

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU

CAMPUS DE BAURU

CONTROLADOR DE DEMANDA E FATOR DE POTÊNCIA DE BAIXO CUSTO PARA  
UNIDADES CONSUMIDORAS DE ENERGIA ELÉTRICA

ANDRÉ LUIZ ANDREOLI

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Engenharia da UNESP - Universidade  
Estadual Paulista - Campus de Bauru,  
para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Industrial.

BAURU-SP

Agosto - 2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU

CAMPUS DE BAURU

CONTROLADOR DE DEMANDA E FATOR DE POTÊNCIA DE BAIXO CUSTO PARA  
UNIDADES CONSUMIDORAS DE ENERGIA ELÉTRICA

ANDRÉ LUIZ ANDREOLI

Orientador: Prof. Dr. José Angelo Cagnon

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Engenharia da UNESP - Universidade  
Estadual Paulista - Campus de Bauru,  
para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Industrial.

BAURU-SP

Agosto – 2005

Ficha catalográfica elaborada por  
DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO  
UNESP – Bauru

Andreoli, André Luiz

Controlador de demanda e fator de potência de baixo custo para unidades consumidoras de energia elétrica / André Luiz Andreoli. - - Bauru : [s.n.], 2005. 217 f.

Orientador: José Ângelo Cagnon.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, 2005.

1. Controle de processo. 2. Sistemas de energia elétrica : controle. 3. Eficiência energética. I – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II - Título.

ATA Nº 071/2005

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE ANDRÉ LUIZ ANDREOLI, ALUNO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNESP – CAMPUS DE BAURU.

No dia doze de agosto de dois mil e cinco, às 09 horas, no anfiteatro do prédio da Pós-graduação da Faculdade de Engenharia da UNESP, Campus de Bauru, reuniu-se à Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos Professores Doutores: José Ângelo Cagnon do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Bauru, Presidente da Banca, Diógenes Pereira Gonzaga do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos-EESC e Ivo Reis Fontes do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia - UNESP- Campus de Bauru, a fim de proceder à argüição pública da Dissertação do candidato ANDRÉ LUIZ ANDREOLI, intitulada "CONTROLADOR DE DEMANDA E FATOR DE POTÊNCIA DE BAIXO CUSTO PARA UNIDADES CONSUMIDORAS DE ENERGIA ELÉTRICA". O Professor Doutor José Ângelo Cagnon, Presidente da Banca, apresentou o candidato, que dissertou sobre seu trabalho, em quarenta minutos, após, o candidato foi argüido oralmente pelos membros componentes da Comissão Examinadora no tempo regulamentar exigido. Logo após, reuniu-se a Comissão Examinadora, tendo apresentado o conceito final: **APROVADO**. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após, lida e aprovada, será assinada pelos Senhores Membros da Comissão Examinadora, Bauru, 12 de agosto de dois mil e cinco.

Prof. Dr. José Ângelo Cagnon \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Diógenes Pereira Gonzaga \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Ivo Reis Fontes \_\_\_\_\_

À Minha esposa Marisa,

e à minha filha Ana Carolina,

pelas horas que, pacientemente, souberam me esperar

dedico este trabalho

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela graça recebida,

A Meus Pais, por me proporcionarem as condições primordiais para que atingisse este ponto.

Ao Amigo, Orientador e Professor, Dr. José Angelo Cagnon, por todo estímulo, orientação e ajuda dispensados na condução desta pesquisa, meus sinceros agradecimentos.

Ao Professor e Amigo, Dr. Ivo Reis Fontes, pelas inúmeras colaborações realizadas durante a condução desta pesquisa.

Aos meus colegas, Michel Cristian Malara e Paulo Henrique Franco, pelo auxílio na preparação dos experimentos.

Aos demais amigos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro, fundamental para a realização do presente trabalho.

## SUMÁRIO

1	Resumo .....	1
2	Justificativa e relevância.....	7
3	Introdução.....	11
4	Medição de Energia Elétrica .....	15
4.1	Medidores de Grandezas Elétricas .....	15
4.1.1	Instrumentos Indicadores.....	19
4.1.2	Instrumentos Registradores .....	19
4.1.3	Instrumentos Integradores ou Acumuladores .....	21
4.2	Medição de Potência Elétrica .....	21
4.2.1	Medição de Potência Ativa.....	22
4.2.2	Medição de Potência Reativa .....	22
4.3	Medidores de Energia Elétrica .....	23
4.3.1	Medidor Eletromecânico de Indução.....	26
4.3.2	Princípio de operação .....	27
4.3.3	Composição .....	28
4.3.4	Precisão.....	30
4.3.5	Limitações .....	30
4.4	Medidores Eletrônicos.....	31
4.4.1	Princípio de operação .....	31
4.4.2	Composição .....	32
4.4.3	Precisão.....	33
4.4.4	Limitações .....	33
4.5	Conexões dos medidores de energia.....	33
4.5.1	Medição Direta .....	34
4.5.2	Medição Indireta.....	34
4.6	Transdutores .....	34
4.7	Medidores de Demanda .....	37
4.8	Medidores de Fator de Potência .....	38
4.9	Medidores de Energia para Tarifa Diferenciada .....	38
4.9.1	Medidores Eletromecânicos para Tarifa Diferenciada .....	38
4.9.2	Medidores Eletrônicos.....	39
4.10	Medidor de energia do protótipo .....	40
4.11	Conclusão .....	41
5	Gerenciamento de energia pelo lado da demanda .....	42
5.1	Demanda de uma Instalação .....	42
5.2	Curva de Carga .....	43
5.3	Estrutura Tarifária.....	44
5.4	Faturamento Horo-Sazonal.....	46
5.5	Faturamento de Energia Elétrica .....	46
5.5.1	Tarifa Convencional - Consumidores do Grupo B.....	47
5.5.2	Tarifa Binômia Convencional .....	47
5.5.3	Tarifa Azul.....	48
5.5.4	Tarifa Verde.....	50
5.5.5	Contratos de Demanda.....	51
5.6	Ultrapassagem de Demanda .....	51
5.7	Aplicação da Demanda de Ultrapassagem .....	52

5.7.1	Demanda de Ultrapassagem - Tarifa Azul .....	52
5.7.2	Demanda de Ultrapassagem - Tarifa Verde .....	53
5.8	Total do Importe de Fornecimento .....	53
5.9	Tarifa Amarela.....	54
5.10	Gerenciamento de Energia pelo Lado da Demanda .....	55
5.11	Medição de Demanda .....	56
5.11.1	Conceito.....	56
5.11.2	Intervalo de Integração .....	57
5.11.3	Registro de Máxima Demanda .....	57
5.12	Controle de Demanda .....	57
5.13	Equipamentos Comerciais para Gerenciamento de Energia.....	59
5.14	Algoritmos.....	60
5.14.1	Algoritmo Reta de Carga.....	61
5.14.2	Algoritmo Janela Móvel.....	62
5.14.3	Algoritmo Preditivo .....	63
5.15	Controle de Demanda no equipamento proposto .....	64
5.16	Conclusões.....	66
6	Fator de potência em instalações elétricas .....	68
6.1	Potência em Circuitos Monofásicos .....	68
6.2	Potência em Circuitos Trifásicos.....	71
6.3	Potência Complexa.....	74
6.4	Triângulo de Potências .....	75
6.5	Fator de Potência .....	76
6.6	Características das Cargas .....	80
6.6.1	Cargas Resistivas.....	81
6.6.2	Cargas Indutivas .....	82
6.6.3	Cargas Capacitivas .....	84
6.6.4	Cargas Compostas .....	85
6.7	Fator de Potência e o dimensionamento dos alimentadores.....	86
6.7.1	Efeitos do Baixo Fator de Potência Indutivo.....	86
6.7.1.1	Efeitos na Instalação.....	86
6.7.1.2	Efeitos no Sistema de Distribuição.....	86
6.7.2	Efeitos do Baixo Fator de Potência Capacitivo.....	86
6.7.2.1	Efeitos na Instalação.....	86
6.7.2.2	Efeitos no Sistema de Distribuição.....	87
6.8	Faturamento.....	87
6.8.1	Legislação.....	87
6.8.2	Reativo Excedente .....	87
6.8.3	Tarifação de Demanda e Consumo Reativos Excedentes .....	88
6.9	Medição do Fator de Potência .....	89
6.9.1	Sistemas de Medição Empregados .....	90
6.9.2	Medidor de $\cos \varphi$ .....	90
6.9.3	Medição Indireta com Wattímetro, Voltímetro e Amperímetro.....	91
6.9.4	Medição Indireta com o uso de Instrumentos Medidores de Energia .....	91
6.9.5	Medição do Fator de Potência pela Concessionária de Distribuição.....	91
6.10	Correção do Fator de Potência.....	92
6.10.1	Dispositivos empregados.....	92
6.10.2	Métodos de Correção.....	92
6.10.3	Correção Centralizada em Baixa Tensão.....	92

6.10.4	Correção Individual .....	93
6.10.5	Correção Automática .....	94
6.10.5.1	Vantagens e Desvantagens da Correção Automática .....	96
6.11	Correção Automática de Fator de Potência: Estratégia de Controle .....	97
6.11.1	Medição e Monitoramento .....	97
6.11.2	Emprego de células capacitivas .....	97
6.11.3	Acionamento rotativo .....	98
6.11.4	Acionamento seqüencial .....	99
6.11.5	Acionamento combinatório .....	99
6.12	Resultados obtidos .....	99
6.13	Controladores de Fator de Potência comerciais .....	102
6.14	Sistema de correção empregado no protótipo .....	103
6.15	Conclusão .....	103
7	Desenvolvimento do controlador de demanda e fator de potência .....	106
7.1	Objetivos do Desenvolvimento .....	106
7.2	Sistemas de Comunicação e Coleta de Dados .....	107
7.2.1	Redes de Comunicação de Dados .....	107
7.2.2	Sistemas Distribuídos .....	107
7.2.3	Redes .....	108
7.2.4	Protocolos de Enlace .....	110
7.2.5	Protocolo MODBUS .....	110
7.2.5.1	Modelo Mestre-Escravo .....	111
7.2.5.2	Padrão de Mensagem do MODBUS .....	113
7.2.5.3	Modo de Transmissão RTU .....	115
7.2.5.4	CRC do Modo RTU .....	116
7.2.5.5	Modo de Transmissão ASCII .....	117
7.2.5.6	LRC do Modo ASCII .....	118
7.2.5.7	Tratamento de Erro de Comunicação .....	118
7.2.5.8	Funções do Modbus .....	119
7.2.6	Comunicação em Rede no Equipamento Proposto .....	120
7.2.7	Sistema de coleta de dados .....	121
7.2.7.1	Sistema de Supervisão e Controle .....	121
7.2.7.2	Armazenamento dos Dados .....	122
7.2.8	Aplicativo de Supervisão e Coleta de Dados .....	123
7.3	Controle .....	124
7.3.1	Aspectos Gerais .....	124
7.3.2	Unidades de Aquisição e Controle .....	127
7.4	Elementos de Hardware .....	128
7.4.1	Blocos do Protótipo .....	128
7.4.2	Microcontrolador .....	129
7.4.2.1	Microcontroladores MICROCHIP .....	131
7.4.3	Medidor de Energia .....	136
7.4.3.1	Descrição do Componente .....	137
7.4.3.2	Características Gerais do Componente .....	138
7.4.3.3	Entradas Analógicas .....	139
7.4.3.4	Conexão ADE7758 ao Sistema de Distribuição .....	140
7.4.3.5	A Interface Serial do ADE7758 .....	140
7.4.4	Relógio de Tempo Real (Real Time Clock, RTC) .....	143
7.4.5	Interface Homem-Máquina .....	143

7.4.6	Interfaces de Comunicação.....	145
7.4.7	Fonte de Alimentação.....	147
7.4.8	Saídas de Controle.....	148
7.4.9	Capacidade de Expansão Futura.....	148
7.4.10	Estrutura Funcional do Protótipo.....	148
7.5	Elementos de Software.....	149
7.5.1	Programa Principal.....	149
7.5.2	Sistema de Tratamento de Interrupções.....	151
7.5.3	Interrupções do Timer 0.....	151
7.5.4	Interrupções do Timer 3.....	152
7.5.5	Interrupções da USART.....	153
7.5.6	Interrupções do Port B – Teclado.....	154
7.5.7	Interrupção Externa 1.....	154
7.5.8	Timer/Contador 1.....	155
7.5.9	Apresentação de Mensagens.....	155
7.5.10	Menus da IHM.....	155
7.5.11	Leitura e Parametrização do CI Medidor – ADE7758.....	157
7.5.12	Leitura e Parametrização do RTC – DS1302.....	157
7.5.13	Protocolo de Comunicação.....	157
7.5.14	Comando dos Módulos de Saída.....	158
7.6	Organização física do protótipo.....	158
7.6.1	Placa do Controlador - CDFP V1.00.....	160
7.6.2	Placa do Medidor de Energia e Fonte - MEEF V1.0.....	162
7.6.3	Placa do Módulo de Saídas a Relés - MSR V1.0.....	162
7.7	Comparativo de Custos com Equipamentos Comerciais.....	163
7.8	Conclusões.....	165
8	Ensaio e Resultados.....	167
8.1	Montagem do Experimento.....	167
8.2	Parâmetros do Circuito de Aplicação.....	168
8.3	Metodologia empregada.....	169
8.4	Planilhas de Dados Coletados.....	169
8.5	Curvas de Fator de Potência × Saídas de Controle.....	170
8.6	Curvas de Demanda do Sistema × Saídas de Controle.....	174
9	Conclusões gerais.....	190
10	Referências Bibliográficas.....	195

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Multiplicador Galvanométrico - Schweigger (1820).....	16
Figura 2 - Galvanômetros Astáticos - Leopoldo Nobili (1825) .....	16
Figura 3 – Galvanômetros de D’Arsonval.....	18
Figura 4 - Instrumento Portátil - Edward Weston .....	18
Figura 5 - Instrumentos Indicadores (Fonte: Yokogawa).....	19
Figura 6 - Registradores Gráficos (Fonte: Eurotherm).....	20
Figura 7 - Medidor de Lâmpada-Hora - J. B. Fuller (1878).....	23
Figura 8 - Medidor de Ampères-Hora - Oliver B. Schallenberger (1888).....	24
Figura 9 - Wattímetro-Registrador - Thomson (1889).....	25
Figura 10 - Medidores de Watt-hora - Thomas Duncan (1892).....	25
Figura 11 - Medidores de Energia Eletromecânicos (Fonte: Landis-Gyr) .....	27
Figura 12 - Medidores de Energia Eletrônicos (Fonte: Landis-Gyr).....	31
Figura 13 - Resistências de Derivação (Fonte: Curtis).....	35
Figura 14 - Transformadores empregados em Medição de Energia (Fonte: ABB).....	36
Figura 15 - Transdutores de Corrente de Efeito Hall (Fonte: LEM).....	37
Figura 16 - Medidor Eletromecânico de Consumo para Tarifa Diferenciada (Fonte: Nansen).....	39
Figura 17 - Circuito Medidor de Energia do Protótipo .....	40
Figura 18 - Demanda de uma instalação .....	43
Figura 19 - Curva de Carga de uma instalação.....	44
Figura 20 - Controladores de Demanda e Fator de Potência comerciais.....	60
Figura 21 - Algoritmo Reta de Carga .....	61
Figura 22 - Algoritmo Janela Móvel .....	62
Figura 23 - Algoritmo Preditivo .....	63
Figura 24 - Algoritmo de Controle de Demanda.....	65
Figura 25 - Potência em circuitos monofásicos de Corrente Alternada .....	69
Figura 26 - Sistema elétrico representado por uma carga .....	70
Figura 27 - Circuito trifásico .....	72
Figura 28 - Carga Equilibrada - Ligação em Y .....	73
Figura 29 - Carga Equilibrada - Ligação em $\Delta$ .....	74
Figura 30 - Triângulo de Potências .....	76
Figura 31 - Tensão e Corrente em Carga Não-Linear .....	78
Figura 32 - Circuito com Cargas Resistivas .....	81
Figura 33 - Tensão, corrente e Potência em Cargas Resistivas.....	82
Figura 34 - Circuito com Cargas Indutivas .....	83
Figura 35 - Tensão, Corrente e Potência em Cargas Indutivas .....	83
Figura 36 - Circuito com Cargas Capacitivas.....	84
Figura 37 - Tensão, Corrente e Potência em Cargas Capacitivas.....	85
Figura 38 - Medidor de $\cos \varphi$ .....	90
Figura 39 - Correção de Fator de Potência Centralizada em Baixa Tensão .....	93
Figura 40 - Correção Individual de Fator de Potência.....	94
Figura 41 - Correção de Fator de Potência Automática Centralizada.....	95
Figura 42 - Correção de Fator de Potência Automática Distribuída .....	96
Figura 43 - Capacitores para Correção de Fator de Potência (Fonte: WEG) .....	98
Figura 44 - Controladores de Fator de Potência comerciais.....	102
Figura 45 - Arquitetura do Modelo ISO/OSI .....	109

Figura 46 - Modelo ISO/OSI - Aplicação do Protocolo MODBUS.....	111
Figura 47 - Modelo Mestre-Escravo modo unicast .....	112
Figura 48 - Modelo Mestre-Escravo modo broadcast .....	113
Figura 49 - Padrão Start/Stop Bit .....	113
Figura 50 - Protocol Data Unit (PDU) do Modbus .....	114
Figura 51 - PDU para comunicação sobre linha serial .....	114
Figura 52 - Sequência de bits do modo RTU .....	115
Figura 53 - Conteúdo da Mensagem RTU do Modbus .....	116
Figura 54 - Conteúdo da Mensagem ASCII do Modbus.....	117
Figura 55 - Mensagem de Erro do Modbus.....	118
Figura 56 - PDU para requisição de Função .....	120
Figura 57 - Tela do Sistema Supervisório - Eclipse SCADA .....	123
Figura 58 - Diagrama de blocos de um Sistema de Controle .....	126
Figura 59 - Diagrama de Blocos do Equipamento .....	129
Figura 60 - Estrutura básica de um microcontrolador .....	130
Figura 61 - Diagrama de Blocos do Microcontrolador PIC18F452 .....	134
Figura 62 - Microcontrolador PIC18F452 - Pinagem .....	135
Figura 63 - Pinagem ADE7758 (Fonte: Analog Devices).....	138
Figura 64 - Diagrama de Blocos - Medidor ADE7758 (Fonte: Analog Devices).....	139
Figura 65 - Estrutura do Registro de Comunicação do ADE7758.....	141
Figura 66 - Temporização da Escrita de Dados no ADE7758 .....	142
Figura 67 - Temporização da Leitura de Dados no ADE7758 .....	142
Figura 68 - IHM - Display LM032 e Teclado .....	143
Figura 69 - HD44780U - Diagrama de Blocos (Fonte: HITACHI) .....	144
Figura 70 - MAX220, MAX232 e MAX232A - Pinagem e Conexões (Fonte: MAXIM) 146	
Figura 71 - MAX485 e seus compatíveis - Pinagem e Aplicação Típica (Fonte: MAXIM)	
.....	147
Figura 72 - Estrutura Funcional do protótipo .....	149
Figura 73 - Fluxograma do Programa Principal .....	150
Figura 74 - Sub-Rotina - Interrupção do Timer 0.....	152
Figura 75 - Sub-Rotina - Interrupção do Timer 3.....	153
Figura 76 - Sub-Rotina - Interrupção de Recepção da USART .....	153
Figura 77 - Sub-rotina - Interrupção do Port B .....	154
Figura 78 - Sub-rotina - Interrupção Externa INT#1.....	155
Figura 79 - Tela de Operação - Relógio e Estado das Saídas.....	156
Figura 80 - Tela de Operação - Dados por Fase.....	156
Figura 81 - Tela de Parametrização.....	157
Figura 82 - Módulo de Medição e Controle - Vista sem o Display da IHM.....	158
Figura 83 - Módulo de Medição e Controle - Conjunto Montado.....	159
Figura 84 - Módulo de Saídas a Relés - Conjunto Montado .....	160
Figura 85 - Placa CDFP V1.00.....	161
Figura 86 - Placa MEEF V1.0 .....	162
Figura 87 - Placa MSR V1.0 .....	163
Figura 88 - Carga Resistiva Variável .....	168
Figura 89 - Cargas Reativas .....	168
Figura 90 - Atuação do Controlador de Fator de Potência.....	172
Figura 91 - Atuação do Controlador de Fator de Potência - Cargas Indutivas.....	173
Figura 92 - Atuação do Controlador de Fator de Potência - Cargas Capacitivas.....	174
Figura 93 - Operação do Controlador de Demanda Máxima .....	176

Figura 94 - Atuação do Controlador de Demanda Máxima ao longo do tempo .....	177
Figura 95 - Controlador de Demanda Máxima - Atuação em um Intervalo de Integração	178
Figura 96 - Controlador de Demanda Máxima - Reação a Impulsos de Potência.....	179
Figura 97 - Reação a aumentos permanentes de Potência não-controlada na instalação ..	181
Figura 98 - Recuperação de Tendência à Ultrapassagem de Demanda Máxima .....	182
Figura 99 - Controle de Demanda Máxima com variação no Intervalo de Integração .....	183
Figura 100 - Transição Horário Fora de Ponta → Horário de Ponta - Desligamento Parcial .....	185
Figura 101 - Transição Horário Fora de Ponta→Horário de Ponta - Desligamento Total	186
Figura 102 - Transição Ponta→Fora de Ponta - Nova tendência à ultrapassagem .....	187
Figura 103 - Transição Horário de Ponta→Horário Fora de Ponta - Religamento total...	188

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Parâmetros de Contratos de Fornecimento de Energia .....	51
Tabela 2 - Variação da seção do condutor em relação ao fator de potência.....	100
Tabela 3 - Funções do MODBUS (uso comum) .....	119
Tabela 4 - Custos Unitários do Equipamento .....	164
Tabela 5 - Comparativo de custos de equipamentos similares.....	165
Tabela 6 - Amostra dos dados coletados durante o experimento .....	170

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (1) - Potência Ativa.....	22
Equação (2) - Potência Reativa .....	23
Equação (3) - Consumo de Energia Elétrica .....	26
Equação (4) - Definição Matemática de Demanda.....	43
Equação (7) - Faturamento de Consumo - Tarifa Convencional Grupo B.....	47
Equação (6) - Faturamento de Demanda - Tarifa Convencional.....	47
Equação (7) - Faturamento de Consumo - Tarifa Convencional.....	48
Equação (8) - Faturamento de Demanda - Tarifa Azul .....	49
Equação (9) - Faturamento de Consumo - Tarifa Azul .....	49
Equação (10) - Faturamento de Demanda - Tarifa Verde .....	50
Equação (11) - Faturamento de Consumo - Tarifa Verde .....	51
Equação (12) - Faturamento de Demanda considerando Ultrapassagem - Tarifa Azul .....	52
Equação (13) - Faturamento de Demanda de Ponta considerando Ultrapassagem .....	52
Equação (14) - Faturamento de Demanda Fora de Ponta considerando Ultrapassagem.....	53
Equação (15) - Faturamento de Demanda considerando Ultrapassagem - Tarifa Verde ....	53
Equação (16) - Importe Tarifário.....	54
Equação (17) - Potência Elétrica .....	68
Equação (18) - Potência Instantânea .....	68
Equação (19) - Tensão Instantânea.....	69
Equação (20) - Corrente Instantânea .....	69
Equação (21) - Potência Ativa em uma carga (I) .....	69
Equação (22) - Potência Ativa em uma carga (II).....	69
Equação (23) - Parcelas da Potência Instantânea .....	69
Equação (24) - Parcela de Potência Ativa .....	70
Equação (25) - Parcela de Potência Reativa.....	70
Equação (26) - Potência Instantânea .....	70
Equação (27) - Impedância Equivalente Z .....	71
Equação (28) - Componente Resistiva da Impedância.....	71
Equação (29) - Componente Reativa da Impedância .....	71
Equação (30) - Lei de Ohm para Impedâncias .....	71
Equação (31) - Parcela Ativa da Potência .....	71
Equação (32) - Parcela Reativa da Potência.....	71
Equação (33) - Tensão Instantânea - Fase a .....	71
Equação (34) - Tensão Instantânea - Fase b.....	71
Equação (35) - Tensão Instantânea - Fase c .....	71
Equação (36) - Corrente Instantânea - Fase a.....	72
Equação (37) - Corrente Instantânea - Fase b.....	72
Equação (38) - Corrente Instantânea - Fase c.....	72
Equação (39) - Potência Instantânea em Circuitos Trifásicos.....	72
Equação (40) - Potência de Circuitos Trifásicos Equilibrados.....	72
Equação (41) - Potência Ativa para valores de linha e de fase.....	73
Equação (42) - Potência Reativa para valores de linha e de fase .....	73
Equação (43) - Fasor Tensão .....	74
Equação (44) - Fasor Corrente.....	74
Equação (45) - Fasor Conjugado da Corrente .....	74
Equação (46) - Fasor Potência Aparente .....	74

Equação (47) - Fasor Potência Aparente (II).....	74
Equação (48) - Decomposição da Potência Aparente em Potência Ativa e Reativa.....	74
Equação (49) - Tensão, Impedância e Corrente .....	75
Equação (50) - Corrente, Admitância e Tensão .....	75
Equação (51) - Relação entre Potência Aparente, Impedância e Corrente.....	75
Equação (52) - Relação entre Potência Aparente, Tensão e Admitância .....	75
Equação (53) - Módulo da Potência Aparente.....	75
Equação (54) - Potência Aparente em Circuitos Trifásicos .....	75
Equação (55) - Relação entre Potência Ativa, Potência Aparente e $\phi$ .....	75
Equação (56) - Relação entre Potência Reativa, Potência Aparente e $\phi$ .....	75
Equação (57) - Relação entre Potência Ativa, Potência Reativa e $\phi$ .....	75
Equação (58) - Relação entre Potência Aparente, Potência Ativa e Potência Reativa.....	76
Equação (59) - Triângulo de Potências.....	76
Equação (60) - Fator de Potência - Definição Matemática .....	77
Equação (61) - Fator de Deslocamento .....	77
Equação (62) - Potência Ativa - Circuitos Lineares, Alimentação Senoidal.....	77
Equação (63) - Potência Reativa - Circuitos Lineares, Alimentação Senoidal .....	77
Equação (64) - Fator de Potência - Circuitos Lineares, Alimentação Senoidal .....	77
Equação (65) - Potência Ativa - Valor Médio.....	78
Equação (66) - Potência Aparente - Cargas Não-Lineares.....	78
Equação (67) - Fator de Potência - Cargas Não-Lineares .....	79
Equação (68) - Fator de Deslocamento - Cargas Não-Lineares .....	79
Equação (69) - Relação entre FP e FD - Cargas Não-Lineares .....	79
Equação (70) - Valor Eficaz da Corrente .....	79
Equação (71) - Valor da Corrente por análise de Fourier.....	79
Equação (72) - Valor Eficaz da Componente de Distorção de Corrente.....	80
Equação (73) - Distorção Harmônica Total.....	80
Equação (74) - Faturamento de Energia Reativa Excedente .....	88
Equação (75) - Faturamento de Demanda Reativa Excedente .....	89
Equação (76) - Fator de Potência Medido com Wattímetro, Voltímetro e Amperímetro ...	91
Equação (77) - Cálculo de $\cos(\phi)$ a partir da Energia Ativa e Reativa .....	91
Equação (78) - Redução Percentual das Perdas.....	100
Equação (79) - Redução de Perdas - Exemplo .....	101
Equação (80) - Queda de Tensão em Condutores .....	101

## **1 RESUMO**

O presente trabalho é o resultado de uma pesquisa aplicada ao desenvolvimento de um equipamento eletrônico microprocessado destinado ao controle de demanda máxima e de fator de potência em instalações elétricas.

Motivado pelo aumento na demanda e pela limitação nos recursos do sistema elétrico interligado, o uso de equipamentos que permitam o gerenciamento de energia pelo lado da demanda tem se difundido com grande velocidade, pois é o método de racionalização do uso de energia elétrica que apresenta boa relação entre custo e benefícios, trazendo resultados favoráveis em curto prazo.

O uso de controladores de demanda máxima e de fator de potência nas instalações atendidas por contratos de fornecimento horo-sazonal é uma forma de garantir que o sistema não ultrapasse os limites contratuais, que resultam em aplicação de multa, e também um modo de se operar o sistema dentro de parâmetros conhecidos evitando perdas excessivas, racionalizando a utilização de seus componentes.

Embora não exista regulamentação relacionada a tarifas diferenciadas de energia elétrica para unidades atendidas em baixa tensão, a utilização de controladores de demanda máxima e fator de potência pode trazer à esta classe de consumidores os benefícios do gerenciamento de energia, reduzindo perdas e em muitos casos permitindo a diminuição no valor da fatura de energia. Pelo ponto de vista do

fornecimento, a existência de controle de demanda nas unidades consumidoras permite um melhor planejamento e maior aproveitamento do sistema de distribuição, minimizando investimentos no setor.

Para aplicação em unidades consumidoras de porte reduzido, os equipamentos de gerenciamento de energia disponíveis no mercado apresentam dois inconvenientes principais: o excesso de recursos que na maioria dos casos não é explorado em sua plenitude e eleva o custo do equipamento, e a necessidade de se empregar equipamentos transdutores de grandezas elétricas ou medidores de energia apropriados, incomuns nestes tipos de instalação.

O equipamento que foi desenvolvido neste trabalho possui um sistema eletrônico de medição de energia elétrica e grandezas associadas independente da medição da concessionária, e também um conjunto de recursos básicos de programação, utilização e comunicação que ampliam o campo de utilização do dispositivo, sem elevar o custo final do conjunto.

O protótipo consiste em um módulo de medição e controle, contendo os circuitos de medição de energia, fonte de alimentação, unidade central de processamento, interface homem-máquina e interfaces de controle e comunicação, e um módulo de saída, contendo as placas de relés, destinados ao comando de cargas externas.

A unidade computacional do equipamento é baseada em um microcontrolador industrial com conjunto reduzido de instruções (RISC - Reduced Instruction Set Code) da série PIC18, produzido pela Microchip e programado para executar as operações de medição, controle e comunicação do equipamento. O medidor eletrônico de energia é baseado no circuito integrado ADE7758, produzido pela Analog Devices, e realiza a medição dos parâmetros elétricos da instalação que são utilizados como variáveis de entrada do sistema de controle.

A comunicação com o usuário pode ser realizada no próprio equipamento, através de uma interface homem-máquina composta por um display alfanumérico e um teclado reduzido, ou por meio de softwares supervisórios, que acessam os parâmetros de operação e controle do dispositivo através de interfaces de comunicação serial, padrão RS-232 ou RS-485.

Os algoritmos de controle da demanda máxima e do fator de potência, atuando através das interfaces de saída, possibilitam o comando de elementos da instalação para que sejam mantidos dentro dos limites aceitáveis a demanda máxima e o

fator de potência da instalação. Sua estratégia de operação segue a filosofia empregada em sistemas de controle de porte industrial, com implementação capaz de atender de forma satisfatória a categoria de instalações a que se destina.

Aplicado a uma instalação, o equipamento atua sobre duas variáveis distintas: a demanda máxima, com limites estabelecidos por parâmetros de programação associados aos respectivos postos horários, controlada através do comando de cargas de baixa prioridade para o processo, e o fator de potência, controlado através da manipulação de capacitores destinados à compensação de energia reativa do sistema.

A validação do experimento consistiu na coleta e armazenamento de dados de operação de uma instalação simulada, com características elétricas variáveis, realizado por um aplicativo desenvolvido para o software Elipse Scada. Através das planilhas obtidas foram elaborados gráficos que permitiram a avaliação dos parâmetros de operação e as ações de controle realizadas pelo equipamento, demonstrando que sua atuação sobre a instalação foi suficiente para manter os valores das grandezas controladas dentro dos limites desejados.

---

**Palavras-Chave:** Gerenciamento de Energia pelo Lado da Demanda; Controle de Energia; Controle Direto de Cargas; Controlador de Demanda; Controlador de Fator de Potência; Eficiência Energética; Controle Industrial; Economia de Energia

LOW-COST DEMAND AND POWER FACTOR CONTROLLER FOR USE IN ELECTRICAL ENERGY CONSUMER UNITS. Bauru, 2005. 216p.

Dissertation presents to Engineering School of UNESP - São Paulo State University - Bauru Campus, for obtention of Master Degree in Industrial Engineering.

Author: ANDRÉ LUIZ ANDREOLI

## **SUMMARY**

The present work is the result of an applied research to the development of an electronic microcontrolled device used in the control of maximum demand and power factor in small and medium range electric facilities.

Stimulated by the increase of demand and limitation of electrical resources of the interconnected system, the use of demand-side energy management devices was increased, since this method is the better mode to provide the energy rationalization, good cost-benefits relationship and presents best results in a short time interval after its implementation.

The use of maximum demand and power factor controllers in facilities with differential billing fares is a method of guarantee that the agreement limits will not be exceeded, resulting in penalties, and also a safe mode of system operation, reducing losses and rationalizing the use their components.

Although don't exist regulation related to the differential billing applied to low-voltage supplied consumers, the use of maximum demand and power factor controllers can bring to this consumers category the benefits of energy management, reducing losses and in most cases decreasing the energy billing. In the supply point of view, the demand control in consumers units allow the better planning and the best utilization of distribution system, minimizing the investment in this sector.

For application in small-size consumer units, the commercially available energy management devices have two inconvenient: excess of resources, in the most cases sub-utilized which increase the price, and the need of a special external energy meter or energy transducer, uncommon in this class of facility.

The device developed in this research have an electronic energy measurement system and associated signals independent of the supplier's meter, and also a cast of basic program, operation and communication resources that increase its application field, without increase the final price of the set.

The prototype consists in a measurement and control module, containing the meter, power supply, central processing unit, human-machine interface, control interface and communication interface circuits, and an output module, containing the relay boards that perform the external loads control.

The computational unit of this device is based in a RISC (reduced instruction set code) microcontroller of Microchip PIC18 family, and programmed for the measurement, control and communication tasks. The energy meter is based in Analog Devices ADE7758 full three-phase energy meter integrated circuit, that performs the measurements of electrical parameters in the facility used as input variable in the control system.

The communication with user is performed in device by an human-machine interface, composed by an alphanumeric liquid-crystal display and a reduced keyboard, or by supervisory control and data acquisition software, that access the operation and control parameters of device through serial interfaces in RS-232 or RS485 standard.

The maximum demand and power factor control algorithms, acting over output interfaces, make the control of circuit elements maintaining the parameters in the set limits. The operation strategy follow the operating modes used in large-scale control systems, with implementation able to attempt, in satisfactory form, the needs of the facility.

Applied in a circuit, the device acts over two distinct variables: the maximum demand, with limits set by parameters according the schedule, and controlled by low-priority load enabling, and power factor, controlled by capacitive loads handling, compensating the reactive energy of the system.

The validation of this experiment was made with the capture of operation data in a simulated facility, with variable electric characteristics, performed by a program developed for use in Elipse Scada software. Through of the obtained spreadsheets, graphics was drawn, showing the operation parameters and the evaluation of control actions, demonstrating the device's efficiency in the maintenance of control parameters inner the set limits.

---

**Keywords:** Demand-Side Energy Management, Energy Control, Direct Load Control, Demand Control, Power Factor Control, Energy Efficiency, Industrial Control, Energy Saving.

## **2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA**

A preocupação com o aumento da eficiência energética de equipamentos elétricos tem se tornado cada vez mais evidente, sendo motivados principalmente pelo aumento na potência instalada e pelas limitações existentes em termos de geração e transmissão.

Este crescimento na demanda de energia tem ocorrido sem significativa preocupação em relação ao uso racional da energia elétrica, levando o sistema elétrico a condições de sobrecarga em determinados horários do dia. Para atender à demanda de consumo nestes horários tornaram-se necessários investimentos consideráveis em geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, mesmo que esta demanda torne-se sensivelmente menor no restante do período.

Mesmo com o emprego de equipamentos energeticamente eficientes, não é possível garantir que a somatória das cargas ligadas simultaneamente estejam sendo utilizadas em sua forma mais eficiente.

Devemos levar em conta que para garantir o fornecimento de energia a uma instalação deve-se considerar a pior condição, onde todos os equipamentos instalados estão em operação simultânea. Nesta situação, admite-se que a demanda de potência da instalação é igual à somatória das potências individuais dos equipamentos

instalados, denominada Potência Total Instalada. Sendo o Fator de Demanda igual à relação entre Demanda Média e a Potência Total instalada, o Fator de Demanda para este caso será igual a 1.

Tecnicamente, esta consideração é uma situação pouco comum, pois o que se encontra na maioria dos casos são instalações que possuem apenas parte das cargas instaladas em operação, enquanto o restante encontra-se desligado ou em regime de baixa potência. Em análise mais profunda, percebe-se que mesmo as cargas em operação não estão plenamente carregadas. Desta forma, para a grande maioria das unidades consumidoras, o Fator de Demanda real da instalação é menor que a unidade.

Outro parâmetro indicador de eficiência energética é o Fator de Carga, definido pela relação entre a Demanda Média e a Demanda Máxima de uma instalação, para de um determinado período. Notar que a Demanda Máxima de uma instalação, na maioria dos casos, é menor que a somatória das cargas instaladas, pelas razões previamente expostas. Deste modo, quanto maior for a medida de Fator de Carga, mais uniforme é o consumo que a unidade solicita do sistema de distribuição.

Estatisticamente, os fatores de demanda são bastante próximos em valores numéricos para atividades comerciais ou industriais semelhantes, e o comportamento de um conjunto de cargas composto por elementos de mesma espécie produz uma contribuição de comportamento conhecido e previsível de forma bastante confiável.

As distribuidoras consideram a Demanda da instalação como parâmetro de carregamento do sistema em termos de disponibilização de energia, ignorando a possibilidade de se controlar de um determinado grupo de cargas visando reduzir a demanda máxima ou o aumentar do fator de carga da instalação.

Qualquer método de controle de cargas que permita não só a redução da demanda máxima, mas também contribua com o aumento do fator de carga da instalação, irá produzir um aumento na eficiência energética da unidade consumidora, pois apresentará um carregamento mais racional do sistema de distribuição. Através do controle de demanda, é possível promover o deslocamento da curva de carga e a diminuição da demanda máxima da instalação por meio do bloqueio ou liberação do funcionamento de determinados equipamentos, mantendo a demanda máxima da instalação dentro de limites conhecidos.

O aumento da eficiência nas unidades de consumo se reflete na possibilidade de racionalização do sistema de distribuição, que passa a contar agora com parâmetros mais seguros quanto à real necessidade de fornecimento, minimizando investimentos e facilitando as projeções de expansão do sistema.

O fator de potência, que é a relação entre a potência ativa e a potência total ou aparente de um circuito, é outro parâmetro passível de controle que influencia de forma significativa na eficiência da instalação elétrica. A legislação atual determina que este valor seja mantido superior a 0,92, e as instalações que apresentem o fator de potência abaixo deste limite sofrem aplicação de faturamento sobre o excedente de energia reativa solicitado.

Além do faturamento, o baixo fator de potência produz vários efeitos indesejáveis na instalação, como a elevação na corrente dos alimentadores, o aumento de perdas por efeito Joule e a redução na capacidade disponível do sistema de distribuição. O emprego de técnicas para a manutenção de um alto valor de fator de potência produz a eliminação de grande parte dos problemas apresentados e eleva consideravelmente a eficiência do sistema elétrico.

Outro fator de motivação ao desenvolvimento deste projeto é a previsão de implementação de estruturas de tarifação diferenciada para consumidores de categoria residencial e comercial. Esta modalidade de tarifação, denominada Tarifa Amarela, já está fundamentada pelos órgãos reguladores do sistema elétrico nacional, e estudos realizados por algumas concessionárias de distribuição mostraram que sua utilização permite reduções significativas no valor do importe tarifário das unidades de consumo enquadradas nesta categoria de medição.

A proposta deste trabalho é o desenvolvimento de um equipamento capaz de atender unidades consumidoras com instalações elétricas que permitam a fácil implementação do gerenciamento energético pelo lado da demanda, mas não justificam o investimento em um equipamento industrial dotado de diversos recursos, principalmente aqueles voltados à comunicação avançada e supervisão em rede, que em sua maioria não apresentariam relevante utilidade neste tipo de instalação.

Embora apresente dimensões reduzidas e exija poucas alterações no sistema elétrico existente na unidade consumidora, seu emprego pode proporcionar o gerenciamento da demanda da instalação e possibilitar a correção do fator de potência da carga instalada. Sua capacidade de expansão permite que módulos de controle adicionais

sejam agregados à configuração original sem necessidade de alteração no hardware original.

No tocante aos recursos implementados, devemos salientar que o equipamento dispensa o emprego de medidores de consumo de energia especiais, pois incorpora em seu conceito um circuito de medição de energia trifásico completo, capaz de fornecer à unidade de processamento todos os parâmetros elétricos do sistema onde se encontra instalado.

Devido ao aumento crescente na popularidade de sistemas supervisórios, também foi prevista neste equipamento a possibilidade de comunicação com softwares de supervisão e controle, empregando protocolo de dados padronizado e bastante difundido, que é o MODBUS no modo RTU. A interface de comunicação pode ser selecionada pelo cliente, conforme sua necessidade ou escolha, entre o padrão EIA-RS232, quando se deseja comunicação ponto a ponto, e o padrão EIA-RS485, para sistemas que empregam redes para a comunicação entre unidades.

A associação das características do equipamento como medidor à sua conectividade a sistemas supervisórios industriais permite seu emprego não apenas como controlador, mas como ferramenta de aquisição de dados em sistemas de supervisão mais complexos, extrapolando inclusive a abrangência de aplicação que motivou este trabalho.

### **3 INTRODUÇÃO**

O crescente aumento na demanda do sistema elétrico, aliado à escassez de recursos de geração, tem aumentado a busca de novas tecnologias para melhorar o aproveitamento dos recursos existentes com a constante preocupação de se minimizar os investimentos. A racionalização no consumo de energia elétrica é um tema global, e embora pesquisas para o desenvolvimento de novas matrizes energéticas estejam em fase bastante adiantada, a taxa de crescimento no consumo de energia elétrica supera a capacidade de ampliação dos atuais sistemas de geração.

O gerenciamento de energia no lado da demanda é o método de racionalização do uso de energia elétrica que requer menores investimentos ao sistema elétrico, e também é o que pode apresentar resultados em menor prazo após sua implementação. Trata-se, portanto, de uma técnica adequada quando se deseja resultados rápidos e com baixo investimento inicial, especialmente quando se considera o nível de complexidade atual dos sistemas de distribuição de energia.

Vários aspectos são considerados quando se discute a racionalização do uso da energia elétrica, desde a otimização dos processos de geração com o aumento na eficiência dos maquinários utilizados atualmente, passando pela implementação de melhorias nos sistemas de transmissão e distribuição visando minimizar

perdas, até a busca de processos e métodos com maior eficiência energética, sendo ainda considerada as mudanças no aspecto cultural, com a utilização racional dos equipamentos de consumo.

Há anos são utilizadas técnicas de Gerenciamento Energético pelo Lado da Demanda no segmento industrial. Além do acréscimo na eficiência, estas técnicas fornecem meios para a avaliação de vários parâmetros da instalação, tais como consumo, fator de potência, demanda máxima, fator de carga, curva de carga, índices de desempenho, etc.

O controle de alguns desses parâmetros são necessários em função do tipo de contrato de fornecimento de energia elétrica, que na sua grande maioria possui tarifas diferenciadas do tipo horo-sazonal, o que representa nos casos de ultrapassagem de demanda contratada ou fator de potência abaixo do valor fixado, pagamento de sobretaxas ou importes diferenciados. A utilização destes recursos traz benefícios não só para a unidade consumidora, mas também para o sistema, uma vez que a forma de operação é conhecida e previsível para a distribuição.

Para os consumidores de pequeno porte, comerciais e residenciais, não existem até o presente momento contratos de fornecimento tipo horo-sazonal, com medição diferenciada, e cobranças relativas ao baixo fator de potência. A limitação existente na oferta de energia e a deficiência na capacidade de transmissão e geração do sistema interligado conduziram algumas concessionárias de distribuição de energia elétrica a realizarem estudos para a implementação de tarifas diferenciadas para os referidos segmentos, na tentativa de conter a demanda nos horários de ponta de consumo.

A aplicação de sistemas tarifários horo-sazonais em instalações de pequeno e médio porte só se tornará interessante ao consumidor nos casos onde haja a real possibilidade de alteração no modo como suas cargas são utilizadas, especialmente nos horários considerados de ponta, onde o valor da tarifa aplicada é substancialmente maior, justamente para inibir o consumo nestes horários.

Um método de se prevenir um excessivo carregamento nos horários de tarifa diferenciada seria a aplicação de um equipamento que realizasse o monitoramento do consumo da instalação, e ao se iniciar o horário de ponta, através de uma ação de controle o equipamento realizasse o desligamento de setores da instalação para garantir que o limite máximo de potência estabelecido pelo contrato, neste horário diferenciado, não seja ultrapassado.

Este equipamento, denominado Controlador de Demanda Máxima ou simplesmente Controlador de Demanda, é com frequência utilizado em instalações industriais complexas, onde o fornecimento de energia é regido através de contratos rigidamente estabelecidos entre a Concessionária de distribuição e a Unidade Consumidora, e as ultrapassagens nos valores máximos de demanda contratada acarretam pesadas multas ao consumidor. Justifica-se, então, o investimento como um meio de se evitar despesas indesejáveis ocasionadas por descumprimento do contrato de fornecimento.

Outra funcionalidade associada com frequência a estes equipamentos é o controle de fator de potência. Através do comando de bancos de capacitores, controla-se o nível de energia reativa solicitada do sistema de distribuição, de modo a manter o fator de potência da instalação acima dos valores definidos por legislação. Elevando-se o fator de potência aumentamos a eficiência da instalação e reduzimos consideravelmente as perdas em condutores e componentes do sistema.

Os controladores existentes no mercado, desenvolvidos para o segmento industrial, são pouco aplicados em instalações de pequeno porte em virtude de seu custo, da complexidade de implementação em instalações de topologias mais simples e pelo longo tempo para retorno de investimento após sua implementação.

O desenvolvimento de um equipamento destinado ao gerenciamento de energia elétrica que apresente baixo custo e facilidade de implementação seria a solução para o gerenciamento de energia de uma grande quantidade de unidades consumidoras, especialmente em instalações comerciais e residenciais, que atualmente apresentam uma potência instalada e uma diversidade de equipamentos que justificam o planejamento e a inclusão de recursos de gerenciamento visando à conservação de energia

Este trabalho está apresentado em capítulos conforme a delimitação dos assuntos envolvidos na pesquisa realizada para o desenvolvimento do protótipo. O Capítulo 4 discorre sobre a medição de energia elétrica e os equipamentos empregados para esta finalidade. O Capítulo 5 apresenta conceitos do Gerenciamento de Energia pelo lado da Demanda, mostrando as estruturas tarifárias aplicadas no faturamento de energia elétrica, os meios de se gerenciar o consumo e a demanda de energia a partir da utilização racional das cargas da instalação, e os métodos empregados neste tipo de gerenciamento.

O Capítulo 6 introduz os conceitos de Fator de Potência de uma instalação, apresenta os efeitos que os vários tipos de cargas introduzem ao sistema de distribuição de energia, os meios de medição e a tarifação aplicada pelas concessionárias

de distribuição, e cita os métodos mais usualmente empregados no controle do fator de potência em instalações elétricas. O Capítulo 7 mostra todo o desenvolvimento do equipamento proposto nesta pesquisa, desde a seleção dos componentes, o estabelecimento dos parâmetros principais do projeto, a composição física do protótipo, passando pela implementação do software e pelos modos de operação do dispositivo.

No Capítulo 8 estão apresentados os resultados obtidos com a aplicação do equipamento em uma instalação elétrica experimental, e a avaliação do desempenho diante de várias condições de operação impostas ao sistema de controle. As conclusões finais deste trabalho estão apresentadas no Capítulo 9, e as referências bibliográficas estão listadas no Capítulo 10.

## **4 MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

### **4.1 Medidores de Grandezas Elétricas**

A história dos instrumentos de medição de grandezas elétricas se confunde com a própria história da utilização da eletricidade. No princípio, a utilização de instrumentos de medida não era prática corriqueira. As medições se limitavam às experiências científicas, e não possuíam aspectos de avaliação prática, mesmo porque os instrumentos desta época eram de grande porte e destinados apenas às práticas de laboratório.

Um dos primeiros instrumentos de medição de corrente elétrica, portanto um instrumento destinado à aplicação em eletrodinâmica, foi o Galvanômetro, destinado à medição de pequenas intensidades de corrente.

O primeiro registro científico conhecido de um Galvanômetro foi o instrumento criado por Johann Salomo Christoph Schweigger, e apresentado em um artigo na Universidade de Halle, em 16 de Setembro de 1820. Este instrumento foi intitulado por seu inventor como “Multiplicador Eletromagnético” ou “Multiplicador Galvanométrico”.

Este instrumento consistia em uma bobina composta por várias espiras de um fio condutor isolado, por onde circulava a corrente a ser medida, e um elemento magnetizado mantido em suspensão, sujeito à orientação promovida pelo campo magnético produzido pela bobina. Sem a passagem de corrente, o elemento magnético

orientava-se de acordo com o magnetismo terrestre. A reprodução da imagem do Multiplicador Galvanométrico de Schweigger é mostrada na Figura 1



**Figura 1 - Multiplicador Galvanométrico - Schweigger (1820)**

(Fonte: <<http://chem.ch.huji.ac.il/~eugeniik/history/schweigger.html>>. Acesso em 21/02/2005)

Embora apresentasse uma relativa facilidade na execução de medidas de corrente, a indicação do Galvanômetro de Schweigger apresentava grande influência do campo magnético terrestre. Em maio de 1825, o italiano Leopoldo Nobili apresentou à Sociedade Italiana de Ciência, em Módena, um aperfeiçoamento do galvanômetro original, denominado Galvanômetro Astático (Figura 2).



