformador de Potencial (TP)

Um Transformador de Potencial pode ser descrito como “um transformador para instrumento 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” (de Medeiros Filho, 1997, p. 29). Os TP são considerados redutores de tensão, pois têm como entrada tensões elevadas e normalmente baixas tensões em seu secundário. Um TP segue a mesma teoria genérica dos transformadores de potência, ou seja, representa o acoplamento através de um circuito magnético de dois circuitos elétricos. Com o desenvolvimento da instrumentação digital, esses transformadores puderam ser incluídos em projetos de medição digitais, porém seus enrolamentos secundários passam a ser ligados à entrada de conversores analógico-digitais.

Os circuitos denominados primário e secundário compõem-se de enrolamentos de fios de cobre, e o número de espiras é dado por n_1 , relacionado ao primário e n_2 , relacionado ao secundário e ainda, $n_1 \neq n_2$. O circuito dito magnético é chamado “núcleo” e é composto de

placas justapostas de material ferromagnético, sendo estas isoladas umas das outras afim de evitar o efeito da perda por correntes de Foucalt. Considerando ainda, u_1 uma tensão alternada aplicada ao primário do transformador e U_1 seu valor eficaz, tem-se que uma corrente circulando no primário gera um fluxo magnético φ , de valor eficaz Φ e que é incluso nos dois circuitos elétricos simultaneamente. Assim, as forças eletromotrizes do primário e_1 e secundário e_2 podem ser descritas da seguinte forma dada pelas Equações 3.1 e 3.2 (de Medeiros Filho, 1997):

$$e_1 = -n_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad 3.1$$

$$e_2 = -n_2 \frac{d\varphi}{dt} \quad 3.2$$

Como

$$\varphi = \Phi_m \text{sen}(\omega t) \quad 3.3$$

Logo,

$$\begin{cases} e_1 = -n_1 \omega \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \\ e_2 = -n_2 \omega \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad 3.4$$

E considerando os valores eficazes, fica-se como na Equação 3.5:

$$\begin{cases} E_1 = n_1 \omega \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \\ E_2 = n_2 \omega \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad 3.5$$

De onde se chega à Equação 3.6:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad 3.6$$

Considerando as bobinas altamente indutivas, pode-se substituir $E_1 = U_1$ e $E_2 = U_2$. Caso tenha-se um rendimento de 100%, ou sem perdas, se chega à Equação 3.7, onde I_1 e I_2 são as correntes de primário e de secundário, respectivamente.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{n_1}{n_2} \quad 3.7$$

Normalmente, um transformador de potencial tem suas bobinas com n_1 e n_2 escolhidos tal que na entrada pode-se ter 2,3 kV, 13,8 kV, 69 kV ou outras tensões e sua saída seja em baixa tensão, como por exemplo, 115 V, mas sempre proporcional à entrada. Caso em um transformador 69 kV/115V se aplique 40 kV no primário, no secundário seria observado uma tensão de 66,67 V (de Medeiros Filho, 1997).

3.1.3 Transformador de Corrente (TC)

Um TC é um tipo especial de transformador para instrumentos que tem $n_1 < n_2$, logo uma corrente $I_2 < I_1$, sendo um dispositivo de redução de corrente. Ou seja, a corrente do

secundário é menor e adequada aos valores dos instrumentos de medição (de Medeiros Filho, 1997).

O primário de um TC apresenta poucas espiras de condutores de cobre de grande seção (de Medeiros Filho, 1997, p. 63). A relação desse tipo de transformador é dada pelo parâmetro de corrente, como por exemplo, 50:5 A, ou seja, quando no primário se tiver 50 ampéres, no secundário será gerada uma corrente de 5 A. Isso funciona de forma proporcional, e a relação se mantém linear ao longo da faixa de medição para que ele foi especificado.

Os TC's de corrente são utilizados em instrumentos para medição de corrente de forma segura, e seu secundário funciona quase em curto-circuito, por apresentar a funcionalidade de alimentar instrumentos de muito baixa impedância (de Medeiros Filho, 1997).

A relação nominal de corrente de um TC é dada por K_c , conforme Equação 3.8:

$$K_c = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} \quad 3.8$$

Quanto ao núcleo dos TC's, pode-se dizer que são de qualidade superior, pois apresentam excelente permeabilidade magnética e menores perdas possíveis. Os de excelente exatidão apresentam ainda, núcleo especial de chapas de ferroníquel laminadas a frio.

3.2 BLOCO DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO

O presente projeto tem como base a instrumentação e controle digitais, e, portanto, algumas etapas específicas dos sistemas digitais precisam ser compreendidas. Em um sistema deste tipo, que recebe sinais analógicos, ou seja, valores absolutos das grandezas de forma contínua no tempo, existem técnicas para se adequar o sinal para ser digitalizado.

A digitalização consiste em adquirir valores analógicos instantâneos das grandezas a cada espaço de tempo bem definido, o que leva à chamada “frequência de amostragem”. Esses valores adquiridos são tratados pelo termo “amostra”, e o processo de obtenção é chamado

“amostragem”. O produto deste processo é uma sequência de números os quais representam o sinal. Uma etapa posterior a isso é realizada, e pode ser definida pela representação dos números providos pela amostragem em valores finitos de amplitudes discretas. A essa operação dá-se o nome “quantização”. Se na amostragem tem-se a discretização do tempo, na quantização é discretizada a amplitude, e o acerto depende de quantos níveis discretos de amplitude a etapa de quantização apresenta. Sistemas digitais têm seus números de níveis definidos em função do número de bits que representa uma amostra. Em um sistema de oito bits, por exemplo, temos $2^8 = 256$ níveis de amplitude para uma amostra. A última etapa da digitalização consiste na “codificação” que é a representação por meio de uma palavra composta por um conjunto finito de símbolos. Na codificação binária isto significa 0’s e 1’s. Toda essa tarefa é desempenhada por um elemento chamado “conversor analógico/digital” (Haykin & Van Veen, 2001).

Mas antes de se poder realizar a digitalização, são necessárias algumas etapas, visando um melhor aproveitamento do sinal e da capacidade do conversor analógico/digital. São elas: Filtragem e Amplificação do sinal. Para o entendimento dessas operações, é vista uma abordagem rápida sobre amplificadores operacionais, importantes componentes da eletrônica e computação.

Mas somente o tratamento e a conversão do sinal não são suficientes para realizar um processo. É necessário algum controle e uma lógica de atuação. A vantagem de um sistema digital em contraste com um do tipo analógico está na facilidade para o processamento desses sinais, flexibilidade e a sua confiabilidade. Atualmente a maioria dos sistemas de controle faz uso de computadores digitais como controladores. Com a finalidade de se projetar sistemas mais compactos, foram desenvolvidos os microcontroladores, nos quais estão implementados em um invólucro, todos os blocos básicos de um microcomputador digital. Esses componentes são amplamente utilizados em automação e são de baixo custo (Haykin & Van Veen, 2001).

3.2.1 O Amplificador Operacional

Os amplificadores operacionais são, atualmente, componentes eletrônicos que apresentam cinco terminais, sendo que três deles são referentes a sinais e dois são para alimentação. Esses

componentes são alimentados com fontes de corrente contínua para o correto funcionamento. A grande maioria necessita de fontes simétricas para operar (+5 e -5 V, -3 e +3 V, etc.). Os terminais de sinais se dividem em entrada e saída. As duas entradas são identificadas pelos símbolos “+” e “-“, significando a entrada não-inversora e a entrada inversora, respectivamente. O símbolo e sinais podem ser vistos na Figura 3.1 (Sedra & Smith, 2000).

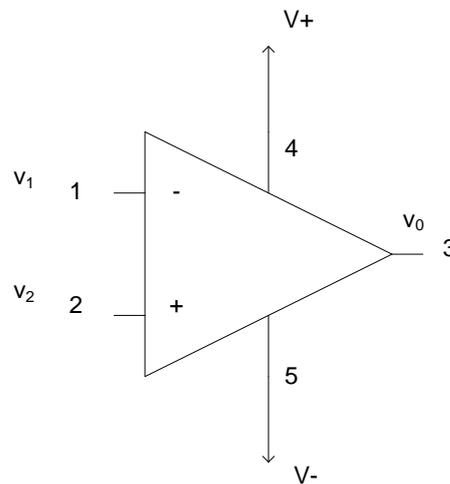


Figura 3.1-Símbolo e sinais do Amplificador Operacional

O funcionamento para o qual foi especificado o amplificador operacional naturalmente é “um sensor da diferença entre os sinais de tensão aplicados em seus dois terminais de entrada” (Sedra & Smith, 2000, p. 58). Desta forma, o terminal de saída apresenta, idealmente, a diferença entre as tensões de entrada ($v_2 - v_1$) multiplicada por um ganho definido A . Logo, a saída v_0 é dada pela Equação 3.9:

$$v_0 = A(v_2 - v_1) \quad 3.9$$

O ganho A pode ser definido como ganho em malha aberta ou ganho diferencial. Mas como essa propriedade de amplificação pode ser extremamente alta, tendendo ao infinito, não se costuma utilizar amplificadores nessa configuração e sim, promover uma realimentação, fechando a malha. É importante, ainda, dizer que o ganho A é idealmente constante para toda a faixa de frequências.

Adicionando-se uma realimentação de v_0 para a entrada inversora através de um resistor R_2 , ligando-se um sinal v_i através de um resistor R_1 à mesma entrada e aterrando-se o terminal da entrada não-inversora, obtém-se uma configuração inversora de amplificador, com malha fechada, conforme a Figura 3.2.

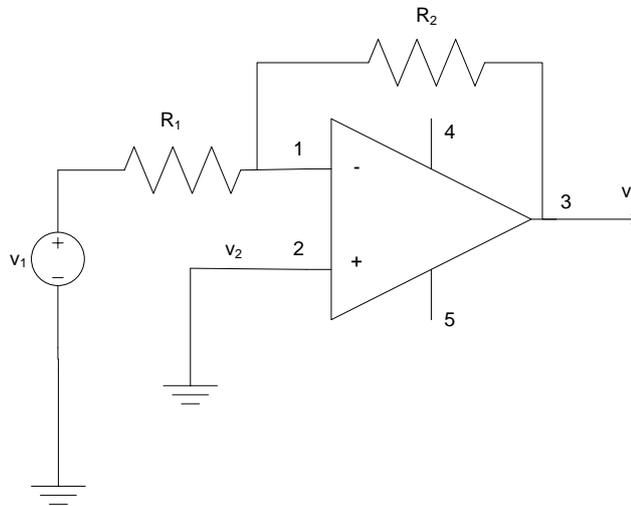


Figura 3.2—Configuração inversora de um amplificador operacional

O ganho em malha fechada G , neste caso, é dado pela Equação 3.10:

$$G \equiv \frac{v_0}{v_1} \quad 3.10$$

Considerando um amplificador ideal e que o ganho A seja infinito, tem-se que as tensões de entrada são muito pequenas, e que a tensão de v_1 está muito próxima de v_2 . Esse conceito remete à idéia de “curto-circuito virtual” entre as entradas. Isto significa dizer que as tensões presentes em v_2 estarão também em v_1 , seja A um ganho infinito. Pode-se calcular i_1 , corrente em R_1 através da Equação 3.11, justamente por esse conceito de curto-circuito virtual. A tensão em v_1 é tida como presente em v_2 também (Boylestad & Nashelsky, 1998, p. 61).

$$i_1 = \frac{v_1 - v_1}{R_1} \cong \frac{v_1}{R_1} \quad 3.11$$

Essa corrente circula por R_2 e pelo terminal 3, dado que a impedância de entrada é infinita. Para calcular v_0 , tem-se que:

$$v_0 = v_1 - i_1 R_2 \quad 3.12$$

Assim,

$$\frac{v_0}{v_1} = -\frac{R_2}{R_1} \quad 3.13$$

Se for considerado A um ganho finito e estando na mesma configuração inversora, refazendo a análise, chega-se à conclusão que para que G se aproxime do valor $-R_2/R_1$, é necessário que a condição na Equação 3.14 seja obedecida.

$$1 + \frac{R_2}{R_1} \ll A \quad 3.14$$

Em malha aberta o ganho diferencial de um amplificador operacional não é infinito e varia conforme a frequência.

Em baixas frequências e em corrente contínua esse ganho é alto e começa a cair uniformemente de -20dB/década nos chamados amplificadores operacionais compensados internamente, ou seja, no processo de fabricação são inseridos circuitos que fazem com que o amplificador operacional se comporte como um filtro passa-baixas como forma de garantir que os mesmos não oscilem (Sedra & Smith, 2000).

Para especificação de um amplificador operacional considera-se a frequência de corte $f_t = \frac{\omega_t}{2\pi}$ um parâmetro adequado para estimar-se o ganho para determinada frequência f . A limitação da faixa de passagem é um fenômeno linear e não modifica a forma da senóide na entrada do circuito e não ocorre uma distorção não-linear.

A taxa de variação da tensão de saída (Slew-Rate) é um fenômeno que pode causar distorções em grandes sinais. O amplificador operacional por características internas não consegue acompanhar a variação da tensão, ou seja, há uma taxa máxima de variação na tensão de saída para o amplificador operacional (Sedra & Smith, 2000).

Essa taxa é conhecida como *slew-rate* e definida como $SR_{max} = \frac{\partial v_o}{\partial t}$ e nos catálogos de amplificadores operacionais vem especificada em V/ μ s.

Portanto, se um sinal aplicado na entrada exigir uma resposta na saída com taxa superior ao valor especificado, o amplificador operacional responderá à taxa máxima permitida, que é o próprio SR característico. O sinal na saída poderá ser distorcido de forma não-linear e pode causar modificação na senóide presente na entrada.

3.2.2 Filtragem

O processo de filtragem serve, segundo (Haykin & Van Veen, 2001, p. 495), para “suprimir sinais espúrios, explorando o fato que o conteúdo de frequência destes sinais é separado do conteúdo de frequência dos sinais desejados”. As frequências que um filtro deixa passar estão na denominada “Faixa de Passagem” e as componentes atenuadas apresentam-se na “Faixa de Rejeição”. Em filtros reais, há sempre uma mudança gradual da faixa de passagem à faixa de rejeição, sendo essa zona chamada de “Faixa de Transição”. Ainda em filtros não-ideais, mesmo a faixa de rejeição não apresenta ganho nulo, mas sim, um ganho muito menor que o apresentado na faixa de passagem.

O emprego da filtragem é essencial em sistemas de processamento de sinais. Isto porque além das perturbações externas ao sistema que sejam de faixas de frequência diferentes ao sinal desejado, é possível atenuar também outros efeitos indesejados, principalmente em sistemas de aquisição de sinais, como é o caso do efeito *aliasing*. Este efeito é bastante prejudicial e (Haykin & Van Veen, 2001, p. 285) o descreve como o “fenômeno de um

componente de alta frequência assumir a identidade de um de baixa frequência”. Desta forma, o sinal de tempo contínuo original não pode ser reconstruído e nem analisado, pois a superposição dessas componentes desfaz a correspondência da forma amostrada para o sinal original.

São comumente vistos alguns tipos de filtros que têm suas denominações referenciadas à sua resposta em frequência: passa-baixa, passa-faixa, passa-alta e rejeita-faixa. A implementação passa-baixa tem sua resposta plana de amplitude de corrente contínua até a frequência de corte do filtro. Já na montagem passa-faixa, a resposta tem uma faixa de passagem iniciando-se em uma dada frequência diferente da corrente contínua e seguindo até outra frequência definida pela rede de elementos passivos. No filtro passa-alta, as frequências baixas que estão na faixa de rejeição. E no último tipo, a definição se dá pela rejeição de uma faixa de frequências definida (Haykin & Van Veen, 2001).

Existem duas abordagens na construção de filtros: Ativa e Passiva. Nesta última, obtém-se a propriedade de filtro apenas utilizando-se de elementos de circuitos passivos, como capacitores, resistores e indutores. Um exemplo de filtro é um circuito RLC, e a ordem de um filtro (1ª ordem, 2ª ordem, etc) é dada pela quantidade de conjuntos LC (elementos armazenadores de energia) presentes no circuito. Comumente se tem a implementação de filtros passivos chamados “Ressonadores”. Em uma solução ativa de filtragem, existem também elementos passivos como capacitores e resistores, mas a inserção de um amplificador garante um ganho mais próximo do linear na faixa de passagem, o que em filtros passivos não acontece, sempre havendo atenuações mesmo para essa faixa (Haykin & Van Veen, 2001).

3.2.3 Filtragem Ativa utilizando Amplificador Operacional

A filtragem que apresenta ganho linear na faixa de passagem é construída utilizando-se amplificadores operacionais. Esses componentes eletrônicos foram aplicados, inicialmente, em áreas de computação e instrumentação analógicas, sendo implementados com componentes discretos como válvulas, e posteriormente, transistores e resistores. Um grande número de componentes era necessário para a construção desses circuitos. Mas logo após a revolução da eletrônica foram miniaturizados e integrados em uma única pastilha de silício, trazendo maior qualidade e versatilidade. Segundo (Sedra & Smith, 2000, p. 56), os

amplificadores operacionais (Amp Op's) têm características muito próximas às ideais, sendo, por isso, largamente utilizados nos diversos projetos de todas as áreas da eletrônica e computação.

Os sinais de entrada obtidos através do transdutor de corrente e do TP devem ser aplicados a um filtro passa-baixa, a fim de que todas as frequências acima da frequência de *Nyquist* (metade do valor da frequência de amostragem) sejam removidas. A utilização desse filtro evita a ocorrência do efeito de *aliasing* durante a amostragem e, desse fato, decorre o nome de filtro *anti-aliasing* (Haykin & Van Veen, 2001).

Com a utilização desse filtro, também são eliminados os harmônicos de ordem superior, que não são de interesse ao sistema em questão. O filtro Sallen-Key é apropriado para essa aplicação, pois possui um fator de qualidade *Q* constante, independente das variações de *R* e de *C*. Dessa forma, a planicidade da banda de passagem não é afetada, resultando em uma atenuação com queda constante, de -40dB por década. Os valores especificados de frequência do filtro devem ser atendidos até mesmo nas condições de pior caso de tolerância dos resistores e capacitores.

3.2.4 Microcontroladores da Família 8051

Todo projeto de automação tem um controlador e no caso deste projeto foi escolhido um microcontrolador da família 8051, elemento já consagrado pelas suas características de desempenho e estabilidade, além da boa documentação e códigos-exemplo.

Os microcontroladores são componentes eletrônicos que integram em uma só pastilha de silício, todos os blocos básicos de um microcomputador. Nos microcomputadores tem-se um microprocessador, memória não-volátil (*Read Only Memory - ROM*) e volátil (*Random Access Memory - RAM*), portas de Entrada e Saída (E/S) e periféricos (Gimenez, 2002, p. 4).

A família de microcontroladores 8051 traz desde suas primeiras implementações algumas características interessantes que tornaram o microcontrolador sempre uma boa escolha nos projetos de automação de diversas áreas, e a cada dia se tem novos modelos saindo das fábricas, cada qual com suas próprias novidades em termos de funções. O microcontrolador escolhido é da fabricante *Analog Devices*, e o modelo é o ADUC814. A escolha tem por base

além das facilidades já citadas, as características principais de blocos e periféricos do microcontrolador, sejam elas (Analog Devices, 2003):

- Unidade Central de Processamento ou *CPU*, em inglês, de 8 bits;
- 8 *kbytes* de memória *Flash/EE* para programas;
- 640 *bytes* de memória *Flash/EE* para dados;
- Programação diretamente no circuito (*In-circuit*) sem *hardware* externo;
- 256 *bytes* de memória *RAM*;
- Conjunto de instruções compatível com o do 8051;
- Cristal Oscilador provido externamente com frequência 32 kHz e multiplicador interno chegando a 16,78 MHz;
- Três temporizadores/contadores de 16 bits;
- 11 linhas de entrada e saída programáveis;
- 11 fontes de interrupções, com 2 níveis de prioridade
- Fonte de alimentação com funcionamento garantido em duas faixas de tensões: 3 e 5 Volts;
- Conversor Analógico/Digital embarcado, com 6 canais de 12 bits multiplexados à 247 kSPS;
- Modo de captura de alta velocidade;
- Referência de tensão precisa para o conversor analógico/digital;
- Conversores Digital/Analógico com saída de tensão dupla;
- Monitor de temperatura;
- Contador de intervalo de tempo;
- Entrada e saída serial compatível com o protocolo *SPI/I²C*;
- Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART) – Porta de entrada e saída serial;
- Monitor da fonte de alimentação e;
- Temporizador Cão de Guarda.

A linha ADUCXXX apresenta diversos microcontroladores com núcleos baseados nos 8051, com desempenho e conversores analógico/digital e também digital/analógico embutidos.

O diagrama de blocos do ADUC814 pode ser visto na Figura 3.3.

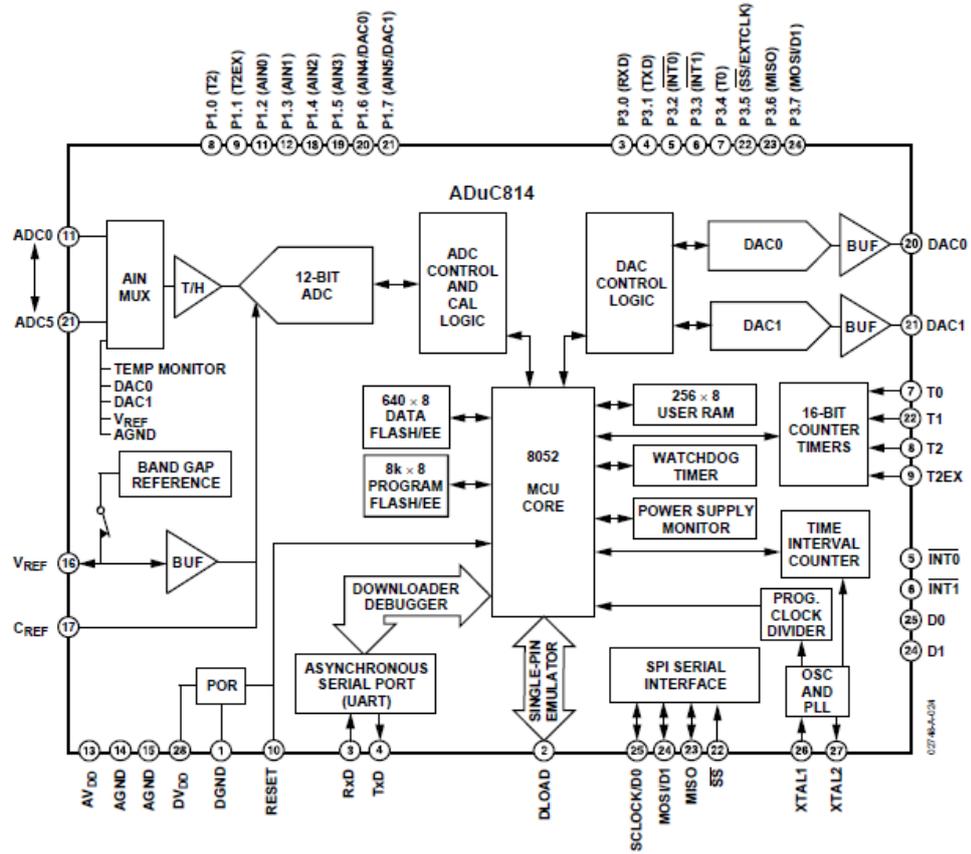


Figura 3.3-Diagrama de blocos do microcontrolador Analog Devices ADUC814
(FONTE: Analog Devices, 2003, p. 16)

Uma visão superior com as pinagens do chip do ADUC814 é vista na Figura 3.4.

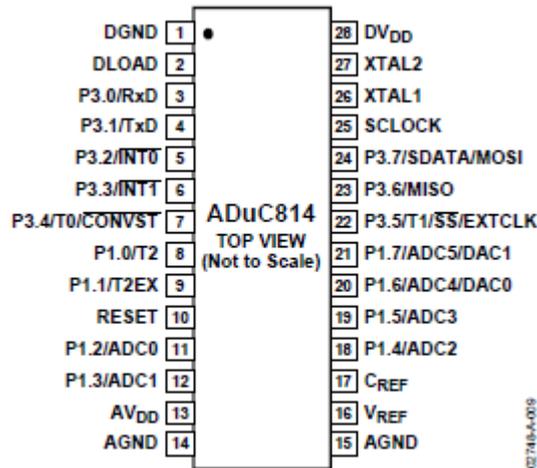


Figura 3.4-Pinagem do microcontrolador ADUC814
(FONTE: Analog Devices, 2003, p. 10)

Nas seções a seguir são explanados com detalhes os blocos básicos de microcomputadores presentes nos micrcontroladores ADUC814 que são usados no projeto.

3.2.4.1 Unidade Central de Processamento ou *Central Processing Unit (CPU)*

A *CPU* tem a função da tomada de decisão, por meio da execução de um programa. (Gimenez, 2002, p. 5) A entrada de dados é feita pelos dispositivos de entrada e saída e de acordo com um programa gravado em memória que está sendo executado, a Unidade Central de Processamento realiza alguma operação com estes dados, transformando-os em informação. O termo informação “subentende dados organizados (segundo uma orientação específica) para o atendimento ou emprego de uma pessoa ou grupo que os recebe” (Monteiro, 2002, p. 1). No caso de sistemas automatizados, muitas vezes, a produção de informação serve tão somente para alimentar um processo posterior ou realimentar o mesmo que a produziu, como é feito nos sistemas de malha fechada. Em uma definição mais formal, a *CPU* apresenta as seguintes funções:

- Busca de instrução na memória;
- Interpretação da instrução;
- Busca de dados;
- Execução da operação com os dados e armazenamento do resultado e;
- Reinício do processo de busca da próxima instrução.

Um fluxograma do ciclo de instrução é exibido na Figura 3.5.

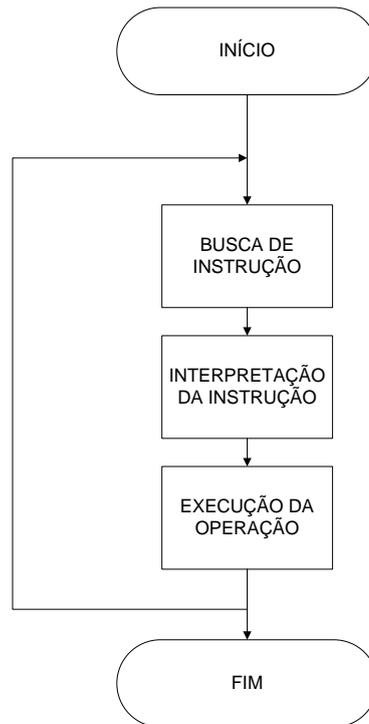


Figura 3.5-Fluxograma de um Ciclo de Instrução

Para seguir o fluxo desse ciclo, existe internamente à CPU, vários blocos com funções bem definidas, que quando em correto funcionamento, resultam em uma Unidade Central de Processamento funcional. Esses blocos são: UAL (Unidade Aritmética e Lógica), Registradores, UC (Unidade de Controle), Relógio, RI (Registrador de Instrução), Registradores especiais de estado, CI (Contador de Instrução), Decodificador de Instrução, RDM (Registrador de Dados de Memória) e REM (Registrador de Endereços de Memória). Este trabalho não pretende se estender por detalhes de cada um desses blocos, portanto informações adicionais podem ser pesquisadas na bibliografia em (Gimenez, 2002) e (Monteiro, 2002).

Sobre a arquitetura dos microcontroladores Analog Devices ADUC814 é importante dizer que se trata, assim como toda a família 8051, de uma CPU de 8 bits e o seu ciclo de máquina corresponde a 12 períodos de relógio da frequência de operação selecionada.

Os registradores de interesse são:

- Acumulador ou “A” – Usado para operações matemáticas e Booleanas;
- Registrador “B” – Usado em conjunto com o acumulador em operações de multiplicação e divisão;

- SP ou Registrador Ponteiro da Pilha – Usado para armazenar um endereço da memória RAM interna chamado topo da pilha;
- Ponteiro de dados – Constituído de dois registradores de 8 bits nomeados DPH e DPL. Proveêm endereços de memória para acesso do código interno;
- PSW ou Palavra de Status do Programa – Contem diversos bits que refletem o estado da CPU e auxiliam na execução do programa; e
- PCON ou Controle de Energia – Contem bits para as opções de economia de energia e sinalizadores de status de uso geral.

Na Figura 3.6 é apresentado um mapa dos registradores de funções especiais do ADUC 814.

ISPI FFH 0	WCOL FEH 0	SPE FDH 0	SPIM FCH 0	CPOL FBH 0	CPHA FAH 1	SPR1 F9H 0	SPR0 ¹ F8H 0	BITS	SPICON ¹ F8H 04H	DAC0L F9H 00H	DAC0H FAH 00H	DAC1L FBH 00H	DAC1H FCH 00H	DACCON FDH 04H	RESERVED	RESERVED
F7H 0	F6H 0	F5H 0	F4H 0	F3H 0	F2H 0	F1H 0	F0H 0	BITS	B ¹ F0H 00H	ADCOFSL F1H 00H	ADCOFSH F2H 20H	ADCGAINL F3H 00H	ADCGAINH F4H 00H	ADCCON3 F5H 00H	RESERVED	SPIDAT F7H 00H
D1 EFH 0	D1EN EEH 0	D0 EDH 0	ECH 0	D0EN ESH 0	EAH 0	EAH 0	EAH 0	BITS	DCON ¹ E8H 00H	RESERVED	RESERVED	RESERVED	RESERVED	RESERVED	RESERVED	ADCCON1 EFH 00H
E7H 0	E6H 0	E5H 0	E4H 0	E3H 0	E2H 0	E1H 0	E0H 0	BITS	ACC ¹ E0H 00H	RESERVED	RESERVED	RESERVED	RESERVED	RESERVED	RESERVED	RESERVED
ADC1 DFH 0	ADCSP DEH 0	CCONV DDH 0	SCONV DCH 0	CS3 DBH 0	CS2 DAH 0	CS1 D9H 0	CS0 D8H 0	BITS	ADCCON2 ¹ D8H 00H	ADCCON2 D9H 00H	ADCCON2 DAH 00H	RESERVED	RESERVED	RESERVED	RESERVED	PSMCON DFH DEH
CY D7H 0	AC D6H 0	F0 D5H 0	RS1 D4H 0	RS0 D3H 0	OV D2H 0	F1 D1H 0	P D0H 0	BITS	PSW ¹ D0H 00H	RESERVED	RESERVED	RESERVED	RESERVED	RESERVED	RESERVED	PLLCON D7H 52H
TF2 CFH 0	EXF2 CEH 0	RCLK CDH 0	TCLK CCH 0	EXEN2 CBH 0	TR2 CAH 0	CNT2 C9H 0	CAP2 C8H 0	BITS	T2CON ¹ C8H 00H	RESERVED	RCAP2L CAH 00H	RCAP2H CBH 00H	TL2 CCH 00H	TH2 CDH 00H	RESERVED	RESERVED
PRE3 CFH 0	PRE2 CEH 0	PRE1 CDH 0	PRE0 C4H 1	WDIR C3H 0	WD3 C2H 0	WD C1H 0	WDWR C0H 0	BITS	WDCON ¹ C0H 10H	RESERVED	CHIPID C2H 03H	RESERVED	NOT USED	RESERVED	EDARL C8H 00H	RESERVED
P31 BFH 0	PADC BEH 0	PT2 BDH 0	P3 BCH 0	PT1 BBH 0	PX1 BAH 0	PT0 B9H 0	PX0 B8H 0	BITS	IP ¹ B8H 00H	ECON B9H 00H	ETIM1 BAH 00H	ETIM2 BBH 00H	EDATA1 BCH 00H	EDATA2 BDH 00H	EDATA3 BEH 00H	EDATA4 BFH 00H
RD B7H 1	WR B6H 1	T1 B5H 1	T0 B4H 1	INT1 B3H 1	INT0 B2H 1	TxD B1H 1	RxD B0H 1	BITS	P3 ¹ B0H FFH	RESERVED	RESERVED	RESERVED	RESERVED	RESERVED	RESERVED	NOT USED
EA AFH 0	EADC AEH 0	ET2 ADH 0	E3 ACH 0	ET1 ABH 0	EX1 AAH 0	ET0 A9H 0	EX0 A8H 0	BITS	IE ¹ A8H 00H	IEIP2 A9H A0H	RESERVED	RESERVED	RESERVED	RESERVED	RESERVED	RESERVED
									NOT USED	TIMECON A1H 00H	HTHSEC A2H 00H	SEC A3H 00H	MIN A4H 00H	HOUR A5H 00H	INTVAL A6H 00H	NOT USED
SM0 9FH 0	SM1 9EH 0	SM2 9DH 0	REN 9CH 0	TBS 9BH 0	RB8 9AH 0	T1 99H 0	RI 98H 0	BITS	SCON ¹ 98H 00H	SBUF 99H 00H	I2CDAT 9AH 00H	I2CADD 9BH 50H	CFG814 9CH 04H	NOT USED	NOT USED	NOT USED
97H 1	96H 1	95H 1	94H 1	93H 1	92H 1	T2EX 91H 1	T2 90H 1	BITS	P1 ^{1,2} 90H FFH	NOT USED	NOT USED	NOT USED	NOT USED	NOT USED	NOT USED	NOT USED
TF1 8FH 0	TR1 8EH 0	TF0 8DH 0	TR0 8CH 0	IE1 8BH 0	IT1 8AH 0	IE0 89H 0	IT0 88H 0	BITS	TCON ¹ 88H 00H	TMOD 89H 00H	TL0 8AH 00H	TL1 8BH 00H	TH0 8CH 00H	TH1 8DH 00H	RESERVED	RESERVED
									NOT USED	SP 81H 07H	DPL 82H 00H	DPH 83H 00H	RESERVED	RESERVED	RESERVED	PCON 87H 00H

Figura 3.6-Mapa dos Registradores de Funções Especiais
(FONTE: Analog Devices, 2003, p. 20)

3.2.4.2 Memória RAM

A memória RAM ou Memória de Acesso Aleatório é um bloco de memória presente no microcontrolador que armazena informações, de forma que permite a escrita e a leitura. Serve como armazenamento temporário, dado que seu conteúdo é perdido ao se interromper a fonte de energia.

A memória RAM é utilizada como memória de dados e no ADUC814, existem 256 bytes desse tipo disponíveis. São separadas suas áreas de memória em blocos de 128 bytes, sendo o primeiro bloco chamado de memória baixa e o segundo de memória alta (Analog Devices, 2003).

Os bytes mais baixos podem ser acessados por endereçamento direto ou indireto e os bytes superiores somente podem ser acessados por endereçamento indireto. Existe ainda, a área de memória onde são mapeados os registradores de funções especiais, cujos endereços coincidem com os 128 bytes superiores e são acessados somente por endereçamento direto. Esse mapeamento provê uma interface entre a CPU e todos os periféricos embutidos.

Um mapa da memória pode ser visto na Figura 3.7.

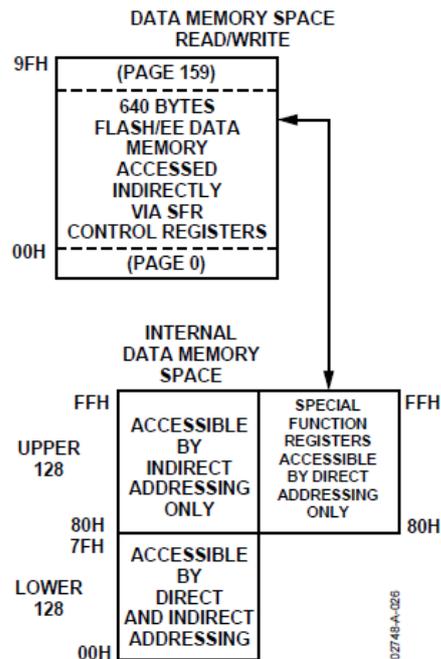


Figura 3.7-Mapa da memória do ADUC814
(FONTE: Analog Devices, 2003, p. 17)

3.2.4.3 Memória ROM

A memória ROM funciona como memória de programa e dependendo do membro da família 8051, pode-se ter 4, 8 ou 16 Kbytes de memória. No caso do ADUC814, tem-se disponível 8 Kbytes de memória de programa e também uma área de 640 bytes para dados.