**Figura 2 - Galvanômetros Astáticos - Leopoldo Nobili (1825)**

(Fonte: <<http://chem.ch.huji.ac.il/~eugeniik/history/nobili.html>>. Acesso em 21/02/2005)

A melhoria consistia basicamente na blindagem magnética do equipamento, e conseqüentemente um aumento significativo em sua imunidade ao campo magnético terrestre. Com este instrumento, aparecia o conceito de instrumento de medição elétrica de precisão, permitindo a quantificação mais exata dos fenômenos mensurados.

Por volta de 1880, Jacques-Arsene D'Arsonval, em conjunto com Étienne-Jules Marey e Marcel Deprez, introduziram um grande avanço nos instrumentos destinados à medição de correntes elétricas de pequena intensidade, ao apresentarem o Galvanômetro D'Arsonval.

Utilizando uma pequena bobina constituída de várias espiras de fio fino, suspensa entre os pólos de um ímã permanente, e associando à bobina uma pequena agulha ou um espelho, obteve-se um instrumento praticamente imune ao campo magnético terrestre, que operava baseado na interação entre o campo magnético produzido pela bobina e o campo gerado pelo ímã permanente, apresentando sensibilidade bastante elevada. Como a suspensão era realizada pelos próprios condutores de alimentação da bobina, e não havia limite para a deflexão da bobina móvel, aplicou-se uma pequena mola em formato espiral que introduzia um torque resistente à rotação da bobina, e na ausência de corrente trazia o conjunto móvel à sua posição de repouso.

O movimento de rotação da bobina móvel só tinha fim quando o torque magnético igualava-se ao torque resistente da mola. A posição alcançada era, portanto, proporcional à corrente circulante pela bobina móvel. A Figura 3 mostra dois modelos de Galvanômetro D'Arsonval, sendo um dotado de ponteiro indicador e outro equipado com um espelho destinado à reflexão de raios luminosos, aumentando a distância de observação e portanto tornando mais fácil a leitura de pequenas deflexões da bobina.

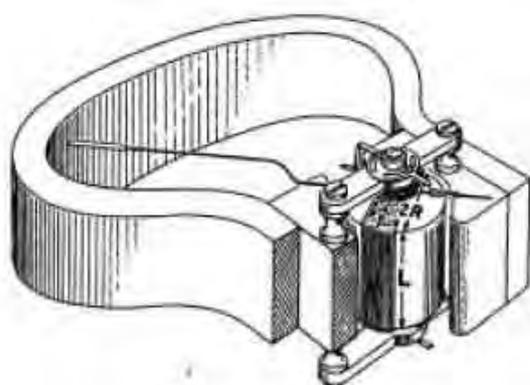


**Figura 3 – Galvanômetros de D'Arsonval**

(Fonte: <<http://chem.ch.huji.ac.il/~eugeniik/history/arsonval.html>>. Acesso em 21/02/2005)

As evoluções tecnológicas que se verificaram permitiram a construção de instrumentos baseados nos galvanômetros de D'Arsonval com sensibilidade consideravelmente maior, e os aperfeiçoamentos em sua estrutura mecânica tornaram este tipo de instrumento bastante compacto e robusto, permitindo inclusive sua aplicação em sistemas de medição portáteis.

Em 1888, Edward Weston desenvolveu um instrumento indicador baseado no galvanômetro de D'Arsonval, com melhoramentos que o tornaram robusto, prático e preciso, e que permitia sua aplicação em aparelhos portáteis.



**Figura 4 - Instrumento Portátil - Edward Weston**

O Instrumento Portátil, como ficou conhecido, tornou-se a base para o desenvolvimento da grande maioria dos medidores eletromagnéticos de corrente, tensão e potência, sendo seu conceito de construção utilizado quase integralmente até os dias atuais.

Estes instrumentos foram posteriormente adaptados para a medição de diversas grandezas de natureza elétrica, como a intensidade de correntes e potenciais elétricos. Posteriormente, grandezas derivadas da corrente e tensão, como a potência e a energia, também passaram a ser medidas, através de instrumentos derivados dos conceitos originais. Da forma como os valores medidos são apresentados por estes instrumentos, surgiu a classificação que os divide entre instrumentos indicadores, registradores ou acumuladores.

#### 4.1.1 Instrumentos Indicadores

São chamados instrumentos indicadores os que apresentam o valor da grandeza medida em um mostrador, e a leitura é feita de forma imediata através da comparação da posição do indicador (ponteiro) com uma escala, ou através da leitura numérica direta, no caso de instrumentos digitais. O valor medido refere-se ao valor presente no instrumento, e não ocorre registro do valor lido. São exemplos clássicos deste tipo de instrumento os voltímetros, amperímetros e wattímetros de painel ou portáteis, analógicos ou digitais, como os mostrados na Figura 5.



Figura 5 - Instrumentos Indicadores (Fonte: Yokogawa)

#### 4.1.2 Instrumentos Registradores

Os instrumentos registradores, ou simplesmente registradores, proporcionam um meio de registro do valor medido, normalmente em função do tempo.

Seguem o princípio de operação dos instrumentos indicadores, porém a indicação pode ser registrada por meio gráfico, magnético ou digital.

Os registradores gráficos mais comuns realizam o registro das medições através do traço de uma pena, que corresponde ao indicador do instrumento, sobre um papel dotado de uma escala de medida que possibilita a leitura posterior dos registros efetuados. O formato do papel de registro é normalmente uma fita contínua ou um disco, e o tempo máximo do registro é limitado pelo tamanho do meio de registro, no caso o comprimento do papel ou a velocidade de rotação do disco. A Figura 6 mostra registradores gráficos de papel contínuo e de cartão circular.



**Figura 6 - Registradores Gráficos (Fonte: Eurotherm)**

Registradores magnéticos empregam meios de armazenamento capazes de reter campos magnéticos em pequenas regiões, de forma quase permanente, possibilitando que os dados sejam escritos por orientação das partículas magnéticas do meio utilizado, e recuperados através da leitura do arranjo magnético das partículas realizado no processo de gravação. Os meios utilizados podem ter a forma de fitas ou discos, flexíveis ou rígidos, e o tipo de material empregado e as dimensões dos elementos de gravação definem a densidade de armazenamento dos dados.

O registro magnético possui a vantagem de permitir o reaproveitamento do meio de armazenamento, pois uma nova orientação dos campos magnéticos pode facilmente ser obtida com o processo de reescrita sobre o dado anteriormente armazenado.

O registro pode ser feito ainda com o uso de dispositivos baseados em memórias semicondutoras. Esta forma é a que apresenta maior número de vantagens na atualidade, pois possibilita o armazenamento de uma quantidade muito grande de dados em volumes bastante reduzidos, com níveis de confiabilidade excelentes e com a total ausência

de dispositivos mecânicos sujeitos a desgaste ou interferências externas. Muitos destes dispositivos, inclusive, empregam tecnologias de armazenamento que permitem o armazenamento dos dados mesmo em condições de ausência de alimentação dos circuitos eletrônicos de memória.

#### **4.1.3 Instrumentos Integradores ou Acumuladores**

Os instrumentos integradores empregam a integração (somatória) dos valores de uma determinada grandeza, possibilitando a determinação do valor total ao final de um intervalo de tempo. São empregados quando não é possível a obtenção do valor direto da grandeza, por esta ser resultante de uma seqüência de valores variáveis e descontínuos, ou por ser resultante da integração de uma outra grandeza. Nesta categoria se enquadram os medidores de energia (integração de potência em um intervalo de tempo), medidores de consumo de líquidos (integração da vazão em um intervalo de tempo), medidores de distância percorrida e os próprios medidores de tempo, onde a grandeza acumulada é o próprio tempo de utilização do instrumento.

#### **4.2 Medição de Potência Elétrica**

Por definição física, a potência elétrica, medida em Watts, é igual ao produto entre a diferença de potencial, em Volts, e a corrente elétrica circulante através do dispositivo, em Ampéres.

Deste modo, para se medir a potência elétrica de um determinado dispositivo, emprega-se um instrumento capaz de indicar o produto entre a tensão e a corrente no sistema a ser medido, e dependendo da forma como este produto é realizado podemos obter a indicação de potência ativa, potência reativa ou potência aparente.

Em circuitos de corrente contínua, a medição de potência pode ser realizada pela simples multiplicação entre os valores de corrente e tensão de alimentação de um circuito, visto que não existe variação de polaridade em circuitos desta natureza, e o produto entre estas duas grandezas resulta sempre em um número positivo. Em circuitos de corrente alternada a característica reativa de certos componentes pode produzir potências de caráter complexo, exigindo que o sistema de medição seja capaz de medir separadamente as parcelas de potência ativa e potência reativa. Por esta razão, os medidores de potência que operam em corrente alternada possuem uma construção e um

princípio de operação capazes de realizar a separação vetorial da potência real, indicada como potência ativa, e da potência imaginária, indicada como potência reativa.

#### 4.2.1 Medição de Potência Ativa

A medição de potência ativa deve considerar apenas a componente real da potência aparente. O valor indicado deve portanto ser igual a :

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (1)$$

O instrumento eletrodinâmico empregado para este tipo de medição é constituído por dois circuitos magnéticos distintos: um circuito destinado à corrente e outro destinado à tensão. No circuito de corrente, o instrumento é equipado com um conjunto de bobinas estacionárias e executadas com condutores de área elevada e reduzido número de espiras, na forma de duas bobinas idênticas sobre núcleo de ar, ligadas em série e submetidas à corrente do sistema, e no circuito de tensão, o instrumento possui uma bobina móvel, executada com um número elevado de espiras de fio de pequena seção, por onde circula uma corrente resultante da conexão à fonte de alimentação do sistema, limitada por uma resistência ligada em série.

A indicação ocorre em virtude do torque originado pela interação entre os campos magnéticos produzidos pelo circuito de corrente e tensão. O emprego de bobinas em núcleo de ar permite que o torque gerado seja proporcional ao produto instantâneo entre os campos produzidos pelos enrolamentos fixo e móvel. Deste modo, a indicação leva em conta os eventuais desvios de fase existente entre os sinais de tensão e corrente, apresentando um deslocamento proporcional à potência ativa do circuito conectado ao medidor.

Medidores eletrônicos de potência realizam a medição por meio de cálculo realizado por circuitos discretos ou por sistemas microprocessados, dispensando artifícios eletromagnéticos para a decomposição vetorial da potência aparente.

#### 4.2.2 Medição de Potência Reativa

Por definição, a potência reativa de um circuito é definida matematicamente através da seguinte equação:

$$Q = U \cdot I \cdot \text{sen}(\varphi) \quad (2)$$

De forma similar ao medidor de potência ativa, o instrumento eletrodinâmico destinado à medição de potência reativa é composto por um arranjo de bobinas fixas e bobina móvel sobre núcleos de ar, com conexão ao sistema elétrico de forma a permitir que a indicação corresponda à parcela imaginária da potência aparente.

### 4.3 Medidores de Energia Elétrica

O primeiro medidor destinado à quantificação de consumo de energia elétrica foi desenvolvido e patenteado por Samuel Gardiner, em 1872. Tratava-se de um medidor de lâmpada-hora para aplicação em corrente contínua, que indicava o período que uma lâmpada permanecia acesa. Por ser uma carga conhecida, com corrente praticamente constante, o cálculo do consumo resumia-se ao produto do tempo ligado pela potência nominal da carga.

Construtivamente, tratava-se de um relógio que era disparado por um eletroímã, cuja bobina ficava ligada em série com a carga. Havendo corrente circulante, o relógio era disparado, e cessando-se a corrente a contagem de tempo era paralisada.

Em 1878, J.B. Fuller desenvolveu um medidor de lâmpada-hora para operação em corrente alternada composto por um relógio cujo mecanismo de escape era acionado por um par de bobinas que vibravam à frequência de alimentação, produzindo o avanço da contagem.

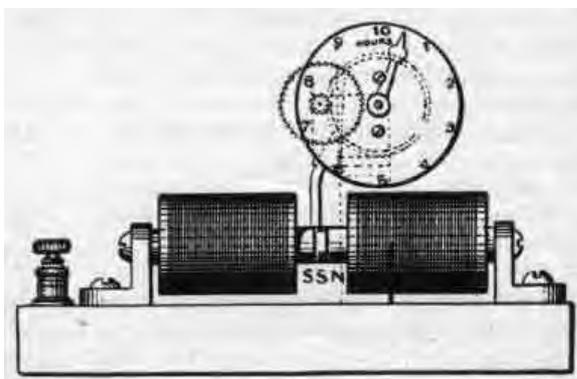


Figura 7 - Medidor de Lâmpada-Hora - J. B. Fuller (1878)

Os medidores de lâmpada-hora mostravam-se eficientes apenas para aplicações com cargas conhecidas, deixando a desejar quando as cargas apresentavam variações de potência ao longo do período de operação. Em 1888, Oliver B. Schallenberger, eletricista-chefe da Westinghouse Company, desenvolveu um medidor de ampéres-hora para operação em corrente alternada, capaz de quantificar o consumo em função da corrente das cargas conectadas ao aparelho.



**Figura 8 - Medidor de Ampéres-Hora - Oliver B. Schallenberger (1888)**

Consistia em um mecanismo contador acionado por uma forma primitiva de motor de pólos sombreados, onde o campo magnético principal era fornecido por uma bobina percorrida pela corrente do circuito a ser medido.

O medidor de ampéres-hora operava considerando que a tensão de alimentação do sistema sofria pouca variação ao longo do tempo, e para o registro empregava apenas a intensidade de corrente como variável. Por não possuir elementos sensores de tensão, este equipamento não era capaz de medir a potência ativa da instalação, pois desconsiderava o fator de potência da carga, tornando pouco precisa a medição de consumo de motores de indução, que começavam a ser introduzidos em aplicações industriais como fonte de energia motriz.

Em meados da década de 1880, Elihu Thomsom, com o auxílio de Thomas Duncan, desenvolveu um wattímetro-registrador destinado à medição de consumo de energia, capaz de operar em corrente alternada ou contínua. Foi introduzido ao uso intensivo em 1889, e permaneceu como sendo o principal meio de medição de consumo até 1892, quando foi substituído por medidores de watt-hora.



**Figura 9 - Wattímetro-Registrador - Thomson (1889)**

Os primeiros medidores de Watt-hora com precisão e confiabilidade suficientes para a aplicação em medição de consumo de energia foram desenvolvidos em 1892, por Thomas Duncan. Apresentavam grande similaridade ao medidor de Ampère-hora de Schallenberger. Inicialmente construídos para a medição em circuitos monofásicos, foram logo adaptados à medição polifásica de energia. Modelos capazes de operar em sistemas de corrente contínua e alternada também foram desenvolvidos, permitindo a aplicação do instrumento a todos os sistemas de distribuição existentes.



**Figura 10 - Medidores de Watt-hora - Thomas Duncan (1892)**

Em termos matemáticos, a energia elétrica consumida, ou simplesmente o consumo, pode ser medido através da integração da potência exigida pela unidade de consumo em um intervalo de tempo. A equação matemática que determina o

consumo de energia elétrica de um circuito em um intervalo de tempo  $\Delta t=(t_2-t_1)$  é apresentada em (3).

$$E(\Delta t) = \int_{t_1}^{t_2} u(t)i(t)dt \quad (3)$$

Medidores de energia elétrica operam através da medição da tensão e corrente instantâneas, e através de seu produto determinam a potência ativa (em Watts) do circuito. A integração da potência medida no tempo fornece então a Energia Consumida, que é medida em Joules, Watts-hora ou seus derivados. Em aplicações comerciais, a unidade empregada é o kWh (Quilowatt-hora), energia equivalente a 3.600.000 Joules, que corresponde a uma carga de 1kW ligada durante 1 hora.

#### 4.3.1 Medidor Eletromecânico de Indução

O tipo de medidor de energia mais empregado é conhecido como medidor eletromecânico de indução. Consiste em um disco de alumínio colocado dentro do campo de ação de três bobinas. Uma das bobinas é conectada de forma a produzir um fluxo magnético proporcional à tensão, e as outras produzem um fluxo proporcional à corrente. Estes fluxos são alinhados de forma que correntes circulantes (eddy current) são induzidas no disco, capazes de produzir um campo magnético em oposição àquele que o originou. A interação entre os fluxos magnéticos das bobinas e o fluxo magnético originado pelas correntes induzidas produz uma força sobre a superfície do disco que é proporcional ao produto vetorial entre os fluxos, produzindo a rotação do disco em velocidade proporcional à potência ativa do circuito. Para exercer a função de freio, um ímã permanente em forma de "C" é colocado com seus pólos próximos à periferia do disco de alumínio, de forma a produzir um torque proporcional à velocidade do disco, mas em sentido contrário à sua rotação. Deste modo, não ocorre o disparo da velocidade angular do disco, e sua rotação é bloqueada quando não há potência no circuito.

O disco de alumínio é sustentado por mancais executados com pedras de alta dureza, como safiras ou rubis, e seu peso é aliviado por mancais de repulsão compostos por pares de ímãs permanentes com faces de mesma polaridade em alinhamento, reduzindo o atrito do conjunto móvel e minimizando erros durante a medição de pequenas potências. A informação da quantidade de voltas realizada pelo disco é

transferida mecanicamente por meio de uma engrenagem sem-fim acoplada ao eixo de rotação do disco, que por sua vez aciona um sistema de contagem por engrenagens de redução e ponteiros indicadores montados sobre um mostrador graduado.

Por serem acionados por engrenagens subseqüentes, normalmente os ponteiros do indicador rodam em sentido contrário ao ponteiro de ordem inferior, exigindo a interpretação do registro conforme a seqüência de giro dos ponteiros. Atualmente, os contadores de ponteiros têm sido substituídos por contadores ciclométricos, similares a odômetros encontrados em automóveis, que facilitam consideravelmente a leitura do valor registrado.

Para medidores de circuitos bifásicos ou trifásicos, torna-se necessário o acréscimo de elementos, compostos por conjuntos de bobinas de tensão e corrente acionando o disco de alumínio, para a computação da potência total do circuito. A Figura 11 mostra alguns medidores eletromecânicos de indução em uso atualmente.



**Figura 11 - Medidores de Energia Eletromecânicos (Fonte: Landis-Gyr)**

#### **4.3.2 Princípio de operação**

A base da operação do medidor eletromecânico de energia é um conjunto que converte a potência elétrica em velocidade angular, que é integralizada por um medidor ciclométrico. A proporção entre a potência através do medidor e a velocidade angular obtida é uma constante ao longo de toda a faixa de operação do medidor; deste modo, é possível relacionar a quantidade de rotações efetuada pelo mecanismo do instrumento com um determinado consumo de energia elétrica ativa.

### 4.3.3 Composição

O medidor eletromecânico de indução é composto, na maioria das configurações existentes, pelos seguintes componentes:

- **Base:** Plataforma de montagem para todos os outros componentes do medidor. Pode permitir, conforme sua configuração, a conexão dos condutores em sua parte inferior ou em sua parte traseira, quando o medidor é instalado em uma espécie de soquete que permite sua remoção sem a desconexão dos condutores.
- **Armação:** Suporte metálico que sustenta os elementos de tensão e corrente, o disco rotativo e o registrador em suas posições de operação, e os mantém fixados à base.
- **Registrador:** Responsável pelo registro do movimento realizado pelo disco, o registrador é composto pelo conjunto de engrenagens redutoras que convertem o movimento do disco em contagem numérica, e por 4 ou 5 indicadores do tipo ponteiro ou indicador ciclométrico. Permitem o registro de 9999 ou 99999 unidades de contagem, que podem corresponder diretamente ao valor de Kilowatts-Hora, ou necessitarem a aplicação de um fator de escala, especialmente quando aplicados em sistemas de medição indireta. Os indicadores do tipo ponteiro são lidos através da interpretação da posição relativa entre os ponteiros e as escalas numéricas, e os indicadores ciclométricos apresentam o resultado numérico direto do valor registrado.
- **Elemento ou Estator:** O instrumento pode possuir 1, 2, 2½ ou 3 elementos, onde cada elemento é composto por uma bobina de tensão e uma bobina de corrente. Instrumentos com 1 elemento são empregados em medições monofásicas, e instrumentos com 2, 2½ e 3 elementos são empregados em medições polifásicas.
- **Disco:** É a parte móvel do medidor de indução. É posicionado no espaço entre a bobina de tensão e a bobina de corrente de um elemento, e é acionado pelo fluxo magnético produzido pelo elemento, proporcional à potência do circuito que está sendo medido, que provoca sua rotação.
- **Imãs de Arrasto:** Compostos normalmente por um par de imãs permanentes situados sobre as faces do disco, têm a função de produzir um torque oposto à

rotação do disco, proporcional à sua velocidade, de forma a impedir seu disparo e garantir o bloqueio de rotação em condições de potência nula.

- ***Supressores de Surtos:*** Instalados entre as conexões de entrada do instrumento e sua estrutura conectada a um condutor de aterramento, tem a função de proteger as bobinas de potencial do instrumento em caso de descargas atmosféricas.
- ***Tampa ou Vidro do Medidor:*** Envolvendo e fechando o conjunto de componentes do medidor, a tampa é executada em vidro, plástico ou metal, e tem as funções de proteger o mecanismo do instrumento e permitir a visualização de seu registrador.

O medidor eletromecânico de indução possui ainda alguns meios de se realizar a calibração dos valores medidos, se valendo de ajustes em componentes do circuito magnético. Os ajustes realizados nestes medidores para efeito de calibração são:

- ***Ajuste de Plena Carga:*** É realizado por um parafuso que realiza a derivação das linhas de fluxo magnético dos ímãs de arrasto, reduzindo sua ação sobre o disco. Deste modo, a força de arrasto do ímã é controlada, permitindo que a linearidade da medição do instrumento seja mantida em toda sua faixa operacional. Este ajuste é realizado na condição denominada Ampère-Teste (AT), que é um parâmetro nominal do instrumento.
- ***Ajuste de Atrito ou Ajuste de Carregamento Leve:*** Tem a função de corrigir o desbalanceamento de fluxo entre as faces dos pólos de um elemento, eliminando o efeito conhecido como Creeping, que é o movimento do disco ocasionado pela aplicação de tensão ao instrumento, sem que haja corrente circulante. O ajuste também tem como finalidade a calibração do instrumento para a condição operacional de 10% do AT.
- ***Ajuste de Atraso ou de Fator de Potência:*** O ajuste de Fator de Potência em medidores de indução determina o deslocamento entre os fluxos de tensão e corrente de cada elemento do instrumento, e é realizado com a corrente defasada em  $60^\circ$  atrasados em relação à tensão. Tem a função de garantir a precisão de medição mesmo em condições de baixo fator de potência das cargas.

#### 4.3.4 Precisão

Os medidores eletromecânicos de indução utilizados com a finalidade de faturamento do consumo de energia de uma instalação são normalmente da classe 2.0, ou seja, possuem erro máximo de  $\pm 2\%$  do valor indicado para sua faixa nominal de operação, dentro do tempo de vida previsto para seu funcionamento. Embora seja um valor relativamente alto, considerando as perdas que podem onerar tanto o fornecedor quanto o consumidor de energia elétrica, torna-se aceitável quando se considera o acréscimo de custos que representaria a utilização massiva de instrumentos com uma faixa de precisão mais elevada.

#### 4.3.5 Limitações

O medidor eletromecânico de indução apresenta, devido às suas características operacionais e construtivas, algumas limitações e restrições para que sua operação seja confiável. Entre estas limitações estão:

- ***Interferência na operação na presença de corrente contínua:*** Por se tratar de um instrumento concebido para a utilização com correntes alternadas, a presença de componentes de corrente contínua afeta a precisão do medidor, por produzirem deformações nos fluxos magnéticos produzidos, podendo inclusive levar à saturação os núcleos ferromagnéticos das bobinas do medidor.
- ***Precisão variável com a condição de operação:*** Os medidores eletromecânicos de indução possuem uma faixa bem definida de operação na qual apresentam a precisão nominal. Para valores muito baixos de potência a precisão diminui, pois o atrito do conjunto mecânico é alto em relação ao torque eletromagnético produzido pelo disco.
- ***Sensibilidade Mecânica:*** Os mecanismos destes instrumentos são sensíveis a vibrações e choques produzidos por elementos externos, dificultando sua aplicação em ambientes mecanicamente instáveis ou em aplicações embarcadas.

#### 4.4 Medidores Eletrônicos

Medidores eletrônicos de energia são instrumentos que empregam em sua operação circuitos eletrônicos para a medição da potência elétrica. Embora a medição seja realizada de forma eletrônica, o método para a apresentação do valor medido pode ser eletrônico, quando emprega mostradores de cristal líquido ou com diodos emissores de luz (LEDs); ou eletromecânico, quando o circuito medidor fornece a saída em forma de pulsos destinados ao acionamento de contadores eletromecânicos de pulsos ou motores de passo acoplados a contadores mecânicos.

A maioria dos medidores de energia eletrônicos incorpora outras funções além da principal, como a possibilidade de comunicação com dispositivos externos, a capacidade de armazenamento das leituras em memória interna, a medição de energia reativa e de demanda incorporadas e recursos para a aplicação de tarifas horo-sazonais. Isto leva à utilização destes medidores como elemento sensor de sistemas de gerenciamento de energia ao mesmo tempo em que operam como registradores de consumo para o faturamento pela concessionária.

Com a intensificação de uso dos medidores eletrônicos de energia, maiores serão as aplicações para as funcionalidades oferecidas por estes equipamentos em todos os segmentos de consumo, tornando-os a alternativa mais econômica em termos de equipamentos destinados ao gerenciamento de energia (Schwendtner, 1996).



Figura 12 - Medidores de Energia Eletrônicos (Fonte: Landis-Gyr)

##### 4.4.1 Princípio de operação

Os medidores eletrônicos de energia são baseados em circuitos conversores analógico-digitais e em processadores digitais de sinal capazes de realizar a

amostragem das tensões e correntes do sistema de alimentação e convertê-las em valores proporcionais à potência do sistema medido.

Circuitos eletrônicos destinados ao processamento digital de sinais possuem melhor desempenho que os circuitos analógicos nas aplicações de medição de energia, apresentando melhor estabilidade, facilidade de composição por elementos programáveis, facilidade na calibração e custo com forte tendência à redução em virtude das novas técnicas de integração disponíveis (Collins, 1999).

Medidores eletrônicos de energia operam a partir de transdutores convencionais (Resistências de Derivação, Transformadores de Corrente) ou a partir de transdutores de efeito Hall, podendo medir potência em circuitos de corrente alternada e de corrente contínua.

Pode se utilizar diversas técnicas para se obter a multiplicação dos valores de tensão e corrente para a determinação da potência do circuito, que integrada fornece a energia consumida. Entre estas técnicas estão a multiplicação digital, multiplicadores de efeito Hall e Multiplicadores por Divisão de Tempo.

#### **4.4.2 Composição**

O medidor eletrônico de energia é composto pelos transdutores, pelo circuito de medição, pelo circuito de indicação e interface e por uma fonte de alimentação. Os tipos de transdutores empregados e o sistema de indicação e interface podem variar de acordo com o fabricante e com as limitações de operação do equipamento.

O circuito de medição realiza a conversão da energia circulante em valores numéricos ou quantidade de pulsos, que é registrada para finalidade de tarifação. Os indicadores podem ser do tipo eletromecânicos, recebendo impulsos elétricos provenientes do medidor para incrementar sua contagem, ou displays numéricos, indicando os valores acumulados em seus registradores internos.

Medidores eletrônicos destinados a aplicações industriais incorporam ainda uma certa quantidade de memória interna destinada ao armazenamento dos parâmetros da instalação por um período mais extenso. Para a descarga destes dados, o medidor é dotado de uma interface óptica infravermelha que permite sua comunicação com coletores de dados externos sem a necessidade de acoplamentos elétricos. Esta mesma interface pode ser utilizada por sistemas de gerenciamento de energia acoplados à medição principal da concessionária.

Para a alimentação de seus circuitos, o medidor requer uma fonte de alimentação capaz de operar em toda a faixa de trabalho do medidor, e ainda contar com uma fonte auxiliar de backup, para manutenção dos registros em caso de falta da alimentação principal.

#### **4.4.3 Precisão**

Medidores eletrônicos de energia são construídos normalmente na classe 0,8, podendo em casos de instrumentação científica alcançar a precisões na faixa de 50ppm. A facilidade em se obter instrumentos de precisão mais elevada decorre principalmente do fato de inexistir limitações mecânicas nos elementos envolvidos no processo de medição e registro, e também à possibilidade de se empregar sensores de maior precisão e alcance dinâmico.

#### **4.4.4 Limitações**

O emprego de circuitos e dispositivos baseados em semicondutores nos remete à sensibilidade destes componentes a surtos de tensão eventualmente presentes no sistema de distribuição. Especial cuidado deve então ser tomado durante o projeto destes instrumentos para que estes eventos espúrios não comprometam o correto funcionamento dos componentes sensíveis, preservando a confiabilidade e precisão do equipamento de medida.

Outra limitação eventualmente presente neste tipo de medidor é a ausência de indicação durante a interrupção de alimentação. Salvo casos de medidores eletrônicos que acionam contadores ciclométricos mecânicos, a indicação destes aparelhos depende de fonte de alimentação obtida na própria tensão do sistema de distribuição.

### **4.5 Conexões dos medidores de energia**

A medição resume-se à quantificação do total de energia fornecida em cada fase do sistema de alimentação. Deste modo, os instrumentos devem ser conectados ao sistema de forma a serem capazes de computar a energia total envolvida. O esquema utilizado dependerá do tipo de instrumento e da configuração do sistema de distribuição (número de fases e tipo de ligação).

Conforme o nível de potência envolvido na instalação, o instrumento de medição pode ser conectado ao sistema de forma direta, quando os sinais principais de corrente e tensão percorrem o interior do instrumento, ou indireta, quando a conexão é realizada através de transdutores das grandezas envolvidas.

#### **4.5.1 Medição Direta**

Medição Direta é o método de medição onde os sinais principais do sistema percorrem os circuitos do medidor. É utilizada principalmente em circuitos de baixa potência, sendo sua limitação imposta principalmente pela corrente máxima admissível pelo medidor.

Possui como vantagens a simplicidade de aplicação, pois dispensa o emprego de transdutores, e a precisão, que é limitada apenas pelas características construtivas do medidor, não sendo influenciada por componentes externos.

As desvantagens deste tipo de medição são a limitação de corrente máxima existente em virtude da forma construtiva do instrumento, e a necessidade de se instalar o equipamento junto ao alimentador principal, reduzindo a flexibilidade de utilização do sistema de medição.

#### **4.5.2 Medição Indireta**

A medição de elevados níveis de tensão, corrente ou potência de forma direta, ou seja, através da manipulação direta da grandeza medida, encontra limitações nas características construtivas dos instrumentos de medição. Para contornar esta dificuldade, emprega-se com frequência transdutores, que são dispositivos capazes de converter um nível da grandeza a ser medida em um outro nível, capaz de ser manipulado pelo instrumento de medida, e com a introdução da menor distorção possível.

### **4.6 Transdutores**

A adequação do valor de grandeza elétrica medida à faixa de operação do instrumento de medição empregado é realizada por transdutores de grandeza. Estes dispositivos, quando utilizados em processos de medição, devem possuir precisão compatível com o tipo de medição que se deseja, apresentarem uma boa linearidade em

toda sua faixa de utilização, e uma taxa de distorção do sinal principal mantida em níveis que não interfiram significativamente no sinal lido pelo instrumento. Os transdutores mais comuns empregados em sistemas de medição de grandezas elétricas são:

1) **Resistências de Derivação (Shunt)**: As resistências de derivação são elementos resistivos de precisão, calibrados dentro de sua faixa de operação, e destinados a ampliar a indicação de instrumentos medidores de corrente elétrica (amperímetros). Pode ser empregada na medição de corrente contínua ou alternada, apresentando baixíssima taxa de distorção do sinal. Possuem a desvantagem de não introduzir a isolamento galvânica entre o instrumento indicador e a linha principal.

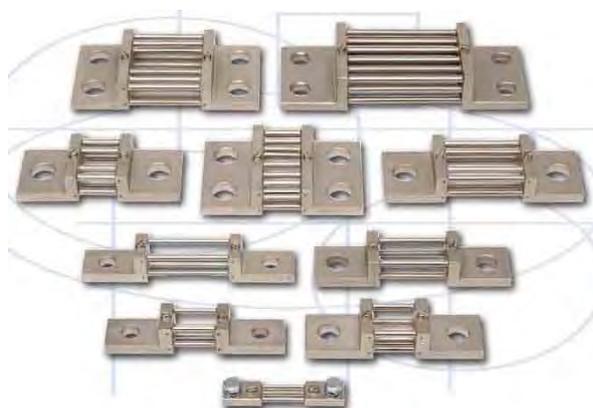


Figura 13 - Resistências de Derivação (Fonte: Curtis)

2) **Resistências Multiplicadoras**: São elementos resistivos de precisão destinados a promoverem a ampliação de escalas em voltímetros. Devem ser especificadas conforme a tensão e corrente de fundo de escala do instrumento de medida utilizado, a assim como as resistências de derivação, não isolam galvanicamente a linha do instrumento. Pode ser aplicada em medidores de corrente contínua ou alternada.

3) **Transformadores de Corrente**: Utilizados exclusivamente para medidas de corrente alternada, estes componentes operam baseados na relação de correntes em função da relação de espiras de um transformador. Sua forma construtiva permite a operação em região linear para toda a faixa de operação, mas o componente pode apresentar considerável distorção no sinal de saída caso a corrente medida apresente alguma componente contínua, por saturação do seu

núcleo. Além da susceptibilidade à saturação, o Transformador de Corrente (ou TC, como é conhecido) apresenta um pequeno deslocamento na fase do sinal de saída em relação ao sinal de entrada. A maioria dos Transformadores de Corrente proporciona isolamento galvânica entre o sinal de entrada e o sinal de saída, e as relações de transformação empregadas permitem o emprego de instrumentos de medição comuns. A Figura 14.a mostra alguns transformadores de corrente empregados em medição de energia em média tensão.

4) **Transformadores de Potencial:** São transformadores construídos de forma a adequar níveis elevados de tensão a valores seguros para a utilização em instrumentos de medição. Possuem relação de transformação conhecida e operam na região linear em toda sua faixa de aplicação. Suas características construtivas permitem o isolamento galvânico entre os enrolamentos primário e secundário, possibilitando a medição de valores elevados de tensão sem risco à segurança da medição. Operam exclusivamente em tensões alternadas, e assim como os transformadores de corrente, estão sujeitos a saturação e conseqüente distorção caso a tensão de entrada possua alguma componente contínua. Exemplos de transformadores de potencial são mostrados na Figura 14.b.



(a) Transformadores de Corrente

(b) Transformadores de Potencial

Figura 14 - Transformadores empregados em Medição de Energia (Fonte: ABB)

5) **Transdutores de Corrente de Efeito Hall:** Destinados à transdução de correntes alternadas ou contínuas, operam baseados no efeito dos campos magnéticos sobre dispositivos semicondutores de construção especial (Efeito Hall). Possuem as vantagens de permitir a isolamento galvânica entre os sinais de

entrada e saída, possuir pequenas dimensões e peso, permitem a quantificação das componentes contínua e alternada de um sinal de corrente, além de não serem prejudicados por saturação magnética. Seu emprego vem se difundindo a cada dia, com a crescente queda no valor deste tipo de componente.



**Figura 15 - Transdutores de Corrente de Efeito Hall (Fonte: LEM)**

**6) Transdutores de Tensão de Efeito Hall:** Uma aplicação de transdutores de corrente de baixo sinal permite a medição da tensão pelos mesmos princípios. Os níveis de tensão são convertidos em correntes por redes resistivas de precisão, e o resultado é um componente de elevada precisão que proporciona as mesmas vantagens de aplicação dos Transdutores de Corrente de Efeito Hall: Pequeno volume e peso, grande linearidade, imunidade à saturação, aplicação em corrente contínua ou alternada e grande faixa de alcances.

#### **4.7 Medidores de Demanda**

Medidores de Demanda empregados para finalidades de tarifação são adaptações ou complementos de medidores de consumo capazes de realizar o registro do máximo consumo da instalação dentro de intervalos definidos, e assim quantificar qual foi a solicitação do sistema de distribuição pela unidade consumidora em termos de potência.

Seu mecanismo de registro é retornado a zero a cada leitura de consumo, permitindo que um novo valor máximo seja registrado e anotado em uma próxima leitura. Caso o registro supere o valor contratado, o consumidor estará sujeito à aplicação de multas sobre o valor de demanda excedido.

#### **4.8 Medidores de Fator de Potência**

O fator de potência médio da instalação pode ser obtido através de cálculos baseados em leituras de consumo de energia ativa e energia reativa, ou de forma direta e instantânea com o emprego de instrumentos adequados semelhantes a Wattímetros, conectados à instalação através de dispositivos de condicionamento de sinais. A medição indica o quociente entre a potência ativa e potência aparente de uma instalação, sujeito a tarifação caso ultrapasse limites estabelecidos por legislação específica.

#### **4.9 Medidores de Energia para Tarifação Diferenciada**

A adoção de sistemas de tarifação horo-sazonal exige sistemas de medição capazes de diferenciar, para efeito de cálculo do importe, o consumo e a demanda da instalação no horário fora de ponta e no horário de ponta. São compostos por sistemas duplos de medição (no caso de medidores eletromecânicos), ou por medidores com registro duplo (em medidores eletrônicos), para que o consumo em cada faixa de horário seja registrado separadamente.

##### **4.9.1 Medidores Eletromecânicos para Tarifa Diferenciada**

Os medidores eletromecânicos para tarifas diferenciadas são dotados de temporizadores que realizam a troca de contadores ciclométricos sempre que o horário de transição é atingido. Deste modo, o consumo do horário de ponta é registrado no contador ciclométrico destinado ao consumo de ponta, e o consumo do horário fora de ponta é registrado em outro contador. A tarifa relativa ao consumo é computada pelo cálculo das diferenças entre leituras em ambos os contadores.

A Figura 16 mostra um exemplo deste tipo de medidor, onde o contador superior é destinado ao registro do consumo de ponta (P), e o contador inferior registra o consumo no horário fora de ponta. Notar no medidor da figura, abaixo do disco, a presença de um circuito eletrônico responsável pela comutação do contador nas transições entre horários de ponta e fora de ponta.



**Figura 16 - Medidor Eletromecânico de Consumo para Tarifa Diferenciada (Fonte: Nansen)**

Trata-se de um medidor de energia híbrido, pois agrega o princípio de operação dos medidores eletromecânicos de energia a funcionalidades obtidas com o emprego de circuitos eletrônicos associados, neste caso a capacidade de medição em dois segmentos horários distintos alternados automaticamente pelo relógio eletrônico incorporado.

O relógio do equipamento mostrado possui alimentação independente da rede, mantida por bateria de backup, sendo imune às interrupções no fornecimento. O ajuste do relógio do medidor possui dispositivo de lacre para que só seja realizado pelo representante da concessionária, evitando fraudes.

#### **4.9.2 Medidores Eletrônicos**

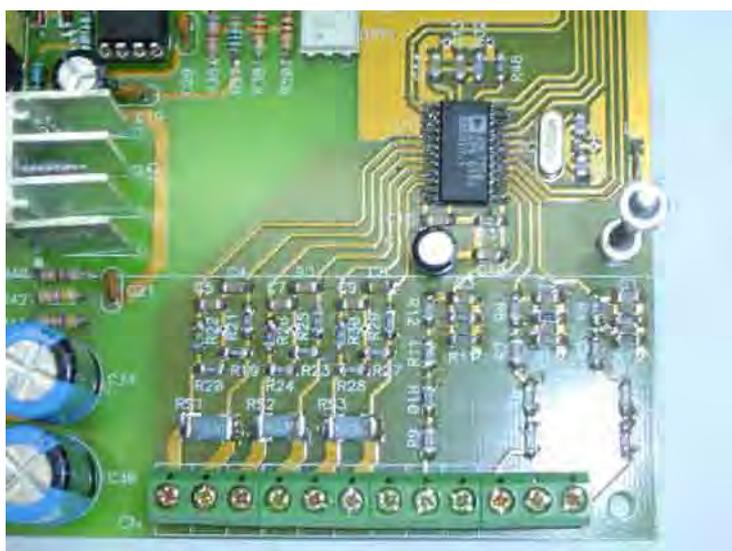
O emprego de medidores eletrônicos de energia trouxe maior flexibilidade na medição de tarifas diferenciadas, pois a alteração necessária nestes casos é realizada apenas em termos de programação do medidor. Os horários de transição são definidos durante a instalação do equipamento, e os contadores internos sofrem incrementos de acordo com o horário de operação.

Os medidores eletrônicos incorporam em seu circuito um relógio de tempo real, capaz de sinalizar as transições entre horários de ponta e fora de ponta, bem como indicar as datas onde não existe tarifação horo-sazonal (sábados, domingos e feriados nacionais) O ajuste do relógio é realizado exclusivamente por representante da concessionária, em razão de alterações decorrentes de longos períodos de inatividade, ou

por deficiências na bateria de backup. Estes medidores permitem a coleta de dados ou a comunicação com outros dispositivos através de interface óptica a infravermelho, trocando informações com coletores de dados ou equipamentos de gerenciamento de energia.

#### 4.10 Medidor de energia do protótipo

O medidor de energia utilizado no protótipo é do tipo eletrônico, com capacidade de leitura de energia em circuitos trifásicos, ligado à rede nos canais de tensão por meio de divisores resistivos. As correntes das fases são amostradas por transformadores de corrente com seus secundários conectados a resistores de precisão em configuração shunt. Compõe-se do circuito integrado ADE7758, da Analog Devices e de todos os componentes acessórios, como resistências, capacitores, cristal oscilador e fonte de alimentação. Sua aparência física é mostrada na Figura 17.



**Figura 17 - Circuito Medidor de Energia do Protótipo**

Sua estrutura permite, por meio de configurações de programa, realizar medições em sistemas monofásicos, bifásicos ou trifásicos, incorporando ainda funções de voltímetro e amperímetro RMS, medidor de frequência e sensor de temperatura do chip, detecção de afundamento, interrupção ou pico de tensão ou corrente por fase, além de permitir amostragem rápida de sinais de tensão ou corrente para análise de forma de onda.

Os sinais de medição são fornecidos por meio de uma interface de comunicação serial síncrona padrão SPI, conjuntamente às duas saídas de pulsos de energia que fornecem os valores de consumo ativo e aparente/reactivo, conforme parametrização do chip.

#### **4.11 Conclusão**

O emprego de medidores de energia eletrônicos permite agregar uma grande variedade de funções ao equipamento, tornando-o adequado ao emprego nas modernas instalações, visto que a conectividade se faz necessária quando se deseja que o gerenciamento de energia assuma um aspecto mais abrangente. O baixo custo destes componentes aliado à ausência de elementos mecânicos sujeitos a desgaste torna o medidor eletrônico de energia um substituto com larga vantagem sobre os sistemas eletromecânicos convencionais.

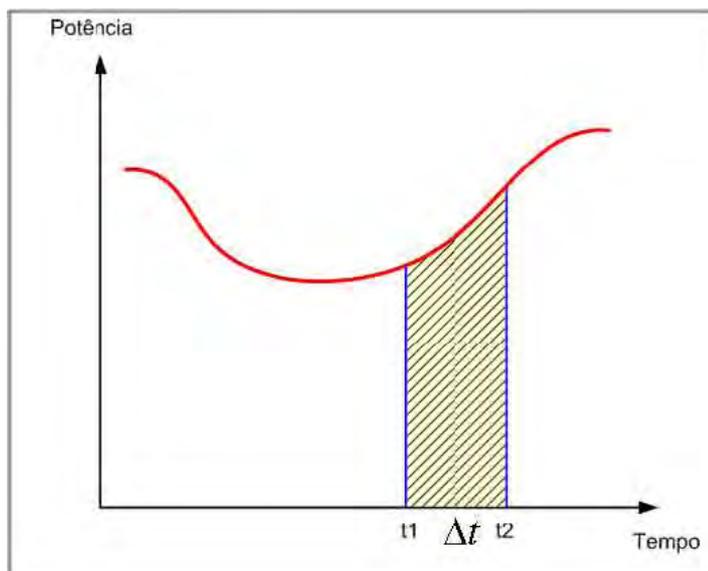
As tecnologias de integração em larga escala vêm permitindo a obtenção de componentes dotados de grande variedade de recursos, que vão além da finalidade principal do componente, a custos praticamente iguais aos dispositivos de gerações anteriores, facilitando substancialmente o trabalho do projetista de equipamentos de medição eletrônica de energia, e ao mesmo tempo conferindo a estes equipamentos um grau de confiabilidade, miniaturização e variedade de funções agregadas somente obtidos anteriormente com a integração de vários componentes e sistemas de processamento de sinais de grande complexidade.

A configuração adotada no protótipo mostra que apesar de possuir poucos componentes e dimensões reduzidas, apresenta capacidade de medir várias grandezas elétricas do sistema de forma simultânea. A conexão do medidor por meio de divisores resistivos e transformadores de corrente torna sua aplicação menos onerosa quando comparada a outros tipos de transdutores, como por exemplo os sensores de efeito Hall, sem significativa redução na precisão das leituras.

## 5 GERENCIAMENTO DE ENERGIA PELO LADO DA DEMANDA

### 5.1 Demanda de uma Instalação

Se considerarmos a potência ativa consumida por uma instalação elétrica predial de qualquer natureza (industrial, comercial, residencial, institucional), verificamos que seu valor instantâneo é bastante variável no tempo, e torna-se difícil a determinação da potência exigida por esta instalação para seu funcionamento. Para tornar mais conveniente a análise, emprega-se como base para a potência de instalação sua Demanda **D**, que é definida pelo valor médio da potência ativa **P** solicitada pela instalação, integrada em intervalos de tempo  $\Delta t$ , conforme a Figura 18. Em sistemas de distribuição considera-se o período de integração  $\Delta t$  igual a 15 minutos, fornecendo desta forma quatro valores de demanda por hora de operação.



**Figura 18 - Demanda de uma instalação**

Matematicamente, a Demanda de uma instalação é o consumo de energia integrado em um período constante conhecido como Intervalo de Integração, dividido pelo próprio período, resultando no valor da potência média solicitada pela instalação naquele intervalo de tempo, conforme mostrado na equação (4).

$$D = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} P \cdot dt \quad (4)$$

Em termos práticos, a demanda é considerada a medida de solicitação de uma instalação sobre o sistema de distribuição, e serve como parâmetro às concessionárias para o gerenciamento do sistema de distribuição e como dado estatístico para análise das necessidades de expansão do sistema.

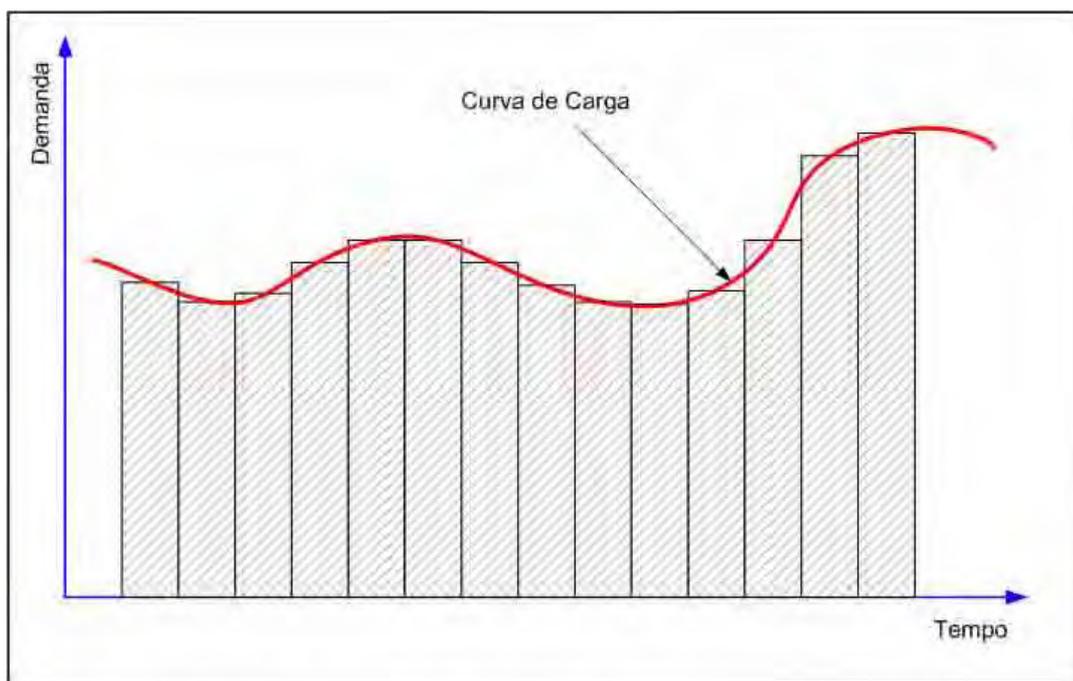
## 5.2 Curva de Carga

A curva de carga de uma instalação é o gráfico formado pelos pontos médios das Demandas da instalação em função do tempo, para um determinado período a ser analisado. Reflete em seu perfil o modo como a energia elétrica é utilizada nesta instalação, e também traz informações importantes a respeito das principais

características de carregamento do sistema, utilizadas quando se deseja realizar o gerenciamento de energia pelo lado da demanda.