Um mapa da memória de programa pode ser visto na figura 3.8.

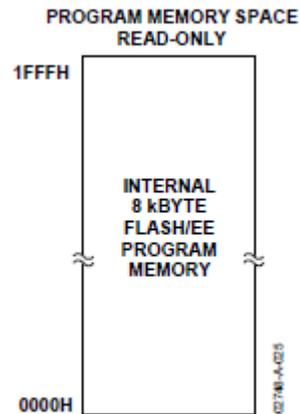


Figura 3.8-Mapa da Memória de Programa
(FONTE: Analog Devices, 2003, p. 17)

3.2.4.4 Portas de Entrada e Saída (E/S)

As portas de Entrada e Saída (E/S) são a interface da CPU com o mundo exterior e por onde se dá toda a lógica de algum controle que venha a ser desenvolvido pelo microcontrolador. As portas funcionam com lógica TTL e no caso do ADUC814, se tem 2 portas disponíveis. As denominações são P1 e P2. Quando se referencia um pino de uma das portas, é feito através do nome da porta seguido de um ponto e o número do pino, como P1.0; P2.3; P2.1; etc. Às portas podem ser atribuídos valores de forma a utilizar todos os seus *bits* ou ainda, *bit a bit*.

Em uma especificação mais técnica das portas, têm-se os níveis de tensões mínimos e máximos, aderentes ao padrão TTL (ver seção *Níveis de Tensão da Lógica Digital TTL*). Um detalhe importante e que justifica o uso de *drivers* quando se trabalha com a família 8051 é a capacidade de dreno de corrente nas portas E/S, que é de 1,6 mA. *Drivers* são circuitos eletrônicos que atuam na interface de circuitos de baixa corrente de dreno para possibilitar o uso de maior corrente.

3.2.4.5 Porta serial

Em contraste com a existência das portas paralelas, o microcontrolador apresenta uma porta serial, que é tratada como UART, o acrônimo para *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*, ou transmissor/receptor universal assíncrono.

O funcionamento baseia-se na tomada de bytes por um *buffer* e a posterior transmissão *bit a bit* dessa informação. Na outra ponta, uma segunda porta recebe essa seqüência de *bits* e a remonta em *bytes* completos.

Para realizar a funcionalidade de porta serial, dois sinais são disponibilizados pelo microcontrolador: RxD e TxD. O acesso a estes sinais é via pinos P3.0 e P3.1. A porta apresenta um *buffer* denominado SBUF, ou registrador de função especial.

A porta pode ser configurada para funcionar nos seguintes modos (Analog Devices, 2003):

- Modo 0: Registrador de deslocamento de 8 bits;
- Modo 1: Transmissor/Receptor Universal Assíncrono de 8 bits, com taxa variável;
- Modo 2: Transmissor/Receptor Universal Assíncrono de 9 bits, com taxa fixa; e
- Modo 3: Transmissor/Receptor Universal Assíncrono de 9 bits, com taxa variável.

Os modos são selecionados através dos *bits* SM0 e SM1 no registrador de função especial SCON, segundo o Quadro 3.1 (Analog Devices, 2003).

Quadro 3.1-Modos da porta serial do ADUC814

SM0	SM1	Modo
1	1	3
1	0	2
0	1	1
0	0	0

No modo 0, os dados seriais entram e saem através do pino RxD, enquanto que o pino TxD tem o sinal de *clock*. Oito *bits* de dados são transmitidos ou recebidos. O funcionamento da transmissão inicia-se quando algo é escrito para o *buffer* SBUF. Os dados são deslocados para fora através de RxD, sendo o *bit* menos significativo o primeiro a ser transmitido. Já a recepção é iniciada quando o *bit* REN(Receive Enable) é 1 e o *bit* RI(Receive Interrupt) é 0.

No modo 1, cada *byte* de dados é precedido por um *bit* de início(0) e sucedido por um *bit* de parada(1). A taxa é definida pela taxa dos *timers* 1 e 2, ou ainda, a combinação dos dois, sendo um pra recepção e outro para a transmissão. A escrita de um *byte* no *buffer* SBUF adiciona também um nono *bit* com valor “1” como *bit* de parada a ser transmitido. Os dados são transmitidos serialmente até que o *bit* de parada apareça na linha de TxD. Uma sinalização de interrupção é feita por TI automaticamente. A recepção ocorre quando a transição de “1” para “0” é detectada em RxD, sendo este um *bit* de início válido, a recepção continua até que todos os *bits* tenham sido recebidos. Os oito *bits* são então armazenados no *buffer* SBUF e o nono *bit* vai para RB8 no registrador SCON. A sinalização de interrupção do receptor é feita no caso de RI ser “0” ou SM2 = “0” ou SM2 = “1” e o stop bit recebido = “1”. Caso contrário, o *frame* transmitido é perdido.

No modo 2, a porta opera em taxa fixa, sendo esta definida pela frequência do núcleo do microcontrolador dividida por 64, como padrão. Ajustes do *bit* SMOD do registrador PCON, permitem fazer a porta operar com a frequência do núcleo dividida por 32. Neste modo, onze *bits* são transmitidos: 1 *bit* de início, oito *bits* de dados, um nono *bit* programável e um *bit* de parada. O nono *bit*, apesar de comumente ser utilizado como paridade, é possível ser usado como *bit* de dado também. A transmissão inicia-se com a escrita do *buffer* SBUF e do nono *bit* em TB8 no registrador SCON. Quando a transmissão se inicia, os oito *bits* de dados são carregados no registrador de deslocamento. O conteúdo de TB8 é carregado na nona posição do registrador e a transmissão se inicia no próximo *clock* válido. O *bit* TI é ajustado para “1” assim que o *bit* de parada aparece na linha TxD. A recepção é idêntica ao modo anteriormente citado.

Por último, no modo 3, a porta opera com 9 bits e taxa variável definidas por timer 1 e timer 2. A operação no modo 3 é idêntica ao modo 2, porém é possível variar a taxa conforme se faz no modo 1.

Em todos os modos, a transmissão se inicia com qualquer instrução que utilize SBUF como registrador de destino. Já para a recepção, em modo 0, é necessário satisfazer a

condição RI="0" e REN="1", e para os outros modos, REN="1" em conjunto com a detecção de um bit de início.

3.2.4.6 *Timers* e contadores

Todo microcontrolador da família 8051 apresenta *timers* e contadores como periféricos padrão. Eles são disponibilizados para livrar o núcleo do processador da tarefa dispendiosa inerente a implementação de rotinas de tempo em *software*. O ADUC814 apresenta 3 dispositivos *timers*/contadores. Todos os *timers* e contadores são constituídos de dois registradores de 8 bits chamados THx e TLx (x pode ser 0, 1 ou 2). E todos podem ser configurados como *timers* ou contadores. Os contadores não são utilizados de forma alguma neste projeto, portanto não foram dispendidas explicações sobre esse dispositivo (Analog Devices, 2003).

Na função *timer*, o registrador TLx é incrementado a cada ciclo de máquina. Como um ciclo de máquina consiste de 12 períodos de *clock*, a taxa máxima de contagem é 1/12 da frequência de *clock*. Essa frequência é ajustável através dos *bits* de seleção CD0 a CD2 no registrador PLLCON. As operações de usuário e configurações de todos os modos de *timers*/contadores são possíveis através dos registradores TMOD, TCON e T2CON.

O timer 0 e 1 pode ser configurado em 4 modos (Analog Devices, 2003):

- modo 0: *Timer*/Contador de 13 bits
- modo 1: *Timer*/Contador de 16 bits
- modo 2: *Timer*/Contador de 8 bits com recarga automática
- modo 3: Dois *Timers*/Contadores de 8 bits

O modo 0 configura um *timer*/contador com 8 bits com um divisor por 32. Neste modo, o registrador *timer* funciona como um registrador de 13 bits e assim que a contagem alcança todos os bits do registrador com 1's ou 0's, TF0 é colocado em estado 1. TF0 pode ser usado então para requerer uma interrupção.

No modo 1, o funcionamento é idêntico ao modo 0 porém com 16 bits.

Já o modo 2 funciona com 8 bits e recarga automática, o que significa dizer que não somente TF0 é posto em estado 1 quando o registrador TL0 é composto de todos os bits 1 ou

0, mas também TL0 é recarregado com o valor definido em TH0, que é predefinido por software. O conteúdo de TH0 nunca é alterado pelo *timer* e funciona somente para a recarga.

No modo 3, é implementada uma configuração de dois timers de 8 bits distintos para o timer 0 e para o timer1, o efeito é diferenciado, simplesmente mantendo a sua contagem, como se TR1 fosse ajustado para desligado ou 0. Para timer 0, TL0 e TH0 são considerados dois contadores independentes, sendo que TL0 usa os bits de controle C/T, GATE, TR0, $\overline{INT0}$ e TF0. TH0 é travado na função de timer, contando os ciclos de máquina e toma o controle do uso de TR1 e TF1 do timer 1, então TH0 controla a interrupção do timer 1. O modo 3 é provido para aplicações que requerem um timer extra de 8 bits.

3.2.4.7 Conversor Analógico/Digital (A/D)

O bloco do conversor analógico/digital incorpora um dispositivo de 12 bits de resolução, com 6 canais e capaz de realizar uma conversão em 4,05 μ s e utilizar uma única fonte. Este bloco disponibiliza um multiplexador para amostrar os seus vários canais, além de um amplificador, uma referência interna e possibilidade de calibração. Todos esses componentes são configurados através de 3 registradores (ADCCON1, ADCCON2 e ADCCON3) (Analog Devices, 2003).

O circuito implementado consiste de um conversor de aproximação sucessiva convencional. O conversor aceita uma entrada de 0 V a + Vref, sendo este uma tensão de referência interna ou externa, dependendo da necessidade da aplicação. Caso opte-se pela referência externa, esta pode estar entre 1,0 V e a tensão de alimentação.

Modos de conversão simples ou contínuos podem ser iniciados por software. Em hardware, um sinal para iniciar a conversão pode ser aplicado a um pino externo (CONVST) ou o *timer 2* pode ser configurado para geração de um gatilho para iniciar as conversões.

O conversor tem ainda, modos de conversão de alta velocidade que enviam o dado diretamente para a interface SPI presente no microcontrolador.

3.3 BLOCO DE COMUNICAÇÃO COM O PC

Neste bloco tem-se a transferência de dados relativos à energia para fora do microcontrolador, para o computador e também as mensagens possíveis do computador para o sistema embarcado. Para o funcionamento com uma maior flexibilidade em estabelecer comunicações com outros dispositivos e computadores, é utilizado um protocolo tradicional de comunicações, o RS-232.

A seguir trata-se do protocolo em si, como suas especificações, capacidades e modos, além do interfaceamento entre o microcontrolador e outro dispositivo que faça uso desse mesmo protocolo.

3.3.1 O protocolo RS-232

O protocolo RS-232 foi desenvolvido na década de 60 para realizar a comunicação de dados entre máquinas de teletipo e modems. Mais tarde, os computadores entraram na lista de equipamentos que passaram a utilizar o protocolo. Os computadores são tratados como DTE(Data Terminal Equipment) ou equipamentos terminais de dados e os modems são denominados DCE(Data Communication Equipment) ou equipamentos de comunicação de dados. O padrão estabelece um conjunto de normas físicas de conexão e ainda, níveis lógicos, cabeamento e operações. Um ambiente de aplicação do protocolo é visto na Figura 3.9.



Figura 3.9-Ambiente típico de aplicação do protocolo RS-232

O padrão RS-232 estabeleceu em suas versões mais antigas, um conector de 25 pinos, e ainda, configuração de cabo para conectar DCE's e DTE's. Essa é a conectorização

recomendada pela norma, porém não é obrigatória. Na prática, os conectores utilizados nas portas seriais de computadores contêm nove pinos e são denominados DE-9, ou popularmente, “DB-9”, sendo a letra “B” uma confusão criada quando da inserção do conector DE-9 no mercado, posteriormente aos DB-25, que tem a denominação “B”, levando à confusão. A utilização de conectores com menos pinos do que 25 ocorre porque a maioria das comunicações não necessita de todos os sinais disponíveis no padrão e sim de apenas alguns. As portas seriais em PC’s utilizam os sinais discriminados no Quadro 3.2.

Quadro 3.2-Pinos e sinais da ligação RS-232 em conectores DE-9

Pino	Sinal	Entrada/Saída	Descrição
1	DCD	Entrada	Detecção de Portadora de Dados
2	RxD	Entrada	Recepção de Dados
3	TxD	Saída	Transmissão de Dados
4	DTR	Saída	Terminal de Dados Pronto
5	GND	-	Terra
6	DSR	Entrada	Conjunto de Dados Pronto
7	RTS	Saída	Pronto para Envio(Computador)
8	CTS	Entrada	Envie os Dados(Modem)
9	RI	Entrada	Indicador de Chamada Telefônica

A codificação mais utilizada nesse tipo de comunicação é a “Start-stop assíncrono”, onde se tem um bit para início, mais sete ou oito bits de dados e 1; 1,5 ou 2 bits de parada.

Uma comunicação RS-232 não é recomendada para grandes distâncias, já que um terra em comum entre os dois equipamentos, apesar de facilitar o nivelamento de sinais, pode gerar, a grandes distâncias, um efeito de diferença no potencial do terra, causando ainda fluxo de cargas no próprio pino terra.

Os níveis de tensão comumente utilizados pelos PC’s em suas portas seriais seguem o padrão RS-232, e estão compreendidos pela faixa de ± 15 V, passando por tensões positivas e negativas de 3 a 15 V, dependendo da fonte de tensão dos equipamentos. O nível lógico 1, chamado de “marca” ou “OFF”, é definido como tensão negativa e o nível 0, denominado “espaço” ou “ON”. Todo esse padrão difere em muito dos níveis normalmente utilizados em circuitos digitais modernos como, por exemplo, o TTL.

3.3.2 Níveis de Tensão da Lógica Digital TTL

O termo TTL, acrônimo para *Transistor-Transistor Logic* pode ser definido como uma classe de circuitos digitais que se baseia em transistores de junção bipolar e pode ser encontrado no mercado em diversas aplicações principalmente de circuitos lógicos para computadores, controle e eletrônicos para o consumidor final, em geral. A família de circuitos integrados mais empregada no mercado que usa lógica TTL é a 7400, que oferece desde simples portas lógicas até circuitos seqüenciais e de lógica de estados.

O grande sucesso dos circuitos de lógica TTL dá-se pelo seu baixo custo, versatilidade e praticidade. Uma vantagem técnica dessa lógica é seu tempo de resposta, que comparado a outras lógicas, como DTL e RTL, é menor, significando maior desempenho em frequências mais elevadas. O consumo de energia da família TTL é maior que de um circuito CMOS (outra família de lógica digital), mas não tem um aumento tão acentuado com o crescimento do clock em que opera quanto esta outra família apresenta.

Todos os circuitos padrão TTL utilizam como alimentação a tensão de +5 V, e seus níveis lógicos “0” e “1” são definidos como sendo as faixas 0 a 0,8 V e 2,2 a 5 V, respectivamente. Essas tensões são todas relacionadas à terra do circuito. Logo, um circuito integrado dessa família deve obedecer ao seguinte padrão, exposto na Figura 3.10.

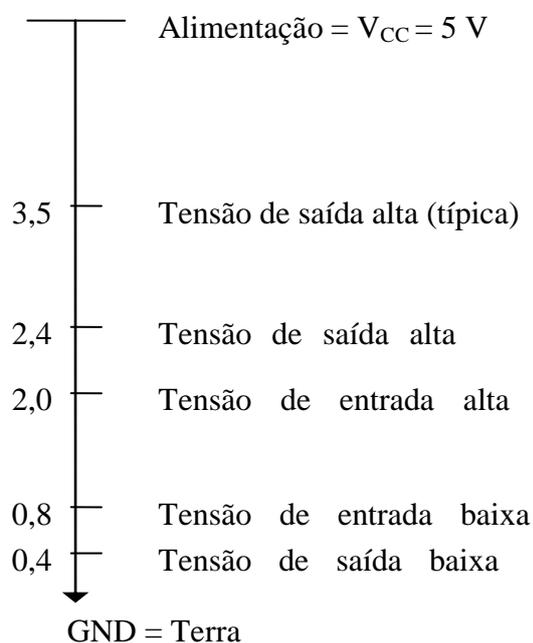


Figura 3.10-Padrão de níveis de sinal TTL

3.3.3 Conversor de Nível RS-232/TTL

Os níveis RS-232 e TTL não são compatíveis, de forma que para se trabalhar com o protocolo RS-232 e microcontroladores que utilizam níveis TTL, é necessária uma conversão de nível. Um circuito conversor de nível então vem a ser útil para o processo. Muitos circuitos estão disponíveis e a escolha dá-se pela praticidade e economia trazida por um circuito que fosse integrado em uma única pastilha, já que o tamanho reduzido e pequena quantidade de componentes externos facilitam o projeto e a aquisição.

O circuito escolhido é já bastante utilizado no mercado e de fácil implementação. Trata-se do CI MAX 232. O conversor provê saídas com níveis de tensões RS-232 a partir de uma fonte simples de + 5 V, através de circuitos charge-pump, que são conversores DC capazes de aumentar a tensão da fonte armazenando energia em capacitores. Isso facilita a criação de dispositivos com RS-232 que não requeiram níveis acima da alimentação de 0 a + 5 V (Texas Instruments, 1989).

Os níveis de tensões são convertidos conforme o Quadro 3.3.