Através da curva de carga podemos determinar qual é a Demanda Máxima da instalação, pela observação do máximo valor registrado para a Demanda integralizada em intervalos de 15 minutos. A Figura 19 mostra o aspecto de uma curva de carga em uma instalação com carregamento variável no tempo.

Uma instalação que opera em regime constante apresenta uma curva de carga praticamente plana, onde a Demanda Máxima pouco se destaca sobre a Demanda Média da instalação. Em instalações com regime variável de consumo, pode-se notar a alteração das demandas médias do intervalo no decorrer do período diário, caracterizando uma diferença maior entre a Demanda Média e a Demanda Máxima da unidade consumidora.



**Figura 19 - Curva de Carga de uma instalação**

### **5.3 Estrutura Tarifária**

O fornecimento de energia elétrica é regido por legislação federal que define a forma como serão repassados aos consumidores os custos relativos à geração,

transmissão e distribuição da energia, estabelecendo dois componentes básicos do importe tarifário. São estes componentes:

- A Demanda de Potência da instalação, quantificada em kW
- O Consumo de Energia, quantificado em kWh

Esta legislação também determina categorias de fornecimento conforme o tipo de estrutura tarifária aplicado e a tensão entregue à consumidora. As Unidades Consumidoras são classificadas da seguinte forma:

•**Grupo A:** Unidades consumidoras atendidas em tensão igual ou superior a 2,3kV, ou atendidas em tensão inferior a 2,3kV através de sistema subterrâneo de distribuição, e faturadas neste grupo, caracterizadas pela estruturação tarifária binômia e dividido nos seguintes subgrupos:

- 1)Subgrupo A1: Tensão de fornecimento igual ou superior a 230kV
- 2)Subgrupo A2: Tensão de fornecimento de 88kV a 138kV
- 3)Subgrupo A3: Tensão de fornecimento de 69kV
- 4)Subgrupo A3a: Tensão de fornecimento de 30kV a 44kV
- 5)Subgrupo A4: Tensão de fornecimento de 2,3kV a 25kV
- 6)Subgrupo AS: Tensão de fornecimento abaixo de 2,3kV, atendida pelo sistema subterrâneo de distribuição, e faturada nesse grupo em caráter opcional.

•**Grupo B:** Unidades consumidoras atendidas em tensão inferior a 2,3kV, ou ainda unidades atendidas em tensão superior a 2,3kV e faturadas neste grupo, caracterizadas pela estruturação tarifária monômia e dividido nos seguintes subgrupos:

- 1)Subgrupo B1-Residencial
- 2)Subgrupo B1-Residencial Baixa Renda
- 3)Subgrupo B2-Rural
- 4)Subgrupo B2-Cooperativa de Eletrificação Rural
- 5)Subgrupo B2-Serviço Público de Irrigação
- 6)Subgrupo B3-Demais Classes

## 7)Subgrupo B4-Iluminação Pública

### **5.4 Faturamento Horo-Sazonal**

Trata-se de uma modalidade de faturamento de energia que diferencia os valores de demanda contratada e de energia consumida conforme o horário de utilização e o período do ano. Nesta modalidade, o dia fica dividido em dois períodos: o Horário de Ponta, composto por 3 horas consecutivas definidas pela concessionária de acordo com as características de seu sistema elétrico e situadas no intervalo compreendido entre 17h e 22h, exceto sábados e domingos e feriados nacionais ou outros feriados definidos por Lei Federal, e o Horário Fora de Ponta, composto pelas 21 horas diárias complementares ao horário de Ponta. Sábados e domingos são considerados horários Fora de Ponta.

O ano divide-se em dois períodos: O intervalo de 5 meses consecutivos compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de dezembro de um ano a abril do ano seguinte passa a ser conhecido como Período Úmido, e o intervalo de 7 meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de maio a novembro, passa a ser denominado Período Seco, em alusão à condição pluviométrica dos meses considerados.

As unidades consumidoras alimentadas em tensão igual ou superior a 69kV, ou que apresentem contrato de demanda superior a 300kW, são obrigadas a se enquadrarem no regime de faturamento horo-sazonal, podendo escolher uma das duas modalidades oferecidas: a Tarifa Azul ou a Tarifa Verde. Os consumidores alimentados por tensão primária de distribuição que não se enquadram nos requisitos acima podem solicitar a tarifação horo-sazonal desde que pelo menos um dos valores de demanda contratada (de ponta ou fora de ponta) seja superior a 30kW.

### **5.5 Faturamento de Energia Elétrica**

A energia elétrica é faturada conforme a classe onde se enquadra a unidade consumidora e o contrato de fornecimento que eventualmente é celebrado entre a concessionária e o cliente. No caso de fornecimentos baseados em contrato, o faturamento pode ainda incluir cobranças relativas ao descumprimento de cláusulas contratuais

### 5.5.1 Tarifa Convencional - Consumidores do Grupo B

Nos consumidores enquadrados no Grupo B, apenas o consumo de energia é faturado, não existindo cobrança relativa à demanda de potência. O Faturamento de Consumo é obtido pelo produto entre o Consumo Medido e a respectiva tarifa:

$$FC=C \cdot TC \quad (5)$$

onde:

$FC$  - Valor relativo ao faturamento de consumo

$C$  - Consumo durante o ciclo medido

$TC$  - Tarifa de consumo

### 5.5.2 Tarifa Binômia Convencional

É aplicada às unidades consumidoras do Grupo A, atendidas em tensão inferior a 69 kV e com demanda menor do que 300 kW. Para este tipo de contrato de fornecimento, o valor da Demanda faturada será o maior entre os valores abaixo:

- a) Demanda contratada ou a demanda medida, exceto se a unidade consumidora for classificada como Rural ou reconhecida como sazonal;
- b) Demanda medida no ciclo de faturamento ou 10% da maior demanda medida em qualquer dos 11 ciclos completos de faturamento anteriores, no caso de unidade consumidora classificada como Rural ou reconhecida como sazonal

A Demanda Faturada é calculada pela equação (6):

$$FD = D_{fat} \cdot TD \quad (6)$$

onde:

$FD$  - Valor relativo ao faturamento de demanda

$D_{fat}$  - Demanda faturável

$TD$  - Tarifa de demanda

O Faturamento de Consumo será obtido pelo produto do Consumo Medido pela respectiva tarifa:

$$FC=C \cdot TC \quad (7)$$

onde:

*FC* - Valor relativo ao faturamento de consumo

*C* - Consumo durante o ciclo medido

*TC* - Tarifa de consumo

### 5.5.3 Tarifa Azul

A estrutura tarifária conhecida como Tarifa Azul é aplicada às unidades consumidores do Grupo A, segundo os seguintes critérios:

- Compulsoriamente às unidades consumidoras atendidas em tensão igual ou superior a 69 kV
- Compulsoriamente às unidades consumidoras atendidas em tensão inferior a 69 kV, com demanda de potência igual ou superior a 300 kW, desde que não façam opção pela tarifa verde.
- Opcionalmente às unidades consumidoras atendidas em tensão inferior a 69kV, com demanda de potência inferior a 300kW, mas com demanda contratada superior a 30kW em pelo menos um dos segmentos horários (ponta ou fora de ponta)

São valores aplicados na composição da Tarifa Azul:

1) Demanda de Potência (kW):

- a) Um preço para horário de ponta (P); e
- b) Um preço para horário fora de ponta (F).

2) Consumo de energia (kWh):

- a) Um preço para horário de ponta em período úmido (PU);
- b) Um preço para horário fora de ponta em período úmido (FU);

- c) Um preço para horário de ponta em período seco (PS); e
- d) Um preço para horário fora de ponta em período seco (FS).

Para os contratos de fornecimento baseados na Tarifa Azul, o valor empregado no faturamento da demanda atende os seguintes critérios:

- a) Demanda contratada ou a demanda medida, exceto se a unidade consumidora for classificada como Rural ou reconhecida como sazonal;
- b) Demanda medida no ciclo de faturamento ou 10% da demanda contratada, no caso de unidade consumidora classificada como Rural ou reconhecida como sazonal.

A expressão abaixo permite melhor visualização do critério de faturamento da demanda:

$$FD=(D_{fat_p} \cdot TD_p) + (D_{fat_{fp}} \cdot TD_{fp}) \quad (8)$$

onde:

$FD$  - Valor relativo ao faturamento da Demanda

$D_{fat_p}$  - Demanda faturável no horário de ponta

$TD_p$  - Tarifa de demanda de ponte

$D_{fat_{fp}}$  - Demanda faturável no horário de fora de ponta

$TD_{fp}$  - Tarifa de demanda fora de ponta

O faturamento do consumo total será obtido pela soma dos produtos dos consumos medidos em cada segmento horo-sazonal, pelas respectivas tarifas do segmento:

$$FC=(C_p \cdot TC_p) + (C_{fp} \cdot TC_{fp}) \quad (9)$$

onde:

$FC$  - Valor relativo ao faturamento do Consumo

$C_p$  - Consumo medido no horário de ponta

$TC_p$  - Tarifa de consumo de ponta

$C_{fp}$  - Consumo medido no horário de fora de ponta

$C_{fp}$  - Tarifa de consumo fora de ponta

#### 5.5.4 Tarifa Verde

A tarifa verde é oferecida em caráter opcional, aos consumidores do grupo A, atendidos em tensão inferior a 69 kV, com demanda superior a 30 kW. Os critérios para o faturamento de Demanda na estruturada tarifa verde são os mesmos aplicados à estrutura tarifária Azul:

- a) Demanda contratada ou a demanda medida, exceto se a unidade consumidora for classificada como Rural ou reconhecida como sazonal;
- b) Demanda medida no ciclo de faturamento ou 10% da demanda contratada, no caso de unidade consumidora classificada como Rural ou reconhecida como sazonal.

São valores aplicados na composição da Tarifa Verde:

1) Demanda de Potência (kW): Valor único para todos os segmentos horários

2) Consumo de energia (kWh):

- a) Um preço para horário de ponta em período úmido (PU);
- b) Um preço para horário fora de ponta em período úmido (FU);
- c) Um preço para horário de ponta em período seco (PS); e
- d) Um preço para horário fora de ponta em período seco (FS).

O faturamento relativo à Demanda na Tarifa Verde é dado pela Equação (10):

$$FD = D_{fat} \cdot TD \quad (10)$$

onde:

$FD$  - Valor relativo ao faturamento de Demanda

$D_{fat}$  - Demanda faturável

$TD$  - Tarifa de demanda

O faturamento do consumo total será obtido pela soma dos produtos dos consumos medidos em cada segmento horo-sazonal, pelas respectivas tarifas do segmento:

$$FC=(C_p \cdot TC_p)+(C_{fp} \cdot TC_{fp}) \quad (11)$$

onde:

$FC$  - Valor relativo ao faturamento do Consumo

$C_p$  - Consumo medido no horário de ponta

$TC_p$  - Tarifa de consumo de ponta

$C_{fp}$  - Consumo medido no horário de fora de ponta

$TC_{fp}$  - Tarifa de consumo fora de ponta

### 5.5.5 Contratos de Demanda

Os contratos de demanda são firmados entre as Concessionárias de Distribuição e as Unidades Consumidoras visando regulamentar o fornecimento de energia e comprometer o consumidor a seguir os limites descritos pelo contrato. Os parâmetros que têm seus limites estabelecidos em contrato variam conforme a modalidade tarifária aplicada, seguindo a seguinte tabela:

**Tabela 1 - Parâmetros de Contratos de Fornecimento de Energia**

<i>Tipo de Contrato</i>	<i>Parâmetros com Limites Definidos</i>
<b>Tarifa Convencional</b>	Demanda Máxima
<b>Tarifa Azul</b>	Demanda Máxima no Horário de Ponta Demanda Máxima no Horário Fora de Ponta
<b>Tarifa Verde</b>	Demanda Máxima

### 5.6 Ultrapassagem de Demanda

A tarifa horo-sazonal tem como princípio básico a disciplina do mercado, permitindo um uso racional do sistema de distribuição de energia. Para que esta

disciplina seja mantida, o consumidor deverá zelar para que os valores de demanda medido nos respectivos segmentos horários e sazonais sejam compatíveis com os valores estabelecidos em contrato. Na hipótese dos valores medidos excederem os valores contratados, será aplicada a tarifa de ultrapassagem sobre o excedente. Esta penalidade, todavia, não será aplicada se o excesso se encontrar dentro dos limites de tolerância estabelecidos abaixo:

- 5% para a unidade consumidora atendida em tensão de fornecimento igual ou superior a 69 kV (Tarifa Azul)
- 10% para unidade consumidora atendida extensão de fornecimento inferior a 69 kV

## 5.7 Aplicação da Demanda de Ultrapassagem

Havendo ultrapassagem de demanda medida em relação ao valor contratado e estando excedidos os limites permitidos pelo contrato, caberá aplicação da tarifa de ultrapassagem à totalidade da parcela que exceder o valor de contrato, cobrada com valor igual a três vezes a tarifa normalmente aplicada sobre o kW de Demanda para o segmento horário referente.

### 5.7.1 Demanda de Ultrapassagem - Tarifa Azul

A aplicação do faturamento de Ultrapassagem de Demanda para consumidores sob contrato de Tarifa Azul é realizada de acordo com equações a seguir, onde o valor total é referente à ultrapassagem de demanda fora de ponta e demanda na ponta:

$$FD = Fd_p + Fd_{fp} \quad (12)$$

Faturamento de Demanda relativo ao Horário de Ponta:

$$Fd_p = (DC_p \cdot TD_p) + (DM_p - DC_p) \cdot TU_p \quad (13)$$

Faturamento de Demanda relativo ao Horário Fora de Ponta:

$$Fd_{fp} = (DC_{fp} \cdot TD_{fp}) + (DM_{fp} - DC_{fp}) \cdot TU_{fp} \quad (14)$$

onde:

$Fd_p$ : Valor relativo ao faturamento da demanda na ponta

$Fd_{fp}$ : Valor relativo ao faturamento da demanda fora da ponta

$DC_p$ : Demanda contratada no horário de ponta

$DC_{fp}$ : Demanda contratada no horário fora de ponta

$TD_p$ : Tarifa de demanda de ponta

$TD_{fp}$ : Tarifa de demanda fora de ponta

$DM_p$ : Demanda medida no horário de ponta

$DM_{fp}$ : Demanda medida no horário fora de ponta

$TU_p$ : Tarifa de ultrapassagem para o segmento de ponta

$TU_{fp}$ : Tarifa de ultrapassagem para o segmento fora de ponta

### 5.7.2 Demanda de Ultrapassagem - Tarifa Verde

Para a tarifa verde a aplicação das tarifas de ultrapassagem, segue de acordo com equações abaixo:

$$FD = (DC \cdot TD) + (DM - DC) \cdot TU \quad (15)$$

onde:

$FD$ : Valor relativo ao faturamento da demanda

$DC$ : Demanda contratada

$TD$ : Tarifa de demanda

$DM$ : Demanda medida

$TU$ : Tarifa de ultrapassagem

## 5.8 Total do Importe de Fornecimento

Para qualquer tipo de estrutura tarifária aplicada, o importe total será o faturamento da demanda somado ao faturamento do consumo:

$$I=FD+FC \quad (16)$$

Onde:

*I*: Importe Tarifário

*FD*: Valor Faturado devido à Demanda

*FC*: Valor Faturado devido ao Consumo

## 5.9 Tarifa Amarela

A tarifa amarela é uma modalidade de tarifação horo-sazonal destinada à aplicação em unidades consumidoras de pequeno porte, especialmente as unidades residenciais. Tem como principal característica a diferenciação de valores na tarifa de consumo nos horários fora de ponta e nos horários de ponta, permitindo ao consumidor obter significativa redução no valor do importe tarifário através do gerenciamento horário de consumo.

Embora ainda não tenha sido efetivamente implementada por concessionárias de distribuição de energia, e não conte com regulamentação específica, vários projetos-piloto foram colocados em prática, com resultados positivos no tocante à redução do importe tarifário mediante aplicação de conceitos de gerenciamento energético por parte dos consumidores contemplados pelo projeto.

O sistema de medição empregado na tarifa amarela prevê a medição do consumo no horário fora de ponta e no horário de ponta. Em relação aos valores cobrados, o consumo no horário de ponta tem preço significativamente maior que o valor do kWh na tarifa convencional, enquanto para o horário fora de ponta este valor sofre um desconto sobre o valor da tarifa comum.

Entre os projetos-piloto implementados, podemos destacar os desenvolvidos pela COPEL- Companhia Paranaense de Energia; CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais; CELESC - Centrais Elétricas de Santa Catarina; CERJ - Companhia de Eletricidade do Rio de Janeiro, e COELCE - Companhia Energética do Ceará.

### 5.10 Gerenciamento de Energia pelo Lado da Demanda

A técnica conhecida como Gerenciamento de Energia pelo Lado da Demanda (GELD) consiste na manipulação das cargas instaladas de forma a se variar o perfil da curva de carga de uma instalação. Esta técnica visa não somente a redução do valor de importe tarifário, mas também tem por objetivo proporcionar um melhor aproveitamento do sistema elétrico existente e a redução de perdas por utilização de forma ineficiente.

A implementação de um programa de GELD inicia-se pela análise do processo industrial ou da rotina de utilização das cargas de uma instalação, verificando-se a possibilidade de deslocamento do horário de funcionamento de cargas para instantes em que a demanda total da instalação é reduzida. Este procedimento pode reduzir o valor de Demanda Máxima da unidade consumidora, modulando a curva de carga para limitar a potência máxima simultânea dos equipamentos da instalação..

Outra ação implantada no GELD é o deslocamento da maior parcela possível de cargas do horário de ponta para operação em horários fora de ponta, permitindo reduzir o valor contratado de Demanda de Ponta. De acordo com a possibilidade de deslocamento obtida, é possível ainda a opção por tarifação horo-sazonal Verde, que reduz significativamente o valor do importe tarifário em instalações que não operam no horário de ponta.

Vários arranjos de operação dos equipamentos da instalação podem ser obtidos pela alteração na ordem de acionamento ou da simultaneidade desnecessária de equipamentos. Em alguns casos, as características físicas das cargas permitem o seu desligamento por curtos períodos de tempo sem prejuízo aparente ao processo do qual fazem parte, como por exemplo cargas de elevada inércia térmica como câmaras frias, sistemas de condicionamento de ar e geladeiras.

As técnicas de GELD podem ser aplicadas a instalações de pequeno porte e residenciais com a apresentação de resultados satisfatórios, embora não existam vantagens financeiras para estes consumidores em aplicar o gerenciamento horário do consumo, visto que não existem regulamentações para aplicação de tarifas diferenciadas neste setor. Em outros casos, as técnicas de GELD não são bem aproveitadas pelos consumidores residenciais por não existir forma significativa de se alterar a curva de carga da instalação (Nazarko e Jurczuk, 2000).

Estas ações, uma vez implementadas, devem ser continuamente gerenciadas para que os limites ótimos de operação do sistema não sejam ultrapassados, acarretando em pesadas multas aplicadas por descumprimento de cláusulas contratuais. Para o monitoramento de instalações que realizam o gerenciamento de demanda, é praxe a instalação de equipamentos controladores de demanda máxima, que desabilitam cargas não-prioritárias da instalação na iminência de uma ultrapassagem do valor de Demanda contratado.

## **5.11 Medição de Demanda**

### **5.11.1 Conceito**

Temos por demanda de uma instalação a integração de potência por um período de tempo, que é um valor de consumo, dividido pelo intervalo de tempo considerado, nos apresentando então um valor de potência elétrica.

Com a medição de potência de uma forma direta, empregando Wattímetros, a integração de valores não seria possível. Emprega-se então, para efeitos de medição de demanda, instrumentos medidores de energia dotados de dispositivos indicadores cíclicos de consumo. Em intervalos regulares, este indicador retorna à posição inicial, no caso de instrumentos eletromecânicos, ou têm seu contador interno zerado em instrumentos eletrônicos, e o novo intervalo de integração tem início.

Para o registro de máxima demanda, estes instrumentos possuem meios de armazenar a máxima contagem obtida por seus medidores de demanda. Em instrumentos eletromecânicos, existem conjugados ao indicador de demanda um ponteiro ou indicador não-retornável, ou seja, quando o indicador cíclico retorna a zero, o ponteiro de demanda máxima permanece em sua última indicação. Este elemento tem a função de mostrar o máximo valor de demanda atingido pela unidade de consumo dentro do período de apuração utilizado pela concessionária, e só é retornado ao zero por intervenção externa.

Em instrumentos eletrônicos, o registro de máxima demanda é realizado através do armazenamento, em um espaço de memória não-volátil, da maior contagem obtida pelo contador de consumo do circuito medidor de demanda.

### **5.11.2 Intervalo de Integração**

O intervalo de integração é definido pela concessionária de distribuição de energia, correspondendo normalmente a um período de 15 minutos. Isto significa que em intervalos de 15 minutos o contador de tempo empregado no registro da demanda da instalação é reiniciado, e um novo intervalo de integração tem início. Para determinação da Potência demandada no período é necessário computar o quociente entre o consumo do intervalo, mensurado em Quilowatts-hora, e o próprio intervalo, neste caso correspondente a 0,25 horas.

### **5.11.3 Registro de Máxima Demanda**

Para efeito de faturamento, há a necessidade de se registrar o máximo valor de demanda exigido pela instalação no intervalo entre as leituras de consumo. Em medidores eletromecânicos, o valor da demanda máxima é indicado por um ponteiro não-retornável, carregado pelo ponteiro do indicador cíclico. Embora o ponteiro cíclico retorne a zero ao término de cada intervalo de integração, o indicador de demanda máxima permanece na posição mais avançada dentre as indicações realizadas. Nos medidores eletrônicos, o valor de demanda máxima é um registro digital do maior valor de demanda medida desde a última leitura efetuada pela concessionária, e sempre que a demanda medida ultrapassa o valor da demanda máxima, o valor deste registro é atualizado.

A demanda máxima da instalação fica registrada no equipamento de medição, e só é retornada a zero durante o processo de leitura efetuado pela concessionária de distribuição. Em medidores eletromecânicos, o retorno do registrador é feito através da movimentação de um mecanismo que permite o retorno do ponteiro indicador a zero, e em medidores eletrônicos realiza-se o apagamento do valor máximo registrado, para que novos valores possam ser escritos naquele registro.

## **5.12 Controle de Demanda**

O controle de demanda é um artifício empregado em unidades consumidoras de porte médio e grande, especialmente aquelas atendidas por contratos de faturamento horo-sazonal, que tem por objetivo limitar a demanda máxima da instalação a valores menores que a Demanda Contratada da concessionária, evitando assim a aplicação

de multas por ultrapassagem (Jorge et al, 1993). O controle de demanda deve considerar inclusive as mudanças entre horário de ponta e fora de ponta, para adequar seus parâmetros de operação.

O controle de demanda máxima, realizado principalmente em instalações de grande porte tarifadas por contratos horo-sazonais, também pode ser aplicado a pequenas instalações e consumidores domésticos. Stephens (1988) cita que o controle de demanda aplicado a equipamentos de aquecimento, ar-condicionado e filtragem de piscinas pode proporcionar a redução de até 12% no valor da demanda relativa a estes equipamentos, sem prejuízo à função que executam. Este valor pode ser ainda maior conforme o algoritmo empregado no controle de demanda máxima.

Para se realizar o controle de demanda máxima, a unidade consumidora deve proporcionar meios de se acionar cargas ou circuitos de sua instalação por meio de comandos elétricos, que serão comandados posteriormente por dispositivos controladores. A forma e a seqüência como estes circuitos serão acionados dependerá da estratégia de controle adotado pelo equipamento destinado ao gerenciamento da demanda máxima da instalação.

As cargas da instalação podem ser classificadas conforme a ordem de prioridade de sua utilização, e agrupadas da seguinte forma:

- ***Cargas Essenciais ou Prioritárias:*** São as cargas de uma instalação que não podem sofrer interrupção em sua alimentação, sob pena de prejuízo ao processo produtivo ou à segurança. Nesta categoria, podemos citar como exemplo bombas de água de caldeiras, dispositivos de segurança, elevadores, esteiras transportadoras, entre outros.
- ***Cargas de Média Prioridade:*** Nesta categoria estão situados os equipamentos que, embora estejam participando ativamente do processo produtivo, permitem curtas interrupções em seu funcionamento sem prejuízo aparente à sua função. Cargas com elevada inércia térmica ou sistemas de irrigação por gotejamento contínuo podem ser enquadrados nesta categoria de aplicação
- ***Cargas de Baixa Prioridade:*** São os elementos da instalação que permitem seu desligamento por um tempo relativamente longo sem prejuízo ao processo produtivo ou a outras atividades. Os exemplos mais comuns são os equipamentos de iluminação decorativa, sistemas de filtragem de piscinas,

condicionadores de ar de áreas de circulação e outras cargas de natureza semelhante.

O gerenciamento de demanda, ou controle de demanda máxima, passa a ser toda ação executada sobre as cargas de média e baixa prioridade, sem prejuízo à atuação das cargas prioritárias, que limita a demanda máxima da instalação ao valor ajustado no sistema de controle.

### **5.13 Equipamentos Comerciais para Gerenciamento de Energia**

No mercado existem vários equipamentos para emprego em ambientes industriais destinados ao gerenciamento de energia pelo lado da demanda. Por se tratarem de sistemas de hardware avançado, possibilitam uma integração de funções bastante diversificadas. A grande maioria dos equipamentos permite conectividade a outros equipamentos por meio de redes de dados, e em alguns modelos já pode ser encontrada a conexão direta à internet, como meio de supervisão e programação remota, assim como emissão automática de alarmes e relatórios.

Em alguns casos, o sistema de gerenciamento de energia é composto por um controlador lógico programável dotado de software adequado às tarefas de controle de demanda, consumo e fator de potência, não existindo equipamentos dedicados à função.

A medição de energia em equipamentos comerciais é realizada através de transdutores de grandezas elétricas conectados aos pontos da instalação e ligados ao equipamento de gerenciamento por redes industriais (RS485), ou através de interfaces acopladas ao medidor da concessionária de distribuição. Não são encontrados equipamentos com sistema próprio de medição incorporado à unidade principal do equipamento.

São recursos normalmente oferecidos por equipamentos comerciais:

- Gerenciamento de Demanda
- Gerenciamento de Consumo
- Controle de Fator de Potência
- Saídas e Entradas modulares (externas ao equipamento)

- Interface RS485
- Interface Ethernet, para conexão a redes corporativas ou Internet
- Armazenamento de dados em memória de massa
- Softwares para emissão de relatórios e supervisão remota
- Medição de Energia por interface com o medidor da concessionária
- Possibilidade de medição multiponto com o uso de transdutores

A Figura 20 mostra o aspecto de equipamentos destinados ao controle de demanda fornecidos por três indústrias nacionais, para aplicações de médio e grande porte, todos incorporando as características anteriormente citadas.



(a) CCK6000 -CCK



(b) HX-600 - Engecomp



(c) SmartBox - Gestal

**Figura 20 - Controladores de Demanda e Fator de Potência comerciais**

#### 5.14 Algoritmos

O modo como o controle de demanda máxima da unidade de consumo atua sobre as cargas controláveis pode variar conforme as regras estabelecidas para as ações de controle. Estas ações de controle são, em sua maioria, resultados de cálculos efetuados pela unidade de controle, baseados em dados obtidos pela medição dos parâmetros do sistema elétrico onde se encontram instalados.

De um modo geral, todos os sistemas de controle de demanda máxima devem evitar a ultrapassagem do valor de máxima demanda permitida para a instalação, considerando-se inclusive as variações deste valor eventualmente existentes por ocasião de contratos horo-sazonais, e ainda avaliar continuamente a disponibilidade do sistema para a inserção de cargas que possam ter sido anteriormente removidas da instalação.

As estratégias elaboradas para que essas ações de controle ocorram são os algoritmos de controle, e de sua forma de atuação dependem a velocidade de resposta e a confiabilidade do sistema. São apresentados a seguir os algoritmos mais empregados em sistemas de controle de demanda máxima.

#### 5.14.1 Algoritmo Reta de Carga

Este algoritmo de controle considera como parâmetros iniciais o valor máximo de demanda permitida e o tempo total do intervalo de integração. A partir destes dados, o sistema de controle traça a reta de consumo da instalação em função do tempo, e passa a monitorar o consumo da instalação.

A ação de controle só é iniciada no instante que o consumo para um determinado tempo  $t$  encontra-se acima do previsto pelo traçado da reta de carga para aquele tempo. Neste instante, cargas controláveis são removidas do sistema na tentativa de se evitar a ultrapassagem do valor de demanda máxima no final do tempo total de integração. A Figura 21 mostra o modo de atuação de um controlador baseado no algoritmo Reta de Carga.

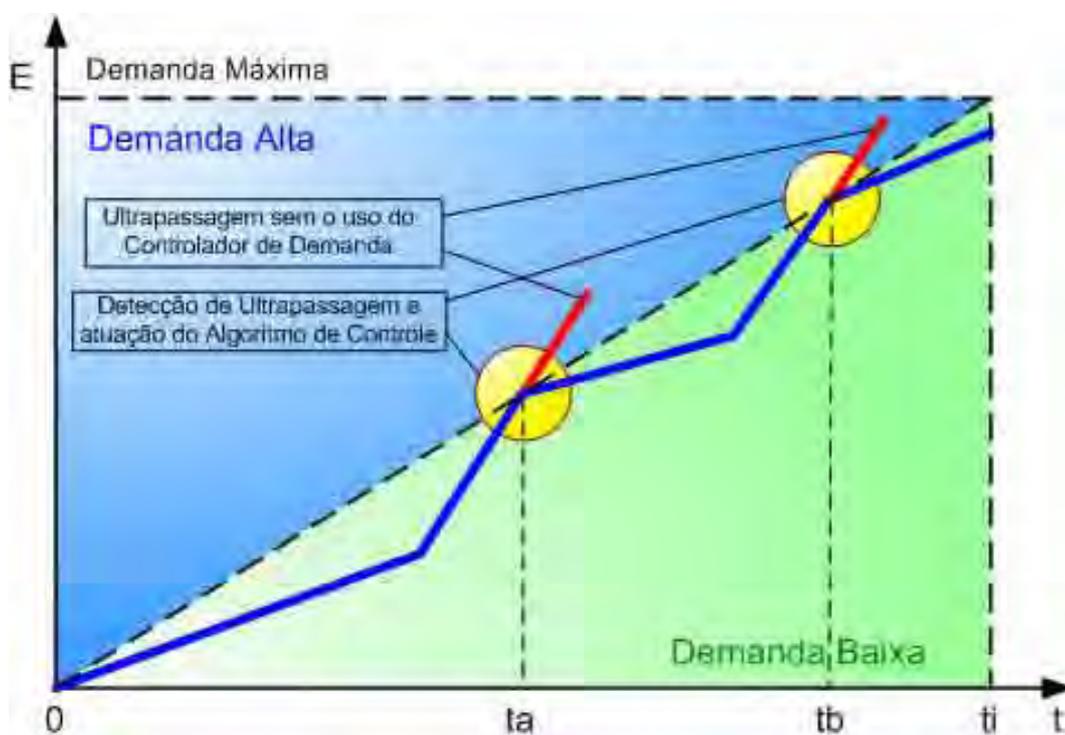


Figura 21 - Algoritmo Reta de Carga

Como a detecção da condição insegura só ocorre após sua ocorrência, este algoritmo requer uma atuação bastante rápida para compensar a baixa velocidade de detecção. Se a ação de controle for insuficiente para que o consumo de energia do período não supere o máximo permitido, ocorrerá a ultrapassagem da demanda máxima, e caso esteja previsto no contrato de fornecimento, o consumidor será penalizado pela aplicação das multas por ultrapassagem de demanda.

#### 5.14.2 Algoritmo Janela Móvel

O algoritmo Janela Móvel realiza a divisão o intervalo de integração total em sub-intervalos, e passa a computar o máximo consumo admitido para o conjunto de sub-intervalos contidos no tempo total do intervalo de integração considerado. O conjunto dos valores de consumo nos sub-intervalos compõe um vetor tipo FIFO (First in, first out – primeiro a entrar, primeiro a sair), que é atualizado em períodos correspondentes ao sub-intervalo admitido pelo controlador.

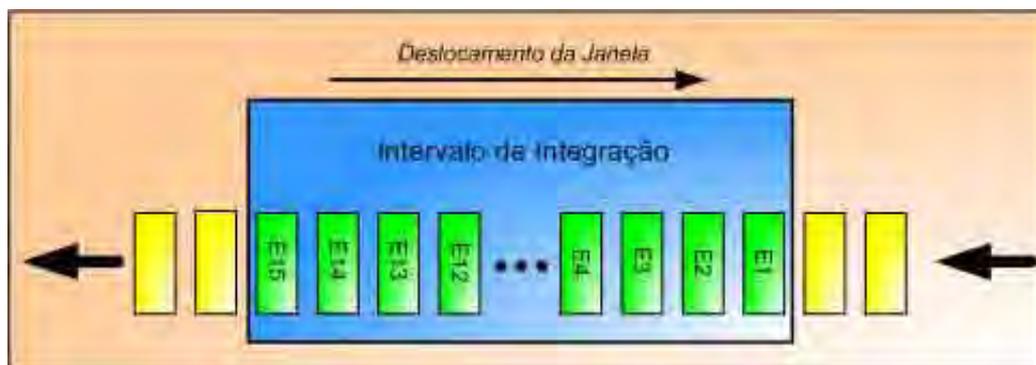


Figura 22 - Algoritmo Janela Móvel

Ao término de cada sub-intervalo, o algoritmo descarta o valor do primeiro sub-intervalo considerado, e calcula o valor permitido para o consumo no sub-intervalo que se inicia. Caso o valor de consumo permitido seja menor ou igual a zero, o algoritmo de controle prevê a remoção de cargas do sistema, na tentativa de limitar o consumo máximo permitido para o intervalo de integração total. As cargas só retornam ao sistema quando ocorre um aumento no valor do consumo permitido para o sub-intervalo.

### 5.14.3 Algoritmo Preditivo

O algoritmo preditivo realiza o controle da demanda máxima da instalação através do permanente monitoramento da derivada da curva de Energia em função do tempo, dentro do intervalo de integração proposto, que pode ser igual ou menor que o intervalo empregado para finalidades de tarifação.

Caso as retas  $f\left(\frac{dE(t)}{dt}\right)$  denunciem a ultrapassagem em algum tempo menor que o tempo de integração corrente, o algoritmo inicia a ação de controle no sentido de se reduzir a inclinação da curva de consumo.

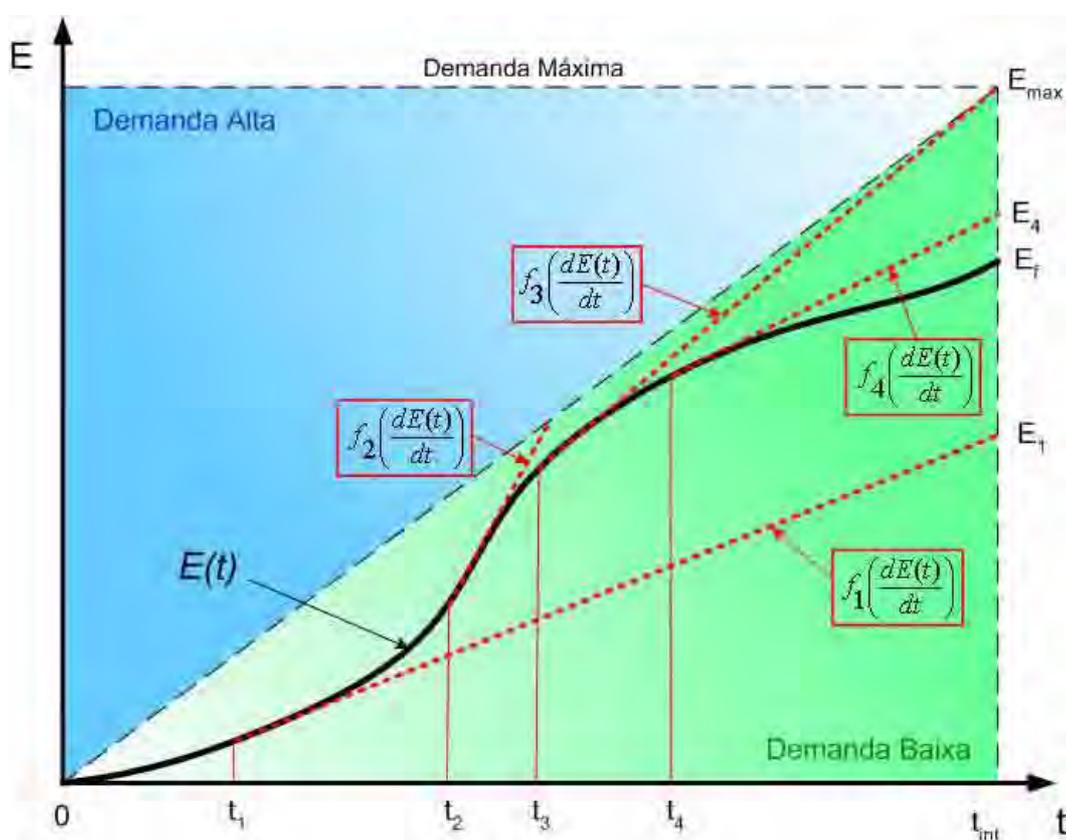


Figura 23 - Algoritmo Preditivo

A Figura 23 mostra um esboço do funcionamento do algoritmo preditivo aplicado ao controle de demanda máxima de uma instalação. Nela notamos o gráfico da função consumo (E) em função do tempo (t), em um intervalo de integração completo. No instante  $t_1$ , a Demanda Projetada possuía valor  $E_1$ , inferior à demanda máxima permitida, e portanto não ocorre nenhuma ação de controle.

No instante  $t_2$ , a Demanda Projetada é maior que a demanda máxima, e o algoritmo de controle promove a redução da potência ligada, minimizando a inclinação da reta de consumo. A redução da potência ligada prossegue até que no tempo  $t_3$  a Demanda Projetada se iguale à Demanda Máxima.

Posteriormente, ocorre a redução na potência instalada, diminuindo ainda mais a Demanda Projetada, de forma que em  $t_4$  o valor  $E_4$  é menor que a Demanda Máxima. Neste instante, o controlador inicia a inserção das cargas que foram anteriormente desligadas, e o intervalo de integração encerra-se com um valor de Energia Consumida  $E_f$ .

### 5.15 Controle de Demanda no equipamento proposto

O software implementado no controlador proposto realiza o controle de demanda utilizando uma simplificação do algoritmo preditivo adaptativo, necessária em virtude da restrição de capacidade computacional do microcontrolador empregado.

Neste algoritmo, os parâmetros do sistema correspondentes às variáveis de entrada, que neste caso específico é a energia registrada pelo medidor, são coletados em intervalos de tempo conhecidos e constantes e comparados com os dados do intervalo anterior. Da diferença apresentada entre a energia atual e a energia anterior determina-se a evolução do consumo no período, e deste modo torna-se possível a previsão de ultrapassagem da demanda máxima antes que esta realmente ocorra.

Caso exista a possibilidade de ultrapassagem, denunciada pela avaliação do coeficiente angular da reta de consumo em função do tempo, inicia-se a ação de controle, através da atuação dos relés do módulo de saída, com o objetivo de se reduzir o consumo da instalação e impedir que ocorra a ultrapassagem da máxima demanda permitida para o período.

Na Figura 24 é mostrada a atuação do algoritmo de controle implementado no equipamento proposto. No instante  $t_1$  do intervalo de integração surge a tendência à ultrapassagem de demanda máxima. Através da atuação do controlador, em  $t_2$  parte das saídas de controle são desativadas, reduzindo a potência total do circuito, e eliminando a tendência surgida em  $t_1$ . Se não houvesse ocorrido a intervenção do equipamento, em  $t_3$  teríamos a ultrapassagem da reta de carga ideal, que levaria à ultrapassagem do valor de demanda máxima antes do término do intervalo de integração.

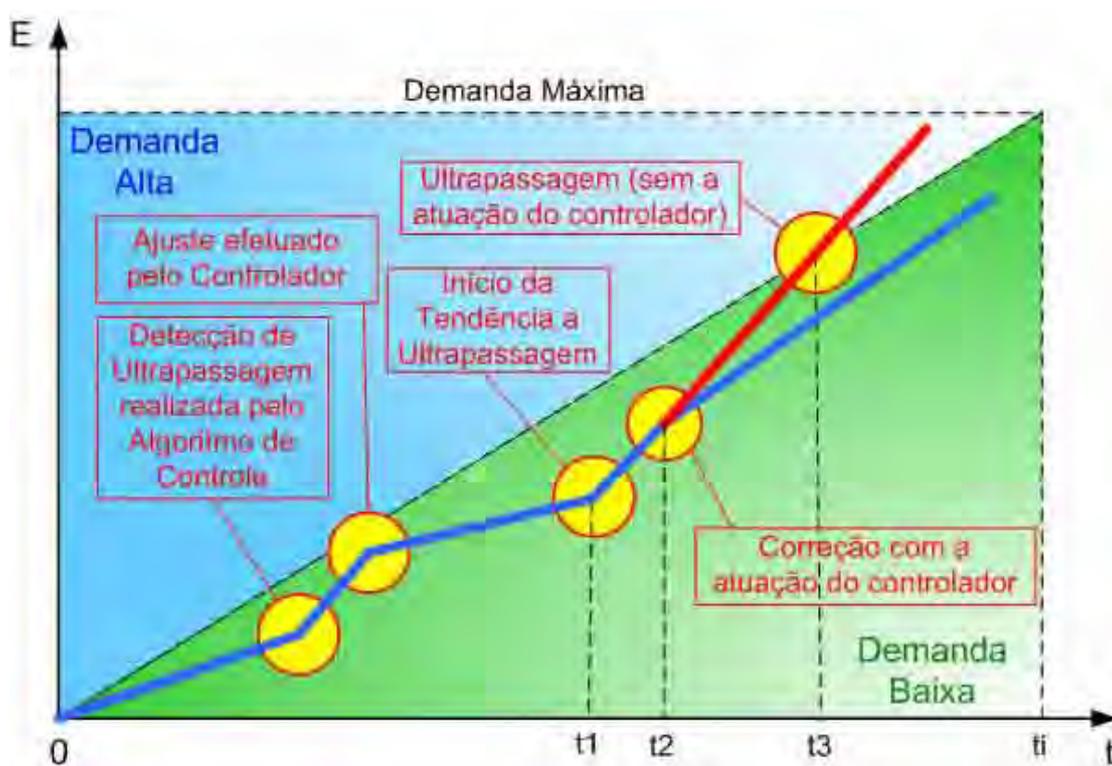


Figura 24 - Algoritmo de Controle de Demanda

Embora o algoritmo permita determinar a quantidade exata de potência a ser removida do circuito quando ocorre o início da tendência à ultrapassagem, a ação de controle manipula sequencialmente as saídas, tornando o algoritmo mais simples e menos sujeito a atuações errôneas por variações transitórias na potência da instalação.

No momento em que é prevista a ultrapassagem, o intervalo entre as leituras das variáveis de entrada é reduzido, para que a velocidade de resposta do sistema seja maior. Desaparecendo a previsão de ultrapassagem, o intervalo entre leituras volta ao seu padrão normal, e o controlador passa a monitorar a disponibilidade de energia para o intervalo de integração.

A cada iteração entre leituras, o programa atribui um novo valor para a máxima inclinação permitida para a reta  $E(t)$ , de forma que ao final do intervalo de integração o valor máximo de consumo permitido para o intervalo, ou Demanda Máxima, não seja atingido.

Havendo a disponibilidade de energia dentro do intervalo, as cargas previamente desabilitadas são novamente inseridas no circuito, desde que não produzam uma nova condição de previsão de ultrapassagem. No intervalo entre inserções de carga é

realizada uma nova avaliação da reta de consumo pelo algoritmo de controle, que definirá então a próxima ação do sistema.

O intervalo de integração de demanda do controlador é um parâmetro ajustável pelo usuário, e medido em segundos. Pelo fato de não existir sincronismo entre a temporização do controlador e a temporização de um medidor de tarifa diferenciada eventualmente instalado no consumidor, por razões de segurança e confiabilidade do sistema recomenda-se que o intervalo empregado pelo medidor seja menor que o intervalo de integração utilizado pela concessionária para fins de tarifação. Deste modo, garante-se que o consumo máximo permitido por intervalo de integração do medidor da concessionária não seja ultrapassado, já que o controlador estará operando dentro de uma janela do período total de integração.

A saída do controlador é composta por módulos compostos por 8 relés, com capacidade de expansão imediata pela simples conexão de módulos adicionais e parametrização do sistema de controle. Cada saída pode manipular, através de um contato reversor, cargas resistivas com correntes de até 5A em 250Vca, ou cargas indutivas com correntes até 2A em 250Vca.

## 5.16 Conclusões

O controle de demanda máxima pela unidade consumidora é uma estratégia de gerenciamento de energia que possibilita a otimização do sistema elétrico, tanto do cliente quanto do distribuidor de energia, e é também capaz de proporcionar a redução no importe tarifário por limitar a máxima demanda da instalação e restringir a ocorrência de ultrapassagens sobre os valores contratados.

A adoção de tarifas horo-sazonais, mesmo fora da obrigatoriedade, é o meio mais utilizado por consumidores de médio porte para a redução no valor do importe tarifário, mas só se mostra vantajoso quando os limites de fornecimento estabelecidos em contrato são integralmente respeitados. O emprego de equipamentos para gerenciamento de demanda, conjugado à reestruturação da instalação para possibilitar o comando das cargas, é um método bastante eficaz para se garantir a limitação contratual e evitar a incidência de cobranças por excessos nos valores de demanda.

As várias estratégias de controle de demanda máxima visam evitar que o consumo de energia da instalação supere o limite máximo permitido para um

determinado horário de operação, e a ação de controle adotada é o desligamento de cargas consideradas não-prioritárias, seguindo uma ordem hierárquica ou de prioridades.

Os controladores de demanda máxima empregam dados obtidos a partir de um equipamento medidor de energia para a realização dos cálculos necessários à tomada de decisão sobre a condição de suas saídas de controle, e por conseqüência sobre a potência da instalação. A utilização de medidores eletrônicos de energia simplificou o emprego de equipamentos de controle de demanda máxima, visto que tais medidores são dotados de interfaces que disponibilizam os dados relativos aos parâmetros da instalação.

O equipamento proposto utiliza como estratégia de controle uma simplificação do algoritmo preditivo, capaz de conferir uma velocidade de resposta razoável ao sistema, e ao mesmo tempo não exigir grande capacidade de processamento de dados, adequando-se à filosofia do dispositivo desenvolvido. A saída do equipamento controlador é acessível por meios de módulos de relés, destinados ao acionamento dos comandos elétricos das cargas sujeitas ao controle.

## 6 FATOR DE POTÊNCIA EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

### 6.1 Potência em Circuitos Monofásicos

A potência elétrica de um circuito é definida como sendo a taxa de variação de energia no tempo produzida por este circuito. Deste modo, a potência elétrica pode ser definida por:

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (17)$$

Levando em conta um circuito onde um elemento está submetido a uma tensão instantânea  $u$ , e é percorrido por uma corrente instantânea  $i$ . A potência desenvolvida por este elemento é dada por:

$$p = u \cdot i \quad (18)$$

Admitindo que  $u$  e  $i$  sejam senoidais, seus valores instantâneos podem ser definidos por:

$$u = \sqrt{2} \cdot U \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (19)$$

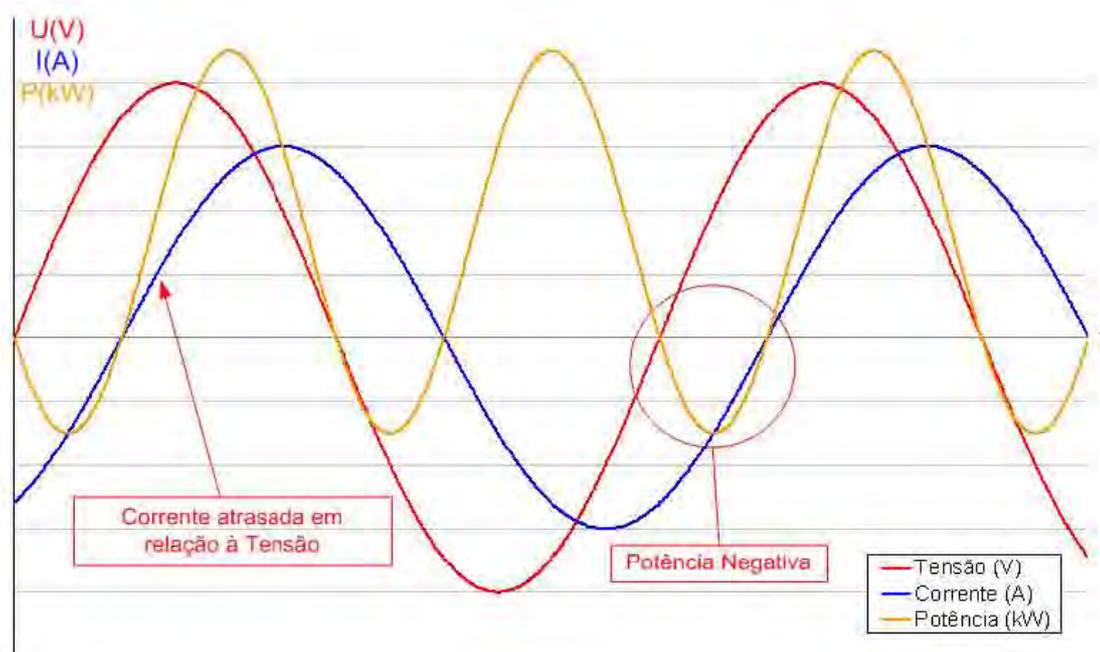
$$i = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (20)$$

Sendo  $U$  e  $I$  os valores médios quadráticos da tensão e da corrente, respectivamente. A potência instantânea será dada pelo produto entre  $u$  e  $i$ , definido por:

$$p = (\sqrt{2} \cdot U \cdot \text{sen}(\omega t)) \cdot (\sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi)) \quad (21)$$

$$p = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) + U \cdot I \cdot \text{sen}(2 \cdot \omega t + \varphi) \quad (22)$$

Pode-se observar que a potência transmitida para a carga pulsa em torno de um valor médio  $U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$ , com uma frequência igual a  $2\omega$ . Durante determinados intervalos a potência torna-se negativa, indicando que a potência flui da carga para a fonte.