Quadro 3.3-Conversão de níveis RS-232 para TTL do CI MAX232

Tipo da linha e nível lógico RS-232	Tensão RS-232	Tensão TTL
Transmissão de dados(RX/TX) Lógica “0”	+3 V a +15 V	0 V
Transmissão de dados(RX/TX) Lógica “1”	-3 V a -15 V	5 V
Sinais de controle (RTS/CTS/DTR/DSR) Lógica “0”	-3 V a -15 V	5 V
Sinais de controle (RTS/CTS/DTR/DSR) Lógica “1”	+3 V a +15 V	0 V

Uma visão superior do CI consta da Figura 3.11.

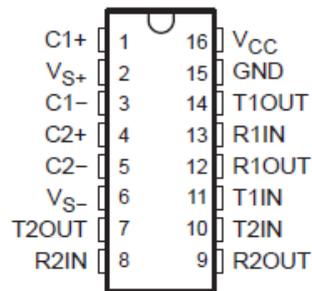


Figura 3.11-Vista superior do CI MAX232 com pinagem
(FONTE: Texas Instruments, 1989, p. 7)

Uma aplicação típica do CI MAX232 faz uso do chip e ainda, 5 capacitores, compactando o máximo a implementação, conforme nota do fabricante exposta na Figura 3.12.

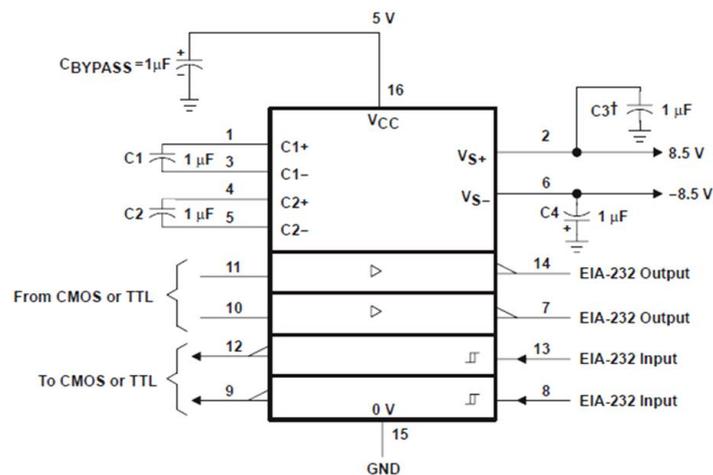


Figura 3.12-Nota de aplicação do CI MAX232
(FONTE: Texas Instruments, 1989, p. 7)

3.4 BLOCO DE CONTROLE

No bloco de controle encontram-se os elementos atuadores e aqueles que realizam interface entre a lógica de controle e a rede elétrica ou ainda, o banco de capacitores. Esse bloco é essencialmente o que há entre a lógica de controle e a rede elétrica. Consiste em um dos elementos mais específicos do projeto, pois para cada volume e tipo de carga, é necessária

uma adequação do bloco de controle, pois a carga do banco seria alterada, uma potência maior poderia pedir uma troca dos relés e com isso, ainda, a troca dos drivers de potência.

Nas seções a seguir são especificados alguns componentes integrantes do bloco e o circuito disponível.

3.4.1 Driver de Potência para Acionamento dos Atuadores

Conforme exposto em seção anterior, o microcontrolador e os dispositivos de controle não suportam correntes de dreno mais altas e necessitam de drivers para operarem corretamente.

A entrada de um driver é feita com baixa corrente e sua saída é drenada direto da fonte de alimentação. É possível ainda, utilizar uma tensão do lado da lógica de controle e outra do lado dos acionadores.

Existem diversos circuitos drivers disponíveis no mercado, mas a necessidade de se ter 8 saídas limita as escolhas. O CI escolhido foi o ULN2803, pois além do número de saídas adequando, trabalha com níveis TTL e possibilita ainda, a utilização de outra tensão que não a de alimentação para a energização do lado de potência.

O CI ULN2803 contém oito transistores na configuração darlington com emissores comuns e diodos de proteção para cargas indutivas. Cada saída suporta uma corrente de 500 mA e podem ser postas em paralelo para possibilitar maior dreno. Cada driver do CI apresenta o seguinte diagrama esquemático, ilustrado na Figura 3.13 (SGS-THOMSON, 1997).

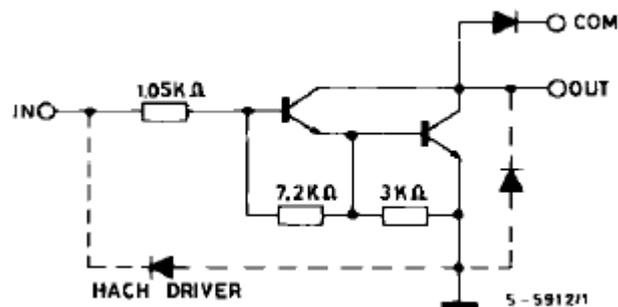


Figura 3.13-Um dos *drivers* do CI ULN2003
(FONTE: SGS-THOMSON, 1997, p. 2)

A pinagem do circuito integrado é ilustrada na Figura 3.14.

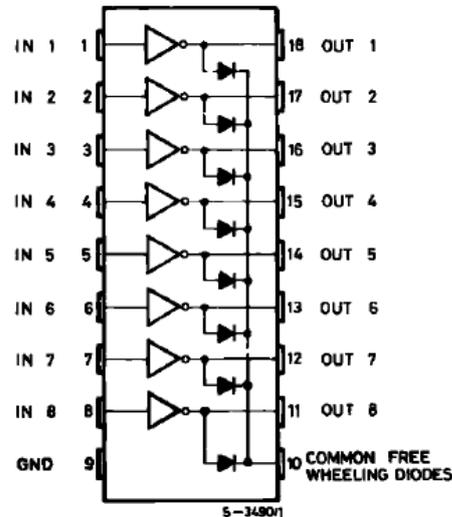


Figura 3.14-Pinagem do CI ULN2803
(FONTE: SGS-THOMSON, 1997, p. 1)

3.4.2 Relés

Os relés são dispositivos eletromecânicos que através de uma bobina energizada acionam cargas em seus contatos, que podem ser normalmente abertos (NA) ou normalmente fechados (NF). Existem ainda, relés de estado sólido, que baseados em SCR's e TRIACS (ambos componentes de eletrônica de potência) acionam da mesma forma, cargas ligadas a seus contatos. Um relé pode ser considerado um dispositivo que apresenta mais de um circuito: o da bobina e os dos contatos. São usados em diversas aplicações de acionamentos de cargas, como processos de fabricação, controles e automatismos (Mamede Filho, 2007).

Um relé eletromecânico apresenta em sua estrutura, diversas partes:

- Eletroímã;
- Armadura;
- Conjunto de contatos;
- Mola de rearme; e
- Terminais.

O eletroímã consiste de uma bobina de fio de cobre que envolve um núcleo de ferro de baixa relutância. Nessa parte se tem o primeiro circuito ao qual o relé faz parte. O acionamento da bobina pode ser em corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC). Uma bobina costuma drenar uma corrente baixa, na ordem de miliamperes.

A armadura é uma parte móvel do relé geralmente de ferro e responsável por realizar o contato elétrico de forma interna. É atraída pelo eletroímã quando este se encontra energizado.

O conjunto de contatos corresponde à parte bastante evidente do relé e acessível em sua parte exterior na forma de terminais. Os contatos são denominados NA (Normalmente Abertos) ou NF (Normalmente Fechados) e seus nomes têm relação com seu estado quando o dispositivo encontra-se não energizado. O estado de um contato muda ao se energizar a bobina do relé: os contatos NA são fechados e os contatos NF são abertos. Um contato aberto é o equivalente a um circuito interrompido, ou seja, a carga ligada àquele contato não será energizada a partir da ligação ao relé. Um contato de relé pode suportar correntes bastante altas, desde a ordem de amperes até dezenas de amperes.

Apesar de a bobina atrair a armadura e realizar a comutação dos contatos do relé, é necessário um retorno ao seu estado inicial quando a corrente de energização é cessada. Para que ocorra isso, uma mola de rearme é posta de forma que ao desenergizar a bobina, que gera uma força contrária a mola comprimindo-a, a armadura seja forçada com a expansão da mola até a sua posição inicial.

Os terminais nos relés dão acesso aos seus contatos, e podem ser dos mais variados tipos como *faston*, terminais para PCI (Placa de Circuito Impresso) e conexões em soquetes.

Um relé eletromecânico assemelha-se com o modelo apresentado na Figura 3.15.



Figura 3.15-Relé eletromecânico para PCI

3.4.3 Banco de Capacitores

Um banco de capacitores deve ser usado sempre que um conjunto de cargas apresenta uma variação do fator de potência devido ao acionamento independente dos seus diversos componentes ao longo do tempo.

Os bancos de capacitores podem ser classificados em três tipos quanto ao funcionamento (Mamede Filho, 2007):

- Programáveis – Os bancos programáveis podem atuar em condições pré-definidas (Períodos ou Eventos) de acordo com a necessidade;
- Fixos – Os bancos fixos são indicados para a correção de cargas constantes tais como transformadores; e
- Automáticos – Os bancos automáticos realizam compensação automática por meio de sinais ligando e desligando módulos capacitivos de acordo com a necessidade.

Quando um dispositivo de correção é selecionado, é necessário saber como ele é ligado à rede: de forma monofásica ou trifásica. Ao se optar pela correção em apenas uma fase, os capacitores escolhidos do banco serão dispostos em ligações paralelas às cargas. No caso de dispositivos trifásicos, estes são constituídos de um conjunto de três capacitores monofásicos ligados em triângulo.

3.5 BLOCO DE VISUALIZAÇÃO DE DADOS/RECONFIGURAÇÃO

No bloco de visualização de dados, apresentam-se os softwares armazenados nos computadores que servem para a visualização das informações geradas no equipamento. Nas próximas seções, o fluxo de dados pela porta serial é tratado de uma forma mais focada na camada de aplicação e não física. Além disso, a possibilidade de se alterar a forma de funcionamento e parâmetros do equipamento também é descrita. Por fim, uma atenção especial à plataforma de desenvolvimento de software, às bibliotecas e à linguagem de programação utilizadas também é exposta.

3.5.1 Reconfiguração e Mudança de Firmware

Todo sistema de automação em malha fechada depende da sua entrada e realimentação, porém utiliza pesos e parâmetros fornecidos em uma condição inicial para começar a operar. Esses parâmetros são passados no ato de configuração do dispositivo e ficam guardados em memória, na maioria das vezes, não-volátil, no caso de sistemas digitais. A necessidade de reajuste do funcionamento faz-se real quando existem mudanças significativas no ambiente de funcionamento que o dispositivo controlador não apresenta lógica ou capacidade para perceber. Essas mudanças apesar de necessitarem ser previstas em software e hardware para poderem ser operadas, precisam ser ajustadas no controlador para que o desempenho e funcionamento sejam adequados e corretos. Um ajuste dessa categoria poderia ser um modo de funcionamento ou a ativação/desativação de alguma funcionalidade. Uma mudança mais profunda, que seja possível operar com o mesmo hardware, mas não está implementada em software, necessita de uma mudança de *firmware*.

O *firmware* é um software de aplicação específica e está ligado a dispositivos embarcados e controladores. Contém um conjunto de instruções operacionais sem as quais um equipamento ou dispositivo seria inútil, pois não seria capaz de executar nenhuma função. Os *firmwares* são normalmente gravados no momento da fabricação dos dispositivos e em uma memória não-volátil como ROM's, EEPROM's e Flash. Diversos equipamentos apresentam *firmware*: calculadoras, computadores, impressoras, roteadores, controles remotos, leitores de DVD, etc.

Somente é necessária uma mudança de firmware se algo possível de ser operado com um dispositivo não foi implementado em seu software básico ou seja, não tem instruções operacionais para execução daquela tarefa. Uma mudança desse tipo pode ser uma necessidade também se uma operação executada não está com bom resultado. Uma “atualização de *firmware*” então é o termo usado para essa ocasião. As atualizações para serem feitas, incluem uma ligação física particular interna ao equipamento, um software próprio para atualização ou ainda, um acesso via cabo dedicado. Alguns equipamentos precisam de uma combinação desses elementos.

3.5.2 A Plataforma de Desenvolvimento Microsoft Visual Studio e A Linguagem de Programação C#

A linguagem C# (*C Sharp*) é uma forma moderna de programação de computadores baseada na plataforma *Windows*. Foi desenvolvida pela *Microsoft Corp.* em resposta às linguagens mais modernas, como C++ e Java. Utiliza o paradigma de orientação a objetos e em seu núcleo já contempla diversas classes e funções padrões, sendo todas componentes da plataforma .NET, da qual faz parte (Microsoft Corp., 2010).

Algumas características dessa linguagem incluem:

- Suporte a ponteiros com a palavra reservada “unsafe”;
- Suporte a coletor de lixo;
- Não-existência de herança múltipla;
- Destruutores;
- Suporte a sobrecarga de métodos e de operadores;
- Criação de novos tipos de dados a partir dos já existentes;
- Passagem de valor por valor, referência e por saída;
- Suporte a polimorfismo; e
- Etc.

A plataforma .NET faz uso de um dos princípios utilizados em Java, o JIT, ou *Just In Time Compiler*. Existe, portanto, uma compilação em tempo de geração da distribuição e outra em tempo de execução. A primeira compilação gera como resultado, um código chamado *bytecode*.

O programador da plataforma .NET pode escolher mais de 20 linguagens diferentes para codificar seu projeto. O compilador traduz o código-fonte em uma linguagem intermediária, chamada MSIL(*Microsoft Intermediate Language*), independente de processador. Uma nova passagem pelo compilador, já em tempo de execução, transforma a codificação intermediária em linguagem de máquina, fornecendo como saída, executáveis, bibliotecas, páginas *web* ou serviços compatíveis com a arquitetura da máquina. Por isso o conceito de JIT já citado.

Toda a plataforma trabalha sobre uma camada chamada CLR(*Common Language Runtime*), um ambiente que age como gerente da execução do código, gerência de memória e outros serviços.

A plataforma conta ainda, com uma biblioteca de classes com acesso a todas as funcionalidades da CLR, com organização por *namespaces*. Estes são espaços de definições de classes que as organizam em grupos de classes que tenham relação umas com as outras.

CAPÍTULO 4 DESENVOLVIMENTO

A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original.

Albert Einstein

Definidos os conceitos, teorias e apresentadas as técnicas e dispositivos, é iniciado o desenvolvimento. A fase de desenvolvimento consiste em, de forma organizada, executar as tarefas previstas em planejamento e chegar ao produto final.

O ponto de partida de todo desenvolvimento de projeto é o atendimento aos requisitos, para que se possa corresponder às expectativas. A constante observação dos requisitos deve ser um direcionamento que não pode ser esquecido. A escolha dos componentes leva em conta esse fator, mas a garantia de que sejam cumpridos até o final deve direcionar a fase de desenvolvimento também. Para isso, os requisitos propostos no início do projeto devem ser revisados:

- Adquirir os sinais de tensão e de corrente de uma fase de corrente alternada (monofásico);
- Calcular e visualizar o fator de potência medido;
- Atuar sobre o banco de capacitores visando a correção do fator de potência;
- Visualizar histórico do fator de potência em tela no computador; e
- Ser um sistema modular.

Para a solução do problema, foi proposto um protótipo modular em 5 blocos, sendo o desenvolvimento dividido de igual forma, porém organizado em um nível superior em *hardware* e *software*. Escolhidos os componentes na fase de projeto, neste capítulo é visto sua integração.

4.1 *HARDWARE*

O hardware consiste de toda a parte física do projeto, e considera-se tanto as montagens mecânicas, como as ligações elétricas e os circuitos eletrônicos. O hardware corretamente especificado e integrado permite a programação das funcionalidades necessárias no projeto.

Para a construção do protótipo são necessários os componentes dos diversos blocos do projeto e ainda, uma bancada de cargas para os testes de medição e controle. É reservado um tópico em especial para a bancada, pois apesar de não fazer parte da parte de controle, é parte importante a fim de validar a implementação. Um esquemático geral é visto na Figura 4.1.

É importante observar ainda, o ambiente ao qual se destina o projeto, pois todo o desenvolvimento se dá visando esse fator.