**Figura 25 - Potência em circuitos monofásicos de Corrente Alternada**

Realizando algumas transformações trigonométricas, dividimos a potência instantânea  $p$  em duas parcelas:

$$p = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \cdot [1 - \cos(2 \cdot \omega t)] - U \cdot I \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(2 \cdot \omega t) \quad (23)$$

A primeira parcela da equação oscila em torno do mesmo valor médio, já assinalado, e nunca se torna negativa, enquanto a segunda parcela apresenta um valor médio nulo. Desta forma pode-se definir duas grandezas:

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (24)$$

Denominada Potência Ativa, e:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi) \quad (25)$$

Denominada Potência Reativa. Substituindo (24) e (25) em (23), temos:

$$p = P[1 - \cos(2 \cdot \omega t)] - Q \cdot \sin(2 \cdot \omega t) \quad (26)$$

A primeira parcela da equação (26) corresponde à potência fornecida à carga, e seu valor médio é a Potência Ativa, que também é valor médio de  $p$ . A segunda parcela representa a potência que transita de forma oscilante entre a carga e a fonte, o que é indesejável sob o ponto de vista de transferência de energia. Seu valor máximo é igual ao valor da potência reativa do circuito.

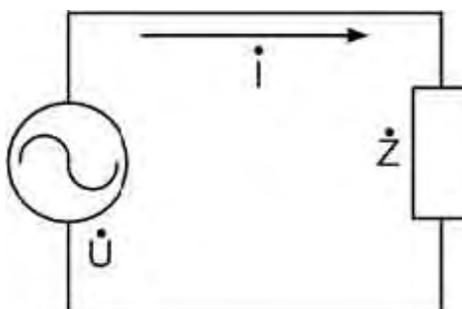


Figura 26 - Sistema elétrico representado por uma carga

Considerar o sistema elétrico da Figura 26. A carga pode ser representada por sua impedância equivalente  $\dot{Z}$ , composta por uma resistência  $R$  e por uma reatância  $X$  equivalentes.

$$\underline{Z} = R + jX = |Z| \angle \varphi \quad (27)$$

Pode-se escrever :

$$R = Z \cdot \cos \varphi \quad (28)$$

$$X = Z \cdot \sen \varphi \quad (29)$$

$$Z = \frac{U}{I} \quad (30)$$

Utilizando-se (28), (29) e (30), pode-se reescrever as equações das potências ativa e reativa, dadas por (31) e (32):

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = Z \cdot I^2 \cdot \cos \varphi = R \cdot I^2 \quad (31)$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sen \varphi = Z \cdot I^2 \cdot \sen \varphi = X \cdot I^2 \quad (32)$$

Considerando as componentes da impedância de forma separada, observamos que cargas de natureza indutiva representam Q com sinal positivo, isto é, indutores consomem potência reativa, e para cargas de natureza capacitiva temos a representação de Q com sinal negativo, indicando que capacitores geram potência reativa. Notar que a mudança no sinal de Q significa simplesmente uma defasagem de 180° na característica reativa da impedância, não tendo ligação com a característica resistiva da carga considerada.

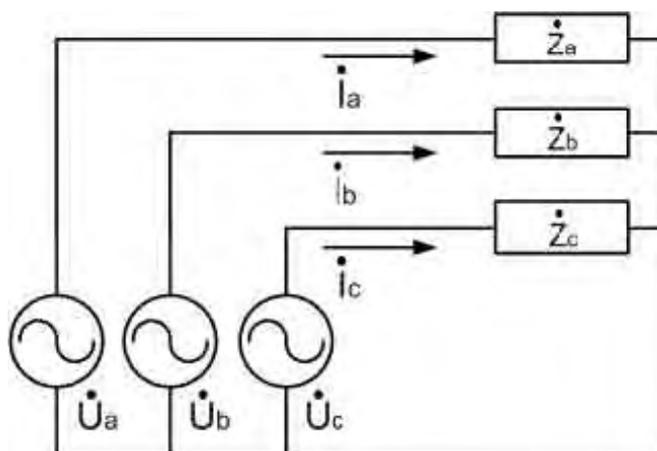
## 6.2 Potência em Circuitos Trifásicos

Seja o sistema trifásico mostrado na Figura 27. Considerando as tensões de fase com mesmo valor eficaz U :

$$u_a = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sen(\omega t) \quad (33)$$

$$u_b = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sen(\omega t - 120^\circ) \quad (34)$$

$$u_c = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sen(\omega t - 240^\circ) \quad (35)$$



**Figura 27 - Circuito trifásico**

Se a carga for equilibrada, ou seja, possuir as impedâncias de mesmo valor, as correntes de fase podem ser representadas por :

$$i_a = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (36)$$

$$i_b = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\omega t - 120^\circ - \varphi) \quad (37)$$

$$i_c = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\omega t - 240^\circ - \varphi) \quad (38)$$

Onde  $I$  é o valor eficaz da corrente de cada fase. A Potência instantânea trifásica transmitida será igual à soma das potências instantâneas de cada fase:

$$P_{trif} = u_a \cdot i_a + u_b \cdot i_b + u_c \cdot i_c \quad (39)$$

Substituindo-se os valores das tensões e das correntes das equações (33), (34), (35), (36), (37) e (38), e utilizando-se relações trigonométricas simples, obtém-se para uma carga equilibrada :

$$P_{trif} = 3 \cdot P = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (40)$$

Para sistemas equilibrados pode-se observar :

a) A soma das correntes de fase é igual a zero, não havendo portanto, necessidade de condutor de retorno; de mesmo modo a soma das tensões de fase também é igual a zero;

b) A Figura 29 e a Figura 29 mostram as relações entre as tensões e correntes eficazes de linha e de fase para cargas ligadas em estrela e em triângulo; é fácil verificar que para ambas ligações podemos escrever:

$$P_{trif} = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos(\varphi) = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos(\varphi) \quad (41)$$

c) para a potência reativa pode-se chegar a uma expressão análoga, ou seja:

$$Q_{trif} = 3U_f I_f \text{ sen } \varphi = \sqrt{3}U_L I_L \text{ sen } \varphi \quad (42)$$

Podemos destacar que em cada fase a potência reativa é monofásica, tal como descreve a Equação (42) e portanto, fisicamente não teria sentido falar em potência reativa trifásica, como também não teria significado citar uma corrente trifásica  $3I$ . No entanto, sempre que se referir a potência reativa num sistema trifásico, é comum utilizar o termo  $Q_{trif}$ .

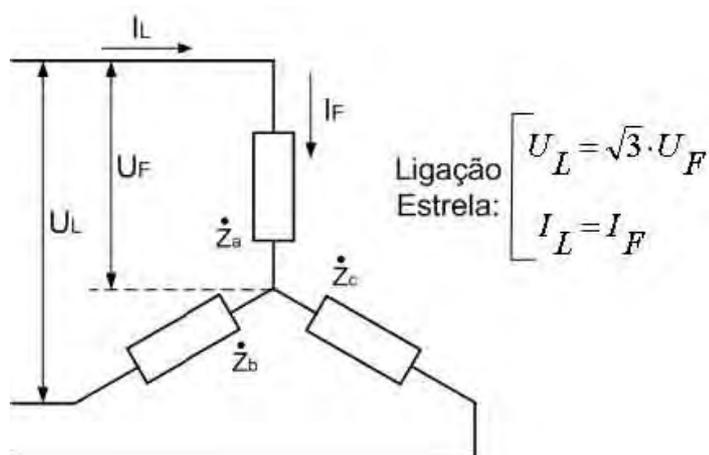


Figura 28 - Carga Equilibrada - Ligação em Y

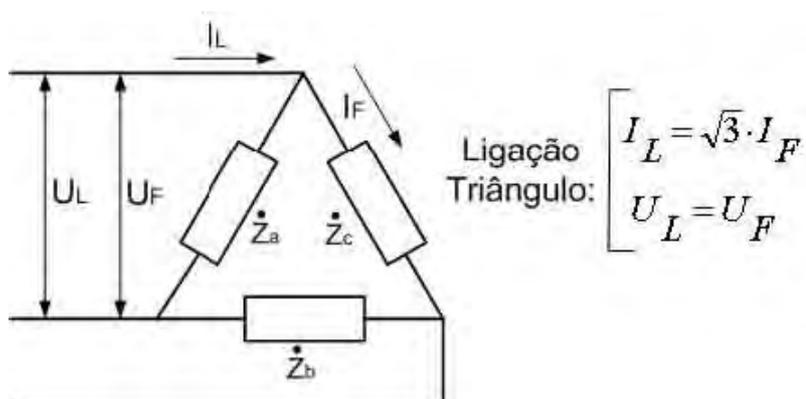


Figura 29 - Carga Equilibrada - Ligação em  $\Delta$

### 6.3 Potência Complexa

Considerando o circuito monofásico mostrado na Figura 26, temos:

$$\underline{U} = U \angle (\varphi_u) \quad (43)$$

$$\underline{I} = I \angle (\varphi_i) \quad (44)$$

Definindo o fasor conjugado da corrente por :

$$\underline{I}^* = I \angle (-\varphi_i) \quad (45)$$

e introduzir o produto :

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* \quad (46)$$

Substituindo-se (43) e (45) em (46) tem-se:

$$\underline{S} = (U \angle (\varphi_u)) \cdot (I \angle (-\varphi_i)) = (U \cdot I) \angle (\varphi_u - \varphi_i) \quad (47)$$

Sendo o ângulo de fase  $(\varphi_u - \varphi_i) = \varphi$ , então,

$$\underline{S} = (U \cdot I) \angle (\varphi) = (U \cdot I \cdot \cos(\varphi)) + j(U \cdot I \cdot \sin(\varphi)) = P + jQ \quad (48)$$

Sabe-se que :

$$U = Z \cdot I \quad (49)$$

$$I = Y \cdot U \quad (50)$$

Então,

$$S = Z \cdot I \cdot I^* = Z \cdot I^2 \quad (51)$$

$$S = U \cdot Y \cdot U = Y \cdot U^2 \quad (52)$$

O número complexo  $\dot{S}$ , do qual as potências ativa e reativa são, respectivamente, a parte real e a parte imaginária, recebe o nome de potência complexa. Seu módulo :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = U \cdot I \quad (53)$$

é designado por potência aparente, medido em Volt-Ampère (VA) e utilizado na indicação das características de equipamentos.

Para sistemas trifásicos equilibrados, pode-se definir, analogamente ao que foi feito para P e Q :

$$S_{trif} = 3 \cdot S = 3 \cdot U_f \cdot I_f = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \quad (54)$$

#### 6.4 Triângulo de Potências

As relações entre as potências ativa, reativa e aparente podem ser representadas pelo triângulo de potências, mostrado na Figura 30. Estas relações são :

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad (55)$$

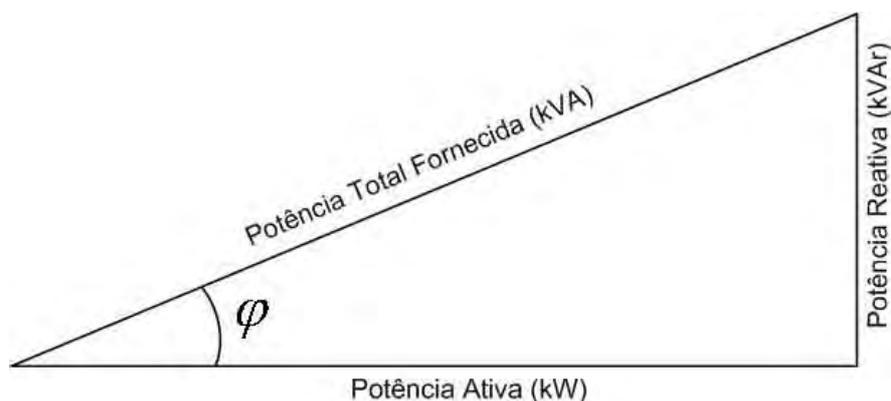
$$Q = S \cdot \sin \varphi \quad (56)$$

$$\frac{Q}{P} = \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi} \quad (57)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (58)$$

A parcela de Potência Ativa é a responsável pela produção de trabalho aproveitável, correspondendo à resposta dos componentes de caráter elétrico resistivo presentes no circuito, enquanto a parcela de Potência Reativa corresponde aos efeitos de elementos de caráter indutivo ou capacitivo presentes no circuito.

À resultante da soma vetorial destas componentes dá-se o nome de Potência Aparente, ou Potência Total fornecida, que é numericamente igual ao produto entre a tensão e corrente de um determinado circuito elétrico. Por se tratar de uma soma vetorial, o valor de potência aparente é sempre maior ou igual ao valor de potência ativa, e esta diferença aumenta com o aumento na componente reativa do triângulo de potências.



**Figura 30 - Triângulo de Potências**

$$\frac{\text{Potência Ativa (kW)}}{\text{Potência Total Fornecida (kVA)}} = \cos(\varphi) = \left( \arctg \frac{\text{Potência Reativa (kVAR)}}{\text{Potência Ativa (kW)}} \right) \quad (59)$$

## 6.5 Fator de Potência

Denomina-se Fator de Potência a proporção entre a Potência Ativa e a Potência Aparente de um circuito. Sua definição matemática está apresentada na Equação abaixo:

$$FP = \frac{1}{T} \frac{\int u(t)i(t)dt}{U_{rms} I_{rms}} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos(\varphi_n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \quad (60)$$

Este fator mostra a taxa de utilização de potência ativa, relacionada à parcela resistiva da composição da carga instalada. A parcela reativa da carga tem influência sobre o ângulo de deslocamento da corrente em relação a tensão; este deslocamento varia de 0° (carga puramente resistiva) até 90° (carga puramente reativa), e o valor do cosseno do ângulo de deslocamento ( $\cos(\varphi)$ ) é definido como sendo o **fator de deslocamento**.

$$FD = \cos(\varphi) \quad (61)$$

Analisando o fator de potência por sua definição, para o caso de tensão e corrente senoidais, com distorção harmônica nula, temos:

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (62)$$

$$S = U \cdot I \quad (63)$$

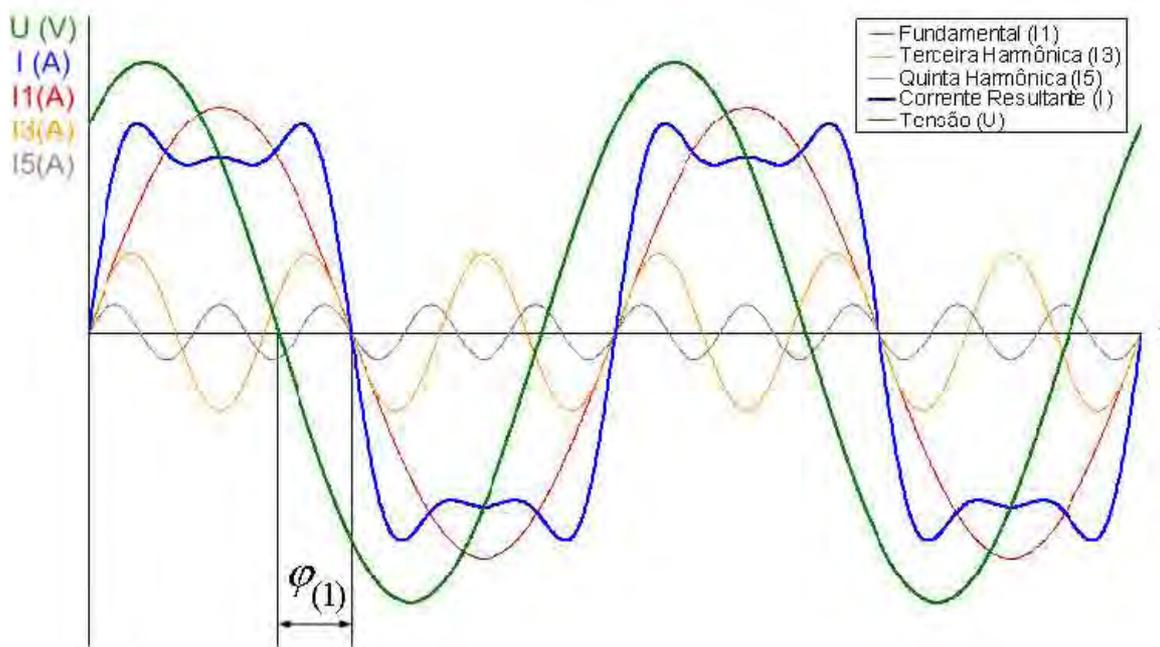
$$FP = \frac{U \cdot I \cdot \cos \varphi}{U \cdot I} = \cos \varphi \quad (64)$$

Pode-se observar que neste caso em particular o fator de potência é numericamente igual ao fator de deslocamento.

Para o caso de instalações onde a corrente tem um comportamento não senoidal, fato este cada vez mais comum devido à crescente utilização de conversores estáticos e equipamentos eletrônicos, deve-se considerar o efeito originado pela distorção da forma de onda da corrente produzida pela carga.

Analisando as formas de onda de tensão e corrente de uma carga não-linear, mostrada na Figura 31, pode-se observar que a forma de onda da Corrente

Resultante sofre uma distorção, distanciando-se significativamente de uma forma de onda puramente senoidal.



**Figura 31 - Tensão e Corrente em Carga Não-Linear**

Através da análise de Fourier, esta corrente pode ser expressa em termos de sua componente de frequência fundamental e por suas componentes harmônicas. Se a tensão ( $U$ ) é assumida como sendo puramente senoidal, somente  $I_{(1)}$  é responsável pelo fluxo de potência médio através da carga. Utilizando os valores eficazes da tensão  $U$  e da componente Fundamental da corrente, designada por  $I_{(1)}$ , podemos calcular o valor médio do fluxo de potência por :

$$P = U \cdot I_{(1)} \cdot \cos(\varphi_{(1)}) \quad (65)$$

onde  $\varphi_{(1)}$  é o ângulo de deslocamento entre  $I_{(1)}$  e  $U$ , como mostrado na Figura 31. A potência aparente  $S$  é calculada por (66):

$$S = U \cdot I \quad (66)$$

O fator de potência pode ser calculado por (67):

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{U \cdot I_{(1)} \cdot \cos(\varphi_{(1)})}{U \cdot I} = \frac{I_{(1)}}{I} \cos(\varphi_{(1)}) \quad (67)$$

O fator de deslocamento (o qual é igual ao fator de potência para circuitos com tensões e correntes senoidais) é definido por :

$$FD = \cos(\varphi_{(1)}) \quad (68)$$

Portanto, o fator de potência pode ser dado por :

$$FP = \frac{I_{(1)}}{I} \cdot FD \quad (69)$$

Pode-se observar na Equação (69) que quanto maior for a distorção da forma de onda da corrente, menor é a relação  $I_{(1)}/I$ , o que produzirá um fator de potência muito pequeno, mesmo que o fator de deslocamento FD seja unitário. A relação  $I_{(1)}/I$  é chamada de fator de distorção da corrente. O valor eficaz (I) pode ser calculado através do valor médio quadrático da forma de onda de  $i$ , para  $T = 2\pi/\omega$ ,

$$I = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (70)$$

ou através dos valores eficazes das componentes obtidos na análise de Fourier,

$$I = \left[ I_{(1)}^2 + \sum_{h=2}^{\infty} I_{(h)}^2 \right]^{1/2} \quad (71)$$

onde  $I_{(h)}$  são os valores eficazes das componentes harmônicas.

De (70) o valor eficaz da componente de distorção na corrente de linha pode ser definido por :

$$I_{dis} = [I^2 - I_{(1)}^2]^{1/2} = \left[ \sum_{h=2}^{\infty} I_{(h)}^2 \right]^{1/2} \quad (72)$$

Para quantificar a distorção na forma de onda da corrente, uma quantidade chamada distorção harmônica total THD é definida por :

$$\%THD = \frac{I_{dis}}{I_{(1)}} \times 100 \quad (73)$$

Considerando-se apenas cargas lineares, sem distorção harmônica, o fator de potência é numericamente igual ao fator de deslocamento, representado pelo cosseno do ângulo  $\varphi$  formado entre a Potência Ativa (Cateto Adjacente) e a Potência Aparente (Hipotenusa), como mostrado na Figura 30.

Como as cargas ainda podem apresentar características de defasagem entre corrente e tensão que dependem da natureza dos elementos que a compõem, torna-se necessário classificar o fator de potência conforme esta tendência de defasagem, entre 0 com corrente atrasada em relação à tensão (Fator de potência de cargas puramente indutivas) e 0 com corrente adiantada em relação à tensão (Fator de potência de cargas puramente capacitivas).

## 6.6 Características das Cargas

Conforme as características elétricas das cargas de uma instalação, teremos variações na composição do triângulo de potências. Esta variação deve-se principalmente ao comportamento da carga em relação à potência reativa e à sua linearidade.

Podemos distribuir estas cargas em três grandes grupos, com aspectos peculiares que as diferenciam. São estes grupos: as cargas resistivas, as cargas indutivas e as cargas capacitivas.

### 6.6.1 Cargas Resistivas

Cargas resistivas são cargas de natureza linear que apresentam apenas a componente real em sua impedância, e portanto a corrente que a percorre não apresenta defasagem em relação à tensão aplicada. Apresentam, portanto, fator de potência unitário, pois em razão de não apresentarem componentes reativos em sua composição, não produzem componentes de potência reativa.

Estas cargas possuem a componente de potência ativa igual à potência aparente, e conseqüentemente apresentam  $\cos(\varphi)=1$ . Desta forma, toda potência absorvida da fonte é convertida em trabalho.

Embora as cargas resistivas reais apresentem também componentes capacitivas e indutivas devida à sua própria composição física, a predominância da característica principal permite que o modelamento matemático deste tipo de componente despreze os efeitos reativos (Figura 32.a) em sua composição de potência. A Figura 33 apresenta a tensão, corrente e potência em função do tempo de um circuito de caráter puramente resistivo.

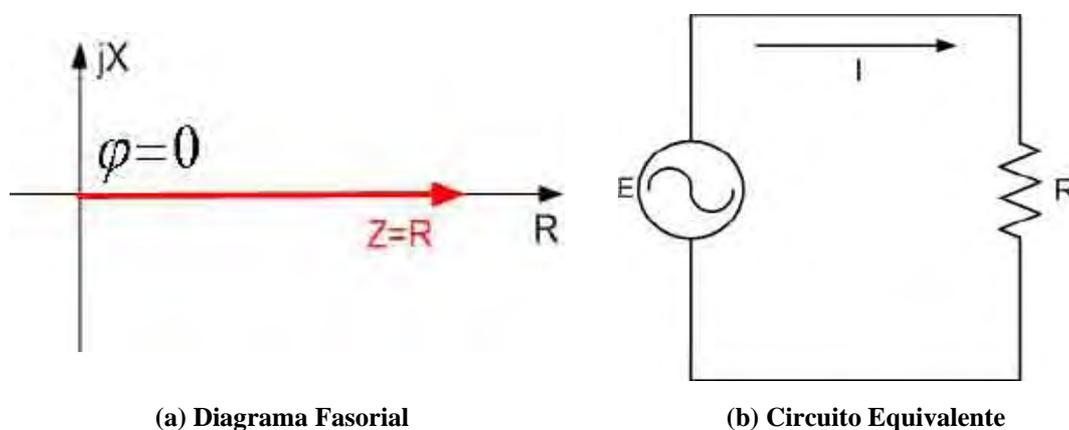
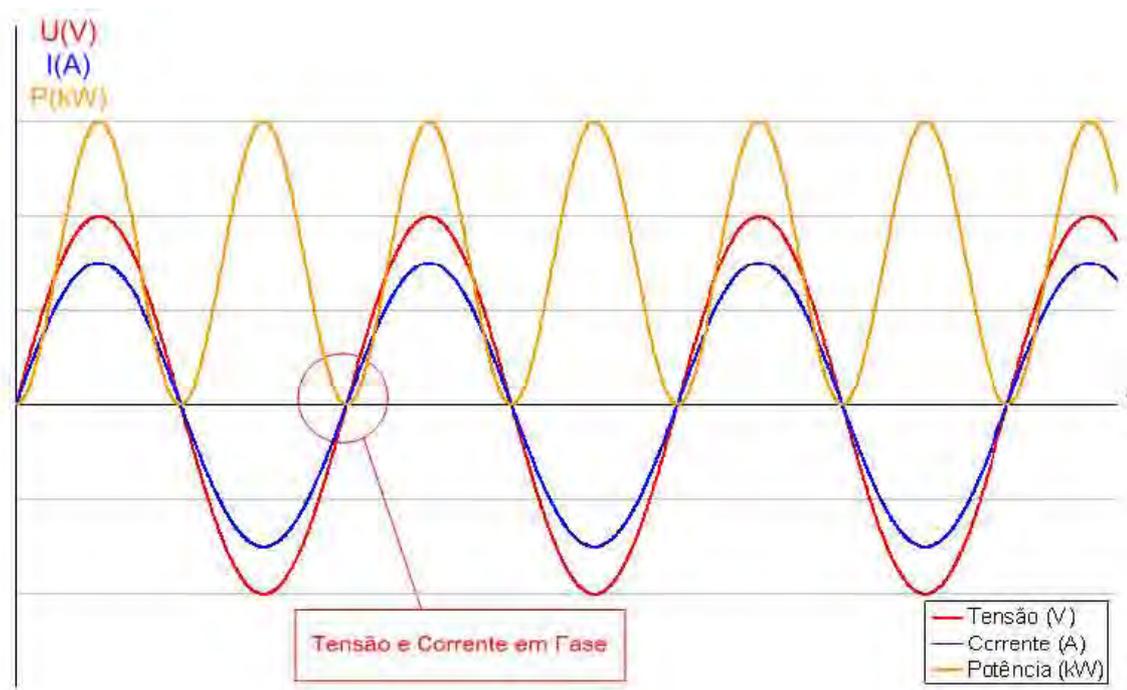


Figura 32 - Circuito com Cargas Resistivas



**Figura 33 - Tensão, corrente e Potência em Cargas Resistivas**

### 6.6.2 Cargas Indutivas

São consideradas *cargas indutivas* aquelas cargas lineares que apresentam em sua impedância componentes de natureza predominantemente indutiva, ou seja, que em sua operação normal armazenam parte da energia utilizada em seu funcionamento na forma de campos magnéticos. Estes elementos apresentam, por esta razão, uma solicitação de potência complexa do sistema onde se encontram inseridos. Parte da potência solicitada é de natureza imaginária, ou seja, encontra-se defasada em relação à potência real, e é necessária ao estabelecimento dos campos magnéticos do equipamento. Outra parte da potência solicitada é a potência de natureza real, que efetivamente é convertida em trabalho.

Cargas puramente indutivas são elementos de descrição matemática onde a corrente apresenta-se atrasada em  $90^\circ$  em relação à tensão aplicada quando é alimentado com uma forma de onda puramente senoidal. Em elementos reais, a característica indutiva sempre aparece acompanhada pela característica resistiva, originada pela resistência do condutor, como mostra a Figura 34.a.

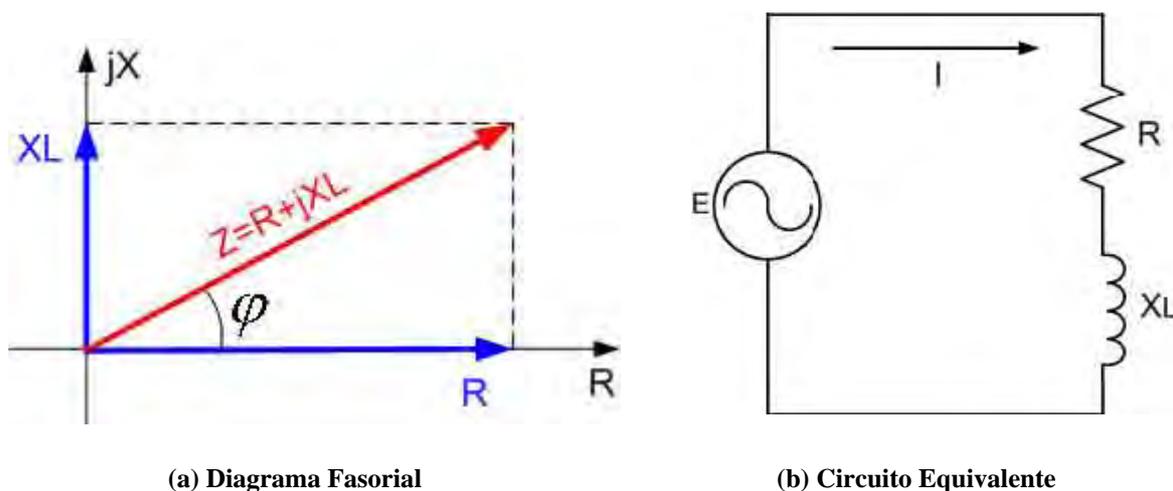


Figura 34 - Circuito com Cargas Indutivas

A componente de potência imaginária, denominada potência reativa, apresenta-se como componente imaginária positiva na composição vetorial da potência solicitada pelo componente, visto que no trato matemático o sinal de corrente apresenta-se atrasado em relação à tensão de alimentação. A Figura 35 mostra o comportamento da Tensão, Corrente e Potência em circuitos com cargas predominantemente indutivas.

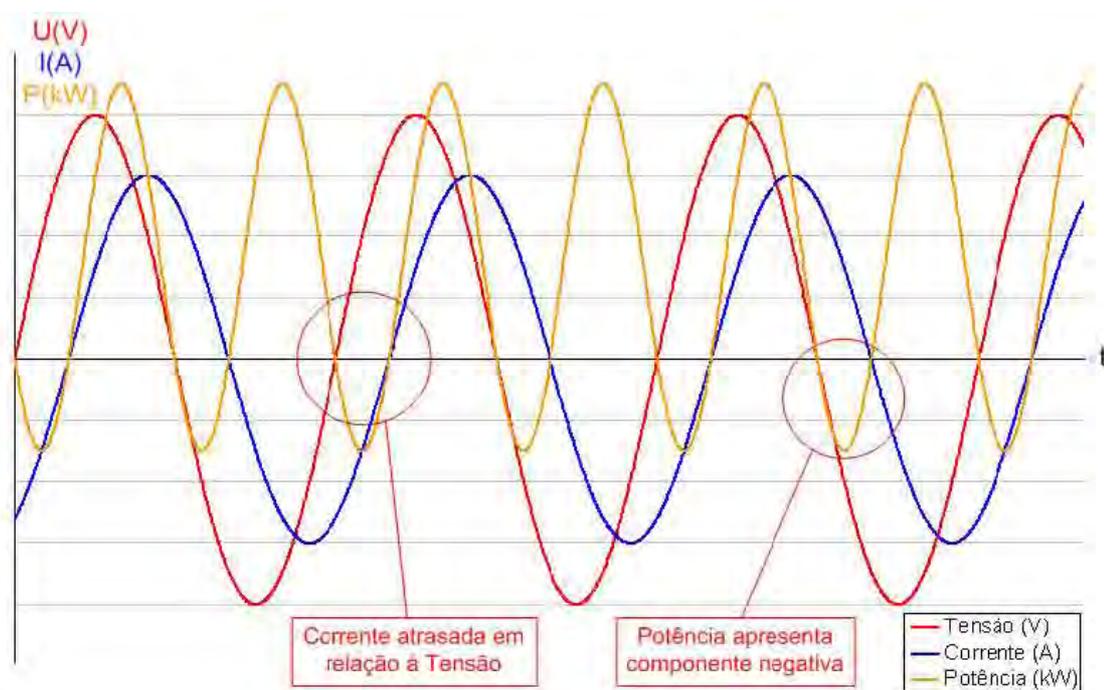


Figura 35 - Tensão, Corrente e Potência em Cargas Indutivas

### 6.6.3 Cargas Capacitivas

São chamadas *Capacitivas* aquelas cargas de natureza linear que possuem em sua composição elementos que armazenam parte da energia necessária ao seu funcionamento em forma de campo elétrico. A solicitação de potência nestes dispositivos apresenta natureza complexa, onde a parte imaginária representa a parcela necessária ao estabelecimento dos campos elétricos em seus componentes internos, e a parte real representa a parcela da solicitação realmente convertida em trabalho.

Embora possam ser matematicamente descritos, componentes e equipamentos nunca apresentam características puramente capacitivas, pois a simples composição física dos componentes introduz elementos resistivos e indutivos ao seu circuito equivalente. Desta forma, embora o componente possua elementos de natureza resistiva, indutiva e capacitiva, ele é tratado a partir de sua característica predominante como um elemento capacitivo, como mostrado na Figura 36.a.

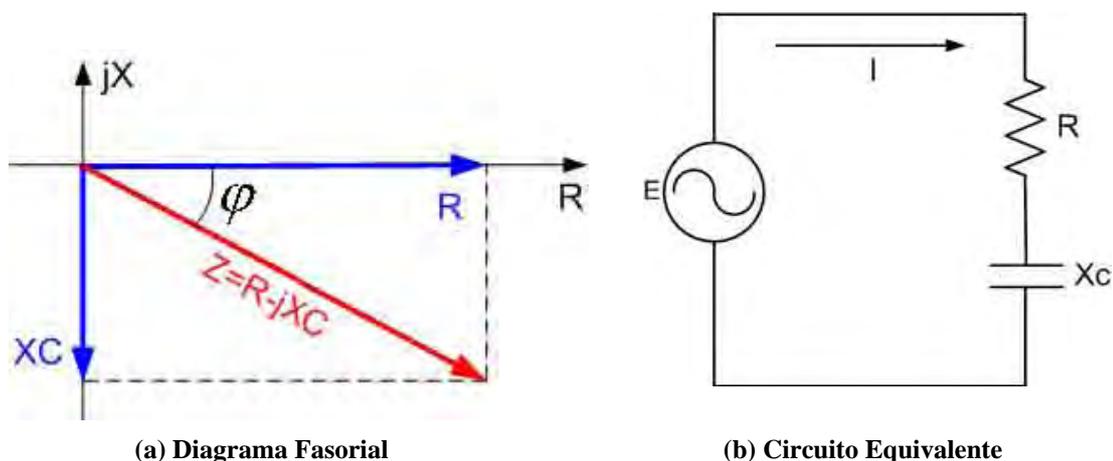
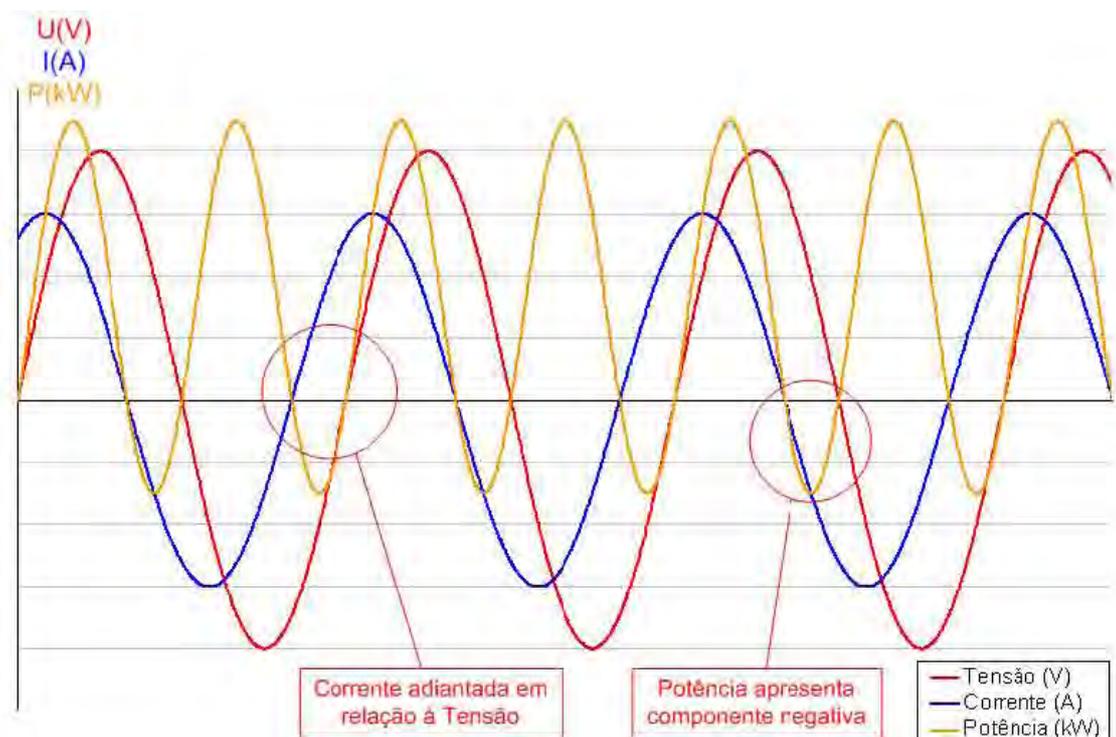


Figura 36 - Circuito com Cargas Capacitivas

Em componentes de natureza capacitiva, a potência reativa possui sinal negativo na composição vetorial da potência do componente, em virtude da corrente apresentar-se adiantada em relação à tensão de alimentação. A Figura 37 mostra as curvas de  $U(t)$ ,  $I(t)$  e  $P(t)$  de um circuito composto por cargas de caráter predominante capacitivo.



**Figura 37 - Tensão, Corrente e Potência em Cargas Capacitivas**

#### 6.6.4 Cargas Compostas

A grande maioria das cargas de uma instalação apresenta a combinação de características resistivas, indutivas e capacitivas. Nestes casos, dizemos que as cargas apresentam comportamento composto.

Em uma carga composta, o comportamento da potência é um reflexo de sua impedância. Sendo assim, cada elemento de composição da impedância é responsável pelas parcelas de potência ativa, reativa indutiva e reativa capacitiva que somadas vetorialmente resultam na potência do equipamento. Assim, um circuito será considerado indutivo sempre que a componente indutiva for maior que a componente capacitiva, do mesmo modo que apresentará caráter capacitivo sempre que a parcela de reatância capacitiva for maior que a reatância indutiva total do circuito.

A partir deste raciocínio, conclui-se que um circuito onde a componente reativa capacitiva é igual à componente reativa indutiva apresenta reatância nula, e portanto comporta-se como um circuito puramente resistivo.

## **6.7 Fator de Potência e o dimensionamento dos alimentadores**

Uma vez que o fator de potência produz influência direta no valor da corrente dos circuitos, torna-se óbvio que seu valor também reflita na determinação da seção transversal dos condutores utilizados nas instalações. Quanto menor for o fator de potência do circuito maior será sua corrente de projeto, e portanto maior será a exigência no condutor.

Para circuitos de características reativas diversas e mesma potência, o que apresenta menor corrente de trabalho é aquele que possui maior fator de potência, sendo os circuitos puramente resistivos os que operam com a menor corrente de trabalho.

### **6.7.1 Efeitos do Baixo Fator de Potência Indutivo**

#### **6.7.1.1 Efeitos na Instalação**

O baixo fator de potência indutivo produz o aumento na corrente de alimentação do sistema, elevando as perdas por efeito Joule e prejudicando a operação dos equipamentos instalados, por efeito da diminuição da tensão de alimentação. A elevação de corrente solicita o emprego de dispositivos de manobra e proteção superdimensionados, capazes de operar com os níveis de potência aparente exigidos.

#### **6.7.1.2 Efeitos no Sistema de Distribuição**

O sistema de distribuição tem uma parcela de sua capacidade disponível utilizada apenas para o fornecimento de energia reativa, exigindo que se instale uma potência maior capaz de suprir os requisitos da instalação. Estes efeitos se estendem até a geração, limitando a capacidade da planta de geração e exigindo investimentos na ampliação do sistema para o atendimento da demanda de consumo.

### **6.7.2 Efeitos do Baixo Fator de Potência Capacitivo**

#### **6.7.2.1 Efeitos na Instalação**

A elevada potência reativa liberada por capacitores pode introduzir problemas em instalações que agregam motores e máquinas de caráter indutivo, produzindo distúrbios que vão desde sobretensões a interferências ressonantes com

circuitos indutivos (Toader et al, 2001). Em casos mais severos, os distúrbios podem levar os equipamentos envolvidos à destruição por danos aos componentes isolantes.

### **6.7.2.2 Efeitos no Sistema de Distribuição**

De um modo geral, o excesso de reativos capacitivos provoca sobretensões nos sistema de distribuição, em proporções capazes de afetar a segurança e a confiabilidade do sistema interligado.

## **6.8 Faturamento**

O baixo fator de potência de uma instalação, além de produzir um carregamento adicional desnecessário e prejudicial ao sistema de distribuição, não altera o consumo de energia ativa, e portanto não é tarifado diretamente, gerando prejuízo às distribuidoras. Deste modo, para evitar desperdícios e melhorar a qualidade do sistema elétrico, o fator de potência que se apresentar abaixo de um valor definido por lei acarretará a cobrança de multa, sob a forma de faturamento de energia reativa excedente e de demanda reativa excedente.

### **6.8.1 Legislação**

O Artigo 64 da Resolução nº 456 da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, de 29 de Novembro de 2000, define que o fator de potência de referência para uma instalação terá valor mínimo igual a 0,92, tanto no quadrante indutivo quanto no quadrante capacitivo. Valores de fator de potência abaixo destes produzirão a cobrança de encargos relativos à energia reativa excedente solicitada do sistema de distribuição.

### **6.8.2 Reativo Excedente**

Para fatores de potência abaixo de 0,92, considera-se como reativo excedente a parcela de energia reativa acima da quantidade prevista para a instalação com fator de potência de referência, igual a 0,92.

### 6.8.3 Tarifação de Demanda e Consumo Reativos Excedentes

Conforme o Artigo 65 da Resolução nº 456 da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, de 29 de Novembro de 2000, fica definido que o fator de potência e a demanda de uma instalação que apresente de forma comprovada por meio de medição seu fator de potência abaixo de 0,92, referência estabelecida pelo Artigo 64 da mesma resolução, estará sujeita a tarifação dos valores excedentes definidos pelas seguintes fórmulas:

$$FER(p) = \sum_{t=1}^n \left[ CA_t \times \left( \frac{fr}{f_t} - 1 \right) \right] \times TCA(p) \quad (74)$$

Onde:

- $FER(p)$  = valor do faturamento, por posto horário “ $p$ ”, correspondente ao consumo de energia reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência “ $fr$ ”, no período de faturamento
- $CA_t$  = consumo de energia ativa medida em cada intervalo de 1 (uma) hora “ $t$ ”, durante período de faturamento;
- $fr$  = fator de potência de referência igual a 0,92;
- $f_t$  = fator de potência da unidade consumidora, calculado em cada intervalo “ $t$ ” de 1 (uma) hora, durante o período de faturamento
- $TCA(p)$  = tarifa de energia ativa, aplicável ao fornecimento em cada posto horário “ $p$ ”;
- $t$  = indica intervalo de 1 (uma) hora, no período de faturamento;
- $p$  = indica posto horário, ponta ou fora de ponta, para as tarifas horo-sazonais ou período de faturamento para a tarifa convencional; e
- $n$  = número de intervalos de integralização “ $t$ ”, por posto horário “ $p$ ”, no período de faturamento.

A demanda de energia reativa excedente, calculada com base na potência reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência, é calculada pela seguinte fórmula:

$$FDR(p) = \left[ \underset{t=1}{\overset{n}{MAX}} \left( DA_t \times \frac{fr}{f_t} \right) - DF(p) \right] \times TDA(p) \quad (75)$$

Onde:

- $FDR(p)$  = valor do faturamento, por posto horário “ $p$ ”, correspondente à demanda de potência reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência “ $fr$ ” no período de faturamento;
- $DA_t$  = demanda medida no intervalo de integralização de 1 (uma) hora “ $t$ ”, durante o período de faturamento;
- $DF(p)$  = demanda faturável em cada posto horário “ $p$ ” no período de faturamento;
- $TDA(p)$  = tarifa de demanda de potência ativa aplicável ao fornecimento em cada posto horário “ $p$ ”;
- $MAX$  = função que identifica o valor máximo da fórmula, dentro dos parênteses correspondentes, em cada posto horário “ $p$ ”;
- $t$  = indica intervalo de 1 (uma) hora, no período de faturamento;
- $p$  = indica posto horário, ponta ou fora de ponta, para as tarifas horo-sazonais ou período de faturamento para a tarifa convencional; e
- $n$  = número de intervalos de integralização “ $t$ ”, por posto horário “ $p$ ”, no período de faturamento.

## 6.9 Medição do Fator de Potência

A medição de fator de potência de uma instalação é realizada sempre que se deseja quantificar a relação entre a potência ativa dos equipamentos instalados e a potência aparente solicitada do sistema de distribuição pela instalação em questão.

Em sistemas industriais e instalações dotadas de grande quantidade de componentes com características reativas, é interesse das concessionárias de distribuição a medição do fator de potência das unidades consumidoras, já que pela legislação os consumidores são obrigados a manterem o fator de potência global da instalação superior a 0,92, capacitivo ou indutivo, sob pena de aplicação de multa sobre o valor de consumo e demanda reativos excedentes.

A medição do fator de potência pode ser realizada de forma direta, onde se obtém a leitura do valor de fator de potência do circuito, de forma instantânea, ou de forma indireta, quando se calcula o fator de potência baseado em leituras de outros instrumentos, como Medidores de Energia, Wattímetros, Voltímetros e Amperímetros

### 6.9.1 Sistemas de Medição Empregados

Para a medição do fator de potência de uma determinada carga ou instalação emprega-se os seguintes métodos:

- 7) Medição direta através de instrumento apropriado
- 8) Cálculo através da medição de potência aparente e potência ativa
- 9) Cálculo através de medição de energia ativa e energia reativa

Cabe salientar que o Fator de Potência é uma grandeza medida por fase, e que para a determinação do fator de potência global de um sistema trifásico realiza-se a média geométrica dos valores de fator de potência por fase.

### 6.9.2 Medidor de $\cos \varphi$

O medidor de fator de potência, também designado por medidor de  $\cos(\varphi)$ , é um instrumento de medição analógico ou digital, que se utiliza do valor da corrente e tensão por fase de uma instalação para sua indicação. Sua conexão assemelha-se à do wattímetro, empregando em alguns casos elementos para adequação de nível dos sinais, como Transformadores de Potencial e Transformadores de Corrente. Só permite a medição do valor por fase, e indicam o valor numérico de  $\cos(\varphi)$  e a característica indutiva ou capacitiva presente. A Figura 38 mostra um medidor de  $\cos(\varphi)$  analógico para utilização em painéis.



Figura 38 - Medidor de Cos  $\varphi$

### 6.9.3 Medição Indireta com Wattímetro, Voltímetro e Amperímetro

Um dos métodos de medição indireta de fator de potência consiste na medição simultânea do valor de Potência Ativa do circuito, de sua Tensão de Alimentação e da Corrente de Alimentação. Com estas grandezas, obtém-se o valor do Fator de Potência através da seguinte equação:

$$FP = \frac{P_i}{U_i I_i} \quad (76)$$

Onde  $P_i$  é o Valor em Watts da Potência Ativa,  $U_i$  é a tensão de alimentação do equipamento e  $I_i$  é a corrente de alimentação do circuito.

### 6.9.4 Medição Indireta com o uso de Instrumentos Medidores de Energia

Outro método empregado para se determinar o fator de potência de uma instalação consiste em coletar em intervalos regulares o valor do consumo de energia ativa e energia reativa, e através da Equação (77) determinar o valor de  $\cos(\varphi)$  do intervalo  $\Delta t$  medido.

$$\cos(\varphi) = \frac{E_{ativa}(\Delta t)}{\sqrt{[E_{ativa}(\Delta t)]^2 + [E_{reativa}(\Delta t)]^2}} \quad (77)$$

### 6.9.5 Medição do Fator de Potência pela Concessionária de Distribuição

Para a tarifação do reativo excedente, o dia é dividido em dois períodos: o período de medição de energia reativa capacitiva, compreendido por 6 horas consecutivas a serem informadas à concessionária, situadas entre as 23:30h e as 6:30h do dia seguinte, e o período de medição de energia reativa indutiva, nas 18 horas complementares.

O fator de potência é medido através do cálculo baseado na energia ativa e reativa consumida a cada período de 1 hora, e o medidor armazena o menor valor registrado em cada período (indutivo e capacitivo), para efeitos de tarifação por reativo excedente.

## **6.10 Correção do Fator de Potência**

Entende-se por correção de fator de potência o emprego de métodos e equipamentos sobre uma instalação de forma a tornar menor possível a solicitação de energia reativa da rede de alimentação do sistema, com o objetivo principal de aumentar a disponibilidade de potência na fonte.

### **6.10.1 Dispositivos empregados**

A correção de fator de potência de cargas lineares é realizada através da inserção de elementos reativos de caráter oposto ao elemento gerador de potência reativa presente no circuito. Ou seja, para cargas cujo fator de potência natural seja de natureza indutiva, a correção é feita por meio de acréscimo de elementos de natureza capacitiva, e vice-versa.

Como em instalações de grande porte ocorre o predomínio de cargas de caráter indutivo, o procedimento de correção leva à inserção de cargas de caráter capacitivo na instalação, reduzindo a solicitação de energia reativa da fonte.

### **6.10.2 Métodos de Correção**

Conforme o local e a forma de instalação dos dispositivos de correção, temos a classificação do sistema adotado. Cada sistema elétrico possui características que tornam um ou outro método mais adequado, pois todos os métodos possuem vantagens e desvantagens a serem consideradas.

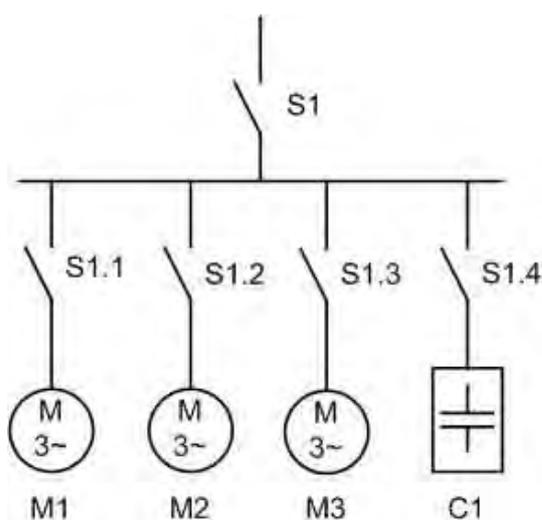
### **6.10.3 Correção Centralizada em Baixa Tensão**

A correção de fator de potência, seja de forma fixa ou variável, pode ser realizada de forma centralizada, quando se conecta todos os componentes destinados à correção em um único ponto da instalação, como mostrado na Figura 39. Embora aparente ser uma forma bastante prática e econômica, não é o método que apresenta maiores benefícios à instalação. Apresenta como principais vantagens:

- Os capacitores instalados são mais utilizados
- Permite a fácil implementação de controle automático

- Proporciona a melhoria geral do nível de tensão, na saída do transformador
- A instalação suplementar de equipamentos é relativamente simples

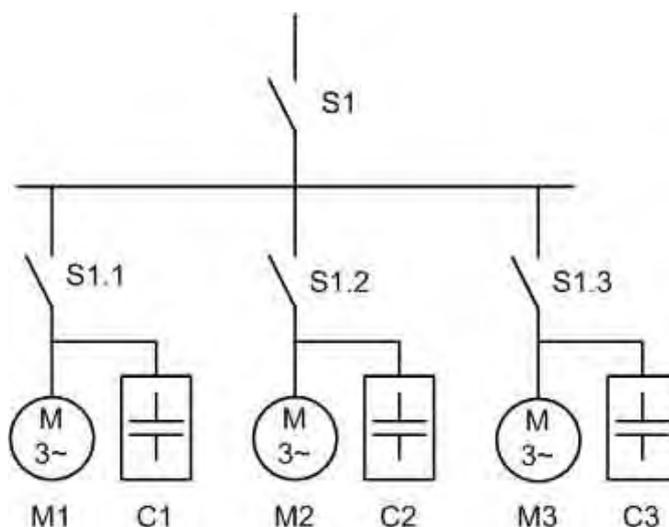
Deve-se considerar que só ocorrerá benefício efetivo à instalação a montante do ponto onde se instalou o conjunto de correção. A troca de energia reativa continuará ocorrendo entre os elementos indutivos e capacitivos do circuito, de modo que pouco se aproveita em benefícios como redução de corrente nos condutores ou melhoria do nível de tensão de alimentação dos equipamentos terminais.



**Figura 39 - Correção de Fator de Potência Centralizada em Baixa Tensão**

#### **6.10.4 Correção Individual**

Quando se realiza a correção de reativos de forma individual, mostrada na Figura 40, cada carga é compensada pela instalação de elementos reativos antagônicos em paralelo de forma que o circuito alimentador passe a suprir praticamente apenas energia ativa. A troca de energia reativa fica restrita aos elementos conectados entre si, reduzindo a corrente dos alimentadores e por consequência todas as perdas associadas a esses efeitos.



**Figura 40 - Correção Individual de Fator de Potência**

A vantagem da correção individualizada também é mostrada no fato de não produzir excessos de energia reativa quando a carga principal é desligada, e por não exigir o acréscimo de dispositivos de manobra extras. Em contrapartida, cuidadoso estudo deve ser realizado quando do emprego de capacitores associados a motores sujeitos a variações de grande amplitude no carregamento mecânico, evitando a geração de sobretensões prejudiciais aos elementos do sistema.

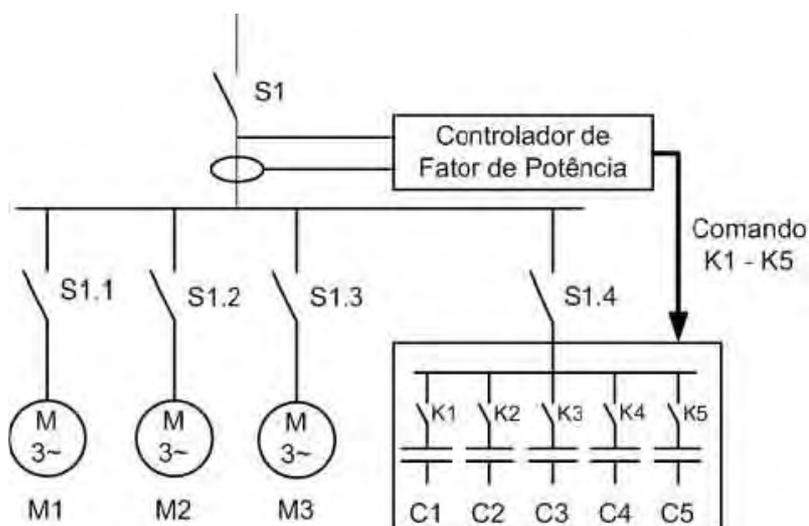
#### **6.10.5 Correção Automática**

A correção automática de fator de potência é realizada com o emprego de um controlador automático de reativos, composto por um equipamento normalmente microprocessado capaz de monitorar o fator de potência da instalação em seu ponto central de distribuição.

A aplicação de controladores de fator de potência comandando a inserção de bancos de capacitores, no lugar de bancos de capacitores estáticos, proporciona maior flexibilidade na compensação de reativos, e possibilita evitar o excesso de reativos que poderiam produzir sobretensões e distorções harmônicas (Tinggreen et al, 1999).

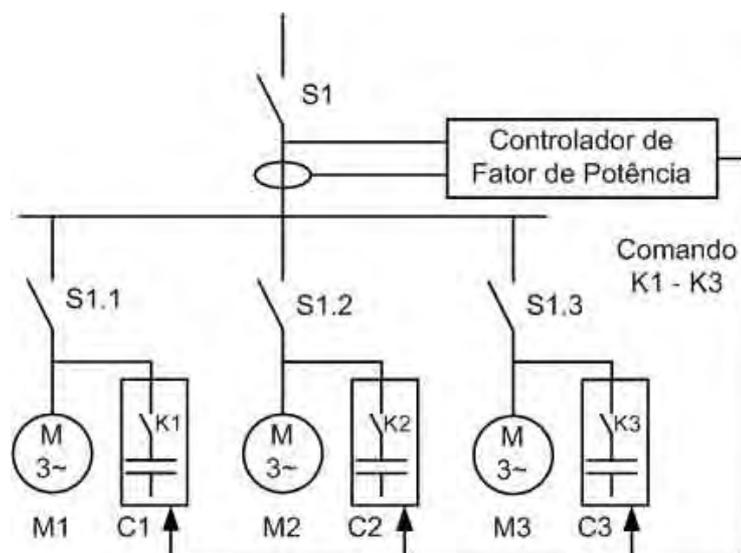
Através de algoritmos de controle, e baseado em um ponto de ajuste de fator de potência mínimo, o equipamento controlador realiza a inserção ou remoção de unidades capacitivas na instalação. Esta manobra é realizada por contadores adequados à manipulação de elementos capacitivos, que realizam a pré-carga do capacitor em um breve instante durante seu processo de acionamento.

A correção automática é realizada na maioria dos casos de forma centralizada, através de bancos de correção de elevada potência, quase sempre capaz de suprir a necessidade integral da instalação, como mostrado na Figura 41. Como citado anteriormente, este tipo de correção não aproveita parte dos benefícios que podem ser obtidos na instalação, pois não reduz a corrente dos alimentadores de circuitos terminais.



**Figura 41 - Correção de Fator de Potência Automática Centralizada**

Uma forma de instalação que apresenta maiores benefícios é a correção individual localizada próxima às cargas, com comando automático realizado por um controlador de fator de potência. Nesta configuração, com exemplo mostrado na Figura 42, encontramos os benefícios da correção automática aliados às vantagens da correção individual, aumentando a eficiência e a confiabilidade do sistema.



**Figura 42 - Correção de Fator de Potência Automática Distribuída**

#### **6.10.5.1 Vantagens e Desvantagens da Correção Automática**

Entre as vantagens encontradas no emprego de sistemas de correção automática do fator de potência em instalações, podemos citar:

- Operação do sistema dentro de uma faixa bem definida de fatores de potência, praticamente eliminando o faturamento de consumo e demanda reativa excedente
- Redução do risco de sobretensões produzidas por excesso de reativos capacitivos na instalação
- Corrente nos alimentadores a montante do sistema de correção mantida sempre em valores reduzidos
- O emprego de unidades automáticas concentradas facilita a inspeção e manutenção do sistema de correção de fator de potência da instalação
- O emprego de correção automática distribuída alia as vantagens da correção automática às da correção localizada.

E como desvantagens deste tipo de correção estão incluídas:

- Aumento no custo de implementação e manutenção do sistema de correção de fator de potência da instalação

- Emprego de correção automática concentrada restringe os benefícios da redução de corrente nos alimentadores aos circuitos a montante do sistema de correção
- Falhas no sistema de medição e controle podem produzir correção ineficiente e levar ao faturamento de reativos excedentes
- O desligamento de unidades automáticas concentradas pode cancelar a correção do fator de potência de toda a instalação.

Durante a implementação de um sistema de correção estes aspectos devem ser considerados, para que o resultado obtido realmente atinja o objetivo e para que a instalação possua posteriormente um certo grau de independência em relação aos equipamentos de controle

### **6.11 Correção Automática de Fator de Potência: Estratégia de Controle**

Para se realizar a correção automática de fator de potência com o emprego de capacitores, torna-se necessária definir de que forma o controlador de fator de potência irá reagir diante da necessidade de se inserir ou remover elementos capacitivos do sistema elétrico para manter o fator de potência dentro dos limites desejados.

#### **6.11.1 Medição e Monitoramento**

A medição do fator de potência é feita de forma direta, através de instrumentos que indicam o desvio angular entre a tensão e a corrente de um sistema elétrico, ou através da medição simultânea dos consumos de energia ativa e energia reativa e cálculo do fator de potência. O valor obtido é empregado como variável de entrada do sistema de controle, que realiza a comparação com o valor de ajuste mínimo (set point), e realiza ações de controle que reduzam a energia reativa circulante no sistema elétrico.

#### **6.11.2 Emprego de células capacitivas**

A utilização de capacitores na correção de fator de potência de cargas indutivas é uma prática há muito adotada, por ser uma solução de baixo custo, compacta e confiável. São compostas por capacitores de polipropileno aluminizado, capazes de suportar operações contínuas quando alimentadas por tensão e frequência

nominais, e apresentam potências que alcançam alguns kVAr. A composição de potências reativas mais elevadas é normalmente conseguida pela associação de células capacitivas, como as mostradas na Figura 43.



**Figura 43 - Capacitores para Correção de Fator de Potência (Fonte: WEG)**

Os módulos capacitivos são dotados de resistores de descarga, dimensionados de forma a reduzirem a tensão terminal dos componentes a níveis seguros para manipulação algum tempo após serem desenergizados (normalmente garantem tensão terminal menor que 75V após 3 minutos de desligamento).

### **6.11.3 Acionamento rotativo**

O acionamento rotativo das células capacitivas consiste em uma técnica empregada para que o tempo de utilização e a quantidade de inserções das células que compõem um banco automático seja o mesmo, independente da potência reativa solicitada. Isto é feito memorizando-se a potência correspondente à cada saída, e por meio do algoritmo de controle escolhe-se a célula a ser inserida ou removida conforme sua utilização anterior.

Com este método, todos os bancos são utilizados de forma intercalada, mantendo uniforme a quantidade de horas de operação de cada unidade capacitiva do sistema e aumentando a vida útil do conjunto, reduzindo os riscos de defeitos produzidos pelo longo tempo de inatividade dos equipamentos.

#### 6.11.4 Acionamento seqüencial

O acionamento seqüencial não considera a potência reativa de cada saída de controle, produzindo apenas a inserção de células ordenadamente quando solicitado, e as remove do circuito na seqüência inversa. Embora este tipo de acionamento produza a utilização desigual de algumas células, sua simplicidade facilita a implementação em pequenos sistemas de controle.

#### 6.11.5 Acionamento combinatório

O acionamento combinatório emprega bancos de capacitores com potências crescentes em valores de potências de 2. Assim, se o primeiro banco possui potência nominal de X kVAr, o próximo banco possuirá 2X kVAr, e os subseqüentes 4X, 8X, 16X, e assim por diante.

Para realizar a correção o controlador seleciona, empregando simplesmente a numeração em base binária, quais bancos perfazem a quantidade de potência reativa necessária à compensação, permitindo o ajuste mais preciso do fator de potência da instalação.

### 6.12 Resultados obtidos

Os benefícios e vantagens da compensação de energia reativa numa instalação podem ser listados como segue:

- Redução das perdas de energia, pela redução da corrente de alimentação;
- Redução dos custos de energia elétrica, não só pela eliminação da ultrapassagem do valor de 0,92 , como pela redução das perdas;
- Liberação da capacidade do sistema, permitindo a ligação de cargas adicionais;
- Elevação dos níveis de tensão, melhorando o funcionamento dos equipamentos e a utilização da instalação

**Redução das perdas:** - A redução das perdas em um sistema elétrico decorrente da melhoria ou correção do fator de potência resulta em lucro

financeiro anual da ordem de 15% do valor do investimento feito com a instalação de capacitores

Nas instalações elétricas industriais, em geral, as perdas de energia por efeito Joule ( $RI^2t$ ) variam de 2,5% a 7,5% do consumo da instalação (kWh), dependendo das horas de trabalho a plena carga, da seção dos condutores e do comprimento dos alimentadores e circuitos de distribuição.

As perdas são proporcionais ao quadrado da corrente, e como a corrente é reduzida na razão direta do aumento do fator de potência, as perdas são inversamente proporcionais ao quadrado do fator de potência. A redução percentual das perdas é dada pela expressão abaixo:

$$\Delta_p \% = \left[ 1 - \left( \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \right)^2 \right] \times 100 \quad (78)$$

Devemos lembrar que o custo da instalação elétrica e do sistema de comando e proteção cresce com o aumento da energia reativa consumida. Da mesma forma, para transportar a mesma potência ativa sem ocorrer o aumento das perdas, a seção dos condutores deve aumentar à medida que o fator de potência diminui. A Tabela 2 ilustra a variação necessária de um condutor em função do fator de potência.

**Tabela 2 - Variação da seção do condutor em relação ao fator de potência**

SEÇÃO RELATIVA	FATOR DE POTÊNCIA
1,00	1,00
1,23	0,90
1,56	0,80
2,04	0,70
2,78	0,60
4,00	0,50
6,25	0,40
11,10	0,30

Para avaliarmos quantitativamente o que representa a redução de perdas conseguida com a compensação da energia reativa, considere a seguinte situação:

- Consumo anual: 150.000 kWh

- Fator de potência original:  $\cos\varphi_1= 0,69$
- Fator de potência corrigido:  $\cos\varphi_2= 0,92$
- Perdas Joule (5% do consumo): 7.500 kWh

Considerando a situação proposta, a redução de perdas será:

$$\Delta_p \% = \left[ 1 - \left( \frac{0,69}{0,92} \right)^2 \right] \times 100 = 43,75\% \quad (79)$$

O que representa uma redução de :

$$0,4375 \times 7.500 = 3281,2 \text{ kWh por ano}$$

Teremos, portanto, perdas anuais de :

$$7.500 - 3281,2 = 4218,8 \text{ kWh ou } 2,81 \% \text{ do consumo}$$

**Elevação dos níveis de Tensão:** - A redução da corrente provocada pela compensação do fator de potência obviamente reduzirá a queda de tensão no circuito de distribuição, e como conseqüência ocorrerá o aumento da tensão aplicada à carga. Devemos observar que, em geral, não é econômico o uso de equipamentos de compensação apenas para esse fim. A elevação da tensão deve ser encarada como um benefício adicional.

Para o cálculo das quedas de tensão, utilizamos a seguinte equação:

$$\Delta V = R \cdot I \cdot \cos\varphi \pm X \cdot I \cdot \sin\varphi \quad (80)$$

onde:

$\Delta V$  - Queda de tensão (V)

$R$  - Resistência ( $\Omega$ )

$I$  - Corrente total (A)

$\varphi$  - Ângulo do fator de potência

$X$  - Reatância ( $\Omega$ ):

(+) - Para cargas com fator de potência atrasado

(-) - Para cargas com fator de potência adiantado

Em instalações industriais com apenas uma unidade transformadora, a elevação de tensão proveniente da inserção de capacitores no sistema, é da ordem de 4 a 5%.

### 6.13 Controladores de Fator de Potência comerciais

Os equipamentos destinados ao controle de fator de potência são normalmente encontrados como sistemas capazes de realizar a medição contínua do fator de potência da instalação, e através de estratégias de controle, comandar dispositivos capazes de manter o nível de reativos da instalação dentro dos valores admitidos pela parametrização. As figuras a seguir mostram o aspecto de controladores de fator de potência produzidos por duas indústrias distintas, para aplicação em painéis, dotados de interface homem-máquina para parametrização e visualização dos dados de operação.



(a) CM4020 - Embrasul



(b) PFC-10 - Solcon

**Figura 44 - Controladores de Fator de Potência comerciais**

Estes equipamentos são conectados à rede por meio de condicionadores de nível, como Transformadores de Corrente e Potencial, ou apenas por meio de TCs e com conexão direta à rede para a medição de tensão. Os modelos mais simples consideram apenas o fator de deslocamento como variável de controle, desprezando distorções harmônicas. Equipamentos de gerações mais recentes realizam a avaliação do conteúdo harmônico da corrente e são capazes inclusive de sinalizar situações desfavoráveis à aplicação de capacitores na correção do fator de potência.

As estratégias de controle variam desde as mais simples, como o acionamento seqüencial, às estratégias mais elaboradas que analisam o tempo de utilização de cada unidade controlada, de forma a manter uniforme o período de acionamento de todos os capacitores do sistema de correção.

#### **6.14 Sistema de correção empregado no protótipo**

O protótipo emprega um algoritmo seqüencial para a correção de fator de potência. Este algoritmo prevê o acionamento das saídas de controle sempre que o fator de potência se encontra abaixo do valor mínimo indutivo ajustado, e desligue de forma seqüencial as mesmas saídas quando o fator de potência torna-se menor que o valor mínimo capacitivo ajustado.

Estão previstas inicialmente oito saídas de controle seqüencial, com possibilidade de expansão modular conforme a necessidade da instalação. A expansão não altera o algoritmo de controle, pois afeta apenas os valores limites das variáveis controladas, mantendo o mesmo perfil de operação.

O sistema de controle utiliza as medidas com valor RMS fornecidas pelo circuito medidor de energia, sem estimar no entanto a distorção harmônica total (THD) da corrente da instalação. Para o emprego do controlador em instalações onde grande parte da potência instalada é composta por cargas não-lineares, especial atenção deve ser dada à possibilidade de ocorrência de correntes de ordem harmônica com amplitude significativa nos capacitores de correção do fator de potência.

Para o comando de unidades capacitivas de potência elevada é recomendado o emprego de dispositivos de manobra dotados de elementos de pré-carga, que minimizam a corrente de inrush característica dos capacitores, que pode facilmente atingir 20 vezes o valor da corrente nominal do componente.

#### **6.15 Conclusão**

A potência elétrica em dispositivos alimentados por correntes alternadas pode ser decomposta em potência ativa, capaz de produzir trabalho útil, e potência reativa, originada pelo armazenamento transitório de energia nos componentes de caráter reativo, como indutores e capacitores. Quanto maior for a parcela reativa da

impedância de uma carga, maior será a quantidade de energia reativa solicitada para seu funcionamento, e portanto maior será a solicitação de corrente da fonte.

A potência obtida pelo produto entre tensão e corrente do circuito é chamada Potência Aparente, medida em Volt-Ampéres, e é o indicativo de solicitação que a carga exerce sobre a fonte para sua operação. A relação entre a potência ativa e a potência aparente de uma carga linear operando sob alimentação com tensão senoidal é denominada Fator de Potência, e que para dispositivos puramente resistivos é igual à unidade. Nesta condição, não existe deslocamento no tempo entre a tensão e a corrente do circuito.

Quanto maior for a parcela reativa da impedância de uma carga, mais defasada no tempo estará a corrente em relação à tensão. Esta defasagem representa o deslocamento produzido pelos componentes reativos do circuito, e o cosseno do ângulo de defasagem, numericamente igual à relação entre potência ativa e potência aparente, é denominado Fator de Deslocamento. Nesta situação, maior será a quantidade de energia reativa solicitada pela carga para seu funcionamento, e desta forma a relação entre a potência ativa e a potência aparente diminui, reduzindo o fator de potência do circuito. Em cargas lineares, o Fator de Potência é igual ao Fator de Deslocamento, e pode ser designado por  $\cos(\varphi)$ , onde  $\varphi$  é o ângulo de defasagem entre tensão e corrente.

Para cargas de natureza não-linear, o fator de potência é definido levando-se em conta a distorção harmônica da corrente, igual à relação entre a corrente na frequência fundamental e a corrente total do circuito multiplicada pelo fator de deslocamento da corrente na frequência fundamental.

Baixos valores de fator de potência elevam a solicitação do sistema de energia, exigindo que se disponibilize uma grande capacidade de corrente para que apenas a parcela ativa seja realmente aproveitável. Para reduzir a solicitação de energia reativa pela carga, realiza-se a correção do fator de potência, que consiste no acréscimo de elementos reativos antagônicos ao circuito, de forma a limitar o trânsito de energia reativa exclusivamente entre estes elementos, liberando capacidade de fornecimento da fonte de energia e otimizando o sistema elétrico de forma geral.

Para evitar o excesso no trânsito de energia reativa pelo sistema de distribuição, estabeleceu-se um limite mínimo de fator de potência, abaixo do qual o consumidor é penalizado com a aplicação de multa sobre o valor do reativo excedente que sua instalação solicitou. Este limite está atualmente limitado a 0,92 indutivo ou capacitivo,

medido através da relação entre consumo de energia ativa e reativa em períodos de uma hora.

A correção do fator de potência introduz uma série de benefícios às características gerais do sistema e da instalação, como a redução nas correntes dos alimentadores, a melhoria nos níveis de tensão, a redução de perdas por efeito joule nos condutores e a possibilidade de emprego de condutores com menor seção transversal. Esta correção, que em ambientes industriais é normalmente realizada com a instalação de capacitores, pode ser localizada juntamente às cargas ou pode ser concentrada em um único ponto, e seu acionamento pode ser realizado de forma permanente ou ser controlado de forma automática conforme as solicitações da instalação.

O controle automático do fator de potência permite que o nível de energia reativa de uma instalação seja mantido dentro de limites estabelecidos por parametrização do dispositivo controlador, deixando o sistema em uma faixa ótima de operação com relação à solicitação elétrica e evitando a incidência de multas aplicadas por excedentes reativos no circuito.

## **7 DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR DE DEMANDA E FATOR DE POTÊNCIA**

### **7.1 Objetivos do Desenvolvimento**

Este desenvolvimento tem por objetivo o protótipo de um equipamento para aplicação em instalações elétricas industriais, comerciais ou residenciais, destinado ao controle em tempo real do fator de potência e da demanda máxima da unidade consumidora. Será dotado de um sistema de medição eletrônica de parâmetros elétricos que o tornará independente da medição principal da concessionária, permitindo inclusive a instalação em pontos distantes do alimentador principal do circuito.

Sistemas de controle semelhantes que empregam microcomputadores ou controladores lógicos programáveis (Tipsuwanporn et al, 2002) como unidades de processamento são bastante difundidos e permitem um excelente nível de processamento, mas não conferem a versatilidade e o custo desejado para o equipamento.

A realização das medições dos parâmetros elétricos com o próprio microcontrolador seria possível (Cho et al, 2001), mas demandaria em grande trabalho computacional e exigiria o emprego de microcontroladores dotados de mais recursos. Por

esta razão, o protótipo conta com um circuito dedicado à medição de energia elétrica que disponibiliza todos os dados necessários ao funcionamento do sistema de controle.

Embora sua concepção esteja focada em um dispositivo de baixo custo, estão previstas funções encontradas normalmente em equipamentos industrializados, inclusive em relação à capacidade de expansão futura e interconectividade. Os componentes empregados no protótipo possuem precisão tal que seu uso como transdutor de grandezas elétricas forneça resultados com confiabilidade similar aos medidores disponíveis no mercado.

## **7.2 Sistemas de Comunicação e Coleta de Dados**

### **7.2.1 Redes de Comunicação de Dados**

O aprimoramento da tecnologia empregada nos computadores e nos sistemas de comunicação de dados influenciou profundamente o modo como são organizados os sistemas computacionais e, portanto, os sistemas de automação. O conceito antigo de centro de computação tornou-se obsoleto e um novo modelo tomou seu lugar. Os modernos sistemas de processamento são constituídos de um grande número de computadores autônomos, independentes, porém interconectados por redes de comunicação de dados. De acordo com Tanenbaum (1996), estes sistemas são chamados de redes de computadores.

### **7.2.2 Sistemas Distribuídos**

Conforme Moraes e Castrucci (2001), dependendo do número de unidades de processamento aplicadas em automação, os tipos de sistemas existentes podem classificados em concentrados ou distribuídos.

Entende-se por sistema concentrado aquele em que um único computador gerencia todo o processo constituído de unidades remotas, onde todo processamento é realizado por uma única máquina. A informação percorre uma estrutura hierarquizada vertical.

No sistema distribuído (distributed system), o gerenciamento de toda informação bem como o controle da automação é realizado por máquinas alocadas ao longo da instalação. As unidades remotas deixam de ser executoras para assumirem a participação no processamento.

Geralmente, os sistemas de automação existentes possuem um grande número de CLPs (Controladores Lógicos Programáveis) e interfaces homem-máquina operando em locais distintos. Com o decorrer do tempo, verificou-se que a integração destes dispositivos em uma rede poderia levar a uma maior confiabilidade e possibilitar o uso compartilhado de recursos (resource sharing) existentes, proporcionando sistemas mais seguros e econômicos.

As redes de comunicação de dados viabilizam a utilização de computadores de pequeno em um modelo Cliente-Servidor em que cada usuário ou cliente possui um computador do tipo PC e os dados são armazenados em um ou mais servidores de arquivos.

No modelo cliente-servidor, a comunicação através da rede geralmente é feita através de mensagens do cliente para o servidor, com pedidos de execução de determinadas tarefas. O servidor as executa e manda de volta a resposta desejada.

### **7.2.3 Redes**

Com o advento das redes de comunicação de dados, tornou-se ideal, tanto para fabricantes de equipamentos de automação e controle quanto para os usuários, a padronização dos equipamentos e de seus programas. Em 1983 a ISO (International Standards Organization) propôs o modelo de referência para interconexão aberta para uso universal chamado OSI (Open Systems Interconnection Reference Model), para ser aplicado na fabricação de equipamentos digitais. Os conceitos básicos do modelo OSI são as camadas, as entidades e os protocolos.

**Camadas (Layers):** São níveis de hierarquia, dispostos de forma que cada um presta serviço para um nível mais alto, agregando valor ou função aos serviços dos níveis mais baixos. Uma estação de trabalho pode participar, física e logicamente, de uma ou mais camadas.

**Entidades:** São dispositivos de hardware ou de software que cooperam para produzir serviços em uma camada.

**Protocolos:** São conjuntos de regras que regulam a comunicação entre as entidades de uma determinada camada.

O modelo de referência OSI da ISO tem sete camadas (ver Figura 45) com as seguintes funções:



Figura 45 - Arquitetura do Modelo ISO/OSI

- Camada 7 – Aplicação (Application): Fornece recursos e os administra para realizar a transferência de dados da aplicação;
- Camada 6 – Apresentação (Presentation): Realiza as transformações e representações da informação;
- Camada 5 – Sessão (Session): Proporciona a manutenção da associação entre entidades da aplicação e controle dos diálogos;
- Camada 4 – Transporte (Transport): Controla o fluxo de dados e o tratamento de erros entre estações;
- Camada 3 – Gerência de Rede (Network): Faz o encaminhamento (routing) de dados, chaveamento e outros serviços internos à rede;
- Camada 2 – Transmissão de Dados (Data Transmission): Faz o controle de fluxos e de erros nos enlaces de dados simples e acesso ao meio de comunicação;
- Camada 1 – Rede Física (Physical Network): Proporciona a transferência de bits de dados e de sinalização.

No nível físico, a padronização de conexões com periféricos é muito importante. Os principais padrões são: IEEE488 Bus, também conhecido por General Purpose Interface Bus (GPIB); geralmente empregado para interconexão de equipamentos de medição em laboratórios, EIA RS232 Standard; mais utilizado para

interconexão de pequena distância e o Padrão 20 mA; um dos padrões mais utilizado em meios industriais. Como uma variante do padrão RS232, para situações em que as distâncias envolvidas superam 15 metros e se deseja comunicação multi-pontos, existem os padrões RS422, RS423 e RS485, que proporcionam maior imunidade a ruídos externos.

#### **7.2.4 Protocolos de Enlace**

Segundo Silveira e Santos (1998), conforme o nível de segurança, a velocidade e a eficiência, requeridos por uma rede de comunicação, existem basicamente dois grandes tipos de protocolos: os assíncronos e os síncronos. Os protocolos assíncronos são orientados a bit, onde o início e final de um elemento de informação são determinados por uma sinalização adequada, por exemplo, o protocolo start-stop-bit. Este tipo de protocolo se caracteriza pela sua simplicidade e economia, com baixo nível de segurança e velocidade de propagação dos dados entre 1.200 a 19.600 bits por segundo. Os protocolos síncronos são orientados a byte e oferecem um maior grau de segurança no transporte da informação. São mais rápidos e mais eficientes. Possuem custo elevado em função de suas características. Um exemplo deste tipo de protocolo é o HDLC, no qual a mensagem é transportada através de pacotes de bytes.

Além dos protocolos baseados em bits e bytes existem os mais antigos, que eram empregados em redes de grande distância, baseados em carácter. Dentre os protocolos industriais mais conhecidos, podem-se citar: Interbus, Devicenet, Fieldbus, Profibus, Modbus, entre outros. Todos são destinados à comunicação entre sistemas de automação, por meio de barramento de campo do tipo serial onde os bits da informação são transmitidos serialmente.

Um outro protocolo de uso bastante difundido na automação automotiva é o CAN, que tem como característica principal o controle de acesso ao meio de transmissão por meio da detecção de colisão CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection). Entre os protocolos industriais o de maior simplicidade de implementação é o Modbus.

#### **7.2.5 Protocolo MODBUS**

O protocolo modbus foi originalmente desenvolvido pela empresa Modicon Incorporation, para ser aplicado nos sistemas de comunicação de controladores

programáveis de sua fabricação. Este protocolo é realizado no nível 2 do modelo OSI, conforme mostra a Figura 46.

É um protocolo de comunicação serial e emprega o modelo Mestre-Escravo. Em um sistema mestre-escravo somente pode existir um mestre, de onde devem se originar todas as requisições de início de comunicação para enviar comandos aos nós escravos e processar as respostas. Aos escravos não é permitida a transmissão de dados sem que haja uma solicitação explícita do mestre. Também não é permitido aos escravos se comunicarem entre si. Devido à estrutura da mensagem, podem existir até 247 escravos em um mesmo barramento de rede serial. No nível físico de rede podem ser utilizados diferentes tipos de interface, por exemplo, RS232 ou RS485, sendo que a segunda, implementada a dois ou quatro fios é a mais comum.

No modelo mestre-escravo deve-se atribuir um endereço único, de um byte, a cada unidade do tipo escravo. O endereço 0 é reservado para a comunicação do tipo broadcast, como será visto mais adiante. Ao mestre não é necessária a atribuição de um endereço, visto que somente ele poderá iniciar uma transação.

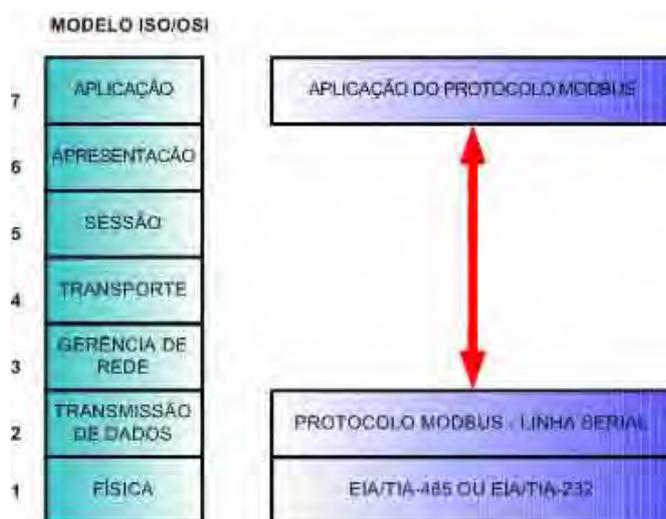


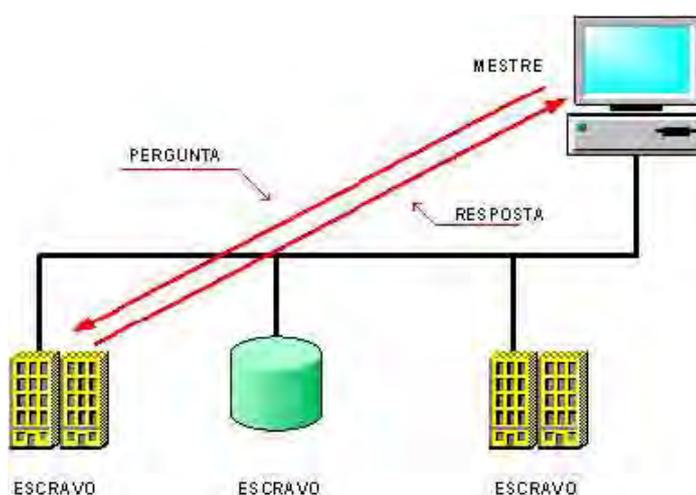
Figura 46 - Modelo ISO/OSI - Aplicação do Protocolo MODBUS

### 7.2.5.1 Modelo Mestre-Escravo

O mestre pode enviar uma requisição MODBUS para os nós escravos de dois modos: unicast e broadcast.

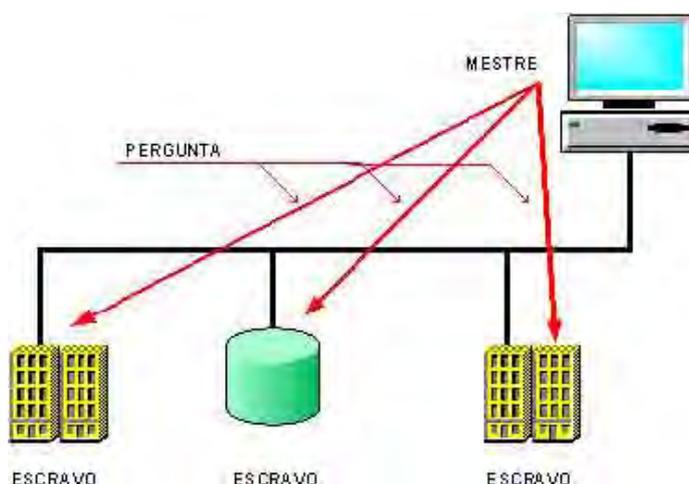
A Figura 47 apresenta o modelo mestre-escravo no modo de operação unicast do protocolo. Neste modo, o mestre, geralmente implementado em um

computador PC, envia um comando para um escravo em particular e aguarda a recepção da resposta para em seguida poder processá-la. Neste modo, o tipo de comunicação que se estabelece é chamado de ponto-a-ponto. Como o início de comunicação entre mestre e um escravo somente pode ser iniciado pelo primeiro, os dispositivos escravos que estão conectados em uma mesma linha devem permanecer sempre no modo de escuta, devendo entrar no modo de transmissão somente no período necessário para transmitir a resposta à requisição a ele enviada. Por outro lado, o mestre pode permanecer sempre no modo de transmissão e entrar no modo escuta somente enquanto aguarda a resposta de uma solicitação. Alternativamente, para evitar consumo excessivo de energia, o transmissor pode se comportar do mesmo modo que os escravos, isto é, entra em modo transmissão somente quando há necessidade de proceder alguma requisição a algum escravo ou enviar algum comando a todos os escravos.



**Figura 47 - Modelo Mestre-Escravo modo unicast**

A Figura 48 apresenta o modelo mestre-escravo no modo de operação broadcast do protocolo. Este modo é utilizado quando é necessário enviar um comando a todos os escravos presentes na linha, por exemplo, ajuste de relógio de tempo real. Mensagens do tipo broadcast não demandam resposta por parte dos escravos.

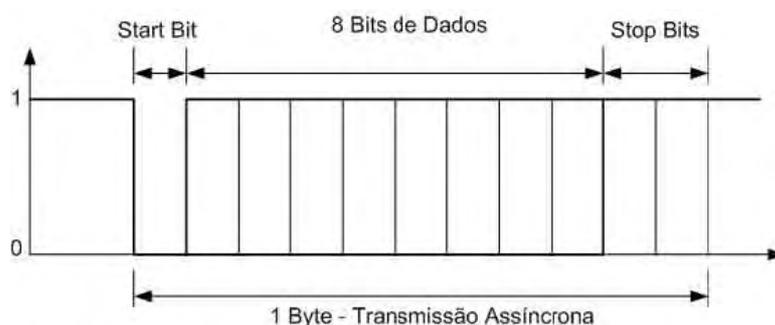


**Figura 48 - Modelo Mestre-Escravo modo broadcast**

### 7.2.5.2 Padrão de Mensagem do MODBUS

Na implementação do nível mais baixo da pilha do protocolo, correspondendo à camada 1 do modelo OSI para o caso da comunicação serial, a transmissão dos bytes constituintes da mensagem geralmente emprega o padrão NRZ (Non-Return to Zero).

No padrão NRZ os valores de tensão ou corrente presentes no meio físico de transmissão, correspondendo aos valores lógicos 1 ou 0 dos bytes da mensagem somente podem assumir valores positivos ou negativos e a sinalização serial padrão geralmente adotada é a do tipo start/stop bit, conforme mostra a Figura 49.



**Figura 49 - Padrão Start/Stop Bit**

O start bit, que geralmente corresponde a uma transição de nível alto para nível baixo, é empregado no processo de sincronização na recepção de cada byte da mensagem. O byte de mensagem pode se constituir de 7 ou 8 bits de dados. Quando se

utilizam somente 7 bits de dados, o oitavo bit geralmente é usado como bit de paridade, e é empregado para a detecção de erro nas transmissões. Os stop bits são empregados para indicar o final de transmissão de cada byte e correspondem à permanência do nível 1 no meio de transmissão por um intervalo de tempo correspondente a 1, 1½ ou 2 bits.

Na implementação da camada de transmissão de mensagem do protocolo, correspondendo à camada 2 do modelo OSI, o MODBUS realiza a troca de mensagens entre os diferentes dispositivos instalados na rede através de um padrão apresentado na Figura 50, denominado PDU (Protocol Data Unit).

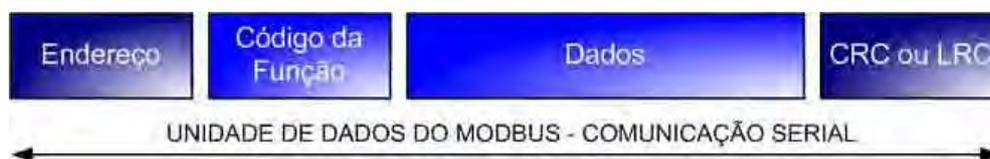
O PDU contém dois campos: código da função e dados. O campo da função deve conter um byte que representa o código binário da função que o escravo deve executar e o campo de dados deve conter os parâmetros ou dados da função a ser executada.



**Figura 50 - Protocol Data Unit (PDU) do Modbus**

O mapeamento do protocolo em um barramento de rede específico incorpora alguns campos específicos ao PDU. O cliente, que inicia uma transação Modbus, deve construir o PDU e acrescentar os campos apropriados para sua transmissão.

A Figura 51 apresenta a estrutura de um PDU para comunicação sobre linha serial.



**Figura 51 - PDU para comunicação sobre linha serial**

Os campos acrescentados ao PDU básico são: endereço e CRC ou LCR. O campo de endereço deve conter o endereço do servidor para onde a mensagem é transmitida e o campo relativo ao CRC é utilizado para o envio de um código verificador de erro na recepção da mensagem.

Dependendo do modo de transmissão a ser empregada, as mensagens do protocolo podem ser de dois tipos: RTU (Remote Terminal Unit) e ASCII (American Standard Code for Information Interchange). Os modos de transmissão definem o conteúdo dos bits da mensagem que devem ser transmitidos serialmente através do canal de comunicação.

### 7.2.5.3 Modo de Transmissão RTU

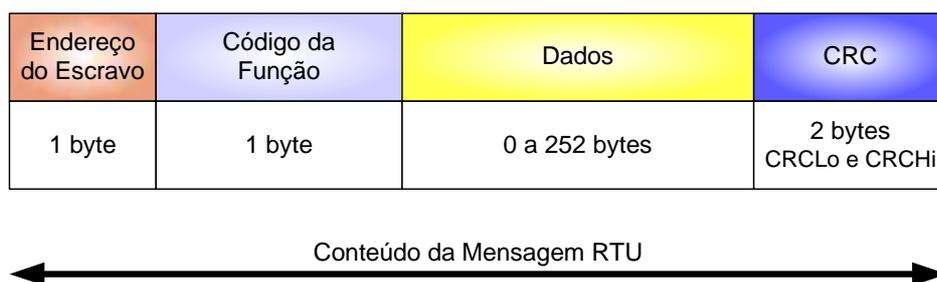
Quando dispositivos se comunicam através da rede utilizando o modo RTU, cada byte da mensagem é codificado em dois caracteres de 4 bits no formato hexadecimal. A principal vantagem deste modo é que a sua grande densidade de caractere permite uma grande velocidade no fluxo de dados. Portanto, cada mensagem deve ser transmitida como uma seqüência contínua de caracteres.

O formato de cada byte da mensagem transmitida é composto conforme mostra a Figura 52. Quando se utiliza o bit de paridade a transmissão de cada byte ocupa o tempo de 11 bits (ver Figura 52.a). Por outro lado, quando não se utiliza o bit de paridade, são enviados 2 stop bits mantendo-se assim o mesmo tempo de transmissão (ver Figura 52.b).



**Figura 52 - Sequência de bits do modo RTU**

O PDU resultante é uma seqüência de bits composta por um dos dois elementos acima, cuja forma é apresentada na Figura 53. Durante a transmissão da mensagem é necessário que o intervalo de tempo entre cada um de seus elementos não exceda o tempo correspondente a  $1\frac{1}{2}$  bits, caso contrário, o dispositivo receptor a declara como incompleta e aborta a recepção.



**Figura 53 - Conteúdo da Mensagem RTU do Modbus**

No modo RTU, o campo de verificação de erro da mensagem, CRC é composto de 2 bytes (CRCLo e CRCHi), cada um representado por 2 caracteres hexadecimais de 4 bits. A sua composição será apresentada mais adiante.

#### 7.2.5.4 CRC do Modo RTU

A geração do campo de verificação de erro no modo RTU é baseada no método de verificação cíclica de redundância CRC (Cyclical Redundancy Checking), no conteúdo da mensagem. Este método é aplicado independentemente da verificação de paridade dos seus elementos. O CRC da mensagem é composto de 16 bits implementados como 2 bytes, compreendendo o byte mais significativo CRCHi e o byte menos significativo CRCLo.

Na construção da mensagem o byte CRCLo é colocado logo após o campo de dados e o byte CRCHi termina da mensagem.

O cálculo do CRC é iniciado carregando-se um registrador de 16 bits com o valor  $FFFF_H$ , isto é, inicialmente todos os bits do registro devem ser iguais a 1.

Em seguida são realizados os seguintes procedimentos: (a) aplica-se a operação lógica OU entre o registro e o primeiro grupo de 8 bits da mensagem (sem os bits de sinalização e controle) e salva-se o resultado no próprio registro; (b) realizam-se 8 operações sucessivas de deslocamento para a direita no registro, preenchendo-se com 0 o seu bit mais significativo e; (c) em cada uma destas operações de deslocamento verifica-se se o valor do bit menos significativo do registro é igual a 1, em caso afirmativo, realiza-se uma operação lógica OU do registro com uma palavra binária de 16 bits pré-determinada e salva-se o resultado no próprio registro; (d) após as 8 operações de deslocamento, repetem-se os passos de (a) a (c) para o próximo grupo de 8 bits da mensagem; (e) repetem-se os

passos de (a) a (c) para todos os bits da mensagem. O conteúdo final do registro representa o CRC da mensagem.

### 7.2.5.5 Modo de Transmissão ASCII

Quando dispositivos se comunicam através da rede utilizando o modo ASCII, cada byte da mensagem é codificado como 2 caracteres ASCII. Este modo de comunicação é utilizado quando o enlace físico de comunicação ou os dispositivos não possuem funcionalidades suficientes para cumprir as restrições de tempo impostas pelo modo RTU. Este modo é menos eficiente do que o modo RTU, uma vez que cada byte da mensagem a ser transmitida é codificado em 2 bytes, provocando uma maior carga de tráfego na rede.

O formato de cada caractere da mensagem transmitida é composto dos mesmos elementos do modo RTU, conforme mostra a Figura 52.a e Figura 52.b.

Como cada 4 bits dos bytes da mensagem são codificados em valores compreendidos no intervalo entre 0 e 15, os códigos ASCII empregados são: 48 a 57 e 65 a 70, que quando representados na forma binária têm valores:  $30_{16}$  a  $39_{16}$  e  $41_{16}$  a  $46_{16}$ . Esta codificação ocupa apenas 7 bits em cada byte a ser transmitido. Quando a verificação de paridade é utilizada, é recomendável a adoção de paridade par.

A composição do PDU para este modo de comunicação é apresentada na Figura 54.



**Figura 54 - Conteúdo da Mensagem ASCII do Modbus**

No modo ASCII o campo de verificação de erro da mensagem, LRC é composto de 2 caracteres contendo o valor de um byte cuja composição será vista a seguir.

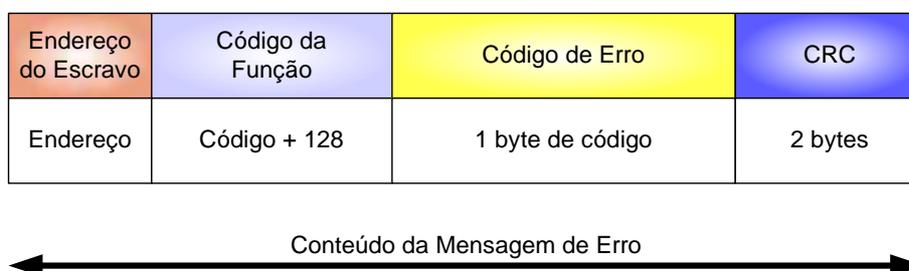
### 7.2.5.6 LRC do Modo ASCII

A geração do campo de verificação de erro do RTU é baseada no cálculo de verificação longitudinal de redundância LRC (Longitudinal Redundancy Checking) no conteúdo da mensagem, inclusive nos caracteres de início e final de mensagem.

Para se obter LRC de uma mensagem é necessário realizar as seguintes operações: (a) efetua-se sucessivamente a soma de todos os bytes da mensagem, desprezando-se o 9º bit do resultado de cada uma das operações; (b) calcula-se o complemento de dois do byte resultante no passo anterior. Os dois nibbles (conjunto de quatro bits) do byte resultante são representados por dois caracteres ASCII.

### 7.2.5.7 Tratamento de Erro de Comunicação

Um dispositivo escravo, ao receber uma mensagem, calcula o CRC ou o LRC correspondente, compara-o com o valor recebido e se os valores não coincidirem, gera uma mensagem de erro para o dispositivo mestre. A Figura 55 apresenta o formato da mensagem de erro para o modo RTU.



**Figura 55 - Mensagem de Erro do Modbus**

A mensagem de erro é composta pelos campos: de endereço do escravo, de código da função, de código de erro e do CRC/LRC. O conteúdo do campo de endereço do escravo é preenchido com o endereço do escravo que tenha sido interrogado. O campo da função deverá conter o código de função solicitada acrescido do valor 128. O campo de código de erro deverá conter o código do erro, composto de um byte, que será utilizado pelo dispositivo mestre para identificar o tipo de erro ocorrido e o campo do CRC/LRC é preenchido da mesma forma que em uma mensagem normal.

### 7.2.5.8 Funções do Modbus

O campo de código de função de uma mensagem é composto de dois caracteres no modo ASCII ou de um byte no modo RTU. Códigos válidos estão compreendidos no intervalo de 1 a 255. A maioria dos dispositivos implementa apenas uma parte destes códigos, Modicon (1996).