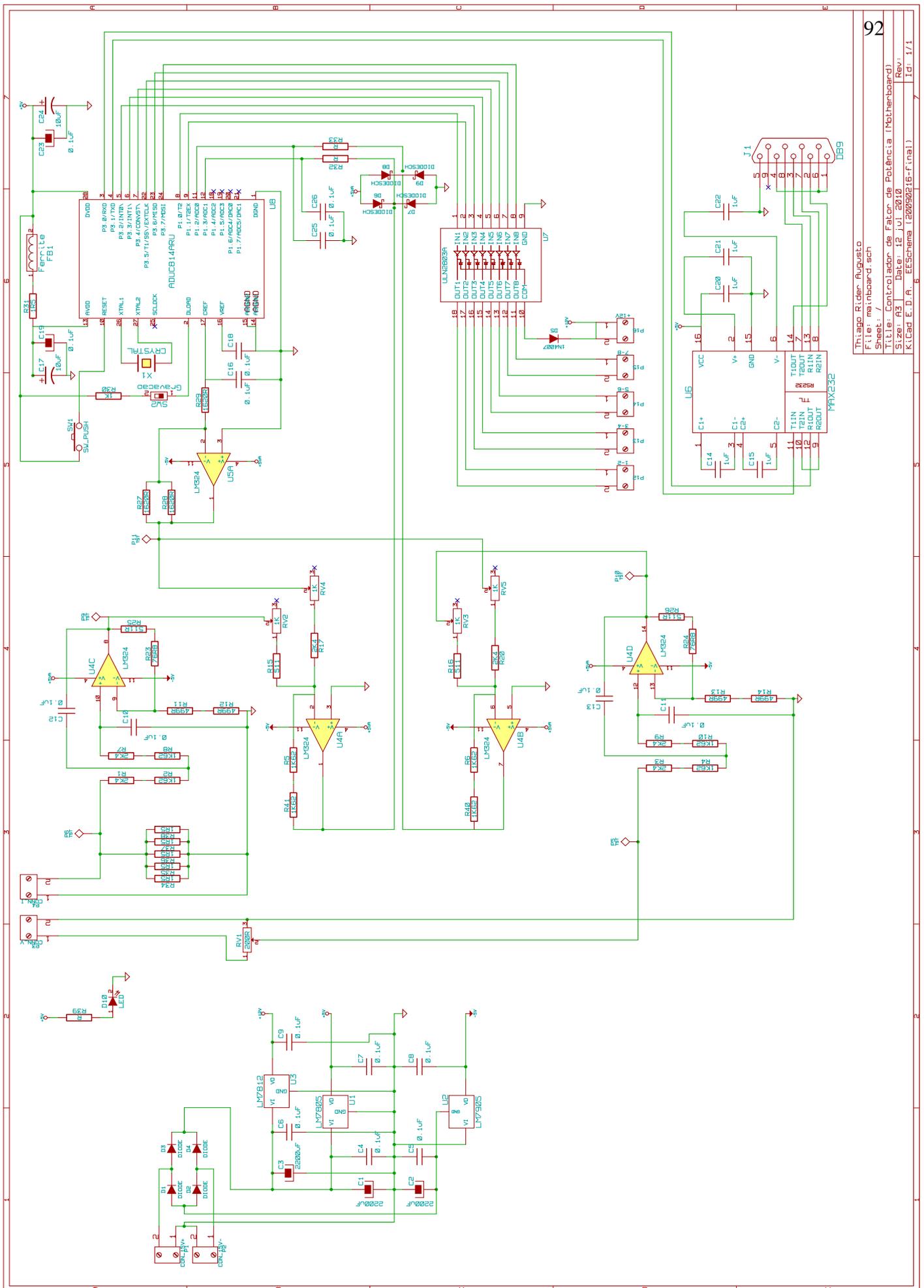


Figura 4.1- Diagrama esquemático geral do projeto

4.1.1 O ambiente de Trabalho do Controlador do Fator de Potência

Normalmente o controlador do fator de potência é empregado em redes industriais ou comerciais, onde a energia apresenta distorções na forma de onda, devido a harmônicas e/ou manobras de equipamentos. Alguns métodos para medição do fator de potência ficam prejudicados quando da presença desses distúrbios. Um deles é o método da “detecção de passagem por zero”, que tem como produto os tempos em que os sinais de tensão e corrente passam por zero. Em ambientes com muitas distorções, o erro fica bastante evidente. Utilizar métodos que façam uso da aquisição e conversão do sinal para digital, como é o do cálculo da tensão e corrente RMS, potência ativa e aparente através de amostragem, leva em consideração toda a forma de onda, com suas componentes harmônicas.

Ainda que resolvido o problema da metodologia, outros problemas de ambiente são destacados, como as interferências eletromagnéticas, que podem gerar uma resposta errônea de um sistema sensível. Para isso, é necessário o cercamento do sistema por uma caixa metálica aterrada (gaiola de Faraday).

4.1.2 Bancada de Cargas

A bancada de cargas visa variar a potência reativa demandada, de forma a testar a capacidade adaptativa do controlador de tratar essa variação. Logicamente existem limites até onde as variações são suportadas, pois para cada quantidade de carga, é exigido um banco de capacitores diferente. A definição da bancada provê todos os parâmetros para as outras partes do projeto.

Para a bancada foram especificadas cargas monofásicas, pois o projeto trata de correção em uma fase. As cargas foram montadas na bancada conforme o Quadro 4.1.

Quadro 4.1-Cargas da Bancada

Nr. Carga	Descrição
1	LUMINÁRIA FLUORESCENTE 2 X 20 W
2	MOTOR WEG ½ CV
3	MOTOR KCELL ½ CV
4	MOTOR METALCORTE ½ CV

Visando uma maior estabilidade e praticidade, as cargas foram fixadas em um suporte, como na Figura 4.2.



Figura 4.2-Suporte para as cargas

A escolha das cargas tem por base não causar uma grande demanda de energia, pois o objetivo da correção do fator de potência pode ser alcançado com pequenas cargas, sendo sua validade ampliada a maiores demandas, respeitando-se o dimensionamento do banco de capacitores e elementos de medição.

Os condutores para os circuitos terminais das cargas (motores e luminária) são dimensionados levando-se em consideração a capacidade de condução de corrente, sendo a área da secção transversal $1,5 \text{ mm}^2$ e $2,5 \text{ mm}^2$ para a luminária e motores, respectivamente. Um quadro de disjuntores também está instalado para o controle das cargas e proteção.

O mesmo suporte em que se encontram as cargas e os disjuntores, abriga também o banco de capacitores a ser tratado na seção correspondente ao Bloco de Controle.

Um diagrama das cargas pode ser visto na Figura 4.3.

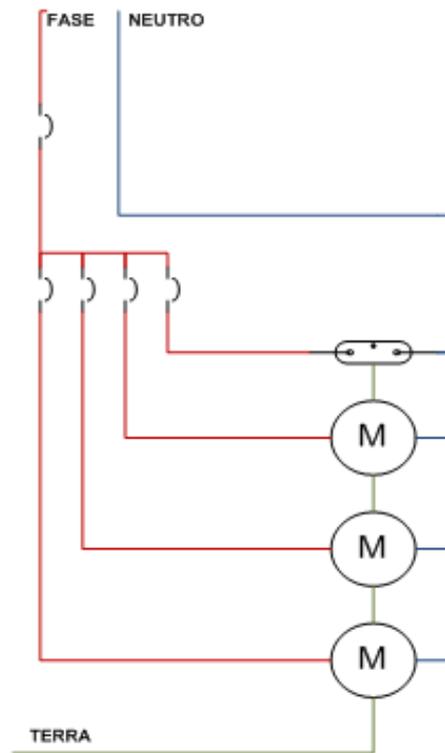


Figura 4.3-Diagrama de cargas da bancada

Para se obter os parâmetros para o resto do projeto, têm-se duas fontes: as folhas de dados e etiquetas dos fabricantes e a experimentação em laboratório. Para os motores, podem-se observar as etiquetas estampadas em cada um, por se tratar de uma norma os fabricantes apresentá-las. As principais características dessas cargas estão resumidas no Quadro 4.2.

Quadro 4.2-Informações de cargas da bancada

Nr Carga	1	2	3	4
Descrição	LUMINÁRIA FLUORESCENTE 2 X 20 W	MOTOR WEG ½ CV	MOTOR KCELL ½ CV	MOTOR METALCORTE ½ CV
Modelo	00157	E48 0196	48/56	10VAD48
KW(HP/CV)	-	0,37(1/2)	0,37(1/2)	0,37(1/2)
I _p /I _n (A)	-	4,6	4,6	6,2
I Nominal(A)	0,28	3,70	4,9-6,2	4,8-6,0
Rendimento	-	N/D	N/D	60,0%
Cos ϕ	0,95	N/D	0,74	0,60

Um ensaio realizado em laboratório mostra alguns parâmetros de difícil aproximação teórica, já que os motores não tinham nenhuma carga em seus eixos e alguns dados são

baseados no carregamento desses dispositivos a partir de 50% de sua potência nominal. Logo, para a realização do experimento, é necessário um equipamento denominado “Analisador da qualidade de energia elétrica”. O dispositivo possui três ponteiros para medição de tensão e três alicates para medição de corrente. Como o projeto contempla somente 1 fase, somente 1 garra e 1 alicate são necessários. Ligadas as cargas uma a uma, podem-se verificar as potências ativa, reativa e aparente demandadas, o fator de potência, além das tensões e correntes instantâneas. A carga 1, por apresentar muito baixo consumo, teve de ser medida com alicate amperímetro, pois o analisador não é capaz de medir tão baixa corrente. Configurados os equipamentos, foram apresentadas as seguintes medições, conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1-Ensaio em bancada de cargas com analisador de qualidade de energia e alicate amperímetro

Nr Carga	1	2	3	4
Descrição	LUMINÁRIA FLUORESCENTE 2 X 20 W	MOTOR WEG ½ CV	MOTOR KCELL ½ CV	MOTOR METALCORTE ½ CV
Tensão	209,50 V	210,40 V	210,60 V	210,60 V
Corrente	0,22 A	3,40 A	5,30 A	5,30 A
Pot. Ativa	-	0,22 kW	0,22 kW	0,22 kW
Pot. Reativa	-	0,62 kVAr	0,62 kVAr	0,62 kVAr
Pot. Aparente	-	0,66 kVA	1,00 kVA	1,00 kVA
Fat. Pot.	-	0,33	0,22	0,22

Um resumo do pior caso, com os totais apurados, excetuando-se a luminária, que por apresentar alto fator de potência, acaba por aumentar o fator total, é dado por:

- Tensão: 210,20 V;
- Corrente: 12,64 A;
- Potência Ativa : 0,66 kW;
- Potência Reativa: 2,58 kVAr; e
- Potência Aparente: 2,66 kVA.

Após esse experimento, foi possível adquirir dados para o dimensionamento dos elementos de medição e banco de capacitores, conforme é exposto nas seções seguintes.

4.1.3 Bloco de Entrada e Condicionamento

Esse bloco, responsável por adequar a entrada, que provém da rede elétrica, aos níveis de trabalho do microcontrolador, é composto de:

- Transformador de Potencial;
- Transformador de Corrente;
- Filtros Passa-Baixa de Segunda Ordem;
- Amplificadores Não-Inversores de Ganho Variável para o sinal de tensão e corrente; e
- Amplificador Inversor para o sinal de referência do microcontrolador.

Para a escolha dos componentes, foram levados em consideração:

- A tensão de trabalho da rede, de 220 Volts;
- Corrente medida na bancada de carga; e
- Tensão de entrada do microcontrolador escolhido, de 2,5 Volts.

Dessa forma, os elementos de medição devem ser compatíveis com 220 Volts, e a sua relação de transformação, no caso dos transformadores, deve reduzir as tensões para níveis próximos aos de entrada, para que, com pequena regulação, possa-se adequá-los. Assim, o transformador de potencial escolhido para a tarefa tem a relação de transformação de 220V/6V e sua corrente, de 100mA, já que o processo de instrumentação não drena muita corrente, e o tamanho do transformador com essa corrente é bem reduzido. Para o transformador de corrente, a escolha baseia-se na corrente nominal máxima a ser medida, e conforme visto em experimentação, essa é de aproximadamente 12,64 A, levando a um transformador de relação 20:1 A. Para o TC, deve-se ainda, inserir um resistor em série com seu secundário para fornecer uma queda de tensão proporcional à corrente. Este resistor é denominado resistor shunt e o valor selecionado foi de 0,2 Ohm, por apresentar uma queda de tensão de 0,2 V quando a corrente no secundário é de 1 A. O transformador de corrente pode ser visto na Figura 4.4.



Figura 4.4-Transformador de corrente

Os sinais do secundário desses transformadores devem passar por filtros, para que as frequências das harmônicas que não interessam (acima da 5ª harmônica, ou 300 Hz) e também para que o efeito *aliasing* não seja observado. O antialiasing leva em consideração o bloco posterior, onde se trabalha com a aquisição de sinais, devendo o filtro ter uma boa atenuação nas frequências altas dos ruídos e abaixo da frequência de amostragem do projeto, notadamente na frequência de Nyquist, ou metade da frequência de amostragem. Pelo antes exposto, a frequência de corte do filtro escolhido foi de 400 Hz, cumprindo todos os requisitos, e o filtro escolhido foi de segunda-ordem, por apresentar uma taxa de atenuação mais elevada a partir da frequência de corte de 40 dB por década. Uma configuração do tipo Sallen-Key foi montada, por apresentar ganho bastante linear na faixa de passagem. O diagrama, com os valores ideais para resistores e capacitores pode ser visto na Figura 4.5.

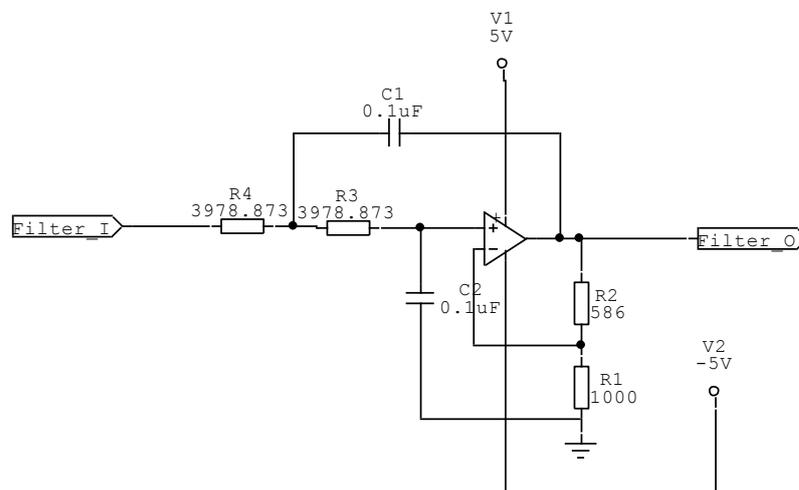


Figura 4.5-Configuração ideal do filtro passa-baixa configuração Sallen-Key

Essa configuração tem ganho na faixa de passagem dado pelos resistores R1 e R2, e vale 4 dB. Na frequência de 1500 Hz, o ganho é de -20 dB, aproximadamente. O diagrama de Bode do circuito pode ser visto na Figura 4.6.

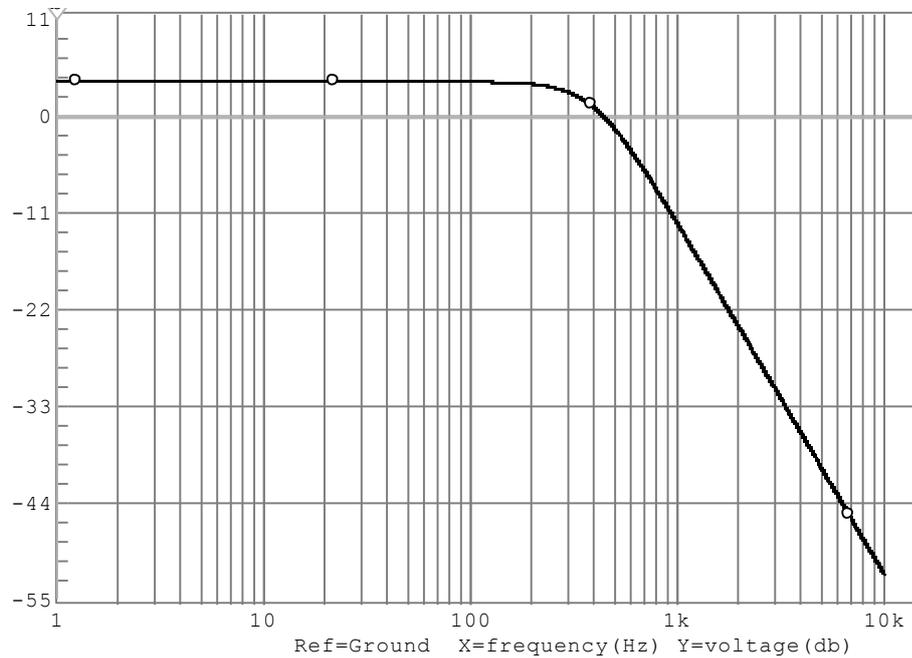


Figura 4.6-Diagrama de Bode para a resposta em frequência do filtro

A montagem com valores comerciais para a entrada de corrente provinda do TC resulta no seguinte circuito, mostrado na Figura 4.7.

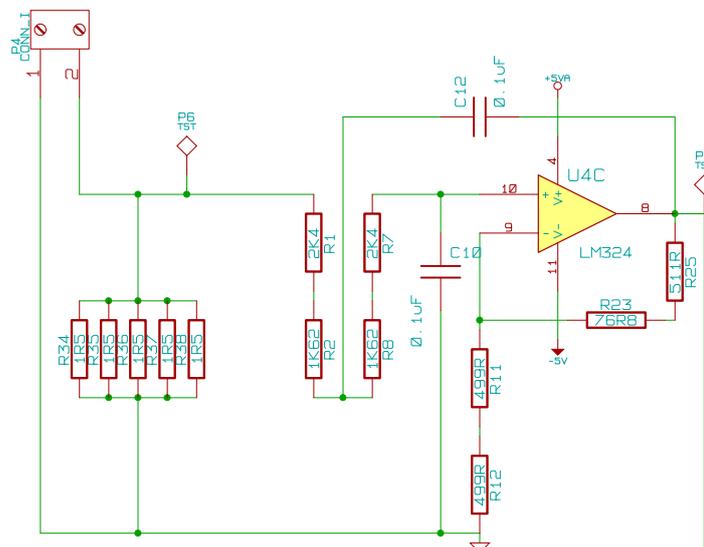


Figura 4.7-Filtro do sinal de corrente do TC

Os resistores R34 a R38 garantem uma tensão de aproximadamente 0,2 V_p, pelo secundário do TC fornecer 1 A quando a corrente na carga for de 20 A.

Outra montagem para a filtragem da tensão foi feita, com um detalhe: o secundário do TP, por apresentar a tensão de 6 V, necessita ser ajustado para uma amostra de amplitude semelhante à da corrente. Para isso, utiliza-se um potenciômetro multivoltas para o ajuste. Esse tipo de dispositivo necessita de aproximadamente 15 voltas para apresentar seu valor máximo nominal, por isso provê bastante precisão. A montagem do ajuste do sinal para o filtro do canal de tensão pode ser vista na Figura 4.8.

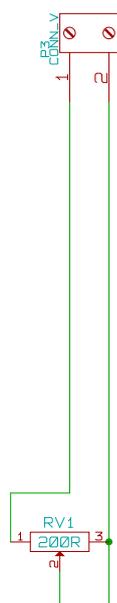


Figura 4.8-Ajuste da tensão para o filtro

A saída de ambos os filtros, de tensão e corrente, tem uma amplitude bastante baixa, de forma que é necessária uma amplificação. Para isso, foi projetada também uma etapa de ganho variável com amplificadores operacionais. Aproveitando o mesmo CI LM324, onde se tem quatro amplificadores, pode-se projetar um amplificador somador de ganho variável, que soma dois sinais e concede diferentes “pesos” a cada um deles. Isto porque, além da necessidade de se ampliar o sinal, é preciso também transpor os sinais de tensão e de corrente para o 1º quadrante, pois o conversor analógico digital trabalha com tensões positivas, de 0 a +2,5 V.