A Tabela 3 apresenta, de forma genérica, alguns códigos de funções que estão disponíveis para os equipamentos produzidos pela Modicon. As funções realçadas são as mais utilizadas em aplicações de dispositivos de aquisição de dados.

**Tabela 3 - Funções do MODBUS (uso comum)**

<b>Função</b>	<b>Nome</b>	<b>Parâmetros</b>
<b>01</b>	Lê estado de bobina (1 bit por bobina)	Endereço inicial (2 bytes) Número das bobinas (2 bytes)
<b>02</b>	Lê entrada (1 bit por entrada)	Endereço inicial (2 bytes) Número das bobinas (2 bytes)
<b>03</b>	Lê registros internos (16 bits)	Endereço inicial (2 bytes) Número de registros (2 bytes)
<b>04</b>	Lê registros de entrada (16 bits)	Endereço inicial (2 bytes) Número de registros (2 bytes)
<b>05</b>	Força uma bobina (1 bit por bobina)	Endereço inicial (2 bytes) Número das bobinas (2 bytes)
<b>06</b>	Pré-ajusta um registro (16 bits por registro)	Endereço do registro (2 bytes) Valor do registro (2 bytes)
<b>07</b>	Lê registro de exceção (16 bits)	Sem parâmetros
<b>08</b>	Realiza Diagnóstico	Sub-função (2 bytes) Dado (2 bytes)

Fonte: Modicon Modbus Protocol Reference Guide

O formato do PDU enviado para os dispositivos servidores (escravos) solicitando a execução de uma função é apresentado na Figura 56.



**Figura 56 - PDU para requisição de Função**

Ao receber um PDU com requisição para executar uma função, o dispositivo servidor (escravo) monta o PDU de resposta conforme o padrão apresentado na Figura 50.

### **7.2.6 Comunicação em Rede no Equipamento Proposto**

O equipamento permite comunicação em rede baseada no protocolo MODBUS, via interface RS485, em comunicação half-duplex. Cada dispositivo conectado à rede pode ser endereçado para acesso remoto via software supervisor, onde além de ser possível a consulta de parâmetros de operação, são possíveis a alteração dos parâmetros de configuração do equipamento e a realização de sua calibração.

Estão implementadas as funções 3 (Leitura de Registros Internos de 16 bits) e 6 (Ajuste de Registros Internos de 16 bits) do protocolo MODBUS, permitindo acesso bidirecional a cada um dos 140 parâmetros de operação e configuração do sistema.

Embora o MODBUS se trate de um protocolo praticamente obsoleto, a facilidade de implementação em microcontroladores e a grande quantidade de dispositivos e sistemas supervisórios que ainda o utilizam tornaram-se fatores decisivos para sua escolha.

Para a avaliação de operação do equipamento desenvolvido foi montada uma aplicação experimental contendo cargas reativas e resistivas, variáveis e fixas, e os dados de operação desta instalação foram armazenados por um sistema automático de coleta de dados em tempo real, se valendo da capacidade de comunicação do protótipo. Empregando comunicação serial por meio de um cabo RS232 foram estabelecidas as funções do protocolo MODBUS para aquisição e transferência de dados provenientes do Controlador. As funções do protocolo implementadas no protótipo são:

- Função 3 – Lê registro simples ou conjunto de registros
- Função 6 – Escreve em registro simples

A partir da função de leitura de parâmetros, e com o auxílio de um software supervisor, foram preenchidas planilhas de dados com os parâmetros de medição significativos para o tipo de experimento que foi executado.

### **7.2.7 Sistema de coleta de dados**

Para a coleta dos dados disponibilizados pelo equipamento proposto, bem como sua parametrização remota ou operação em rede com vários equipamentos, torna-se necessária a utilização de um software capaz de realizar a comunicação com os equipamentos, utilizando o protocolo de enlace implementado no protótipo e que permita o armazenamento dos dados em um meio que se possa aproveitar posteriormente para a análise e validação dos resultados obtidos.

#### **7.2.7.1 Sistema de Supervisão e Controle**

Para a função de coletor de dados, foi empregado o software de supervisão e controle Elipse PRO (SCADA), desenvolvido pela Elipse Software Ltda. Sua escolha se deu em função dos recursos de programação oferecidos, que otimizam o tempo de desenvolvimento e a manutenção dos sistemas, tais como:

- Pode ser executado em qualquer plataforma Microsoft Windows;
- Linguagem de programação simples e orientada a objeto;
- Facilidade de comunicação com os mais diversos tipos de periféricos existentes no mercado ou mesmo com outros aplicativos;
- Há uma maior confiabilidade por se tratar de um software nacional e, com isso, há uma maior suporte local e de drivers de comunicação;
- Disponibiliza o suporte à rede e acesso remoto via Internet;
- Possui suporte a banco de dados via ODBC, Access, SQL Server, Oracle;
- Comporta uma biblioteca gráfica para criação e edição de telas;
- Permite configuração e reconhecimento de alarmes;
- Emite relatórios formatados, graficamente customizados pelo usuário;
- Possibilita o registro de dados em disco rígido e análise histórica;
- Permite programação de valores para serem enviados ao processo através das Receitas;

- Permite CEP (Controle Estatístico de Processos) aplicado aos dados coletados;
- Possui módulo matemático para a formulação de equações;
- Possibilita segurança através do controle de acesso por nível de usuário;
- Possui opções para captura, registro e transmissão digital de imagens;

Para a configuração do aplicativo Elipse PRO dedicado à coleta de dados do equipamento proposto, segue abaixo, conforme já citado anteriormente uma lista dos parâmetros medidos e dos elementos controlados no sistema.

Como as tags criadas para realizar a troca de informações com os equipamentos de aquisição de dados foram do tipo PLC e do tipo BLOCO, para realizar a configuração das mesmas, foi necessária a instalação de um driver de comunicação responsável pela comunicação do sistema de supervisão com os periféricos externos.

O driver empregado foi o MODBUS32.DLL, que implementa o protocolo de mesmo nome e opera no modo RTU. Para a sua instalação foram utilizados os recursos do Organizer. Este driver possui os seguintes parâmetros, que devem ser ajustados para a sua operação:

- a) Porta de comunicação serial (COM1, COM2, COM3,...),
- b) Paridade,
- c) Taxa de transferência de bits (*Baud Rate*)
- d) Tempo de espera (*Timeout*)

Após a criação das telas e das tags do sistema, foi realizada a configuração da aplicação dedicada à coleta de dados do sistema controlador, no software supervisão Elipse, conforme segue.

#### **7.2.7.2 Armazenamento dos Dados**

Os dados obtidos através da supervisão da operação do equipamento foram armazenados em um arquivo no formato de planilha compatível com o software Microsoft Excel, sendo realizada a adição de uma nova linha a cada leitura dos parâmetros efetuada pelo software.

O intervalo entre leituras (tempo de varredura) é definido através da parametrização dos tags na configuração do aplicativo, e foi ajustado de forma a permitir a obtenção de curvas com boa definição, capazes de reproduzir o comportamento das ações dos controladores monitorados. Foram empregados intervalos entre leitura na

faixa de 1 a 5 segundos, tempo suficiente para que o controlador apresentasse tempo hábil para resposta, e curto o suficiente para capturar as atuações transitórias dos algoritmos de controle.

### 7.2.8 Aplicativo de Supervisão e Coleta de Dados

Na execução do aplicativo supervisorio utilizado na coleta de dados de operação do equipamento, é apresentada uma tela que permite ao operador estabelecer quais variáveis serão armazenadas na planilha de dados, e ao mesmo tempo exibe os valores instantâneos destas variáveis, conforme mostra a Figura 57.

**Controlador de Demanda e Fator de Potência**

Endereços das Variáveis		
VAR 1	VAR 2	VAR 3
8	105	112
VAR 4	VAR 5	VAR 6
120	121	130
VAR 7	VAR 8	VAR 9
1	2	3

Valores das Variáveis Monitoradas								
VAR 1	VAR 2	VAR 3	VAR 4	VAR 5	VAR 6	VAR 7	VAR 8	VAR 9
8	45	2764	163	163	24	19	38	9

Figura 57 - Tela do Sistema Supervisorio - Elipse SCADA

Os valores ajustados nas caixas de "Endereços das Variáveis" estabelecem quais parâmetros do equipamento serão coletados por varredura, sendo permitida a alteração destes parâmetros durante a execução do aplicativo, caso seja de interesse do operador. Nas caixas de "Valores das Variáveis Monitoradas", o valor correspondente de cada parâmetro selecionado é mostrado e atualizado a cada nova varredura de dados.

## 7.3 Controle

### 7.3.1 Aspectos Gerais

A palavra controle surgiu a partir da palavra de origem francesa “contrôler”, que denota o ato de fiscalizar, supervisionar e manter o equilíbrio. A necessidade de controlar processos deu origem às técnicas de controle e para que se possa entender a evolução destas técnicas é preciso compreender seu contexto histórico e econômico.

O homem sempre buscou simplificar o seu trabalho de forma a substituir o esforço braçal por outros meios e mecanismos, de modo a obter uma melhoria da qualidade de vida. Com o decorrer da história, compreendeu-se que a criação de novos mecanismos, que pudesse substituir o processo produtivo artesanal, poderia ser a chave para o sucesso, o que possibilitaria o alcance de objetivos de forma rápida e econômica. Com esse novo paradigma e com a promessa pautada na melhoria da qualidade de vida e liberação do ser humano da mão-de-obra braçal, é que em meados do século XVIII, foram desenvolvidas as primeiras máquinas que acabaram dando suporte tecnológico para a Primeira Revolução Industrial.

Essa Primeira Revolução Industrial, também conhecida como Revolução das Máquinas, ocorreu na Inglaterra, mais precisamente no período de 1760 a 1850, e foi caracterizada pela transição de um processo predominantemente agrícola de subsistência e da produção de bens de consumo para uma sociedade industrializada, caracterizada pela introdução de máquinas simples que substituíam a força muscular pela mecânica, em tarefas repetidas.

A Segunda Revolução Industrial se deu com o aperfeiçoamento e a implantação das máquinas por toda a Europa no período de 1850 a 1900. Foi caracterizada por um grande avanço tecnológico, onde apareceram a locomotiva e o barco a vapor. O primeiro trabalho significativo utilizando técnicas de automação, desenvolvido neste período, foi o de James Watt, que construiu um controlador centrífugo do tipo pneumático e hidráulico, para o controle de velocidade de uma máquina a vapor.

Somente no século XIX, com o decorrer das necessidades da própria evolução, é que surgiram os mecanismos automáticos fixos e as linhas de montagem para produção em massa. Em 1950 tais mecanismos eram comandados por circuitos transistorizados e em 1960 por computadores, que passaram a trabalhar segundo

instruções codificadas que lhes eram transmitidas por meio de fita perfurada ou fitas magnéticas.

O termo automação se difundiu desde a construção das primeiras máquinas e se consolidou com a Segunda Revolução Industrial. A etimologia do termo “automação” surge de duas derivações: “Autômato”, denominação que se dá a máquinas que imitam os movimentos do homem e “Automático”, que se trata dos dispositivos, que uma vez regulados adequadamente são capazes de executar determinados trabalhos ou operações, inclusive repetidos e em série, sem a intervenção direta do homem. De maneira geral pode-se definir automação como sendo a ação de controlar um conjunto de processos repetitivos, que são realizados de modo a se atingir um nível de produtividade e qualidade muito mais elevado do que um processo em que as ações são comandadas de forma individualizada através da intervenção do operador.

A técnica de controle é um conceito e emprega um conjunto de elementos por meio dos quais se constroem sistemas ativos capazes de atuar com eficiência ótima sobre o processo produtivo utilizando as informações recebidas do meio sobre o qual atuam. Com base nas informações, o sistema calcula a ação corretiva mais apropriada para a execução da ação. Esta é uma característica de sistemas em malha fechada, conhecidos como sistemas com realimentação, ou seja, aquele que mantém uma relação expressa entre um valor da saída e um valor de entrada de referência do processo. Essa relação entrada/saída serve para corrigir eventuais valores de saída que estejam fora dos valores desejados. Para tanto, são utilizados controladores que, por meio da execução algorítmica de um programa ou circuito eletrônico, comparam o valor atual com o valor desejado (set-point), efetuando o cálculo para ajuste e correção.

A ação de controle pressupõe a presença de três componentes básicos, cuja principal característica é a realimentação das informações requeridas para o controle do processo através de um controlador, conforme ilustra a Figura 58.

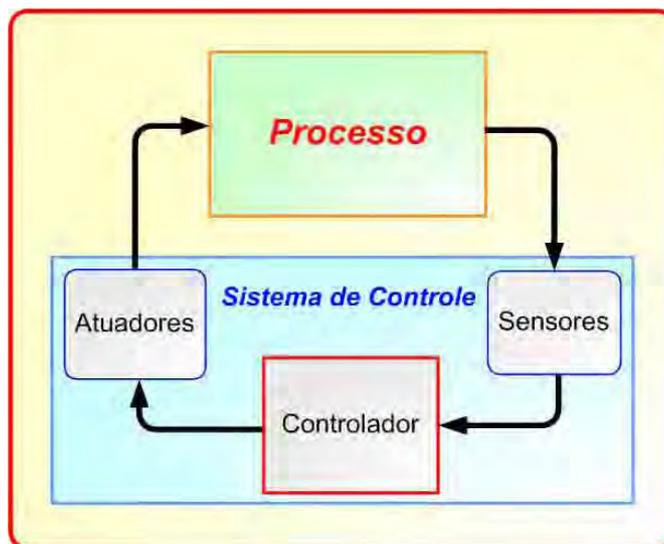


Figura 58 - Diagrama de blocos de um Sistema de Controle

**Sensor:** É definido como sendo um dispositivo sensível a um fenômeno físico, tal como: temperatura, umidade, luz, pressão, etc. Por meio desta sensibilidade, os sensores enviam um sinal para os dispositivos de medição e controle. Caso exista a necessidade de medir uma grandeza a partir de um fenômeno físico que envolva uma grandeza física que não seja de natureza elétrica, tem-se, conceitualmente, a necessidade de se utilizar um transdutor, que se caracteriza por um dispositivo capaz de responder ao fenômeno físico, ou estímulo, de forma a converter a sua magnitude em um sinal elétrico proporcional à amplitude desse estímulo. Os transdutores também são conhecidos como conversores de sinais.

**Atuador:** Atuadores são dispositivos destinados à realização de uma determinada força, deslocamento ou outra ação física qualquer definida pelo sistema controlador. Estes dispositivos são os elementos através dos quais o controlador atua sobre o processo. Podem ser magnéticos, hidráulicos, pneumáticos, elétricos ou de acionamento misto. A título de exemplo, temos: válvulas e cilindros pneumáticos, válvulas proporcionais, motores, aquecedores, entre outros.

**Controlador:** É o elemento responsável pela aquisição dos sinais enviados pelos sensores, seu processamento e o envio de comandos para os atuadores. Podem ser dispositivos microprocessados ou não.

Todo sistema de automação segue um princípio comum, em que o gerenciador do processo é realimentado de informações resultantes da conclusão de cada

tarefa, de forma a redimensionar ou reorientar a etapa seguinte, com o objetivo de alcançar o resultado final mais próximo possível daquele para o qual o dispositivo foi instruído a executar através de informações codificadas.

Um exemplo de sistema que desempenha a função de controlador é o sistema de supervisão e controle, que possui a característica de uma plataforma multitarefa e de tempo real, podendo executar inúmeras tarefas diferentes simultaneamente e com um tempo de resposta extremamente curto, situado na faixa de milésimos de segundo.

### **7.3.2 Unidades de Aquisição e Controle**

As unidades de aquisição e controle são constituídas de pequenos computadores capazes de realizar tarefas programadas e com um grau de liberdade suficiente para atender as variações necessárias aos diferentes estágios dos sistemas por eles comandados ou controlados. Operam com base nos dados de entrada, que são informações obtidas através de sensores instalados nas máquinas e fornecem sinais de saídas, que se constituem em sinais dos atuadores necessários para a operação dos equipamentos e máquinas. Em seus processadores são executados algoritmos de controle. Cada unidade de aquisição e controle forma um centro remoto inteligente com decisões autônomas quando as soluções estão previstas e também podem aceitar decisões externas provenientes de outro microprocessador, ou de um computador de maior porte que esteja executando um programa destinado ao comando de várias unidades de aquisição e controle.

O alcance de sua estrutura logística fica condicionado ao tamanho do projeto lógico do processador e quanto maior for a sua capacidade, maior será a condição para realizar programas complexos, tendo em vista que sua sofisticação depende da variedade de informações que podem ser processadas simultaneamente.

Para isto, a estrutura logística precisa ocupar um espaço maior, ou seja, ela necessita ocupar um número maior de compartimentos, ou células de trabalho, a fim de permitir a abertura de tantos caminhos quantos forem necessários para processar toda a informação requerida pelos diversos estágios da programação, sem que haja congestionamentos prejudiciais ao encaminhamento dos dados de acordo com suas prioridades.

As prioridades estão associadas a regras que compõem a formação da base logística de dados e ajudam na construção de estruturas que estejam dentro das exigências da formulação das soluções, estabelecendo polarização energética de toda a área de trabalho do processador, para que o processamento se organize dentro de uma dinâmica estabelecida e seja aprovado pelo estágio superior, que por sua vez necessita de uma base de dados sólida a fim de atender todas as variações energéticas, criadas por um modelo matemático que vai se sofisticando e exigindo dados cada vez mais precisos e complexos para o controle estatístico a que está submetido cada estágio de processamento no interior de toda a estrutura logística.

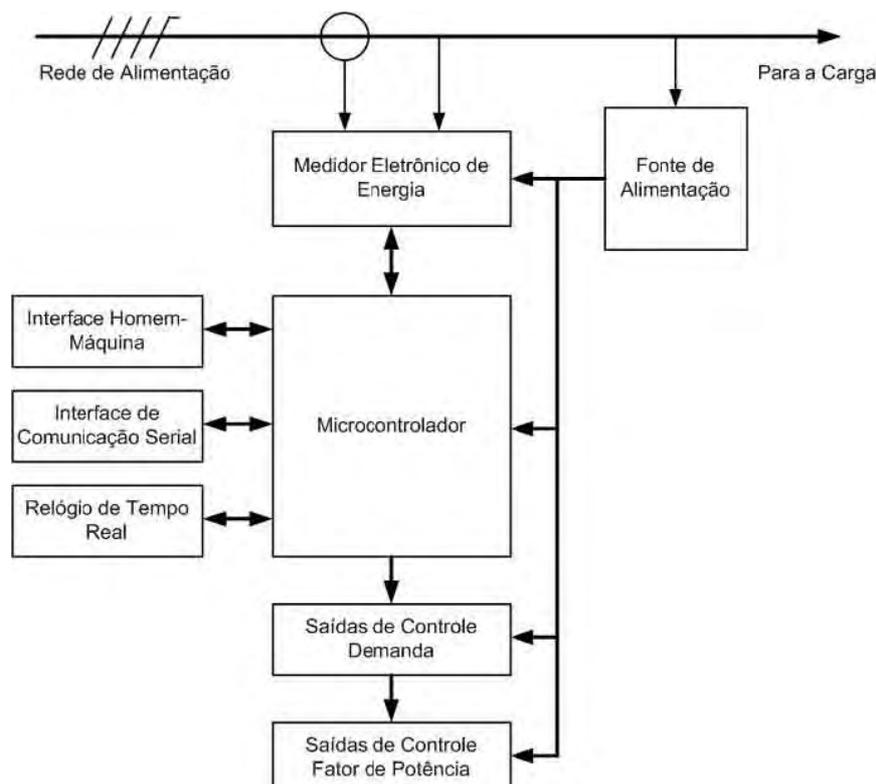
## **7.4 Elementos de Hardware**

### **7.4.1 Blocos do Protótipo**

O protótipo pode ser dividido nos seguintes blocos funcionais:

- Microcontrolador (Unidade Central de Processamento)
- Medidor Eletrônico de Energia
- Circuitos Periféricos Acessórios
- Interface Homem Máquina
- Interface de Comunicação
- Fonte de Alimentação
- Saídas de Controle

A disposição dos blocos conforme suas funções pode ser melhor apresentada através do diagrama de blocos da Figura 59.



**Figura 59 - Diagrama de Blocos do Equipamento**

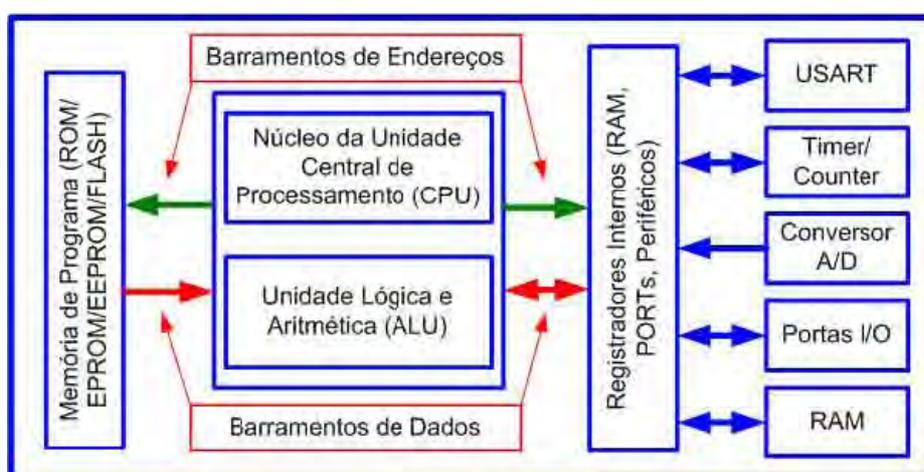
#### 7.4.2 Microcontrolador

O microcontrolador é o principal componente deste circuito. Ele é o responsável pela execução das rotinas que compõem a programação do dispositivo, interagindo com os circuitos integrados periféricos e comunicando-se com o meio externo, seja por meio da interface homem-máquina, ou por intermédio de uma porta de comunicação serial. É também responsável pela atuação das saídas de controle, obedecendo ao algoritmo implementado em sua programação com base nos valores colhidos do sistema de medição.

A velocidade de processamento deste componente deve ser suficiente para realizar o controle de todos os circuitos periféricos e ainda executar os algoritmos de controle sem prejuízo à operação do equipamento.

Os microcontroladores são unidades de processamento digital, ideais para aplicações localizadas e são projetados de tal forma que são capazes de proporcionar a solução para uma vasta quantidade de problemas realizando as operações lógicas e aritméticas necessárias. São dispositivos eletrônicos praticamente autônomos necessitando de um número mínimo de dispositivos periféricos para realizar suas tarefas.

Os microcontroladores operam sobre dados adquiridos através de portas de entrada analógicas ou digitais e fornecem os sinais de saída correspondentes através de outras portas digitais ou analógicas. A estrutura básica de um microcontrolador, apresentada na Figura 60, compreende uma ULA (Unidade Lógica Aritmética), uma memória de programa do tipo ROM (Read Only Memory), um conjunto de registradores de uso geral e de uso específico em RAM (Random Access Memory), um conjunto de portas de entrada e de saída e uma estrutura interna de barramentos compreendendo os barramentos de programa, de dados e de endereços e um barramento de controle.



**Figura 60 - Estrutura básica de um microcontrolador**

O programa executado pelo microcontrolador é armazenado em formato binário na memória de programa, que é composta de um conjunto de posições sucessivas com capacidade para armazenar dezesseis bits cada uma. Cada posição da memória de programa é capaz de armazenar um código binário que representa uma instrução a ser executada pelo microcontrolador ou algum parâmetro que esteja associado à mesma.

Durante a execução de um programa o microcontrolador lê seqüencialmente os códigos de instrução presentes na memória de programa, as decodifica e as executa. Durante este processo, pode ocorrer a necessidade de leitura ou escrita de dados na área de memória destinada aos registradores ou o acesso a portas de entrada ou de saída.

Uma característica que diferencia os microcontroladores dos microprocessadores é o fato do primeiro ter sido concebido empregando uma arquitetura

denominada Harvard, na qual, a área de memória de dados é separada da área de memória de programa, enquanto que a outra arquitetura existente, denominada Von Newman, geralmente empregada nos microprocessadores, é caracterizada pelo uso de uma única área de endereçamento, isto é, toda a área de memória pode ser utilizada tanto para o armazenamento de programa como o armazenamento de dados. Portanto, na arquitetura Harvard o barramento por onde trafegam os bits relativos aos códigos de programa é separado do barramento pelo qual trafegam os bits de dados. Esta característica proporciona aos microcontroladores uma maior velocidade de processamento, quando comparado com microprocessadores do mesmo porte, tornando-os mais atrativos em aplicações de controladores. A grande maioria dos Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) disponível no mercado utiliza microcontroladores como unidades centrais de processamento.

Outra característica importante dos microcontroladores e que lhes acrescenta maior versatilidade é o fato de incorporarem na própria Unidade Central de Processamento (CPU) alguns elementos periféricos, tais como: contadores, portas de entrada e saída, conversores analógico/digitais, portas de comunicação serial síncrona e assíncrona, e dispositivos para a supervisão de sua operação (watchdog).

#### **7.4.2.1 Microcontroladores MICROCHIP**

Uma família de microcontroladores tipo PIC composta de vários circuitos integrados que empregam um núcleo processador comum é produzida pela Microchip Technology Incorporation. Estes componentes eletrônicos fazem parte de uma categoria de microcontroladores que incorporam todos os circuitos necessários para a realização completa de um sistema de processamento digital programável.

Estes microcontroladores são fabricados em uma única pastilha (chip) e montados em encapsulamentos de plásticos ou cerâmicos providos de pinos para sua conexão com outros componentes que façam parte da aplicação, sendo que o número de pinos está relacionado com as funcionalidades oferecidas em cada modelo. Numa mesma pastilha estão incluídos todos os elementos básicos que constituem um sistema microprocessador, ou seja:

- Unidade Central de Processamento
- Memória de Programa

- Memória de Dados volátil
- Memória de Dados permanente
- Portas de Entrada e Saída
- Temporizadores
- Barramentos

**Unidade Central de Processamento (CPU)** – Esta unidade é responsável por todo o funcionamento do microcontrolador. Ela interpreta e executa as instruções de programa e tem capacidade de realizar operações lógicas e aritméticas.

**Memória de Programa** – Na memória de programa são gravados os códigos das instruções do programa a ser executado. São memórias permanentes, isto é, mantêm o conteúdo dos dados nelas gravados mesmo quando não estão sendo alimentadas eletricamente. Os microcontroladores estão disponíveis na versão de memória de programa do tipo EPROM/OTP (memória somente de leitura eletricamente programável/programável uma única vez) e na versão de memória de programa do tipo FLASH (memória somente de leitura e eletricamente reprogramável). A capacidade da memória de programa em bytes varia de acordo com o modelo de microcontrolador.

**Memória de Dados volátil** – É uma memória do tipo RAM, ou seja, memória de acesso aleatório. É uma memória volátil, isto é, perde seus dados quando deixa de ser alimentada eletricamente e nela são mapeados os diversos registradores de escrita e leitura do microcontrolador. Sua capacidade varia de acordo com o modelo de microcontrolador.

Nesta memória são mapeados os registradores de uso geral, os registradores de uso especial da CPU, os temporizadores e as portas de entrada e saída.

**Memória de Dados permanente** – A maioria dos microcontroladores da Microchip incorporam uma memória de dados permanente, normalmente implementada a partir de memória do tipo EEPROM. Esta memória pode ser utilizada pelo usuário para guardar parâmetros do programa ou até mesmo dados que precisam ser mantidos mesmo quando o microcontrolador não está sendo alimentado eletricamente.

**Portas de Entrada e Saída** – As portas de entrada e saída são constituídas de linhas de entrada ou saída de sinais digitais e são conectadas a pinos do encapsulamento do circuito integrado do microcontrolador. Para a família de

microcontroladores da Microchip, os estados lógicos dos sinais a serem colocados nas linhas das portas de saída devem ser escritos em registradores associados às portas que estão mapeados no espaço de memória dos registradores. Da mesma forma, os estados presentes nas linhas das portas de entrada podem ser utilizados pela CPU lendo-se registradores que também estão mapeados no espaço de memória dos registradores. É o conjunto de linhas que constitui as portas de entrada e saída que permite o microcontrolador interagir com dispositivos periféricos a ele conectado, isto é, estas linhas podem, por exemplo, acionar relés de comando, enviar pulsos de tensão para algum componente, indicar o estado de alguma chave, etc.

**Temporizadores** – Os temporizadores são contadores de pulsos provenientes da própria CPU ou de algum circuito externo e servem para gerar sinais de temporização para o programa ou para a aplicação ou ainda operarem como contadores de eventos externos.

**Barramentos** – Internamente à CPU existem quatro barramentos, ou seja, o barramento de programa, o barramento de endereço, o barramento de dados e o barramento de controle. Por meio destes barramentos a CPU lê e executa os códigos de programa, opera sobre os dados da aplicação e se comunica com as portas de entrada e saída.

Além dos elementos básicos, os diferentes modelos podem incluir circuitos adicionais, tais como: conversor analógico/digital, comparador de tensão, gerador de sinal PWM (Pulso modulado em largura) e portas de comunicação serial.

Todas estas características fazem com que esta família de microcontroladores seja adequada para aplicações onde se pretende um menor número de componentes para uma máxima funcionalidade.

Os modelos de hardware e de programação desta família podem ser melhor entendidos através de um diagrama de blocos apresentado na Figura 61, que corresponde à arquitetura do PIC18F452.

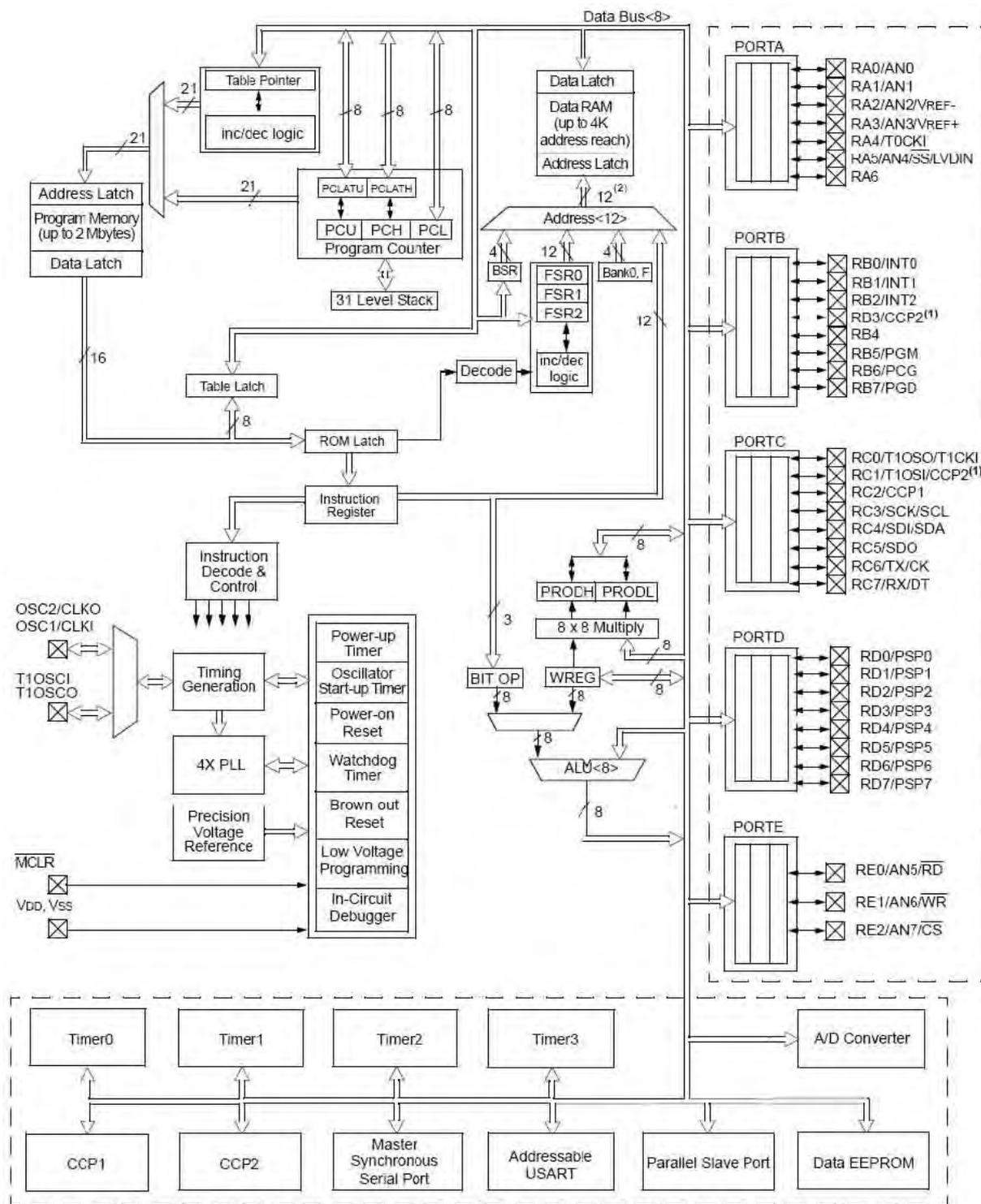


Figura 61 - Diagrama de Blocos do Microcontrolador PIC18F452

As principais características do PIC18F452 são:

- 32.768 posições de memória de programa do tipo flash com 16 bits cada
- 1536 bytes de memória tipo RAM onde são mapeados os registradores de uso

específico e de uso geral

- 256 bytes de memória tipo EEPROM para armazenamento de dados permanentes
- Núcleo RISC com 75 instruções implementadas
- Três temporizadores/contadores
- Conversor analógico-digital de 10 bits com 8 canais de leitura
- Interface serial universal síncrona/assíncrona
- Porta paralela em modo escravo
- Cinco portas de entrada e saída, totalizando 34 pinos de I/O.

Este microcontrolador é encapsulado em um invólucro de 40 pinos, sendo que 34 deles estão disponíveis para serem independentemente configurados como entrada ou saída digitais e estão agrupados em cinco portas: PORTA (RA0-RA6), PORTB (RB0-RB7), PORTC (RC0-RC7), PORTD (RD0-RD7) e PORTE (RE0-RE2). A pinagem do encapsulamento tipo DIP40 do PIC18F452 é apresentada na Figura 62.

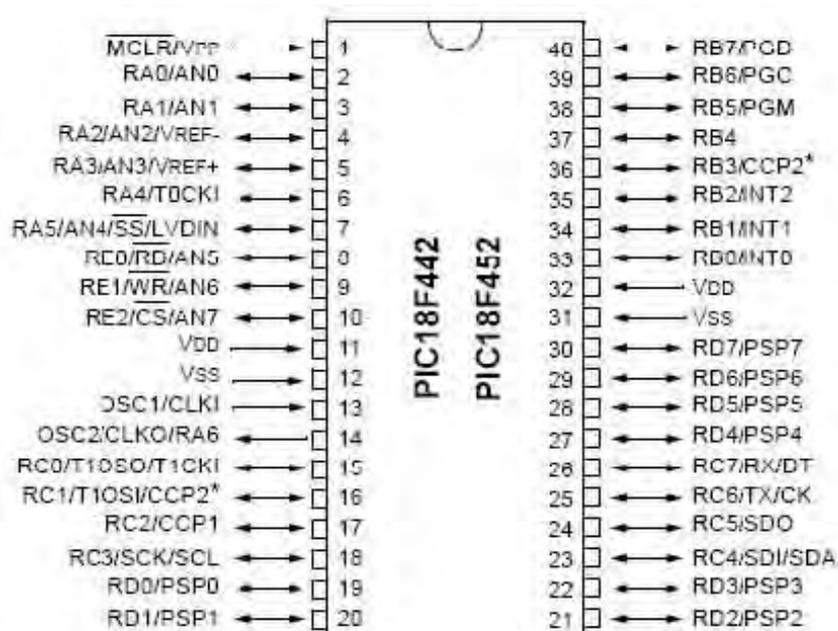


Figura 62 - Microcontrolador PIC18F452 - Pinagem

Alguns pinos das portas têm múltipla função, ou seja, conforme a configuração permitem a leitura de valores analógicos, estimulam interrupções, fornecem sinais de clock aos contadores internos ou servem de linhas de comunicação de dados para as interfaces implementadas no chip.

Os demais pinos são utilizados para a alimentação do circuito integrado (Vdd e Vss), para o circuito oscilador que gera o sinal de relógio o qual controla o funcionamento do microcontrolador (OSC1 e OSC2) e um pino para o sinal externo de reset (MCLR).

Este microcontrolador possui três entradas externas de interrupção, acessáveis pelos pinos RB0, RB1 e RB2. Além das interrupções externas, os seguintes eventos podem produzir interrupções:

- Recepção de dado pela USART
- Esvaziamento do buffer de transmissão da USART
- Chegada de dado na interface paralela
- Alterações no estado dos pinos RB4-RB7
- Término de conversão Analógico-Digital
- Atividade detectada na interface SPI/I<sup>2</sup>C
- Estouro de contagem dos timers (TMR0-TMR3)
- Captura ou comparação de valores analógicos (CCP1 e CCP2)
- Detecção de baixa tensão de alimentação
- Colisão de barramento (I<sup>2</sup>C)
- Término de escrita na EEPROM interna

A CPU conta com 4 unidades temporizadoras/contadoras, sendo 3 de 16 bits (TMR0, TMR1 e TMR3) e uma de 8 bits (TMR2). São contadores binários crescentes, que podem operar como temporizadores contando pulsos de nível alto do sinal do relógio da CPU, utilizando ou não os divisores programáveis (prescalers) internos, ou como contadores quando contando pulsos de um sinal externo. Quando programados, sinalizam à CPU um pedido de interrupção sempre que ocorre o estouro (overflow) em seu valor de contagem. Por se tratarem de contadores cíclicos, o estouro de contagem produz o retorno automático a zero do valor do temporizador.

### **7.4.3 Medidor de Energia**

Para a função de Medidor de Energia, empregou-se o circuito integrado ADE7758, produzido pela Analog Devices. Trata-se de um circuito dedicado à função de medidor de energia trifásico de alta precisão, dotado de interface serial padrão SPI e duas saídas de pulso de energia configuráveis por software.

Pode, através de configuração, operar como medidor monofásico, bifásico ou trifásico, atendendo a todos os sistemas de medição existentes em uso, além de possuir um grande número de funções agregadas.

#### **7.4.3.1 Descrição do Componente**

O CI ADE7758 incorpora conversores analógico-digitais (ADC) tipo Sigma-Delta de segunda ordem, Integradores Digitais, Circuitos de Referência de Tensão e todo o sistema de processamento digital de sinais necessário à medição e ao cálculo dos valores médios quadráticos das potências Ativa, Reativa e Aparente.

Este medidor é habilitado à medição de energia ativa, reativa e aparente em diversas configurações de medição trifásica, como Y ou  $\Delta$ , em instalações de três fios (FFF) ou quatro fios (FFFN). Além desta capacidade, o CI é dotado de um sistema de calibração de parâmetros para cada uma das fases, composto por correção do Offset das medidas RMS, correção de deslocamento de fase e calibração da indicação de potência.

A saída de pulsos APCF proporciona informações sobre a potência ativa, e a saída VARCF fornece em forma de pulsos informações sobre potência aparente ou potência reativa, conforme configuração por software.

O ADE7758 possui um registro que permite a amostragem digitalizada da forma de onda de cada canal conversor analógico-digital. O componente também incorpora um circuito para detecções de variações de tensão de curta duração, sensível a sub ou sobretensões. O nível de variação na amplitude e o tempo para detecção destes distúrbios, medido em semiciclos do sinal de tensão, podem ser ajustados pelo usuário através de parâmetros de configuração.

Para efeitos de medição de período dos sinais de tensão, o circuito integrado possui detectores de passagem por zero ativados por qualquer uma das três entradas de tensão. Estes sinais dos detectores de passagem por zero são internamente aproveitados para a medição no modo de Acumulação de Energia por Quantidade de Ciclos da Linha, um modo que permite uma calibração mais rápida e precisa, pois sincroniza a acumulação com um número inteiro de ciclos da linha de alimentação.

A leitura dos dados e a parametrização do circuito integrado são realizadas por meio de uma interface serial síncrona padrão SPI. O ADE7758 ainda possui uma saída de Requisição de Interrupção (IRQ), ativada em nível baixo sempre que ocorrer

um ou mais eventos de interrupção durante o funcionamento do circuito. Estes eventos podem ser habilitados individualmente através da configuração do registro de Status de Interrupção.

A Figura 63 mostra a pinagem do circuito integrado ADE7758, que é fornecido em encapsulamento plástico SOIC de 24 terminais.

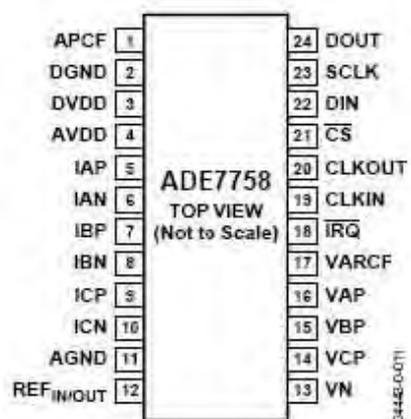


Figura 63 - Pinagem ADE7758 (Fonte: Analog Devices)

#### 7.4.3.2 Características Gerais do Componente

Como características gerais do componente, podemos citar:

- Alta precisão, suportando as normas IEC 60687/61036 e IEC 61268
- Compatibilidade com sistemas de Três Fases/Três Fios e Três Fases/Quatro Fios, ou outros tipos de sistemas trifásicos existentes
- Precisão para medidas de potência ativa com erro menor que 0,1% sobre uma faixa dinâmica de 1000: 1
- Fornece as leituras de Energia Ativa, Reativa e Aparente, Tensão RMS e Corrente RMS por fase e amostragem da forma de onda do canal selecionado por software
- Possui duas saídas de pulsos, uma para energia ativa e outra para energia reativa ou energia aparente, com seleção de fonte e frequência programável por software
- Calibração digital de Potência, Fase e Offset das leituras RMS
- Sensor de Temperatura no interior do chip, com precisão típica de  $\pm 3\%$  após a calibração



admitindo um sinal diferencial máximo igual a  $\pm 0,5V$ , e dotadas de um Amplificador de Ganho Programável (PGA), com fator de escala selecionável entre 1, 2 e 4, através de parametrização por software, onde nestes casos as entradas diferenciais ficam limitadas a  $\pm 0,5V$ ,  $\pm 0,25V$  e  $\pm 0,125V$ , respectivamente.

Os canais de tensão são três entradas unipolares, denominadas VAP, VBP e VCP, admitindo um sinal de entrada máximo de  $\pm 0,5V$  em relação à entrada VN (Neutro). Estas entradas de tensão são igualmente dotadas de Amplificadores de Ganho Programável com opções para ganho 1, 2 e 4, aplicados simultaneamente aos três canais.

#### **7.4.3.4 Conexão ADE7758 ao Sistema de Distribuição**

Para a conexão do circuito medidor ao sistema de distribuição é necessário o condicionamento dos sinais da rede, para que estes não ultrapassem os limites aceitos pelo componente, e conseqüentemente não apresente erros em sua medição.

O condicionamento dos sinais de entrada nos canais de tensão do equipamento é realizado com o emprego de divisores de tensão e filtros passa-baixa com efeitos de Anti-aliasing, visto que a taxa de amostragem do medidor é muito superior à frequência da rede de alimentação.

A medição de corrente é realizada com o emprego de Transformadores de Corrente associados a resistências de derivação (shunt). A medida da corrente é realizada através da medição do sinal de tensão sobre as resistências de derivação, condicionados por divisores de tensão e filtros passa-baixa.

Erros de fase introduzidos por características dos transformadores de corrente empregados podem ser corrigidos através de calibração digital do componente por software, e realizada através da introdução de pequenos retardos ou avanços na temporização do processamento dos sinais durante os cálculos de energia e potência.

#### **7.4.3.5 A Interface Serial do ADE7758**

O Circuito Integrado ADE7758 é dotado de uma interface de comunicação serial síncrona padrão SPI, e acessada no componente pelos sinais SCLK, DIN, DOUT e CS. O sinal de clock empregado na sincronização durante a transferência de dados é aplicado à entrada SCLK, dotada de uma estrutura de entrada tipo Schimidt-

Trigger, permitindo assim o emprego de fontes de clock com tempos de subida e descida relativamente lentos.

A entrada CS, ativa em nível baixo, possui a função de seleção de chip na interface de comunicação, permitindo o emprego de vários dispositivos no mesmo barramento. A aplicação de uma borda descendente de sinal nesta entrada produz a inicialização da interface serial, e coloca o chip em modo de comunicação, devendo ser mantida em nível baixo durante todo o processo de transferência de dados. A mudança de estado desta entrada para nível alto produz a interrupção do processo de transferência de dados e a colocação de todos os pinos relativos à interface em estado de alta impedância.

O protocolo de comunicação é composto por um Registro de Comunicação e pelo Dado propriamente dito. O Registro de Comunicação formado por 8 bits (1 byte), onde o bit mais significativo indica o sentido da comunicação: 0 para leitura e 1 para escrita. Os 7 bits restantes indicam o endereço do registro que está sendo manipulado. A estrutura do registro de comunicação é mostrada na Figura 65.

DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
W/R	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0

**Figura 65 – Estrutura do Registro de Comunicação do ADE7758**

O dado é composto por uma palavra cujo comprimento depende do endereço do registro. Embora sejam sempre manipulados em conjuntos de bytes inteiros, podem apresentar comprimentos efetivos de 7, 8, 12, 16 e 24 bits.

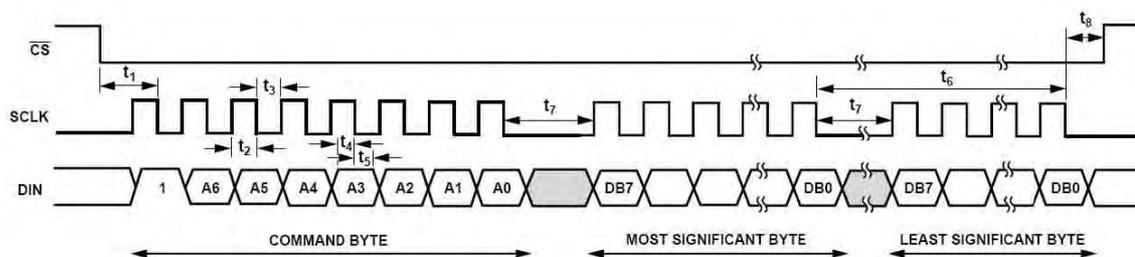
A comunicação entre o chip e o mundo exterior através de sua interface serial é iniciada com sua ativação, por aplicação de nível baixo na entrada CS. Após a inicialização da interface, inicia-se o envio do Registro de Comunicação.

Terminado o envio dos 8 bits do Registro de Comunicação, de forma serial através da entrada DIN, e sincronizado pela borda de descida dos pulsos de clock aplicados na entrada SCLK, o chip encontra-se pronto para o restante do processo de comunicação. Se a operação selecionada foi a escrita de um registro (bit 7 do Registro de Comunicação = 1), o dado a ser escrito deverá ser introduzido de forma serializada pela entrada DIN, iniciando-se pelo bit mais significativo, até que seu último bit seja enviado.

No caso de registros com mais de 8 bits de comprimento, a palavra escrita deve ser composta por bytes inteiros, sendo que os bits enviados a mais, necessários

ao preenchimento dos bytes, e que ocuparão a posição de MSB do byte mais significativo, não serão efetivamente considerados.

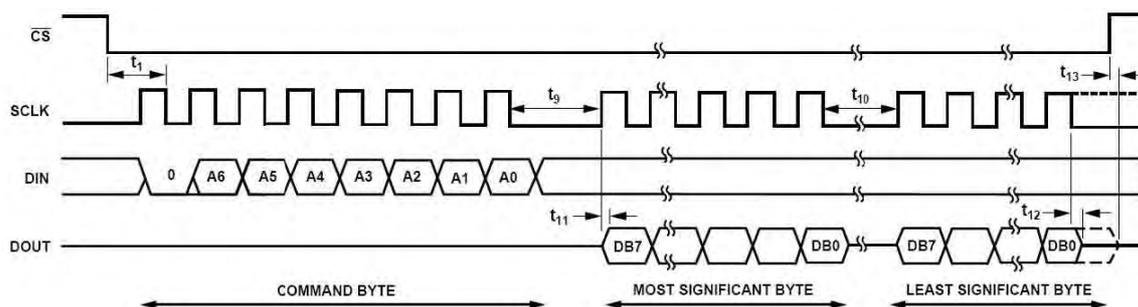
O diagrama de tempos da operação de escrita de dados em registros do ADE7758 é mostrada na Figura 66.



**Figura 66 - Temporização da Escrita de Dados no ADE7758**

Caso a operação selecionada seja a leitura do valor de um registro (bit 7 do Registro de Comunicação = 0), o dado solicitado será disponibilizado de forma serial na saída DOUT, iniciando-se pelo bit mais significativo. O término da transferência dos dados ocorrerá após o envio de pulsos na quantidade igual ao comprimento da palavra binária que compõe o registro lido.

Caso seja necessária a manipulação de bytes inteiros, os registros lidos podem eventualmente necessitar o preenchimento dos bits mais significativos dos bytes incompletos com valores “0”, de forma a não afetar o valor lido. O diagrama de tempos do processo de leitura de dados do chip é mostrado na Figura 67.



**Figura 67 - Temporização da Leitura de Dados no ADE7758**

#### 7.4.4 Relógio de Tempo Real (Real Time Clock, RTC)

O controlador é dotado de um Relógio de Tempo Real para a cronometragem de eventos e também para fornecer dados relativos a horários e dias da semana utilizados na determinação dos horários de ponta e fora de ponta.

Foi escolhido o chip DS1302, fabricado pela Dallas Semiconductors, por se tratar de um componente de fácil utilização, que utiliza comunicação serial padrão SPI, e que permite o emprego de bateria de backup externa para a manutenção da operação do relógio mesmo em caso de falta de alimentação via rede.

A operação do relógio de tempo real permite acesso aos dados de hora, minuto, segundo, dia, mês, ano e dia da semana. Como base de tempo o chip emprega um cristal externo de 32.768Hz, totalmente independente da CPU do controlador.

#### 7.4.5 Interface Homem-Máquina

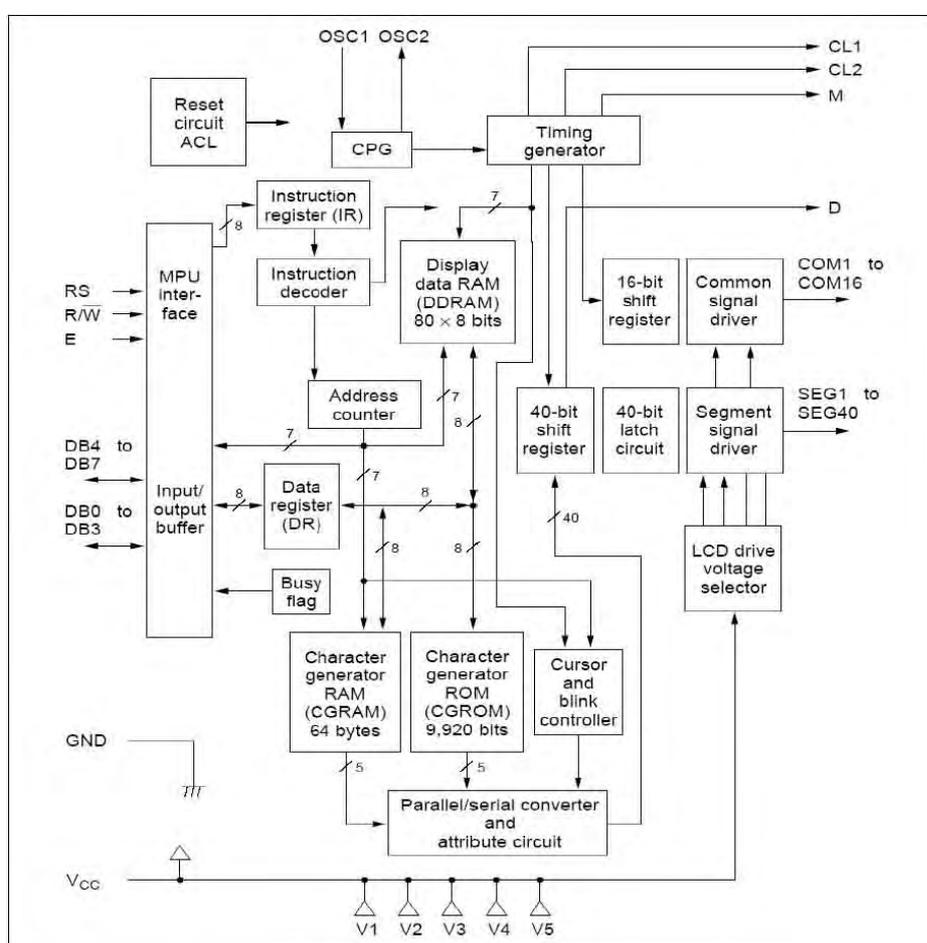
A interface homem-máquina do protótipo é composta por um display de cristal líquido (LCD) alfanumérico organizado em 2 linhas de 20 caracteres cada, destinado à exibição de mensagens e dados relativos à operação do equipamento, e por um teclado simplificado de 4 teclas, destinado à parametrização do aparelho. Seu aspecto é mostrado na Figura 68.



Figura 68 - IHM - Display LM032 e Teclado

O display empregado no equipamento é baseado no controlador HD44780, bastante difundido, e com funções incorporadas que facilitam sua aplicação em circuitos microcontrolados. Sua comunicação se faz através de uma interface paralela, com opção de troca de dados empregando palavras com largura de 8 bits ou 4 bits.

O diagrama de blocos do controlador de display é mostrado na Figura 69. Externamente, estão acessíveis apenas os pinos D0-D7, RS, R/W, E, VCC e GND, através dos quais são realizadas a alimentação do chip e a comunicação de dados.



O gerador de caracteres em ROM do HD44780 fornece um conjunto de caracteres padrão ASCII, e outros caracteres adicionais que dependem da versão de ROM do chip, bastando que seja enviado o código do caractere desejado para que este seja apresentado no display. Vários caracteres de controle estão incluídos no set básico, permitindo principalmente a manipulação das mensagens dentro da memória do

componente, e o controle de status do display e do cursor. Por meio de programação, o controlador permite alterar a largura das palavras de dados empregadas em suas comunicações. Com o objetivo de diminuir o número de pinos utilizados no microcontrolador, o display foi conectado em modo de comunicação de 4 bits.

O teclado incorporado à Interface Homem-Máquina (IHM) é composto por quatro teclas tipo push-button, alinhadas à face inferior do display, e permitem através da combinação de sua utilização realizar a navegação entre as telas de parametrização e as telas de operação do equipamento. As funções atribuídas às teclas da IHM são:

- **Tecla +:** Aumenta a numeração da tela visualizada ou o valor do parâmetro
- **Tecla -:** Diminui a numeração da tela visualizada ou o valor do parâmetro
- **Tecla Enter:** Alterna entre os modos de operação e de parametrização. Quando no modo de parametrização, grava o valor alterado dos parâmetros.
- **Tecla Shift:** Alterna entre o modo de exibição e o modo de alteração de valores, no modo de parametrização. Não apresenta efeito no modo de operação

O software do equipamento permite dois modos operacionais distintos, selecionáveis pelo teclado:

- **Modo Operação:** Neste modo, são apresentados as telas de operação, com os valores das grandezas lidas pelo circuito medidor e o estado das saídas de controle. É um modo exclusivamente de exibição, não permitindo a alteração de parâmetros de operação.
- **Modo Parametrização:** Este modo permite que sejam visualizados e alterados os parâmetros de operação e configuração do equipamento. Os parâmetros são apresentados em forma de telas, numeradas e acessíveis por teclado ou por interface de comunicação serial, via protocolo de comunicação MODBUS.

#### 7.4.6 Interfaces de Comunicação

O protótipo é dotado de uma interface de comunicação serial para troca de dados com sistemas supervisórios ou para a configuração de seus parâmetros de operação. Os níveis físicos de sinal disponíveis para comunicação podem ser escolhidos entre o padrão RS-232 ou o padrão RS-485, bastando manter na placa do controlador o circuito integrado correspondente ao driver desejado.

Para a função de driver quando se utiliza a interface RS-232, foi empregado o circuito conversor de nível MAX232, produzido originalmente pela Maxim. A pinagem e o circuito típico de aplicação do circuito integrado MAX232 e seus compatíveis são mostrados na Figura 70.

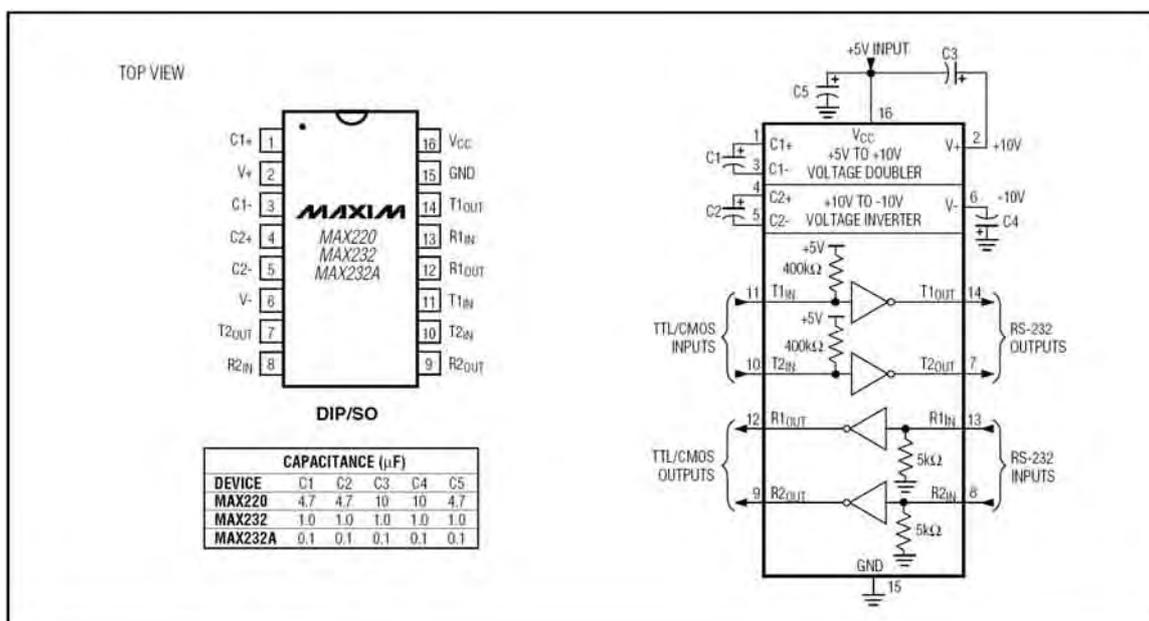


Figura 70 - MAX220, MAX232 e MAX232A - Pinagem e Conexões (Fonte: MAXIM)

Este circuito integrado é composto por 2 transmissores e dois receptores padrão EIA-232, além de todos os circuitos necessários à obtenção das tensões empregadas neste tipo de interface ( $\pm 10V_{cc}$ ) a partir de alimentação simples em 5V. Sua função é adequar os níveis de tensão empregados na interface (0 lógico = +3V a +25V; 1 lógico = -3V a -25V) aos níveis utilizados pelo microcontrolador.

A interface RS-232 permite apenas a comunicação ponto-a-ponto, sendo portanto adequada quando se emprega apenas um equipamento conectado a um microcomputador, em um sistema supervisor de apenas um ponto. Quando se deseja a comunicação com mais de um equipamento através de uma única interface de comunicação, torna-se necessário o emprego de uma rede de comunicação. Em ambientes industriais, é comum a utilização de interfaces de comunicação padrão EIA-485 (RS-485) para esta finalidade.

O protótipo possui embutido o recurso para utilização em redes, bastando a substituição do circuito integrado empregado como driver. Para a utilização

desta interface, remove-se o MAX232 e insere-se no soquete apropriado o driver MAX485, que é composto por um transeptor diferencial half-duplex capaz de excitar uma rede balanceada RS-485. A Figura 71 mostra a pinagem e o circuito típico de aplicação do MAX485 e seus compatíveis.

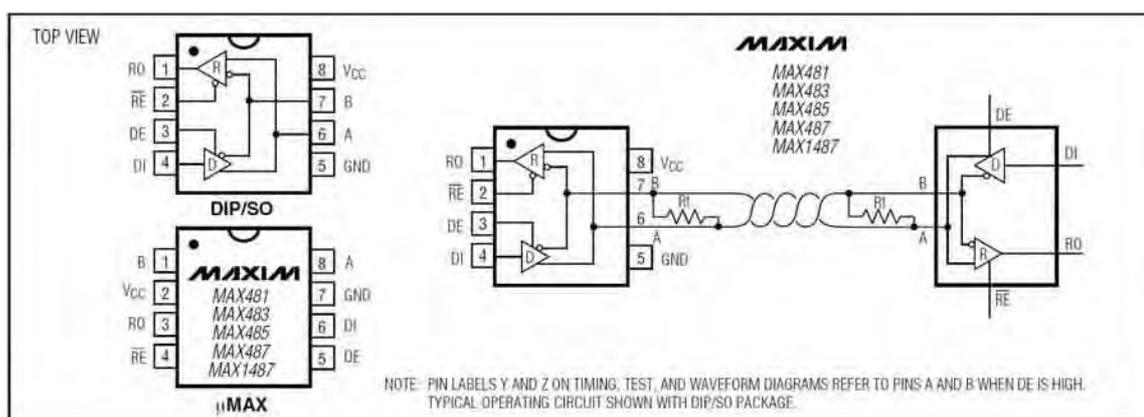


Figura 71 - MAX485 e seus compatíveis - Pinagem e Aplicação Típica (Fonte: MAXIM)

#### 7.4.7 Fonte de Alimentação

O circuito eletrônico do controlador é alimentado por meio de uma fonte chaveada em configuração flyback, operando em 250kHz, baseada no controlador PWM UC3844. Possui transformador composto por quatro enrolamentos: Um primário, para operação em configuração flyback, um secundário destinado à alimentação do circuito PWM da própria fonte, um secundário com saída de 8V x 500mA destinado à alimentação da parte lógica do equipamento, e um secundário com saída de 24V x 1A, destinado à alimentação dos relés das placas de saída.

Sua configuração admite alimentação monofásica com tensões entre 90Vca e 160Vca, em 60Hz. As saídas são isoladas do circuito de entrada, mas possuem conexão ao ponto comum do sistema de medição (neutro). O controle de tensão é realizado por realimentação do secundário através de circuito opto-isolador, com saída atuante diretamente sobre o controlador PWM. O circuito secundário de 8Vcc alimenta um regulador de tensão linear autoprotégido de 5V,  $\pm 5\%$ , que fornece alimentação ao microcontrolador e demais circuitos lógicos envolvidos.

O emprego de uma fonte chaveada proporciona excelente imunidade do circuito a ruídos provenientes da rede originados por chaveamentos de

cargas de potência elevada, tornando maior sua estabilidade de operação e reduzindo a ocorrência de erros por problemas de alimentação, além de aumentar a eficiência na conversão, quando comparada a fontes lineares de mesma potência.

#### **7.4.8 Saídas de Controle**

As ações de controle são disponibilizadas na forma de acionamento de relés de baixa corrente, com capacidade de manipulação de cargas até 2A em 250Vca. O controle das bobinas dos relés é opticamente isolado dos circuitos lógicos, elevando a imunidade do sistema a ruídos de comutação. Cada contato é protegido por varistores de óxido de zinco, que reduzem o centelhamento produzido no chaveamento e prolongam a vida útil dos contatos.

Cada módulo de saída é composto por um conjunto de 8 relés com contatos reversíveis, e permitem o acionamento individual dos relés.

#### **7.4.9 Capacidade de Expansão Futura**

Os módulos de saída são acionados de forma serial, e possuem conectores que permitem a ligação em cascata de mais de um módulo. A limitação inicial do protótipo é de 4 módulos em cascata, por limitações da fonte de alimentação, mas pode perfeitamente ser expandida com a elevação da capacidade de fonte.

Por software define-se quantas saídas serão destinadas ao controle de fator de potência e quantas serão empregadas pelo algoritmo de controle de máxima demanda, tornando o sistema flexível e capaz de se adaptar às necessidades da instalação.

#### **7.4.10 Estrutura Funcional do Protótipo**

O protótipo pode ser representado por sua estrutura funcional mostrada na Figura 72, que exhibe a organização do equipamento quanto às placas que o compõem, e também a localização dos principais componentes.

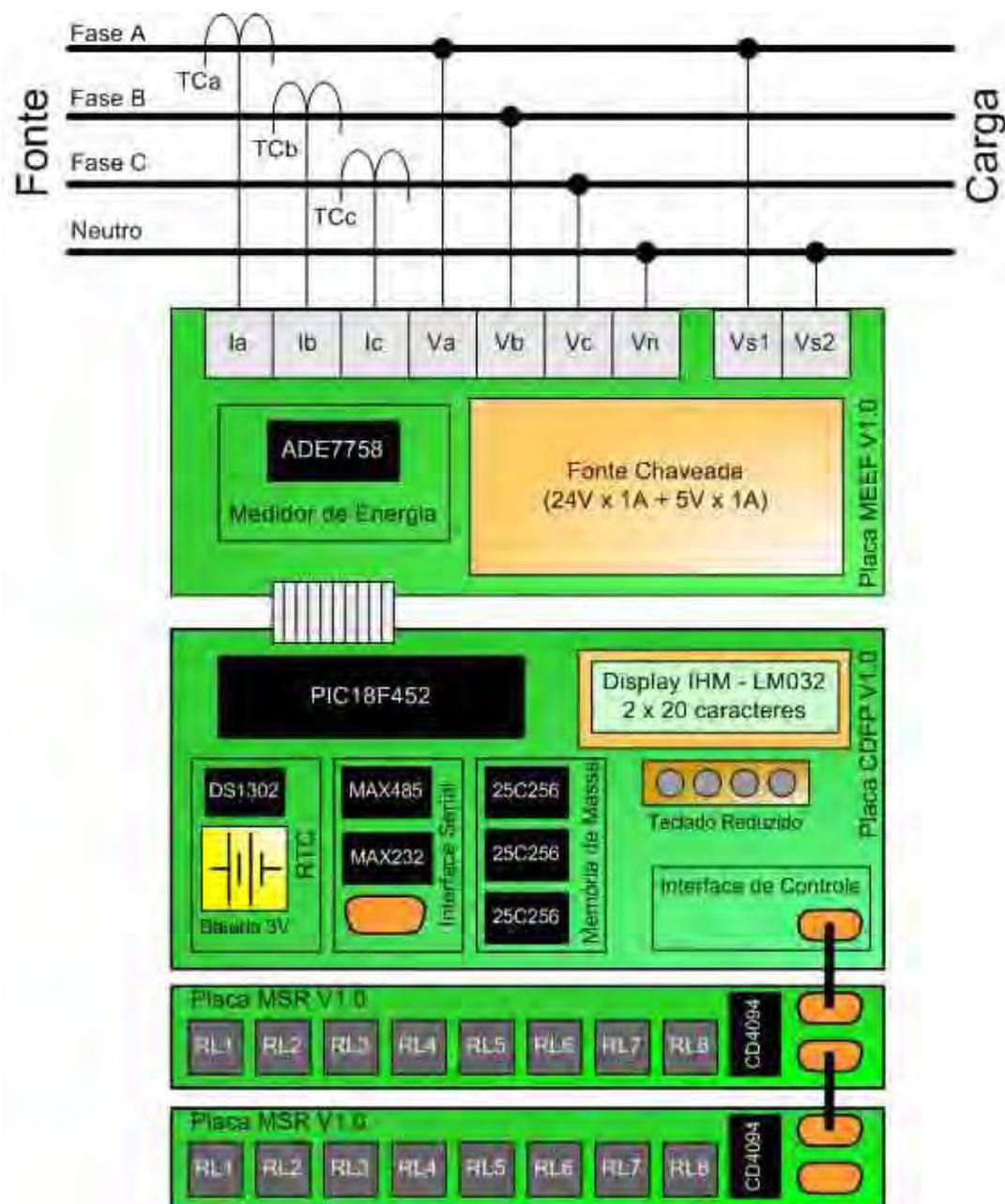


Figura 72 - Estrutura Funcional do protótipo

## 7.5 Elementos de Software

### 7.5.1 Programa Principal

O programa principal implementado no equipamento, com o fluxograma mostrado na Figura 73, é composto por uma seqüência de inicialização e um loop infinito, e as principais ações são executadas a partir de chamadas disparadas por interrupções.



**Figura 73 - Fluxograma do Programa Principal**

Na seqüência de inicialização, os principais parâmetros de operação do equipamento são carregados da memória EEPROM do próprio chip do microcontrolador, os parâmetros de configuração do circuito medidor são transferidos, os dados do relógio de tempo real são carregados e as principais variáveis de medição são recuperadas da região de armazenamento permanente localizada na memória RAM do relógio de tempo real.

Ainda durante a inicialização, a mensagem de apresentação é mostrada no display da IHM, e um período de estabilização da fonte de alimentação do

circuito medidor é aguardado. Após este período de aproximadamente 2 segundos, as saídas de controle são atualizadas para o último estado registrado, e o equipamento entra em fase operacional. Neste instante, o programa principal fecha-se em um loop infinito, que realiza a constante verificação de ocorrência e eliminação de erro de recepção na USART, sendo quebrado apenas para o tratamento das diversas sub-rotinas ativadas por interrupções que compõem o programa.

### **7.5.2 Sistema de Tratamento de Interrupções**

O programa principal é complementado por um conjunto de sub-rotinas chamadas por meio de interrupções, que podem ser síncronas quando acionadas por elementos de temporização internos, ou assíncronas, quando são disparadas por eventos externos ao microcontrolador.

Entre as interrupções síncronas podemos citar a Interrupção do Timer 0 (INT\_TIMER0), associada à sincronização de eventos internos, e Interrupção do Timer 3 (INT\_TIMER3), associada ao estouro do tempo de recepção (timeout) da USART. As interrupções assíncronas utilizadas são a interrupção por recepção de caracteres pela USART (INT\_RDA), alteração dos pinos do Port B (INT\_RB) e Requisição externa de interrupção #1 (INT\_EXT1)

### **7.5.3 Interrupções do Timer 0**

A interrupção gerada pelo estouro de contagem do Timer 0 chama as execuções das rotinas de apresentação de dados na tela da IHM, define a execução das sub-rotinas de controle de demanda máxima e de fator de potência, e atualiza o estado das saídas de controle, como indicado pelo fluxograma da Figura 74. Seu disparo é realizado de forma síncrona, tendo como clock a frequência do processador dividida por 32.

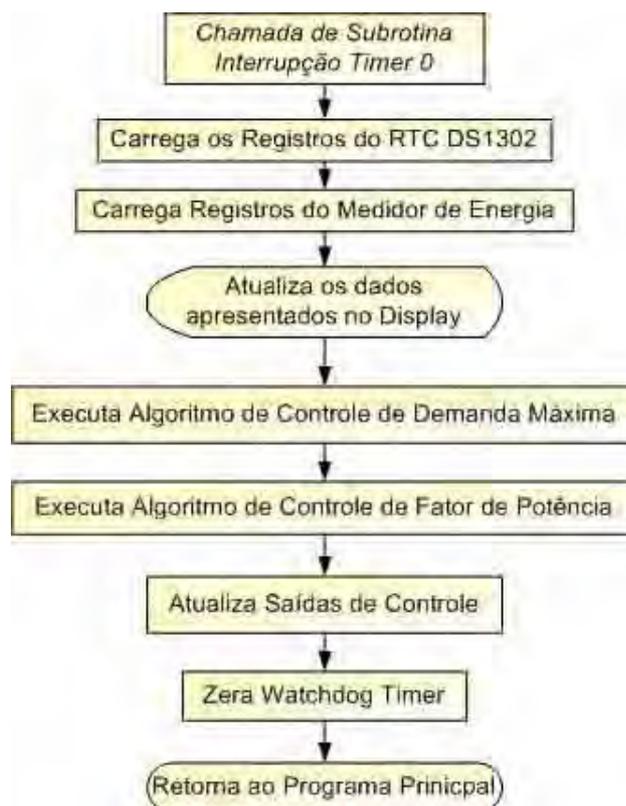


Figura 74 - Sub-Rotina - Interrupção do Timer 0

#### 7.5.4 Interrupções do Timer 3

O Timer 3 é um contador de tempo empregado para se sinalizar o fim de recepção de uma mensagem através da interface de comunicação serial (USART). Quando ocorre o estouro de contagem do Timer 3, verifica-se a chegada e inicia-se o tratamento da mensagem recebida através de sua validação. Uma vez validada, a mensagem é interpretada, a resposta é montada e em seguida enviada pela interface de comunicação serial, completando a comunicação com o dispositivo externo (Figura 75).

O tratamento da mensagem pela sub-rotina só ocorre quando existe recepção de caracteres, indicada pelo preenchimento do buffer de recepção. O clock do Timer 3 é síncrono, correspondendo à frequência interna de processamento dividida por 8.



Figura 75 - Sub-Rotina - Interrupção do Timer 3

### 7.5.5 Interrupções da USART

A recepção de caracteres pela USART dispara uma interrupção que leva a uma sub-rotina de preenchimento de um vetor de recepção, mostrada pelo fluxograma da Figura 76.

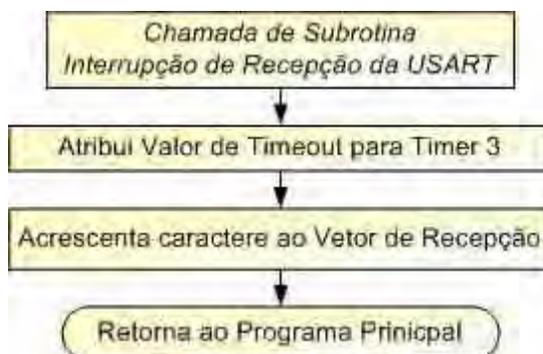


Figura 76 - Sub-Rotina - Interrupção de Recepção da USART

Ao se iniciar o preenchimento deste vetor, uma sub-rotina secundária de gerenciamento de tempo-limite é disparada, de forma que o vetor será considerado completamente preenchido após a ocorrência do estouro do temporizador implementado pelo Timer 3 (Timeout de Recepção).

### 7.5.6 Interrupções do Port B – Teclado

A detecção de utilização do teclado é realizada através da interrupção gerada pela mudança de estado nos pinos RB4 a RB7, do PORTB. A cada alteração no estado de um destes pinos, a rotina de interrupção detecta qual tecla foi pressionada ou liberada, e a correspondente ação é executada.

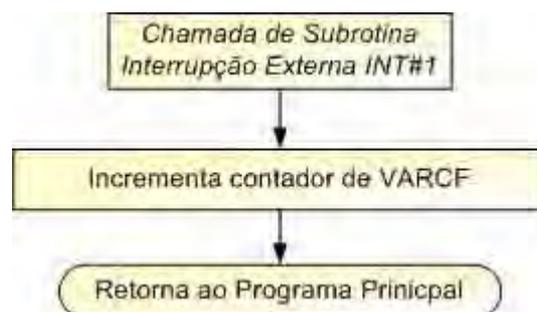
A rotina, apresentada no fluxograma da Figura 77, leva em conta qual é o status atual da tela de apresentação para definir a função da tecla, já que cada uma possui mais de uma função conforme o contexto de utilização.



Figura 77 - Sub-rotina - Interrupção do Port B

### 7.5.7 Interrupção Externa 1

A interrupção externa 1 (INT\_EXT1) é empregada para se incrementar o contador de pulsos proveniente da saída VARCF do circuito integrado medidor de energia. Sua rotina de tratamento resume-se ao incremento da variável de contagem do pulso VARCF, que posteriormente é tratado e computado como parâmetro de medida da energia reativa do circuito.



**Figura 78 - Sub-rotina - Interrupção Externa INT#1**

### 7.5.8 Timer/Contador 1

O Timer 1 foi configurado como contador assíncrono de 16 bits, incrementado através de entrada de clock externa fornecida pela saída de pulsos VACF, proveniente do circuito integrado medidor de energia. Por se tratar de um contador independente, não requer rotinas de software para seu tratamento. A leitura do Timer 1 pelo software de controle fornece a quantidade de pulsos aplicada à entrada de contagem, proporcional ao consumo de energia ativa computada pelo circuito medidor.

### 7.5.9 Apresentação de Mensagens

As mensagens são apresentadas no display da interface homem-máquina em intervalos definidos pela interrupção do Timer 0. As variáveis e dados apresentados dependem do modo de operação definido e dos endereços das variáveis selecionadas.

### 7.5.10 Menus da IHM

A interface homem-máquina proporciona a comunicação entre o equipamento e o operado por meio de mensagens apresentadas em um display alfanumérico organizado em duas linhas de vinte caracteres cada. Neste display são exibidos, conforme o modo de operação, menus de parametrização e mensagens com parâmetros de execução.

É permitida a navegação entre os menus e mensagens pelo uso do teclado da IHM, composto por quatro teclas com as funções Incrementa, Decrementa, Shift e Enter. Pelo teclado é possível realizar a consulta e alteração a qualquer parâmetro de

operação do equipamento. Caso o parâmetro alterado seja destinado somente à leitura, a operação de escrita não afetará seu valor.

As telas de operação mostram os principais parâmetros da instalação e o status do equipamento e de suas saídas de controle. São indicadas as potências ativa, ativa e aparente, por fase e total, além do horário do relógio de tempo real e os valores atribuídos às saídas de controle de fator de potência e de demanda máxima.

A Figura 79 mostra um exemplo de tela de operação, onde na primeira linha estão o horário, a data e o dia da semana. Na segunda linha, estão mostradas as variáveis  $Dout$  e  $FPout$ , que representam a quantidade de saídas ativas do controlador de demanda máxima e do controlador de fator de potência, respectivamente.



Figura 79 - Tela de Operação - Relógio e Estado das Saídas

O display mostrado na Figura 80 apresenta a tela de operação no modo indicador de dados por fase. Neste exemplo, estão exibidos os valores de potência ativa ( $P_a$ ), potência reativa ( $Q_a$ ) e potência aparente ( $S_a$ ) da fase A do medidor.



Figura 80 - Tela de Operação - Dados por Fase

O modo de parametrização do equipamento é indicado pela apresentação do endereço do parâmetro na primeira linha do display, e o nome da variável e seu valor atual na segunda linha, como mostrado na Figura 81.



**Figura 81 - Tela de Parametrização**

#### **7.5.11 Leitura e Parametrização do CI Medidor – ADE7758**

O Circuito Integrado ADE7758 é um dispositivo programável, permitindo o ajuste de suas variáveis internas de cálculo e operação. Esta programação é realizada toda vez que o equipamento é inicializado, e os parâmetros usados estão armazenados em memória EEPROM interna ao microcontrolador, permitindo a calibração do equipamento para adequação aos componentes externos empregados no condicionamento dos sinais e a recuperação dos dados de calibração a cada inicialização.

#### **7.5.12 Leitura e Parametrização do RTC – DS1302**

O relógio de tempo real DS1302 requer uma inicialização por software, para ajuste de seu modo de operação. Este ajuste é realizado a cada inicialização, e não afeta a operação do relógio caso este já esteja inicializado.

O sistema de alimentação de reserva, composto pela bateria associada ao circuito do RTC, permite que o relógio permaneça em operação mesmo após a interrupção de fornecimento da fonte principal, e também mantém a retenção dos dados armazenados na memória RAM existente internamente ao circuito integrado.

#### **7.5.13 Protocolo de Comunicação**

A comunicação com dispositivos externos é realizada através da USART, utilizando a implementação das funções 3 e 6 do protocolo MODBUS para leitura e escrita dos registros internos do equipamento. Para a comunicação, é necessária a atribuição de um endereço de rede ao equipamento, que será seu identificador nos processos de escrita e leitura de dados.

#### 7.5.14 Comando dos Módulos de Saída

Os módulos de saída são comandados através do envio serial dos bytes correspondentes aos registros de controle de demanda máxima e de fator de potência. Cada módulo acionado corresponde a um byte, onde cada bit está relacionado a um relé de saída. O acréscimo de módulos de saída requer apenas que mais bytes sejam associados aos registros de controle. As saídas são atualizadas a cada segundo, mesmo que não ocorra alteração no último valor registrado, garantindo o acionamento da seqüência correta mesmo no caso de interferências que possam modificar os estados das saídas.

#### 7.6 Organização física do protótipo

O protótipo está fisicamente organizado em dois conjuntos distintos: o módulo de medição e controle e o módulo de saídas. O módulo de medição e controle é composto pelo arranjo na forma empilhada das placas do medidor de energia e da fonte, do controle lógico microcontrolado e pelo display da interface homem-máquina, formando um arranjo compacto dotado de conectores e bornes para conexão dos diversos sinais externos. Seu aspecto, sem o display da IHM, é mostrado na Figura 82.



Figura 82 - Módulo de Medição e Controle - Vista sem o Display da IHM

Para a utilização do módulo de medição e controle, foi montado um bastidor em acrílico transparente com a instalação dos transformadores de corrente, dos bornes de força e dos conectores das interfaces de comunicação e de acionamento do módulo de saídas. Foram empregados transformadores de corrente toroidais de construção miniaturizada, e capacidade de operação nominal com corrente de primário de 100 Ampéres e corrente de secundário de 0,2 Ampéres, resultando em um conjunto de transdutores de tamanho reduzido e com capacidade adequada à aplicação proposta. Embora os transformadores de corrente empregados operem com uma relação de 100:0,2, o emprego de outros componentes também é possível, sendo necessária apenas a parametrização adequada da relação de transformação utilizada.

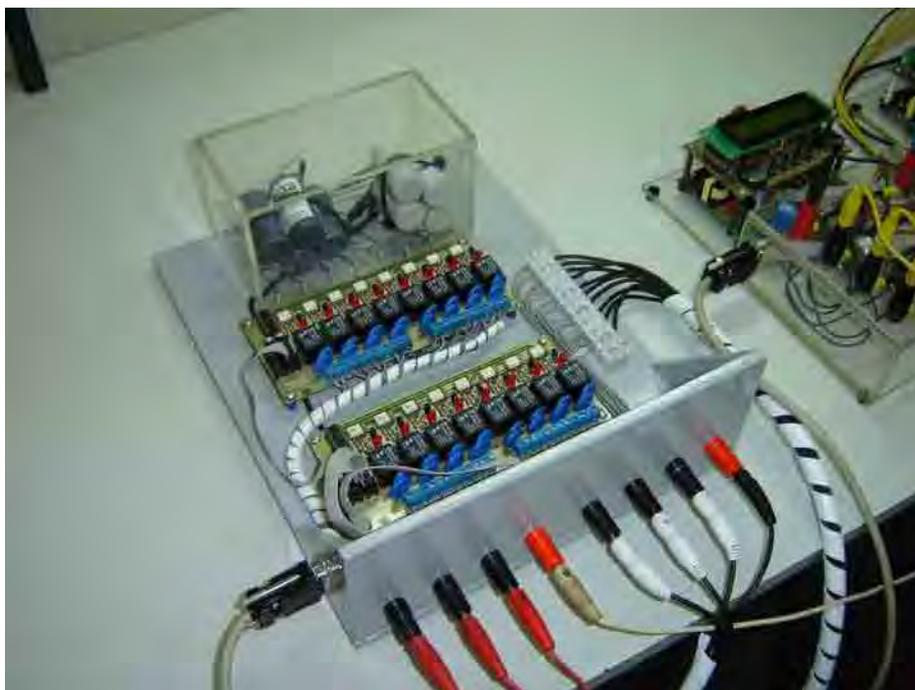
No protótipo empregado nos experimentos, cada condutor fase atravessou três vezes o interior do TC, reduzindo a relação de transformação para 33,3:0,2A. Este artifício foi empregado para permitir a ocupação de uma faixa maior da resolução do medidor na leitura dos valores de corrente manipulados no experimento, e ao mesmo tempo reduzir a interferência produzida pelos campos magnéticos originados nos condutores adjacentes. O aspecto do protótipo de módulo de medição e controle utilizado no experimento é mostrado na Figura 83.



**Figura 83 - Módulo de Medição e Controle - Conjunto Montado**

O módulo de saídas do protótipo é composto por duas placas de saídas a relés conectadas em cascata, destinadas ao acionamento das cargas controláveis e dos capacitores de correção de fator de potência. Das 16 saídas disponíveis, 8 são empregadas no controle de demanda máxima e 8 são utilizadas na correção do fator de potência.

As placas foram montadas sobre um arranjo de material isolante, contendo os bornes de força, as conexões das cargas controláveis e um invólucro transparente contendo os capacitores utilizados na correção de fator de potência do experimento, além do conector da interface de acionamento proveniente do módulo de medição e controle. A Figura 84 mostra o módulo de saída a relés empregado no experimento.



**Figura 84 - Módulo de Saídas a Relés - Conjunto Montado**

### **7.6.1 Placa do Controlador - CDFP V1.00**

Esta placa abriga o microcontrolador e seus periféricos diretos: Display e teclado da IHM, Relógio de tempo real e interface de comunicação serial. Na Figura 85 observa-se o aspecto da placa, com a disposição dos componentes locados sob o espaço destinado ao display, reduzindo o tamanho físico da placa.

A placa tem a mesma largura do display empregado para a apresentação dos dados na IHM. O teclado, composto por quatro chaves miniaturizadas de acionamento momentâneo está localizado abaixo da posição ocupada pelo display, possibilitando a composição da IHM com dimensões reduzidas, acessível diretamente pela parte frontal da placa.

Para a função de fonte de reserva para o relógio de tempo real, a placa conta com uma bateria de lítio de 3V, com duração estimada de 3 anos em condição de falta de alimentação da rede. Esta bateria é responsável pela manutenção da operação e armazenamento dos registros internos do relógio de tempo real.



**Figura 85 - Placa CDFP V1.00**

À direita do microcontrolador é possível notar a presença de espaços para circuitos integrados, que são destinados à colocação de memória de massa do tipo EEPROM, e à esquerda do microcontrolador observa-se outro espaço para a colocação de um circuito integrado, destinado à adequação de níveis para a utilização de interface serial padrão EIA RS485 (acima da bateria do RTC). Quando é empregada a interface RS485, o driver para a interface RS232 é removido do circuito, para evitar conflitos na linha de dados recebidos.

Os conectores para terminais de cabos planos localizados na borda superior da placa são os pontos de conexão da interface RS232 e do primeiro módulo de saída a relés. No canto inferior direito está instalado um conector padrão RJ45, para a conexão do equipamento a redes padrão RS485.

### 7.6.2 Placa do Medidor de Energia e Fonte - MEEF V1.0

A placa MEEF V1.0 contém o circuito medidor de energia e todos seus periféricos, e a fonte de alimentação chaveada responsável pelo suprimento de energia de todos os componentes do equipamento. As conexões dos terminais de medição são feitas por meio dos bornes localizados na parte inferior direita da placa, e a alimentação da fonte chaveada é realizada nos bornes da parte inferior esquerda.

O circuito medidor, localizado à direita da placa, é composto pelo circuito integrado ADE7758 e por seus componentes acessórios, destinados à adequação do nível e filtragem dos sinais e à geração da base de tempo do medidor. O circuito da fonte de alimentação, localizado à esquerda da placa, é composto por um retificador de onda completa, capacitores de alta tensão, transistor de chaveamento, transformador, circuitos de controle PWM, retificadores, filtros e reguladores de baixa tensão.

A placa do controlador recebe a alimentação e os sinais do circuito medidor através da barra de pinos prolongados situada no topo da placa. A montagem empilhada torna compacto o equipamento, e a redução do comprimento dos condutores de interligação aumenta a imunidade a ruídos do conjunto. A Figura 86 mostra o aspecto físico da placa MEEF V1.0.

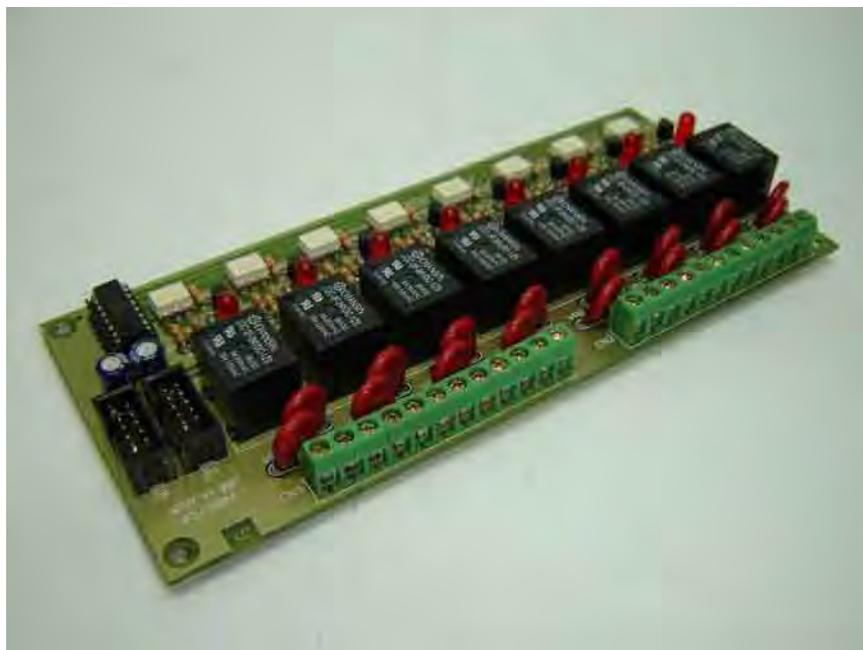


Figura 86 - Placa MEEF V1.0

### 7.6.3 Placa do Módulo de Saídas a Relés - MSR V1.0

A placa de saída a relés traduz as ações de controle do equipamento em manipulação dos contatos dos relés, de forma a permitir a manipulação de elementos externos. Cada placa é composta por 8 relés de 1 contato reversível, com capacidade de

manipulação máxima de 5A a 250Vca, sendo recomendável para uma operação segura limitar essa corrente em 2A a 250Vca, como mostrado na Figura 87.



**Figura 87 - Placa MSR V1.0**

Possui elementos de isolamento óptica entre o circuito lógico de acionamento e o circuito de manipulação das bobinas dos relés, de forma a isolar ruídos originados por chaveamento dos contatos. A supressão de transientes é realizada por varistores de óxido de zinco em paralelo como os contatos dos relés, capazes de limitar sobretensões e centelhamento em níveis aceitáveis à operação dos relés, e reduzir a emissão eletromagnética que poderia afetar a operação dos circuitos eletrônicos presentes..

O acionamento dos módulos de relés é realizado de forma serial unidirecional, por meio de registradores de deslocamento, permitindo a conexão de múltiplas placas em cascata. Para facilitar esta conexão, cada placa MSR V1.0 é dotada de 2 conectores de 10 pinos, um para a conexão da entrada de dados e outro para a conexão de outra placa em seqüência.

### **7.7 Comparativo de Custos com Equipamentos Comerciais**

O custo de fabricação do equipamento foi estimado para fins de comparação com produtos similares existentes no mercado. O índice de comparação

empregado foi o Dólar norte-americano, e para melhor definição foram apresentados os custos para produções de 100 e de 1000 conjuntos. A Tabela 4 mostra os custos de cada componente do conjunto:

**Tabela 4 - Custos Unitários do Equipamento**

<b>Componente</b>	<b>Custo Unitário (Produção : 10 unidades)</b>	<b>Custo Unitário (Produção: 100 unidades)</b>
Módulo de Medição e Controle, incluindo placas MEEF, CDFP, TC's para 100A e gabinete metálico	US\$320,80	US\$240,56
Módulo de Saídas a Relés, contendo 8 saídas para controle de Demanda Máxima e 8 saídas para controle de Fator de Potência montados em gabinete metálico	US\$262,96	US\$186,12
Acessórios para interconexão (cabos de controle de 10 metros e cabo de comunicação RS232)	US\$45,20	US\$35,20
<b><i>Total para Configuração Mínima:</i></b>	<b><i>US\$628,96</i></b>	<b><i>US\$461,88</i></b>

Convém observar que a produção em maiores quantidades resulta em significativa redução no custo da unidade. Os valores apontados referem-se à configuração básica do equipamento, com 16 saídas de controle e cabo de comunicação entre os módulos de medição de saída com 10 metros de comprimento. Permite ligação a instalações trifásicas de 220/127V com corrente máxima de 100 Amperes, sendo possível a utilização em sistemas de outras tensões e correntes mediante adequação dos TC's e dos divisores resistivos do medidor.

Seu custo foi comparado ao de três equipamentos de características similares, produzidos por indústrias nacionais e com valores para fornecimento unitário de suas configurações básicas, cujas funcionalidades estão apresentadas na Tabela 5.

Notar que apesar de possuir a maioria das funcionalidades oferecidas pelos produtos industrializados, o equipamento possui custo de produção muito inferior. Esta diferença se deve, em grande parte, ao software de gerenciamento e parametrização fornecido com os equipamentos, que no caso do protótipo não é um item obrigatório para sua operação, e também à interface de comunicação padrão ETHERNET, que permite conexão direta a redes de computadores.

Tabela 5 - Comparativo de custos de equipamentos similares

<b>Funcionalidade</b>	<b>Equipamento A</b>	<b>Equipamento B</b>	<b>Equipamento C</b>	<b>Protótipo Desenvolvido</b>
Controle de Demanda Máxima	<i>sim</i>	<i>sim</i>	<i>sim</i>	<i>sim</i>
Controle de Fator de Potência	<i>sim</i>	<i>sim</i>	<i>sim</i>	<i>sim</i>
Medição Trifásica Integrada	<i>não</i>	<i>não</i>	<i>não</i>	<i>sim</i>
Conexão em Rede (RS485)	<i>sim</i>	<i>sim</i>	<i>sim</i>	<i>sim</i>
Conexão ponto a ponto (RS232)	<i>não</i>	<i>não</i>	<i>não</i>	<i>sim</i>
Conexão ETHERNET	<i>sim</i>	<i>não</i>	<i>sim</i>	<i>não</i>
Conexão Internet	<i>não</i>	<i>não</i>	<i>sim</i>	<i>não</i>
Protocolo Industrial	<i>sim</i>	<i>sim</i>	<i>sim</i>	<i>sim</i>
Capacidade de Expansão	<i>sim</i>	<i>não</i>	<i>sim</i>	<i>sim</i>
Número de Saídas (básico)	8 (até 128)	12	8 (até 64)	16 (até 64)
Software específico (proprietário)	<i>sim</i>	<i>sim</i>	<i>sim</i>	<i>não</i>
Parametrização no equipamento	<i>sim</i>	<i>não</i>	<i>não</i>	<i>sim</i>
Interface Homem-Máquina	<i>sim</i>	<i>não</i>	<i>não</i>	<i>sim</i>
Memória de Massa	<i>sim</i>	<i>sim</i>	<i>sim</i>	<i>opcional</i>
Algoritmo Preditivo	<i>sim</i>	<i>sim</i>	<i>sim</i>	<i>sim</i>
Algoritmo Janela Móvel	<i>sim</i>	<i>sim</i>	<i>sim</i>	<i>não</i>
<b>Custo da Configuração Básica</b>	<b>US\$2.761,20</b>	<b>US\$2.696,00</b>	<b>US\$2.029,20</b>	<b>US\$461,88*</b>

\*Para produções acima de 100 peças.

## 7.8 Conclusões

O protótipo foi concebido de forma modular e dotado de capacidade de expansão futura, de forma bastante simples e prática. Todas as precauções de projeto foram tomadas para que a operação em ambiente industrial não tornasse o equipamento vulnerável a ruídos, fossem estes provenientes de fontes externas ou da própria rede de alimentação.

O projeto da fonte de alimentação contemplou a operação em uma extensa faixa de tensões de alimentação, de forma a permitir a operação segura do equipamento mesmo sob condições de variação na tensão de fornecimento. A utilização de

uma fonte chaveada de alta frequência reduziu substancialmente o tamanho do circuito e proporcionou um excelente isolamento dos ruídos provenientes do sistema de distribuição.

A operação do equipamento de forma independente mostrou-se simples e de fácil assimilação, auxiliada pela interface alfanumérica e pelo teclado de funções combinadas. O retorno das ações de controle é exibido na tela padrão de operações, permitindo o acompanhamento em tempo real da atuação do sistema de controle incorporado.

Visando facilitar a integração do equipamento ao sistema de potência das instalações, os módulos de saída foram projetados de forma a permitir sua instalação afastada da unidade de medição e controle, mantendo com este uma comunicação de modo serial unidirecional, com uso de poucos condutores.

O uso de transformadores de corrente como transdutores aumenta a versatilidade do equipamento, permitindo sua aplicação em instalações com uma grande faixa de potências, necessitando apenas que se ajuste a parametrização relativa à relação dos TC's empregados.

Um comparativo de custos demonstrou que o protótipo apresenta valor bastante inferior ao de seus similares industrializados, com diferenças funcionais bastante pequenas, justificando seu emprego em instalações de médio e pequeno porte.

## **8 ENSAIOS E RESULTADOS**

### **8.1 Montagem do Experimento**

O experimento para a avaliação do comportamento do protótipo foi montado com os seguintes componentes:

- Módulo Controlador de Demanda e Fator de Potência
- Conjunto contendo as Saídas de Controle e os capacitores para correção do fator de potência
- Carga controlável composta por um estande de 8 lâmpadas incandescentes de 200W cada, representando os elementos da instalação passíveis de controle
- Carga Resistiva Variável, composta por um arranjo de três eletrodos mergulháveis em solução salina, representando as cargas não controláveis da instalação
- Carga Indutiva Variável, composta por um indutor trifásico com núcleo dotado de entreferro variável, capaz de proporcionar variação na componente de potência reativa indutiva da instalação
- Carga Capacitiva Variável, composta por três bancos de capacitores permanentes acionados por interruptores, capaz de proporcionar variação na componente reativa capacitiva da instalação

## 8.2 Parâmetros do Circuito de Aplicação

- Sistema de Alimentação: Trifásico Balanceado, 220V, 60Hz
- Potência das Cargas Controláveis: 8 estágios de 200W cada, conectados em Y (elementos ligados entre Fase e Neutro)
- Capacitores de correção de Fator de Potência: 4 unidades de 3uF e 4 unidades de 3,5uF, compondo 8 estágios ligados em Y (elementos ligados entre Fase e Neutro)
- Carga Resistiva Variável: Potência de 3kW (Figura 88)
- Carga Capacitiva Variável: 2 estágios de 270VAr e 1 estágio de 180VAr (Figura 89.a)
- Carga Indutiva Variável: Potência Reativa de 50VAr a 1500VAr (Figura 89.b)

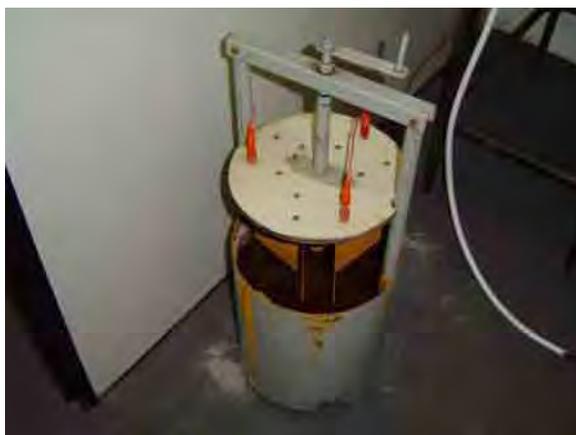
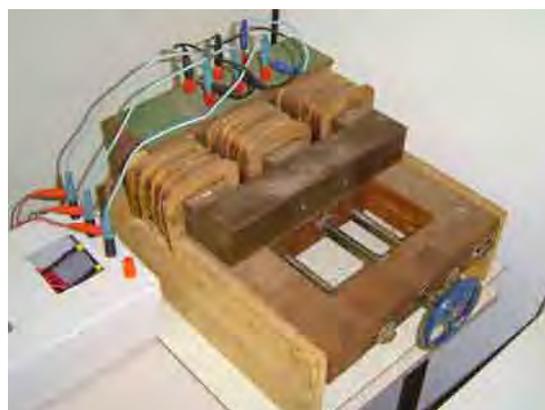


Figura 88 - Carga Resistiva Variável



(a) Carga Capacitiva Variável



(b) Carga Indutiva Variável

Figura 89 - Cargas Reativas

### 8.3 Metodologia empregada

Para validação do experimento montou-se uma instalação contendo elementos capazes de simular as variações de carga e de potência reativa. O controlador de demanda máxima teve ligado às suas saídas de controle elementos representando cargas sujeitas ao controle, e o módulo de saída de controle de fator de potência foi conectado a capacitores destinados à correção dos reativos do circuito.