Para transpor o sinal, necessita-se de uma tensão DC, que somada ao sinal AC e devidamente amplificada, vai resultar no sinal que se precisa. Para gerar essa referência DC, o

conversor analógico-digital tem uma saída de tensão com o valor do máximo admitido como sinal em seus canais, ou seja, + 2,5 V. Para aproveitar o máximo da resolução do canal, desloca-se o sinal AC para o meio da faixa de medição, ou seja, + 1,25 V. Para isso, o sinal de referencial passa por um buffer não-inversor, que divide + 2,5 V por dois, e entra no somador, junto com o sinal do filtro, para serem amplificados com diferentes “pesos”.

4.1.4 Bloco de Aquisição e Processamento

Para o bloco de aquisição, composto basicamente do conversor analógico-digital e do microcontrolador, é necessária uma correta especificação de componentes periféricos de alimentação e condicionamento para seu correto funcionamento.

O microcontrolador trabalha com uma tensão de alimentação de + 3 V ou + 5 V. A segunda alternativa foi a escolha da fonte por ser a mesma tensão de alimentação dos amplificadores operacionais e maior facilidade de se achar circuitos reguladores comerciais. O circuito com as três tensões de alimentação (+ 5 V, - 5 V e + 12 V) requeridas no projeto foi desenhado conforme Figura 4.9.

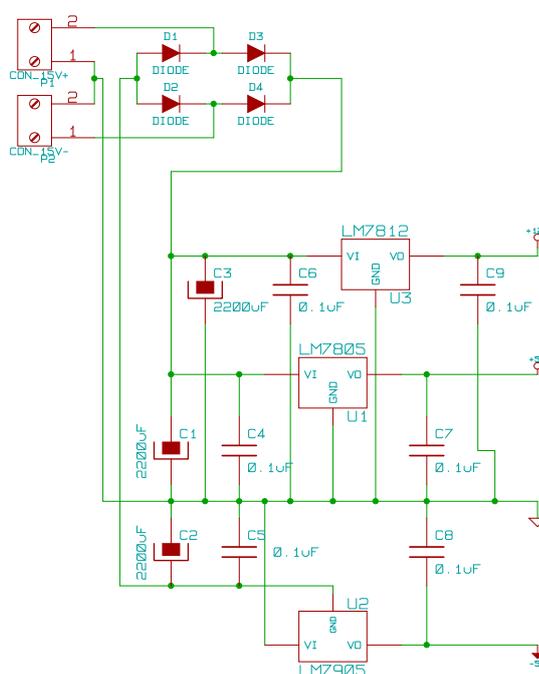


Figura 4.9-Fonte de alimentação de + 5V, - 5V e + 12 V

A tensão de +12 V vista na fonte é para uso nas bobinas dos relés, conforme é visto na seção relativa ao Bloco de Controle.

Com o conversor analógico-digital integrado ao microcontrolador, o projeto é otimizado, e a escolha de alguns detalhes é necessária. Foi optado por se utilizar a mesma fonte para os circuitos digitais e analógicos, por se averiguar não haver muito ruído após filtragem em cada CI digital, utilizando-se para isso capacitores não-polarizados de valor 100 nF. O método tem por base aterrar as altas frequências, eliminando os ruídos provenientes de alimentação. Uma ligação com fonte simples é ilustrada no datasheet do microcontrolador (Analog Devices, 2003), e pode ser vista na Figura 4.10.

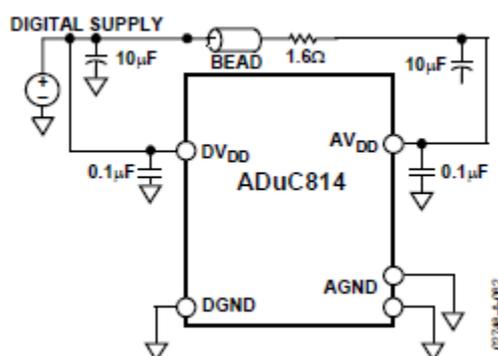


Figura 4.10-Ligação com fonte simples
(FONTE: Analog Devices, 2003)

Outra questão a se considerar quando da utilização de conversores de alta resolução como o do ADUC814 é que em se utilizando o mesmo terra para circuitos analógicos e digitais, os últimos devem ter o menor caminho possível de retorno à terra vindo do CI, não sendo recomendável a passagem de correntes digitais sob o conversor. Neste caso, o datasheet sugere a disposição de componentes digitais junto à fonte de um lado da placa e a parte analógica do sistema do outro lado.

Uma questão bastante importante diz respeito ao cristal para o clock do microcontrolador, mas isso se torna simples pelo fato desse núcleo trabalhar com um cristal do tipo utilizado em relógios, de 32 kHz. Fácil de ser adquirido no comércio, esses cristais são baratos e têm tamanho reduzido, sendo perfeitos ao uso em sistemas embarcados. A solução dada à montagem do microcontrolador e cristal foi a solda do microcontrolador, apresentado em invólucro SMD do tipo SSOP28, em uma placa adaptadora para DIP28, já em conjunto com o

cristal. Isso resolve a problemática da resolda na placa principal em caso de defeito e permite também que o cristal fique tão perto quanto possível dos pinos do microcontrolador. A adaptação pode ser vista na Figura 4.11.



Figura 4.11-Adaptação do invólucro SSOP28 para DIP28 e cristal

A previsão de uma forma de gravação do dispositivo no circuito, ou gravação ICP é uma das características mais interessantes dos microcontroladores mais modernos, e com o ADUC814 tem-se ainda a facilidade de gravação através da porta serial sem quase nenhum componente adicional. A única necessidade se faz em ter um resistor de valor 1 K Ohm para inserir nível lógico alto no pino DLOAD (pino 2). Após essa configuração e um *reset*, o microcontrolador entra em modo de gravação, ficando pronto a receber um programa através dos pinos RxD e TxD (pinos 3 e 4). Um botão de *reset* também foi inserido no circuito, pois é interessante ter essa opção ao invés de se desligar todo o sistema quando da reconfiguração.

Outra observação, esta com relação ao conversor AD, é que em suas entradas, deve haver um pequeno filtro de transientes constituído por um resistor de 10 Ohms e um capacitor de 0,1 μ F, conforme Figura 4.12.

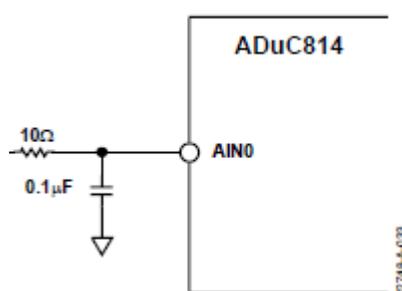


Figura 4.12-Filtro de transientes na entrada analógica do conversor
(ADAPTADO de Analog Devices, 2003)

A necessidade de se usar a referência interna de tensão para o conversor também requer alguns cuidados especiais, como o desacoplamento dos sinais V_{REF} e C_{REF} do microcontrolador a terra. Isso é feito inserindo-se um capacitor de $0,1 \mu\text{F}$ entre o pino e a terra, conforme Figura 4.13.

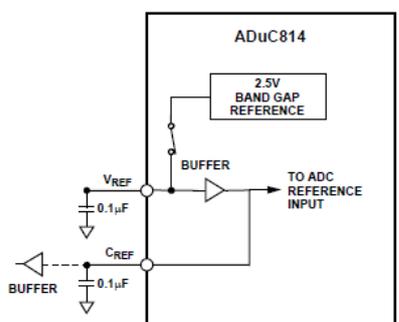


Figura 4.13-Desacoplamento de V_{REF} e C_{REF}
(FONTE: Analog Devices, 2003)

Para a utilização do sinal de referência em C_{REF} , é preciso ainda, utilizar-se de *buffer*, com o intuito de drenar a menor corrente possível. No projeto, este sinal é utilizado para transpor o sinal AC de tensão e corrente para um nível DC, conforme explanado anteriormente.

Um diagrama esquemático da montagem descrita está ilustrado na Figura 4.14.

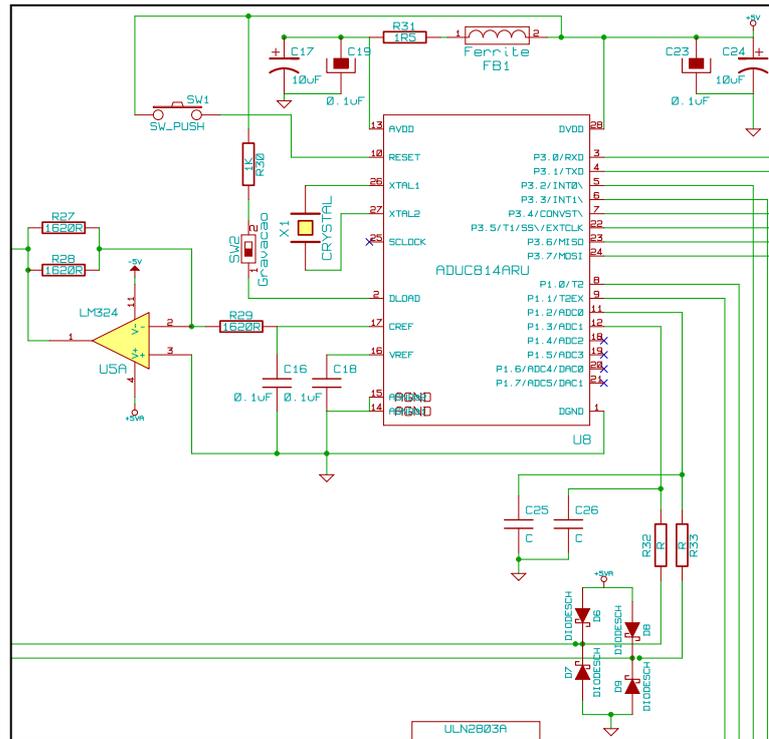


Figura 4.14-Diagrama esquemático do circuito do microcontrolador e conversor AD

4.1.5 Bloco de Comunicação com o PC

O bloco de comunicação consiste da interligação do PC ao microcontrolador via porta serial. Para essa ligação, o CI MAX 232 foi utilizado, seguindo recomendações presentes no seu datasheet. Também foi consultado o datasheet do microcontrolador, que indica a correta ligação de cada sinal RxD e TxD em seus pinos. O esquemático da ligação entre o conector para a porta serial e o CI MAX 232 pode ser visto na Figura 4.15.

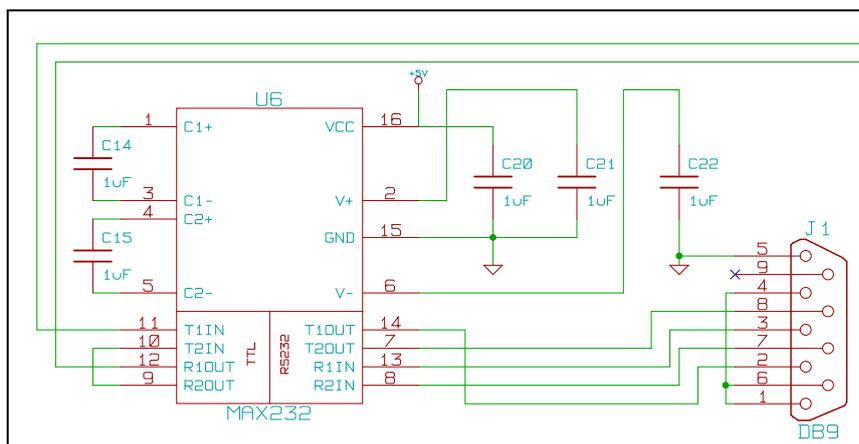


Figura 4.15- Esquema de ligação do CI MAX 232 ao conector da porta serial

4.1.6 Bloco de Controle

Para o bloco de controle, a solução consiste na implementação de uma placa de relés para chaveamento dos capacitores do banco a partir da lógica de controle e *driver* para corrente superior à fornecida pelo microcontrolador. A lógica de controle é dada por software no microcontrolador, mas a saída deste, em +5V pode fornecer corrente na ordem de poucos mA. Como os relés escolhidos necessitam de uma corrente maior, de 40 mA em +12V, a montagem de um circuito driver com o CI ULN2803 foi realizada. Nesse bloco se pensou ainda, em tornar o banco intercambiável, e para isso, utilizou-se de bornes de ligação da saída do CI *driver* para a placa de circuito impresso dos relés.

Os relés foram escolhidos pensando-se nas dimensões, corrente e tensão de energização da bobina, tensão e corrente no contato. As dimensões devem ser reduzidas, pois o espaço disponível na bancada é pequeno. Por isso foram escolhidos os mini-relés para circuitos impressos, por facilitarem a montagem em placas e possibilidade de se agruparem oito relés facilmente. A corrente de energização da bobina também não poderia ser muito alta, pois de outra forma, uma fonte extra de energia seria necessária. Assim, a tensão escolhida para a bobina tem de ser mais alta que + 5 V, escolhendo-se + 12 V, o que possibilita um fornecimento de corrente menor, de aproximadamente 40 mA. A tensão no contato do relé depende exclusivamente da tensão entre fase e neutro do circuito monofásico das cargas, ou 220V. Já a corrente requisitada nos contatos depende dos capacitores a serem chaveados, pois cada um tem uma demanda de corrente ao ser acoplado à rede. Um valor de capacitância

maior necessita de um relé com uma maior capacidade de corrente em seus contatos. Para o protótipo, foram escolhidos relés de 16 A de capacidade de corrente no contato, já que contempla uma corrente acima da máxima requerida pelo banco, preservando a sua vida útil. Os contatos dos relés com conectorização *Faston* também facilita para a ligação nos capacitores, que também apresentam esse conector. Os relés podem ser vistos soldados em uma placa de circuito impresso na Figura 4.16.

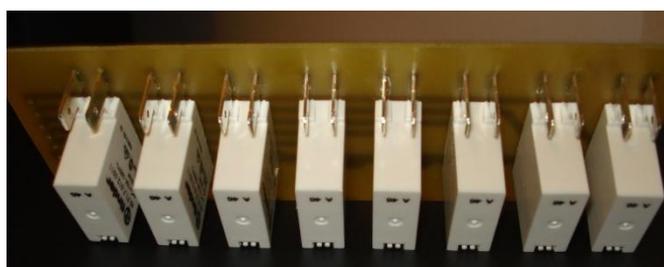


Figura 4.16 - Relés para PCI soldados na placa de controle

O valor nominal do banco de capacitores escolhido após teste da bancada tem o valor de 2,4 kVAr e conta com oito estágios cada qual representado por um capacitor de filme de polipropileno metalizado ou *Metalized Polypropylene Film*, por apresentar uma maior vida útil e baixas perdas, características demandadas pela aplicação de correção do fator de potência. Seus fatores de sobretensão e sobrecorrente também são decisivos para a escolha, pois suporta tipicamente 110% e 130% da tensão e corrente nominais, respectivamente. Sua forma compacta, regime de funcionamento contínuo e dielétrico seco torna-o adequado para esse uso. A escolha dos capacitores também deve levar em conta a tensão máxima de trabalho, que no caso de circuitos 220 V deve ser 330 V ou maior devido ao valor de pico do circuito. A gama de valores de capacitância disponíveis no mercado facilmente, assim como seu valor em potência reativa é mostrada no Quadro 4.3.

Quadro 4.3-Gama de valores de capacitores PPM para até 330V

Valor (μF)	Tipo	Conexão	Potência kVAr	Potência VAr
2	PPM	TERMINAL	0,036	36,49
2	PPM	FIO	0,036	36,49
3	PPM	TERMINAL	0,055	54,74
5	PPM	TERMINAL	0,091	91,23
10	PPM	TERMINAL	0,182	182,46
15	PPM	TERMINAL	0,274	273,70
20	PPM	TERMINAL	0,365	364,93
20	PPM	FIO	0,365	364,93
30	PPM	TERMINAL	0,547	547,39
33	PPM	TERMINAL	0,602	602,13
35	PPM	FIO	0,639	638,62
40	PPM	TERMINAL	0,730	729,85

O capacitor de polipropileno com conector *Faston* pode ser visto na Figura 4.17.



Figura 4.17-Capacitor com conector Faston

Todos os oito estágios do banco são acoplados em paralelo com as cargas para fornecerem a energia reativa necessária a cada uma. Os estágios foram divididos conforme Quadro 4.4.

Quadro 4.4-Potência dos estágios do banco

Estágio	Capacitância	Potência (kVAr)
1	3 μF	0,055
2	3 μF	0,055
3	5 μF	0,091
4	10 μF	0,182
5	10 μF	0,182
6	20 μF	0,365
7	40 μF	0,730
8	40 μF	0,730

Os capacitores foram todos ligados ao neutro e o acoplamento da fase é feito pelo relé. A montagem final do banco e placa de circuito impresso dos relés pode ser vista na Figura 4.18.



Figura 4.18-Montagem final do banco de capacitores

4.2 SOFTWARE

A parte de *software* desenvolvida para o projeto é distribuída entre o bloco de visualização de dados/reconfiguração e o firmware, parte de código que é gravada no microcontrolador.

No bloco de visualização de dados/reconfiguração foi utilizada a plataforma .NET e desenvolvido um programa de computador em linguagem C# para mostrar os dados do fator de potência na tela do computador.

O firmware foi concebido em um ambiente de desenvolvimento integrado chamado Keil μ Vision versão 3 (ARM, 2010), que facilita a escrita de código em C estruturado ou diretamente em assembly, por ter facilidades como bibliotecas de funções matemáticas, de definições do microcontrolador e possibilidade de realização de testes e agrupamento dos arquivos em projetos, inclusive de documentação, como arquivos textos.

4.2.1 Bloco de Visualização de Dados/Reconfiguração

O bloco de visualização de dados/reconfiguração é representado por um software de computador para o sistema operacional *Microsoft Windows*, sendo desenvolvido na plataforma .NET com o ambiente de desenvolvimento integrado *Microsoft Visual Studio*. Foram criados dois formulários, um para a visualização do histórico (“MONITORAMENTO.CS”) e outro para a configuração da porta de comunicação serial (“CONFIGURAPORTA.CS”). Os códigos-fonte para o formulário de monitoramento encontra-se no Apêndice A e para o formulário de configuração, no Apêndice B.

O software faz uso de diversos *namespaces* ou espaço de nomes, um espaço ou região dentro de um programa que tem diversas funcionalidades implementadas, como classes, métodos e funções e onde é possível realizar chamadas a estas rotinas e nomes. Os namespaces utilizados são:

- *System;*
- *System.Data;*
- *System.Drawing;*
- *System.Text;*
- *System.Windows.Forms;* e
- *System.IO.Ports.*

O *namespace System* é a raiz de todos os outros *namespaces* e contem os tipos de dados mais comuns e utilizados. O *namespace Data* define classes de dados não tão usuais e fornece métodos para acessá-los, como *DataTable*, utilizado no projeto. Essa classe representa uma tabela de dados que estão na memória e é utilizada para criar uma tabela com as colunas de Data/Hora e Fator de Potência. O *namespace Drawing* implementa métodos para desenho, assim como o *Text* implementa métodos para tratamento de texto e o *Windows.Forms* trabalha

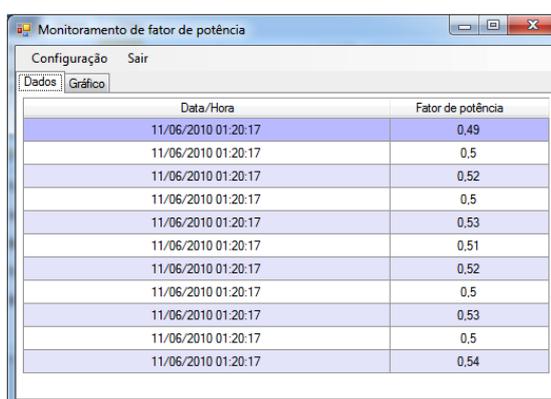
com janelas do *Windows*. Por último, o IO.Ports é utilizado para acesso às funções inerentes a porta de comunicações serial.

A possível ação de usuário no software é a de configurar a porta de comunicações, permitindo trocar:

- Porta;
- Velocidade;
- Bits de Dados;
- Paridade; e
- Bits de Parada.

O software funciona abrindo a porta selecionada à recepção de dados, e aguardando que estes cheguem ao *buffer* serial. Quando isto acontece, uma ação é tomada e os dados brutos recebidos são armazenados em memória em uma instância da classe *DataTable* chamada “FatoresPotencia”. Essa tabela de dados apresenta as colunas “Data” e “FatorPotencia”. Os dados recebidos chegam na forma de 1 *byte*, sendo o seu valor de 0 a 100, representando cada um de seus algarismos a posição da unidade do fator de potência, a de décimo e a de centésimo. Se o valor recebido for 60, por exemplo, o fator de potência indicado na tela será de 0,60.

A tela do software de visualização de dados pode ser vista na Figura 4.19.



Data/Hora	Fator de potência
11/06/2010 01:20:17	0.49
11/06/2010 01:20:17	0.5
11/06/2010 01:20:17	0.52
11/06/2010 01:20:17	0.5
11/06/2010 01:20:17	0.53
11/06/2010 01:20:17	0.51
11/06/2010 01:20:17	0.52
11/06/2010 01:20:17	0.5
11/06/2010 01:20:17	0.53
11/06/2010 01:20:17	0.5
11/06/2010 01:20:17	0.54

Figura 4.19 - Tela do software de visualização de dados

4.2.2 Firmware

Para o firmware o fluxograma da Figura 4.20 foi desenvolvido em linguagem de programação C para a família 8051, levando ao código do Apêndice C.

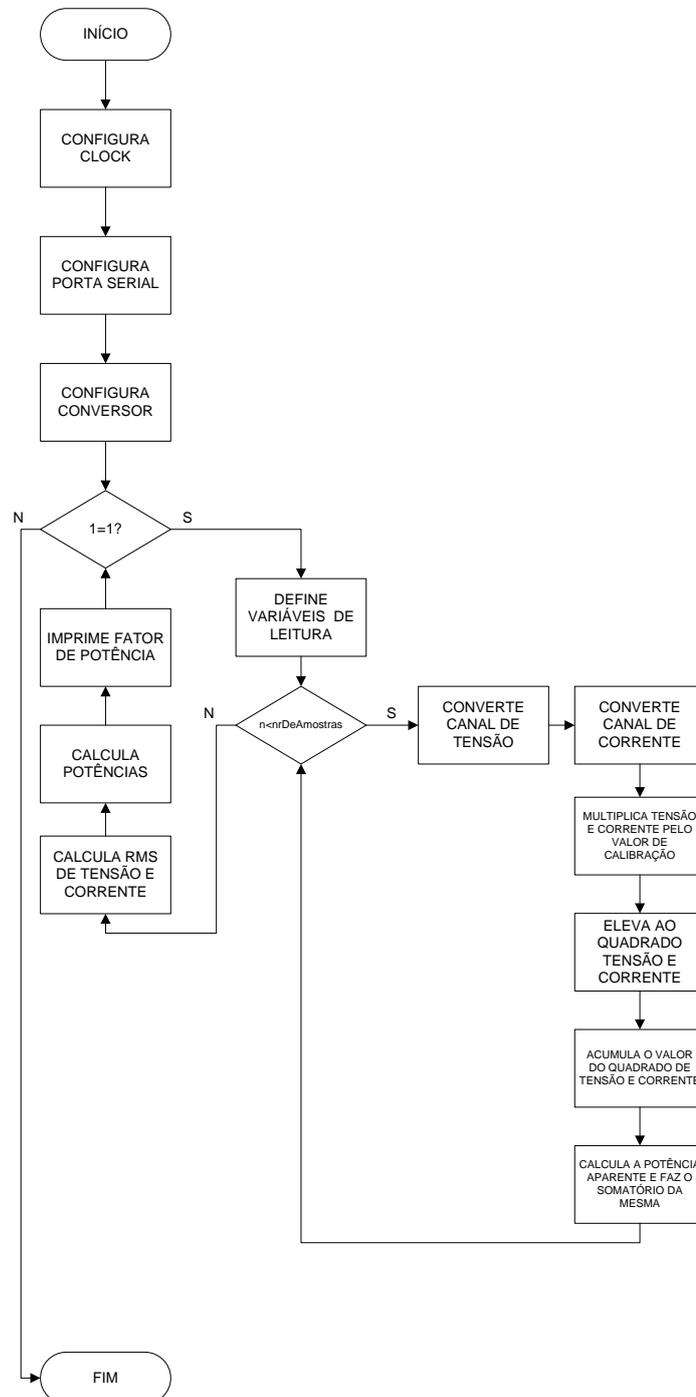


Figura 4.20 - Fluxograma do *firmware*

O *firmware* faz uso da biblioteca “ADUC814.h” disponível no compilador para realizar a compilação correta. A biblioteca contém definições de endereços dos registradores, portas e *bits* para configuração e facilidade de uso na programação. Além dessa biblioteca, utiliza-se também a “STDIO.h” que facilita o uso da porta serial, implementando funções como a *printf()*, que imprime qualquer texto direcionando-o à porta serial.

O trabalho em ponto flutuante é possível utilizando-se a biblioteca “MATH.h”, que dispõe também de funções para extração de raiz quadrada, dentre outras.

O programa inicia configurando o *clock*, a porta serial e o conversor. A configuração do *clock* foi feita em 16.78 Mhz, frequência máxima do núcleo do ADUC814. Essa frequência foi utilizada por aproveitar melhor o núcleo para realizar tarefas dispendiosas como cálculos em ponto flutuante, já que a aquisição de dados é sempre posterior à diversas operações, levando à queda de precisão do dispositivo caso essas operações entre as conversões consumissem muito tempo.

A porta serial foi configurada usando o *timer* 1 como gerador de taxa de recepção e transmissão. Para isso, foram ajustados os registradores SCON e TMOD, de forma a configurar o *timer* em modo 2, com recarga e de 8 *bits*. A porta serial opera em modo 1, de 8 *bits*. Com um ajuste de 1 bit SMOD, pode-se dobrar a frequência normal da interface serial, que no caso deste projeto é de 1200 *bauds*, assim chegando-se aos 2400 *bauds*.

O conversor é configurado para utilizar a referência interna de + 2,5 V e um *clock* para o conversor de 1/8 do *clock* do núcleo do microcontrolador. É ajustado também para ter um tempo de aquisição de 4 *clocks* do conversor e não utilizar nem o *timer* e nem o pino CONVST para iniciar as conversões.

Após estas configurações iniciais, o programa entra em *loop* infinito, como todo *firmware* deve ser executado, e dentro deste *loop* realiza a tarefa de cálculo dos valores relevantes. Esse cálculo é realizado baseado num certo número de amostras definido pela variável “nrDeAmostras” definida em tempo de projeto.

A partir desse momento, o conversor adquire uma amostra de tensão e armazena na variável “Amostra_V” e logo após faz o mesmo com a corrente, guardando-a em “Amostra_I”. A partir dessas amostras, é calculado o quadrado de cada uma .

Os valores do quadrado da tensão e da corrente são acumulados separadamente em somatórios de quadrados de tensão e de corrente. O cálculo da potência instantânea é dado

pela multiplicação de “Amostra_V” por “Amostra_I” e esse valor de potência também é acumulado em um somatório.

Com o fim da repetição deste trecho do código por alcançar o valor de “nrDeAmostras”, tem-se o somatório de quadrado da tensão e da corrente e um somatório com as potências instantâneas. Com isso é possível calcular os valores RMS de tensão e corrente, que é dado pela raiz quadrada da soma da grandeza dividida pelo número de iterações do *loop*, ou seja, “nrDeAmostras”.

Calculados os valores RMS, a potência ativa é dada pela divisão do somatório de potências instantâneas pelo “nrDeAmostras”. A potência aparente é a multiplicação dos valores RMS de tensão e corrente e o fator de potência é dado pela divisão da potência ativa pela aparente. O fator de potência é então enviado via porta serial e os acumuladores são zerados, recomeçando as iterações.

Ressalta-se que a parte de software necessária ao controle do fator de potência não foi possível de ser implementada, pois se necessita de estudos complementares.

4.3 RESULTADOS

Desenvolvidos todos os circuitos e a parte de software possível, testes para validação da teoria precisam ser feitos. O protótipo foi da mesma forma que no desenvolvimento, testado em estágios, visando validar cada estágio para a integração com o próximo, evitando problemas de mau funcionamento por conta de saídas errôneas dos estágios.

O primeiro estágio a ser testado foi a entrada dos sinais de tensão e corrente, do transformador de potencial e do transformador de corrente, respectivamente. Ambos se comportaram como esperado com pequenas variações dos valores nominais, principalmente o TC, que seria o mais problemático para o condicionamento, por conta da escolha do valor do resistor shunt. Neste caso, a saída de 0,2 V foi superada e chega a ser 0,25 V, mas isto não inviabiliza o resultado, pois mesmo assim, o componente se comporta de forma linear e com ajustes esse fato é contornado.

A filtragem foi a etapa de maior dificuldade do projeto, pois na primeira montagem, em circuito junto ao do microcontrolador e com a mesma fonte de alimentação dos circuitos

digitais, os circuitos do amplificador operacional sofreram interferências e apresentaram saída comprometida, com uma frequência de 1 KHz embutida de alta amplitude que se sobreponha à frequência do sinal de tensão, de 60 Hz. A montagem experimental desta primeira aproximação para o estágio de filtragem utilizou-se de:

- Gerador de função configurado para a amplitude de 0,2 V e frequência de 60 Hz;
- Placa do microcontrolador e filtros; e
- Osciloscópio de dois canais configurado com ambos os canais para 0,2V/Divisão e 10ms/Divisão.

A interferência atribuída ao uso da mesma fonte de alimentação tanto para o circuito de filtragem quanto para os circuitos digitais foi resolvida realizando-se uma nova montagem, com uma fonte exclusiva para a etapa de nivelamento e condicionamento do sinal idêntica a proposta para a primeira aproximação. Os resultados obtidos com esta segunda aproximação foram de um filtro ativo de segunda ordem com o comportamento muito próximo ao teórico, com ganho na faixa de passagem de aproximadamente 4,08 dB e um ganho negativo acentuado (aproximadamente -40 dB/década) a partir da frequência de corte de 400 Hz.

Outro circuito também beneficiado com a montagem de uma nova fonte de alimentação foi o circuito de tensão DC de referência provinda do microcontrolador. Com a nova fonte de alimentação e o circuito montado fora da placa do microcontrolador, não foram observadas as flutuações antes presentes. O circuito funcionou como projetado e com a referência de +2,5 V do ADUC814, o amplificador operacional tem sua saída fixada no negativo da metade desta, ou seja, - 1,25 V.

O próximo estágio testado é o amplificador somador inversor que tem como entrada o sinal do filtro e da referência de tensão condicionada do ADUC814. Aqui foi possível verificar o funcionamento correto do circuito como somador, e com os diferentes pesos aplicados aos sinais foi possível obter um sinal de polaridade positiva que contempla a forma de onda do filtro e uma componente DC de referência. A característica inversora garantiu que a tensão de -1,25 V fosse invertida para + 1,25 V, comprovada com o auxílio de osciloscópio, após retirado o sinal do filtro do somador. O ajuste utilizando os valores projetados permitiu amplificar o sinal do filtro para preencher toda a faixa coberta pelo conversor analógico-digital de 0 V a + 2,5 V, pois com uma componente transpondo o “zero” para o valor + 1,25, a amplitude do sinal do filtro de aproximadamente 0,2 V deveria ser amplificada até 1,25 V de pico, ou um ganho de valor 6,25. Um ganho ligeiramente maior é alcançado e então o sinal

ajustado, chegando a tensão de saída do somador ao valor de 2,3 V que por questões de segurança não se permitiu chegar ao máximo de tensão permitida ao conversor A/D. A Figura 4.21 mostra as duas formas de onda, a da entrada em AC e a da saída já transposta para DC e com amplitude sendo regulada(Canal 1 com 0,2 V/DIV e Canal 2 com 0,5 V/DIV).

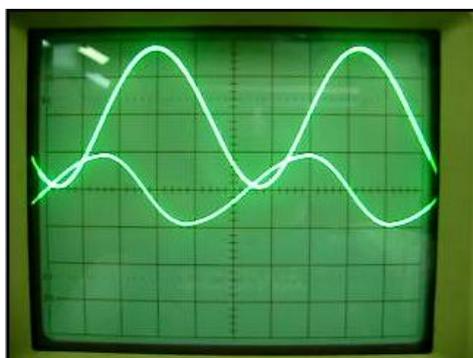


Figura 4.21 - Entrada e saída do circuito amplificador somador

O efeito do filtro passa-baixa pode ser notado na Figura 4.22, onde tem-se de um quadro para o outro(esquerda para a direita), o aumento em frequência e a diminuição do sinal no canal 2, que está transposto para DC.

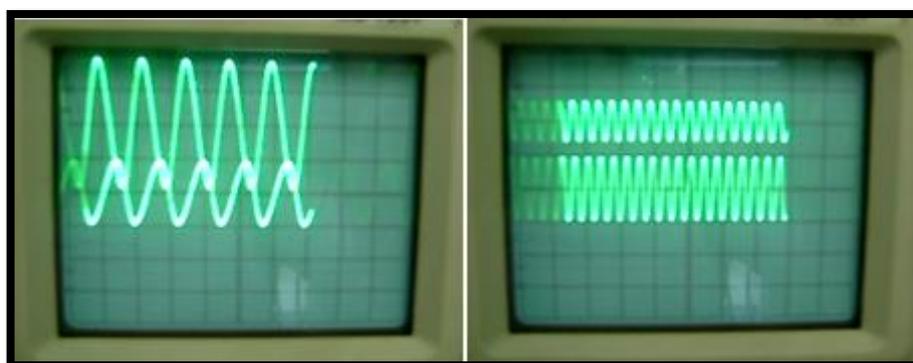


Figura 4.22 - Efeito do filtro passa-baixa

O microcontrolador com conversor A/D e o circuito de comunicação serial foi testado utilizando-se software do próprio fabricante Analog Devices, o Windows Analog Software Program (WASP) versão 6.1, disponível no sítio gratuitamente. Esse software testa a conversão analógico-digital realizada pelo microcontrolador através de comunicação serial. Desta forma, tanto o dispositivo microcontrolador e conversor quanto o circuito de

comunicação com o computador estariam sendo testados já de forma integrada. Isso porque o programa precisa que o microcontrolador entre em modo de gravação para só então gravar um programa que interage com o software *Windows* através da porta serial, acionando o conversor e fazendo com que o microcontrolador envie os dados convertidos. Na Figura 4.23 se vê um processo de amostragem de uma tensão DC de aproximadamente 0,9 V, utilizando o canal 0, referência interna, tempo de conversão igual a 1/8 do clock de 16 MHz e tempo de aquisição por amostra de 1 clock do conversor A/D, resultando em uma frequência de amostragem de 123.365 amostras por segundo e tempo de conversão de 8,106 μ s. O valor com código 1473(decimal) do conversor A/D equivale a 0,899 V.

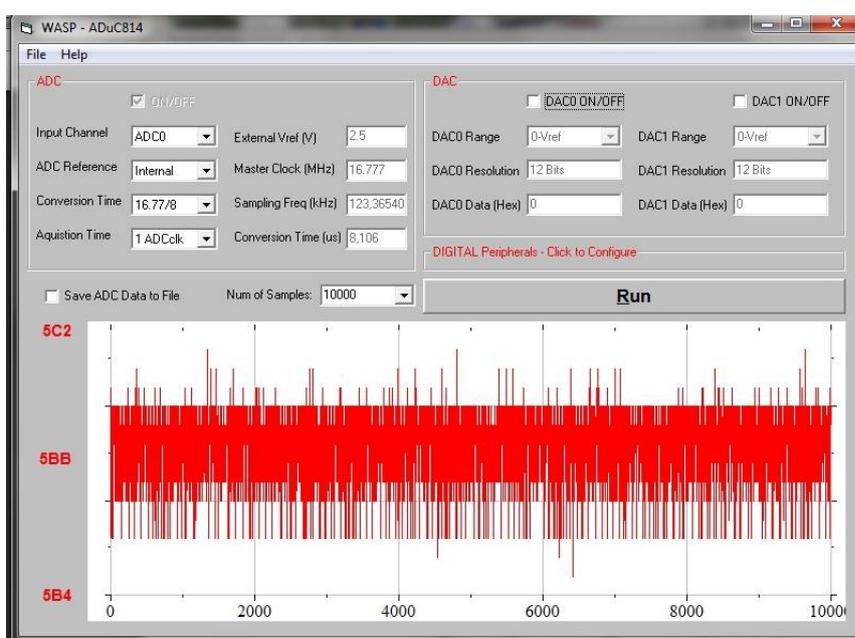


Figura 4.23 - Processo de amostragem de uma tensão DC com o *software* WASP

Para a bancada de cargas já haviam sido feitos testes durante a fase de desenvolvimento propriamente dita, logo o próximo estágio a se testar foi o driver do microcontrolador, feito através do acionamento dos bits 0 e 1 da porta 1 e dos bits 2 a 7 da porta 3 estando para isso uma pequena carga ligada aos contatos dos relés. O resultado foi o acionamento e desacionamento de forma seqüencial e repetitivo de todos os relés, com um tempo de permanência em estado ligado de 1 minuto cada, confirmando a capacidade de corrente do CI ULN 2803 e que a fonte de + 12 V também está funcional. Cada saída do CI driver foi medida e resulta em valores próximos ao esperado, de 30 mA, corrente de energização da bobina dos relés.

O último teste contempla a integração das cargas, da placa de aquisição e controle e filtros/amplificadores. Foi possível medir o fator de potência das diversas cargas em separado e pode-se chegar a um valor total, ou seja, com todos os motores em pleno funcionamento e a luminária ligada. Os valores foram medidos e comparados aos valores adquiridos com um equipamento profissional Instrutherm AE-100, conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Resultados do FP medidos pelo protótipo e pelo equipamento profissional

Nr Carga	1	2	3	4
Descrição	LUMINÁRIA FLUORESCENTE 2 X 20 W	MOTOR WEG ½ CV	MOTOR KCELL ½ CV	MOTOR METALCORTE ½ CV
FP Equipamento	Não foi possível medição	0,33	0,22	0,22
FP Protótipo	0,91	0,26	0,21	0,22
FP TOTAL			Equipamento	0,26
			Protótipo	0,25

Desta forma, o protótipo apresentou erros relativamente satisfatórios para uma demonstração de que é possível resolver o problema do fator de potência utilizando microcontroladores.

CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, que se sintam humildes. É assim que as espigas sem grãos erguem desdenhosamente a cabeça para o Céu, enquanto que as cheias as baixam para a terra, sua mãe.

Leonardo da Vinci

A correção do fator de potência tende a ser uma preocupação cada vez maior nos diversos setores industriais e comerciais tanto internacionais quanto no Brasil. A questão ambiental do aproveitamento energético vem alavancar este fato. Espera-se que dentro de alguns anos, os próprios equipamentos sejam dotados de alguma tecnologia que realize a correção do fator de potência internamente, principalmente os equipamentos considerados como cargas não-lineares.

Este trabalho teve por objetivo realizar uma pesquisa a respeito do tema e propor uma solução de correção do fator de potência utilizando microcontroladores de alto desempenho para controle. Nem todos os objetivos foram cumpridos pela complexidade do tema proposto. A correção do fator de potência em si não pode ser implementada necessitando-se de estudos complementares para sua programação. Porém, muitas dificuldades foram contornadas como: a complexidade do microcontrolador, as interferências com a etapa de filtragem e os ajustes para a entrada do conversor analógico/digital. O protótipo construído quanto instrumento medidor do fator de potência apresentou resultados satisfatórios para uma primeira aproximação e encontra-se pronto a receber uma nova programação e poder realizar a correção do fator de potência.

A importância deste trabalho se deve às possibilidades e o poder do uso dos microcontroladores em dispositivos embarcados de instrumentação e medição e como estudo aprofundado no âmbito da qualidade de energia elétrica, mais especificamente o fator de potência, deixando uma contribuição para a pesquisa acadêmica nessa área de pesquisa. Além disso, um dispositivo controlador do fator de potência pode ter seu uso tido como bastante compensador, pois evita o desperdício de energia, poupa equipamentos, condutores, e o meio ambiente, além de evitar pagamento de uma conta de energia mais alta, justificando a continuidade de pesquisas deste tema.

Para projetos futuros sugere-se a implementação da correção do fator de potência em si e também, a adaptação do protótipo de forma a funcionar como uma plataforma de aquisição de dados apta a, em conjunto com um software de computador, realizar análise de outros

parâmetros e distúrbios de qualidade da energia elétrica como flutuações, distorção harmônica, afundamentos de tensão, interrupções, etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Analog Devices. (2003). Datasheet. *ADUC814, MicroConverter®*, Small Package, 12-Bit ADC with Embedded Flash MCU . Norwood, Massachusetts, Estados Unidos da América.

ARM. (2010). *Keil 8051*. Acesso em 15 de Maio de 2010, disponível em Microcontroller Development Tools: <http://www.keil.com/c51/>

Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (1998). *Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos* (6ª Edição ed.). Rio de Janeiro, RJ: Prentice-Hall do Brasil.

Cotrim, E. D. (2003). Projeto e Integração de um Sistema de Amostragem de tensão e corrente para aplicações em Sistemas de medição de energia elétrica. Itajubá.

Creder, H. (2000). *Instalações Elétricas* (14ª ed.). Rio de Janeiro, RJ, Brasil: LTC.

de Medeiros Filho, S. (1997). *Medição de Energia Elétrica* (4ª Edição ed.). Rio de Janeiro, RJ: LTC.

Flarys, F. (2006). *Eletrotécnica Geral* (1ª Edição ed.). São Paulo: Editora Manole.

Gimenez, S. P. (2002). *Microcontroladores 8051* (1ª Edição ed.). São Paulo, SP: Pearson Education do Brasil.

Hafner, A., Lopes, H. S., & Lima, C. R. (2005). Implementação de um Medidor de Qualidade de Energia Usando Computação Reconfigurável por Hardware. *VII SBAI/ II IEEE LARS*. São Luís.

Haykin, S., & Van Veen, B. (2001). *Sinais e Sistemas* (1ª ed.). (J. C. dos Santos, Trad.) Porto Alegre, RS, Brasil: Bookman.

Johnson, D. E., Hilburn, J. L., & Johnny, J. R. (1994). *Fundamentos de Análise de Circuitos Elétricos* (4ª ed.). (O. d. Martins, & M. A. Moreira de Santis, Trads.) Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Prentice-Hall do Brasil.

Kienitz, K. H. (2002). *Análise de circuitos: um enfoque de sistemas* (1ª ed.). Barueri, SP, Brasil: Manole.

Mamede Filho, J. (2007). *Instalações Elétricas Industriais* (7ª ed.). Rio de Janeiro, RJ, Brasil: LTC.

Martins, J. S., Couto, C., & Afonso, J. L. (2003). Qualidade de energia eléctrica. 3º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia – CLME'2003. Maputo - Moçambique.

Melo, M. O. (2008). Avaliação do impacto da qualidade de energia eléctrica na. *Produto & Produção*, 15-25.

Microsoft Corp. (2010). *Visual C# Developer Center*. Acesso em 18 de Março de 2010, disponível em Microsoft Developer Network: <http://msdn.microsoft.com/pt-br/vcsharp/default.aspx>

Monteiro, M. A. (2002). *Introdução à Organização de Computadores* (4ª Edição ed.). Rio de Janeiro, RJ: LTC.

Noll, V., Fassheber Jr., C., Bonacorso, N. G., Mélo, É., & Schmidt, I. (s.d.). Correção Automática da Tensão Eficaz em Baixa Tensão Usando Microcontrolador Dedicado.

Noll, V., Fassheber, C., Bonacorso, N., & Schmidt, I. e. (2003). Correção Ativa de Fator de Potência Trifásico Usando Microcontrolador. *Revista de Automação e Tecnologia da Informação* v.2 nr. 1 .

Rashid, M. H. (1999). *Eletrônica de Potência* (1ª ed.). (M. M. de Assumpção Filho, Ed., & C. A. Favato, Trad.) São Paulo, SP, Brasil: Makron Books.

Savitch, W. J. (2004). *C++ Absoluto* (1ª ed.). (R. Trimer, Ed., & C. Martins, Trad.) São Paulo, SP, Brasil: Addison Wesley.

Sedra, A. S., & Smith, K. C. (2000). *Microeletrônica* (4ª Edição ed.). São Paulo, SP: MAKRON Books.

SGS-THOMSON. (Setembro de 1997). Datasheet. *ULN2003A, Eight Darlington Arrays* . Estados Unidos da América.

Texas Instruments. (Fevereiro de 1989). Datasheet. *MAX 232 - Dual EIA-232 Drivers/Receivers* . Dallas, Texas, Estados Unidos da América.

Tipler, P. A., & Mosca, G. (2006). *Física para cientistas e engenheiros* (Vol. II). (F. R. da Silva, & M. S. Neto, Trad.) Rio de Janeiro, RJ, Brasil: LTC.

APÊNDICE A - CÓDIGO-FONTE “MONITORAMENTO.CS”

```

using System;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;
using System.IO.Ports;

namespace FatorPotencia.UI
{
    public partial class Monitoramento : Form
    {
        #region Propriedades
        public SerialPort PortaSerial;
        ConfiguraPorta frmConfiguracao;
        DataTable FatoresPotencia = new DataTable();
        #endregion

        #region Construtor
        public Monitoramento()
        {
            InitializeComponent();
        }
        #endregion

        #region Load
        private void Monitoramento_Load(object sender, EventArgs e)
        {
            // Configurações
            FatoresPotencia.Columns.Add(new DataColumn("Data"));
            FatoresPotencia.Columns.Add(new DataColumn("FatorPotencia"));
            dgvFatorPotencia.AutoGenerateColumns = false;
        }

        private void Monitoramento_Shown(object sender, EventArgs e)
        {
            Monitorar();
        }
        #endregion

        #region Menu
        private void mnConfiguracao_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            if (frmConfiguracao != null)
                frmConfiguracao.Close();

            frmConfiguracao = new ConfiguraPorta();
            frmConfiguracao.PortaConfigurada += new
            EventHandler(frmConfiguracao_PortaConfigurada);
            frmConfiguracao.Show();
        }

        private void mnSair_Click(object sender, EventArgs e)
        {

```

```

        Fechar();
        Application.ExitThread();
    }
#endregion

#region Porta Serial
void PortaSerial_DataReceived(object sender, SerialDataReceivedEventArgs e)
{
    Invoke(new AtualizaGridDelegate(AtualizaGrid),
PortaSerial.ReadExisting());
}

void frmConfiguracao_PortaConfigurada(object sender, EventArgs e)
{
    PortaSerial = frmConfiguracao.PortaSerial;
    PortaSerial.DataReceived += new
SerialDataReceivedEventHandler(PortaSerial_DataReceived);
}

private void Fechar()
{
    if (PortaSerial != null && PortaSerial.IsOpen)
    {
        PortaSerial.Close();
        PortaSerial.Dispose();
    }
}
#endregion

#region Grid
delegate void AtualizaGridDelegate(String texto);

private void AtualizaGrid(String texto)
{
    byte[] bytes = Encoding.ASCII.GetBytes(texto);

    for (int i = 0; i < bytes.Length; i++)
    {
        byte item = bytes[i];

        DataRow row = FatoresPotencia.NewRow();
        row.ItemArray = new object[]
        {
            DateTime.Now,
            ((float)item)/100
        };

        FatoresPotencia.Rows.Add(row);
    }

    dgvFatorPotencia.DataSource = null; // Força nova renderização
    dgvFatorPotencia.DataSource = FatoresPotencia;
}

private void dgv_RowPrePaint(object sender, DataGridViewRowPrePaintEventArgs
e)
{
    if (e.RowIndex % 2 == 0)
        ((DataGridView)sender).Rows[e.RowIndex].DefaultCellStyle.BackColor =
Color.Lavender;
}

```

```
    }  
    #endregion  
  }  
}
```

APÊNDICE B - CÓDIGO-FONTE “CONFIGURAPORTA.CS”

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;
using System.IO.Ports;

namespace FatorPotencia.UI
{
    public partial class ConfiguraPorta : Form
    {
        public SerialPort PortaSerial;
        public event EventHandler PortaConfigurada;

        public ConfiguraPorta()
        {
            InitializeComponent();

            // Valores padrão
            cboPorta.SelectedIndex = 0;
            cboVelocidade.SelectedIndex = 6;
            cboBitsDados.SelectedIndex = 3;
        }

        private void btnOk_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            if (PortaSerial != null)
                Fechar();

            try
            {
                PortaSerial = new SerialPort();
                PortaSerial.BaudRate =
Convert.ToInt32(cboVelocidade.SelectedItem.ToString());
                PortaSerial.DataBits =
Convert.ToInt32(cboBitsDados.SelectedItem.ToString());
                PortaSerial.PortName = cboPorta.SelectedItem.ToString();
                PortaSerial.Parity = Parity.None;
                PortaSerial.StopBits = StopBits.One;
                PortaSerial.Open();
                this.Close();

                if (PortaConfigurada != null)
                    PortaConfigurada(this, e);
            }
            catch (Exception ex)
            {
                MessageBox.Show(ex.Message, "Erro", MessageBoxButtons.OK,
MessageBoxIcon.Error);
            }
        }

        private void Fechar()

```

```
    {  
        if (PortaSerial != null && PortaSerial.IsOpen)  
        {  
            PortaSerial.Close();  
            PortaSerial.Dispose();  
        }  
    }  
}
```

APÊNDICE C - CÓDIGO-FONTE P/ MICROCONTROLADOR 8051 “MAIN.C”

```

#include <ADUC814.H>
#include <stdio.h>
#include <math.h>

void main (void)
{
    int nrDeAmostras = 255;

    int                Amostra_V,
                      Amostra_I,
                      Ult_Amostra_V,
                      Ult_Amostra_I;

    float              Ult_Filt_V,
                      Ult_Filt_I,
                      filtrada_V,
                      filtrada_I,
                      sqAmostra_V,
                      sqAmostra_I,
                      calibrado_V,
                      SomasqV,
                      SomasqI,
                      InstP,
                      SomaP,
                      FP;

    code const float ajuste_V = 1.0;
    code const float ajuste_I = 1.0;
    code const float ajuste_fase = 0.9;

    PLLCON = 0X00;    //0X00 16.78 MHz
    CFG814 = 0X00;

    /*-----
    Configurando a porta serial em 1200 bps
    -----*/
    SCON = 0x50; // SCON: mode 1, 8-bit UART, enable rcvr
    TMOD |= 0x20; //TMOD: timer 1, mode 2, 8-bit reload
    TH1 = 221; //1200 bauds em 16.78 MHz, que vezes 2 é fixado em 2400 bauds
    PCON = 1 << 7;
    TR1 = 1;
    TI = 1;

    /*-----
    Configurando o conversor A/D
    -----*/
    ADCCON1 = 0x8C; // 10001100
                  // bit 7 = 1 = ADC ligado
                  // bit 6 = 0 = Referência Interna
                  // bits 5 e 4 = 0 e 0 = ADCCLK = PLLCLK/8
                  // bits 3 e 2 = 1 e 1 = ACQTIME = 4 ADCCLK's

```

```

// bit 1 = 0 = Não usa Timer
// bit 0 = 0 = não usa pino CONVST para conversão

/*-----
Loop Infinito
-----*/
while (1)
{
    unsigned char n;
    char fator;

/*-----
Realiza n iterações onde n é definido por nrDeAmostras
-----*/
for (n=0; n<nrDeAmostras; n++)
{
    Ult_Amostra_V = Amostra_V;
    Ult_Amostra_I = Amostra_I;

/*-----
Inicia uma conversão de corrente e espera que ela termine
-----*/
    ADCCON2 = (ADCCON2 & 0xF0) | 0x00;
    SCONV = 1;
    while (ADCCON3 & 0x80);

/*-----
Lê o dado do A/D e guarda em Amostra_I.
-----*/
    Amostra_I = ADCDATAL | ((ADCDATAH & 0x0F) << 8);

/*-----
Inicia uma conversão de tensão e espera que ela termine
-----*/
    ADCCON2 = (ADCCON2 & 0xF0) | 0x01;
    SCONV = 1;
    while (ADCCON3 & 0x80);

/*-----
Lê o dado do A/D e guarda em Amostra_V.
-----*/
    Amostra_V = ADCDATAL | ((ADCDATAH & 0x0F) << 8);

    Ult_Filt_V = filtrada_V;
    Ult_Filt_I = filtrada_I;

    filtrada_V = 0.996 * (Ult_Filt_V + Amostra_V - Ult_Amostra_V);
    filtrada_I = 0.996 * (Ult_Filt_I + Amostra_I - Ult_Amostra_I);

    calibrado_V = Ult_Filt_V + ajuste_fase * (filtrada_V - Ult_Filt_V);

/*-----
Calcula V e I
-----*/

```

```
sqAmostra_V = calibrado_V * calibrado_V;
SomasqV += sqAmostra_V;

sqAmostra_I = filtrada_I * filtrada_I;
SomasqI += sqAmostra_I;

InstP = calibrado_V * filtrada_I;
SomaP += InstP;

} // FIM DO FOR

FP = ((ajuste_V * ajuste_I * SomaP / nrDeAmostras) / ((ajuste_V * sqrt(SomasqV /
nrDeAmostras)) * (ajuste_I * sqrt(SomasqI / nrDeAmostras))));
FP = FP * 100;
FP = abs(FP);
fator = (char)FP;

// ENVIA FP
printf("%c",fator);

// Zera os acumuladores Soma
SomasqV = 0;
SomasqI = 0;
SomaP = 0;

}

}
```