Para o registro dos resultados do experimento foi empregada uma aplicação escrita para o software Elipse SCADA, que coletava os dados relativos aos parâmetros selecionados através da porta de comunicação serial do equipamento, empregando protocolo MODBUS, e os gravava em uma planilha compatível com o software Microsoft Excel.

Para cada experimento, os parâmetros relevantes são selecionados e a aplicação realiza a leitura dos valores destes parâmetros a intervalos regulares. As condições dinâmicas da instalação são simuladas através da intervenção sobre as cargas variáveis, que produzem o carregamento adequado à ação de controle que se deseja verificar.

### 8.4 Planilhas de Dados Coletados

Os dados coletados foram armazenados em planilhas compatíveis com o software Microsoft Excel. Cada planilha possui até 10 variáveis diferentes, selecionáveis durante a operação do software supervisor, permitindo que apenas os dados de real interesse ao experimento sejam armazenados. A Tabela 6 mostra um trecho de uma das planilhas obtidas durante a operação do experimento sob supervisão do aplicativo desenvolvido no Elipse SCADA.

Nesta planilha, observamos os registros do instante da amostragem (coluna TEMPO), e dos valores armazenados em cada variável lida (colunas V1 a V20), sendo o conteúdo de cada linha correspondente a uma amostragem. A configuração adotada para o aplicativo realiza o registro dos endereços dos parâmetros nas variáveis ímpares V1 a V19, e o valor do conteúdo dos respectivos parâmetros nas variáveis pares V2 a V20. A interpretação destes valores mostra, por exemplo, que o parâmetro cujo endereço está armazenado em V1 tem valor registrado em V2 da mesma linha, e assim por diante.

A partir das planilhas de dados foram obtidos os gráficos de operação e as respostas dinâmicas do protótipo em funcionamento como controlador de demanda máxima e de fator de potência da instalação experimental.

**Tabela 6 - Amostra dos dados coletados durante o experimento**

TEMPO	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20
10:19:10	8	7	105	40	112	2401	120	465	121	171	130	28	1	10	2	24	3	17	0	0
10:19:12	8	8	105	40	112	2400	120	476	121	180	130	30	1	10	2	24	3	19	0	0
10:19:13	8	8	105	40	112	2624	120	476	121	198	130	31	1	10	2	24	3	22	0	0
10:19:15	8	8	105	40	112	2740	120	496	121	202	130	33	1	10	2	24	3	22	0	0
10:19:16	8	8	105	40	112	2740	120	516	121	220	130	34	1	10	2	24	3	25	0	0
10:19:18	8	8	105	40	112	2739	120	518	121	224	130	36	1	10	2	24	3	25	0	0
10:19:19	8	8	105	40	112	2739	120	537	121	241	130	37	1	10	2	24	3	28	0	0
10:19:21	8	8	105	40	112	2740	120	539	121	246	130	39	1	10	2	24	3	28	0	0
10:19:22	8	8	105	40	112	2740	120	559	121	263	130	40	1	10	2	24	3	31	0	0
10:19:24	8	8	105	40	112	2736	120	561	121	267	130	42	1	10	2	24	3	31	0	0
10:19:25	8	8	105	40	112	2738	120	574	121	278	130	43	1	10	2	24	3	32	0	0
10:19:27	8	8	105	40	112	2738	120	574	121	296	130	45	1	10	2	24	3	35	0	0
10:19:28	8	8	105	40	112	2738	120	594	121	300	130	46	1	10	2	24	3	35	0	0
10:19:30	8	8	105	40	112	2738	120	613	121	317	130	48	1	10	2	24	3	38	0	0
10:19:31	8	8	105	40	112	2741	120	615	121	322	130	49	1	10	2	24	3	38	0	0
10:19:33	8	8	105	40	112	2736	120	629	121	333	130	51	1	10	2	24	3	39	0	0
10:19:34	8	8	105	40	112	2740	120	629	121	350	130	52	1	10	2	24	3	42	0	0
10:19:36	8	8	105	40	112	2739	120	648	121	354	130	54	1	10	2	24	3	42	0	0
10:19:37	8	8	105	40	112	2739	120	668	121	372	130	55	1	10	2	24	3	45	0	0
10:19:39	8	8	105	40	112	2737	120	670	121	376	130	57	1	10	2	24	3	45	0	0
10:19:40	8	8	105	40	112	2736	120	683	121	387	130	58	1	10	2	24	3	47	0	0
10:19:42	8	8	105	40	112	2738	120	683	121	404	130	60	1	10	2	24	3	50	0	0
10:19:43	8	8	105	40	112	2735	120	702	121	409	130	61	1	10	2	24	3	50	0	0
10:19:45	8	8	105	40	112	2735	120	722	121	426	130	63	1	10	2	24	3	53	0	0
10:19:46	8	8	105	40	112	2733	120	724	121	430	130	64	1	10	2	24	3	53	0	0
10:19:48	8	8	105	40	112	2737	120	737	121	441	130	66	1	10	2	24	3	54	0	0
10:19:49	8	8	105	40	112	2734	120	737	121	458	130	67	1	10	2	24	3	57	0	0
10:19:51	8	8	105	40	112	2733	120	757	121	463	130	69	1	10	2	24	3	57	0	0
10:19:52	8	8	105	40	112	2733	120	776	121	480	130	70	1	10	2	25	3	0	0	0

Para cada condição operacional simulada foi gerada uma planilha de dados contendo os parâmetros de interesse na análise do comportamento do equipamento, e dessas planilhas foram extraídos gráficos demonstrando a resposta dinâmica dos sistemas de controle desenvolvidos para a validação do experimento. Os tempos de amostragem foram reduzidos de forma a tornar possível o registro de ações transitórias do sistema de controle, tornando mais precisa a avaliação dos resultados.

## 8.5 Curvas de Fator de Potência × Saídas de Controle

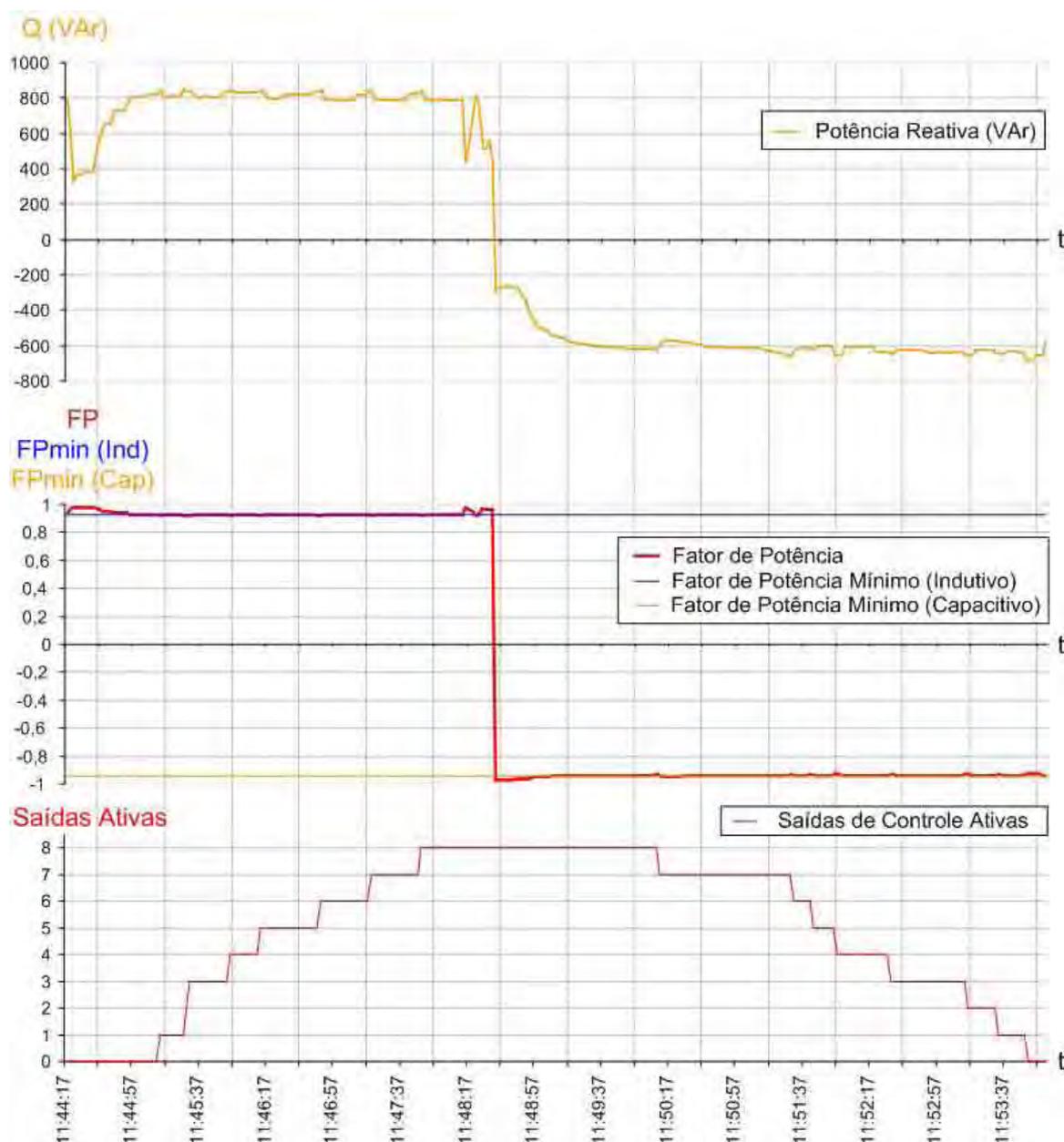
Para a avaliação do equipamento como controlador de fator de potência de cargas lineares, foram compostas planilhas contendo os dados de fator de

potência do sistema, a quantidade de saídas de controle acionadas e a potência reativa do sistema.

Durante o experimento, foi realizada a variação da potência reativa da instalação, de forma a provocar a atuação do controlador de fator de potência no sentido de manter o  $\cos(\varphi)$  dentro dos limites estabelecidos na parametrização do equipamento.

Os gráficos obtidos mostram o comportamento do equipamento diante da variação do fator de potência da instalação, tanto na aproximação do limite indutivo, onde inicia-se a inserção de unidades capacitivas para a devida compensação, quanto na aproximação do limite permitido para o fator de potência capacitivo, onde as células inseridas são gradualmente removidas, evitando que o fator de potência ultrapasse o limite estabelecido pela parametrização.

Na Figura 90 é possível observar que a elevação no nível de potência reativa indutiva produz uma redução do fator de potência da instalação.

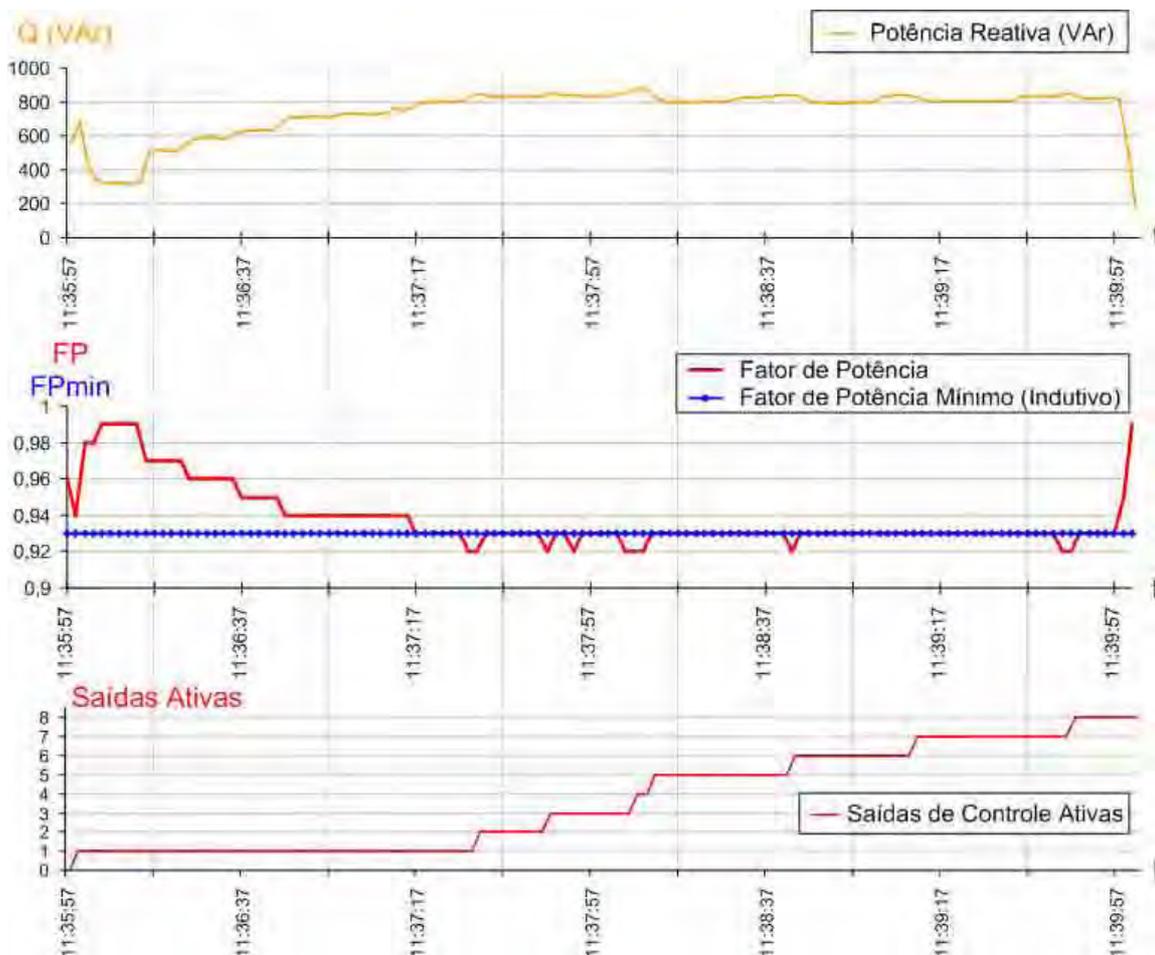


**Figura 90 - Atuação do Controlador de Fator de Potência**

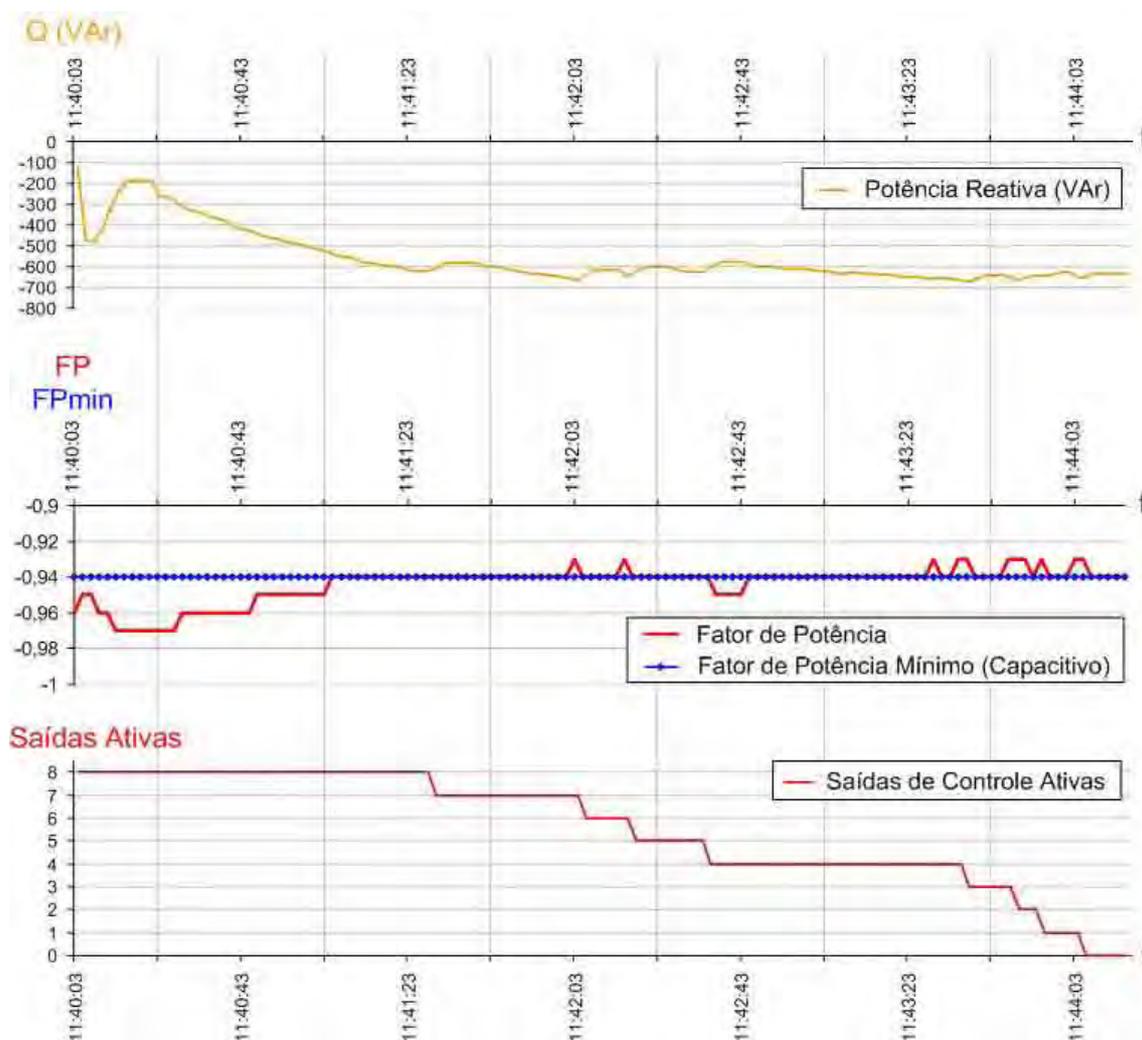
No instante em que o fator de potência se torna menor que o parâmetro definido pela variável "Fator de Potência Mínimo (Indutivo)" programada no equipamento, inicia-se a ação do controlador, inserindo cargas de caráter capacitivo ao circuito, mantendo praticamente constante o nível de potência reativa da instalação, e evitando desta forma a ultrapassagem do limite mínimo para o fator de potência indutivo.

Em um instante a seguir, a característica predominante da instalação passa a ser capacitiva, sinalizada pelo sinal negativo da potência reativa. Do mesmo modo, quando é ultrapassado o limite mínimo capacitivo definido pelo valor da

variável "Fator de potência Mínimo (Capacitivo)", o controlador remove as células capacitivas da instalação e mantém o nível de potência reativa capacitiva acima do limite permitido. Outros instantes de operação do equipamento podem ser avaliados pelas curvas de operação mostradas na Figura 91 e na Figura 92.



**Figura 91 - Atuação do Controlador de Fator de Potência - Cargas Indutivas**



**Figura 92 - Atuação do Controlador de Fator de Potência - Cargas Capacitivas**

Embora o controlador permita o acionamento automático de células capacitivas, convém salientar que o dimensionamento dos elementos reativos deve levar em conta a potência instalada e o fator de potência natural do sistema onde o equipamento será instalado, para que a inserção da quantidade máxima de unidades capacitivas seja suficiente para levar o fator de potência da instalação a níveis superiores ao limite mínimo estabelecido pela parametrização.

## 8.6 Curvas de Demanda do Sistema × Saídas de Controle

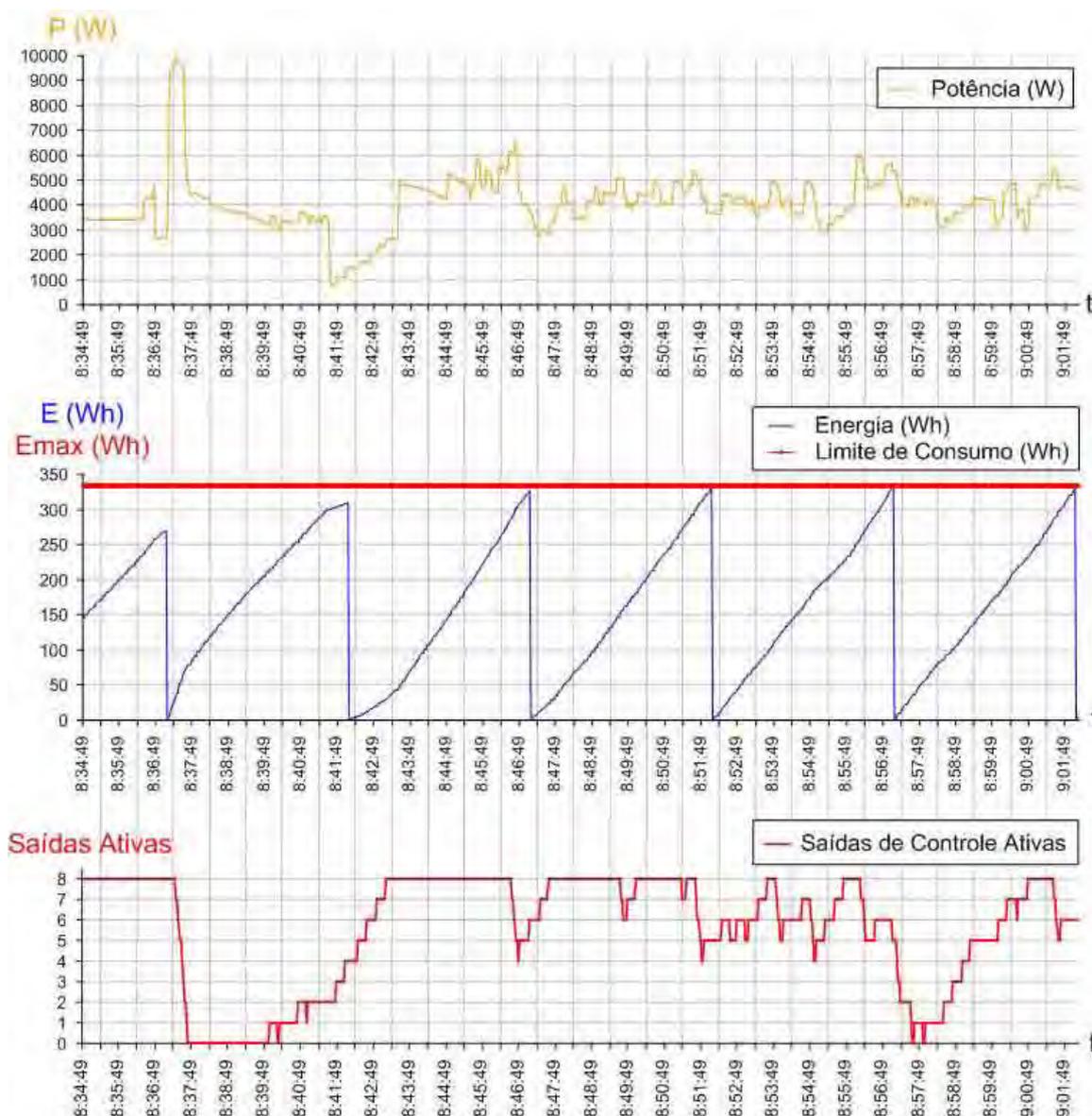
Para a validação do experimento com o equipamento utilizado como controlador de demanda máxima foram coletados dados nas planilhas relativos à

máxima demanda permitida, o intervalo de integralização de consumo, a potência do sistema e a quantidade de saídas de controle ativas.

Neste modo de operação, as principais variáveis do sistema são a potência da instalação, a energia acumulada no intervalo de integração, o limite de consumo permitido para o intervalo e a quantidade de saídas de controle ativas. O limite máximo de consumo é uma variável dependente do intervalo de integração utilizado e da demanda máxima permitida para o posto horário considerado (ponta ou fora de ponta), sendo automaticamente atualizado nos instantes definidos para a transição.

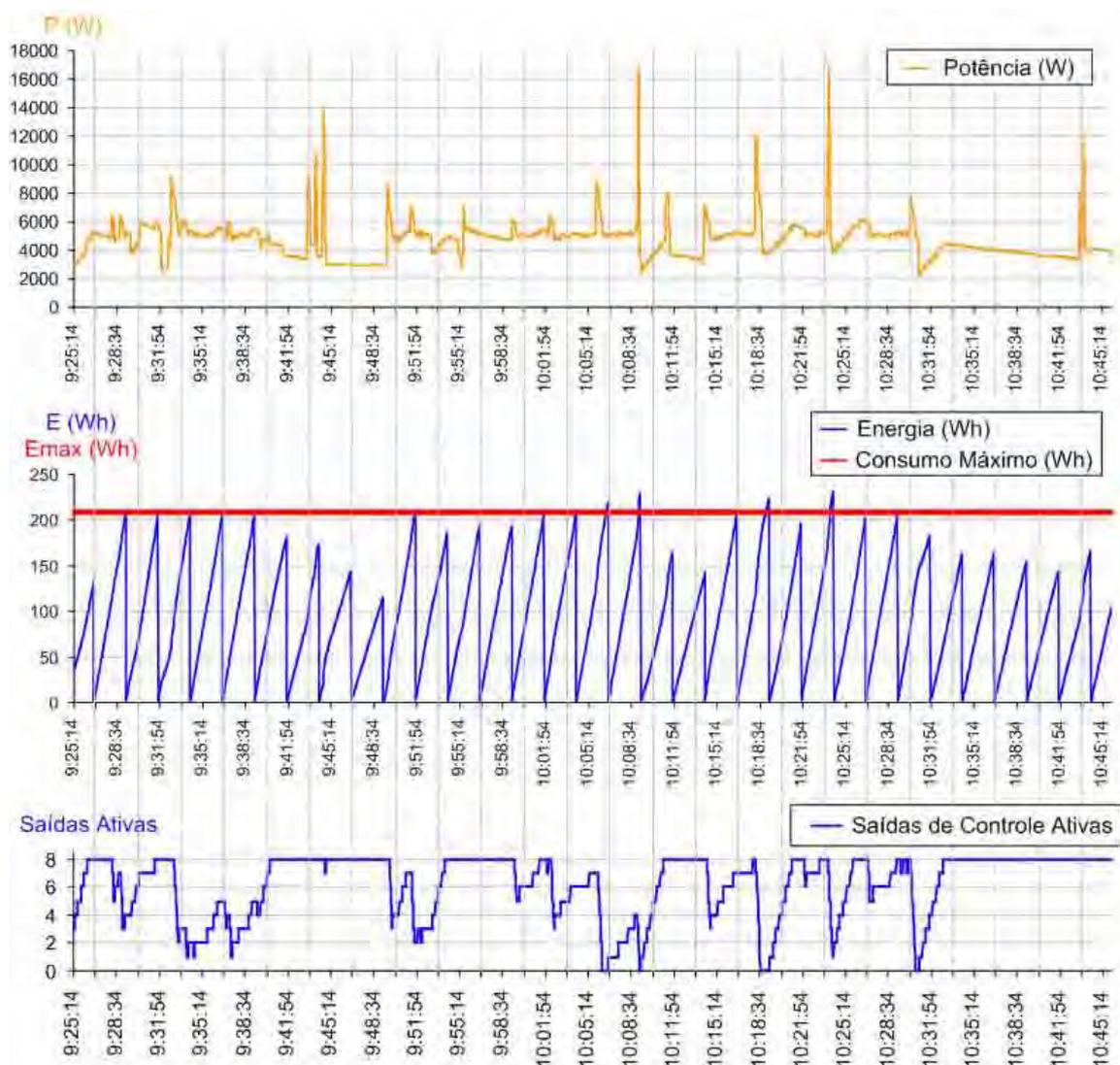
Para estimular a atuação do controlador de demanda máxima, variou-se a potência ativa do circuito por interferência na carga variável resistiva. Como resposta, a cada tendência à ultrapassagem sentida pelo algoritmo de controle, ocorria a remoção de um estágio de carga, reduzindo a potência instalada e diminuindo a tendência original à ultrapassagem da demanda máxima. Os dados coletados também contemplam a atuação do controlador durante as transições entre horário fora de ponta e horário de ponta, quando ocorre a mudança no valor da demanda máxima permitida.

A Figura 93 mostra de uma forma geral o comportamento do controlador de demanda máxima em condições de variação de carga na instalação, evidenciando a atuação sobre as saídas de controle para que a demanda máxima não seja ultrapassada a cada intervalo de integração.



**Figura 93 - Operação do Controlador de Demanda Máxima**

Ao longo do tempo, a atuação do controlador evita que as ultrapassagens de demanda máxima ocorram, desde que as cargas sujeitas ao controle apresentem potência total superior ao maior transitório de potência que possa ocorrer no sistema controlado. A operação do sistema em um intervalo maior pode ser observada na Figura 94.

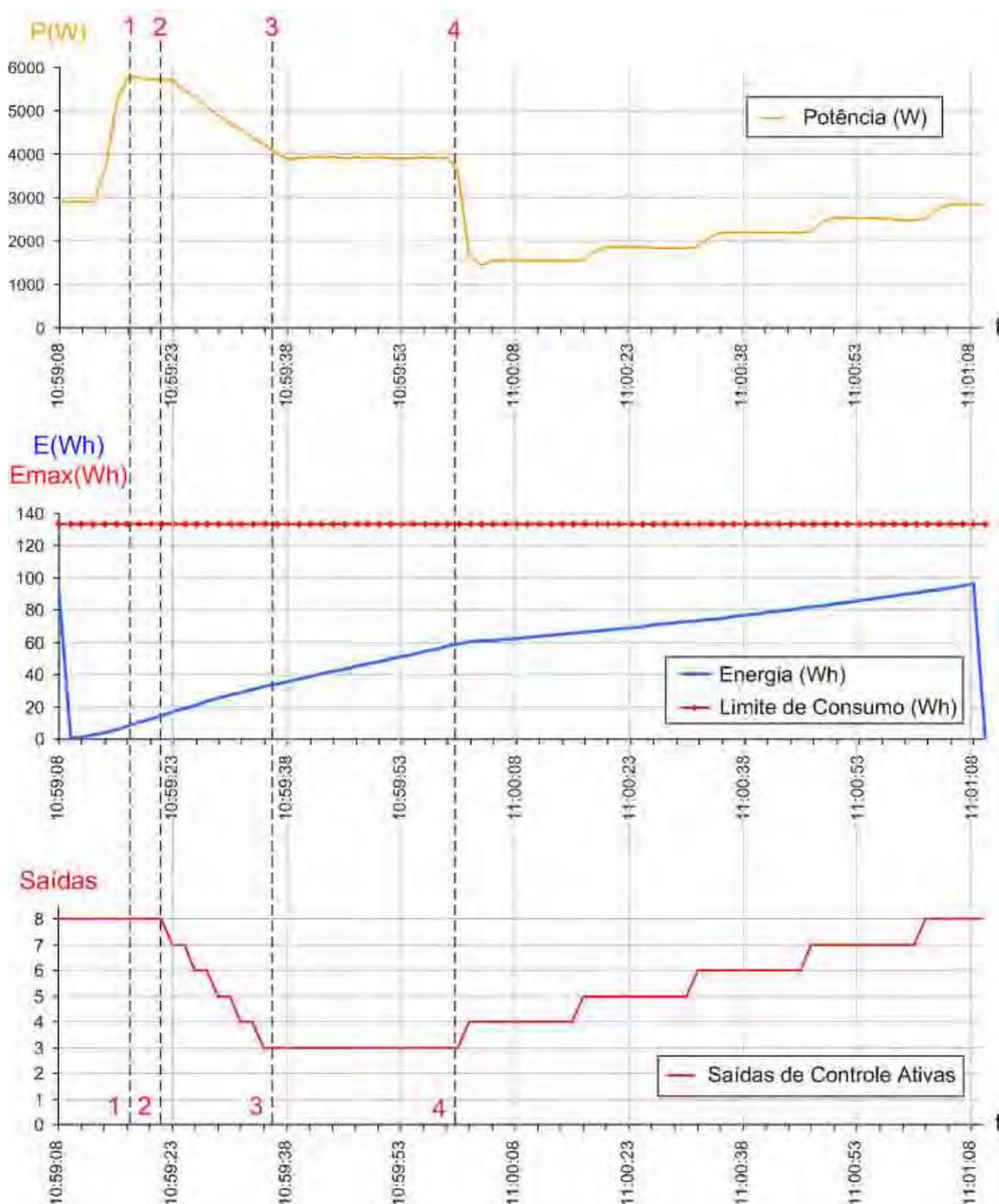


**Figura 94 - Atuação do Controlador de Demanda Máxima ao longo do tempo**

As ações de controle ocorrem através da contínua análise do consumo dentro de cada intervalo de integração. Na Figura 95 é possível observar o comportamento das saídas de controle quando ocorre o aumento na potência da instalação, produzindo uma tendência à ultrapassagem da Demanda Máxima. Ao ser detectada a tendência no instante **1**, as saídas de controle são seqüencialmente desativadas, a partir do instante **2**, até que esta tendência desapareça no instante **3**, mantendo a potência da instalação dentro de um limite que não produza ultrapassagem de demanda máxima até o término do intervalo de integração.

Ocorrendo uma redução na potência da instalação, sinalizada pelo instante **4**, o controlador detecta a possibilidade de reativar as cargas anteriormente removidas sem que ocorra nova tendência à ultrapassagem de Máxima Demanda. A partir

deste momento, o controlador passa a ativar seqüencialmente as saídas de controle, monitorando continuamente a curva de energia em função do tempo de forma a evitar o excessivo consumo dentro do intervalo de integração.

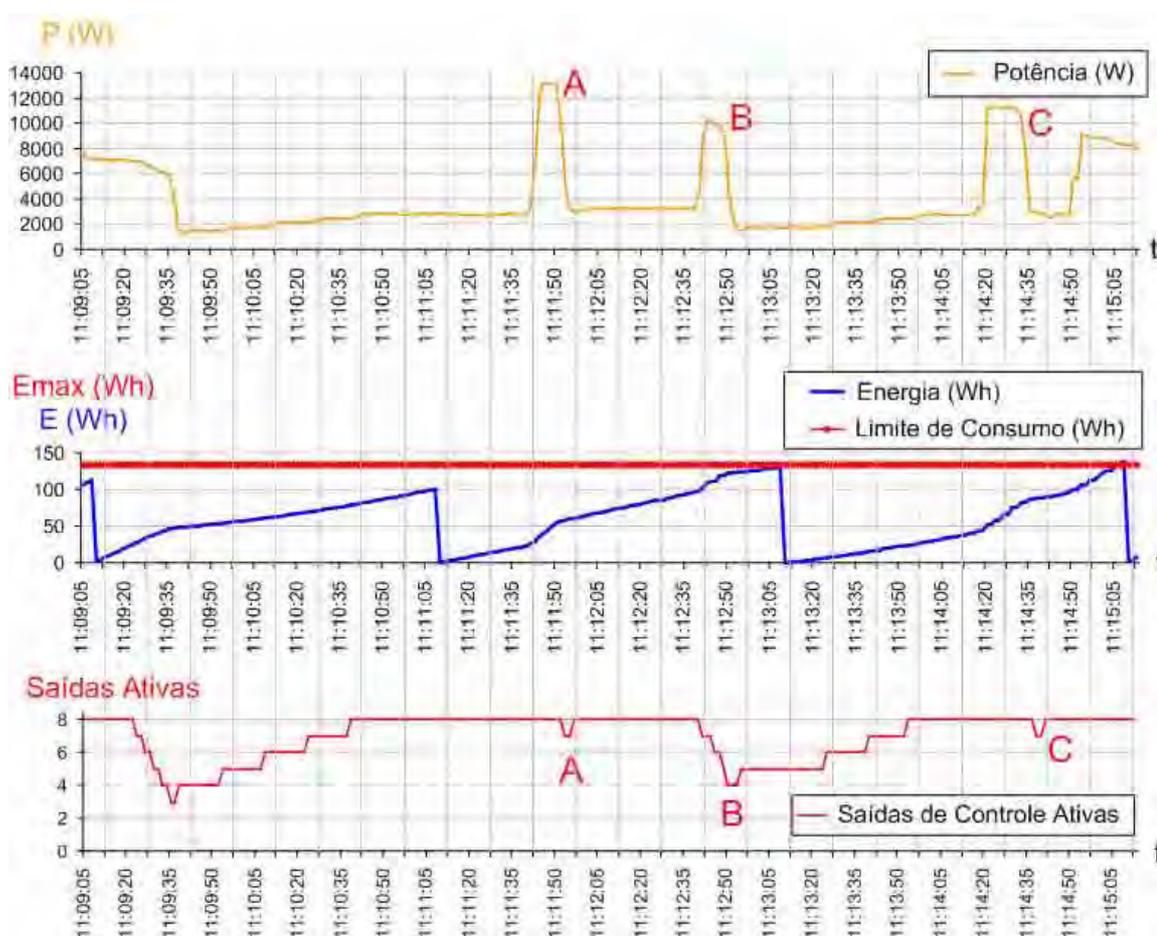


**Figura 95 - Controlador de Demanda Máxima - Atuação em um Intervalo de Integração**

O aumento transitório de potência da instalação, como o encontrado em partidas de motores de indução, não produz considerável efeito sobre a ação

do controlador, embora a presença contínua destes transitórios ou a elevação significativa da potência da instalação por um tempo considerável possam ser interpretadas como uma tendência permanente à ultrapassagem de demanda máxima e produzirem a atuação do sistema de controle.

Na Figura 96 notamos a atuação do controlador diante de dois impulsos significativos de potência dentro de um mesmo intervalo de integração. O impulso apresentado em **A**, embora represente uma elevação de potência da faixa dos 3kW para o limite dos 13kW, produziu apenas a atuação breve e transitória sobre uma saída de controle apenas. Logo em seguida, um impulso de amplitude aproximada de 10kW apresentado em **B** levou ao desligamento sucessivo de 4 saídas de controle, visto que naquele instante a tendência à ultrapassagem se apresentou mais intensa em virtude do histórico de consumo do intervalo de integração.



**Figura 96 - Controlador de Demanda Máxima - Reação a Impulsos de Potência**

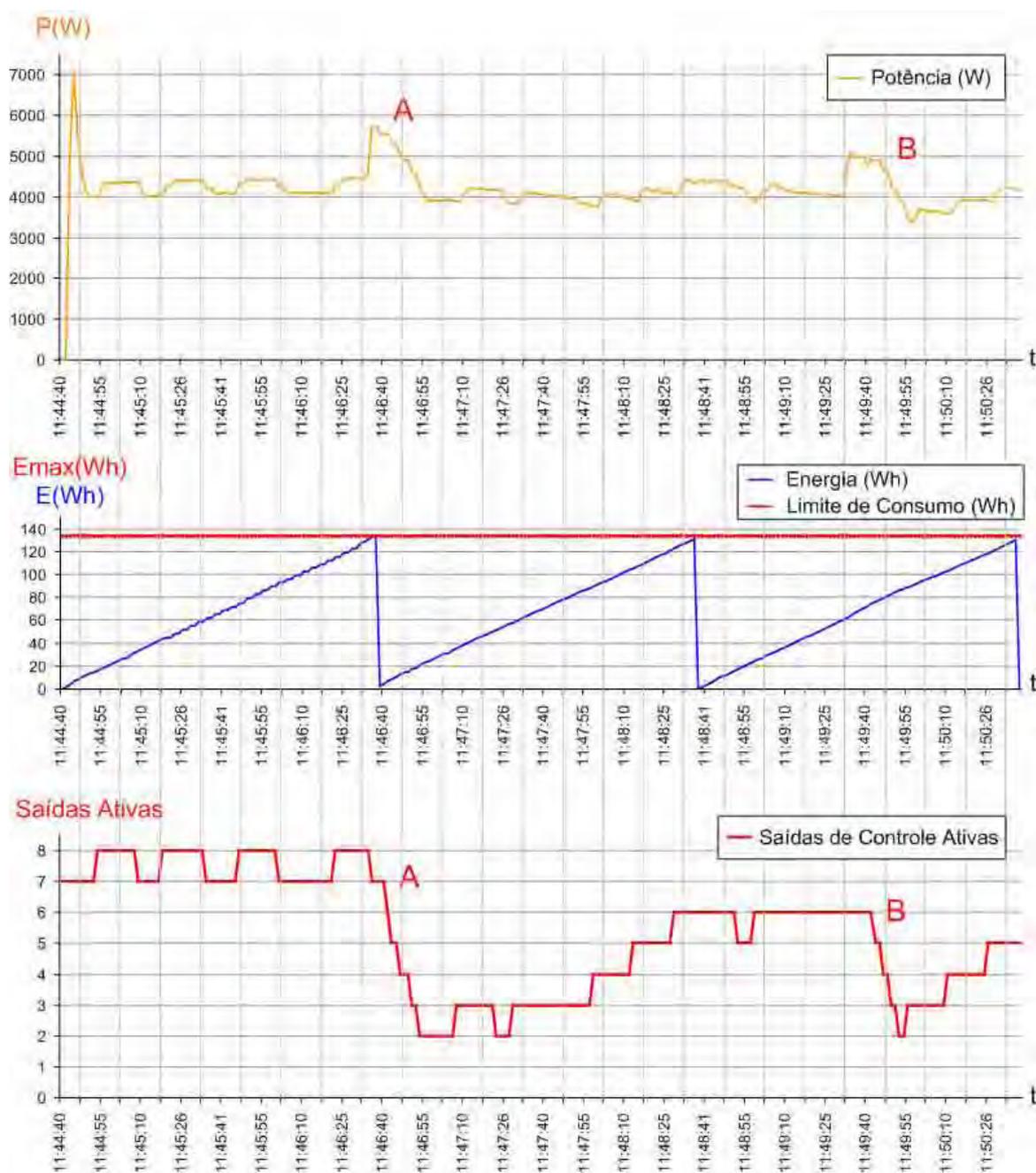
Tendo desaparecido a tendência e se iniciado um novo intervalo de integração, o controlador restabeleceu as saídas de controle e o sistema voltou a operar com todas as saídas ativadas. Um novo transitório (**C**) não produziu atuação significativa, pois a curva de consumo do novo intervalo não indicava uma tendência forte à ultrapassagem de demanda máxima.

Embora os impulsos não produzam a rápida atuação das saídas de controle, o aumento da potência da instalação em regime permanente proporciona um significativo aumento na sensibilidade de atuação do controlador. Quanto mais próximo do limite máximo de demanda, maior é a velocidade de atuação do controlador, mesmo para pequenos impulsos de potência.

A Figura 97 mostra o comportamento do equipamento quando opera com potências próximas ao limite estabelecido pela parametrização, onde a elevação do nível de potência do circuito produz a atuação rápida das saídas de controle no sentido de conter a ultrapassagem de demanda máxima da instalação.

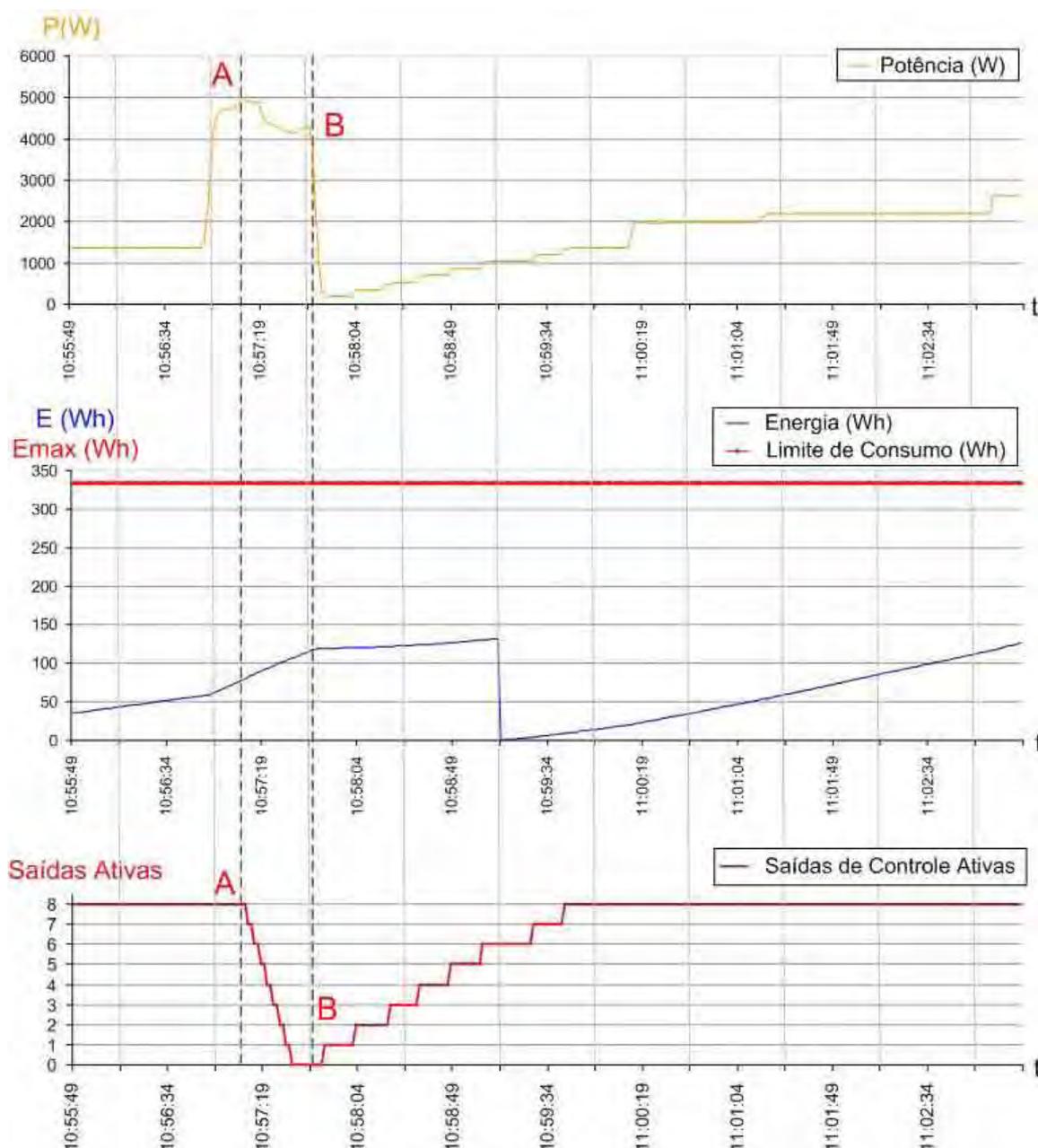
No instante **A** ocorre um aumento na potência do circuito, que leva à remoção de cargas. Após o desaparecimento da tendência à ultrapassagem, as cargas removidas são novamente acionadas, até que no instante **B** uma nova condição insegura é detectada, levando novamente ao desligamento de algumas saídas de controle.

O religamento das saídas de controle é realizado pelo equipamento sempre que se detecta o desaparecimento da tendência à ultrapassagem de demanda máxima, mesmo que o intervalo de integração não tenha chegado ao fim.



**Figura 97 - Reação a aumentos permanentes de Potência não-controlada na instalação**

Na Figura 98 podemos verificar que, mesmo após o desligamento de todas as saídas de controle produzido por uma elevação transitória de potência, indicada em **A**, o algoritmo de controle detectou a possibilidade de religar as cargas removidas no instante **B**, e iniciou a seqüência de ativação das saídas de controle.



**Figura 98 - Recuperação de Tendência à Ultrapassagem de Demanda Máxima**

A reativação das cargas só não ocorre dentro do mesmo intervalo de integração quando a ultrapassagem de demanda máxima tenha efetivamente ocorrido, ou quando a simples inserção de carga correspondente a uma das saídas de controle seja capaz de produzir a ultrapassagem.

O aumento no intervalo de integração através de intervenção na parametrização do equipamento produz a elevação no valor máximo de energia consumida permitido pelo controlador. Este recurso reduz a sensibilidade do sistema a variações

transitórias de potência, sem reduzir a velocidade de resposta em condições de detecção de ultrapassagem do limite de consumo máximo para o intervalo de integração. A Figura 99 mostra o controlador de demanda máxima operando com dois intervalos de integração diferentes, mas que produzem ações de controle que mantém a potência da instalação em torno de um valor médio igual.

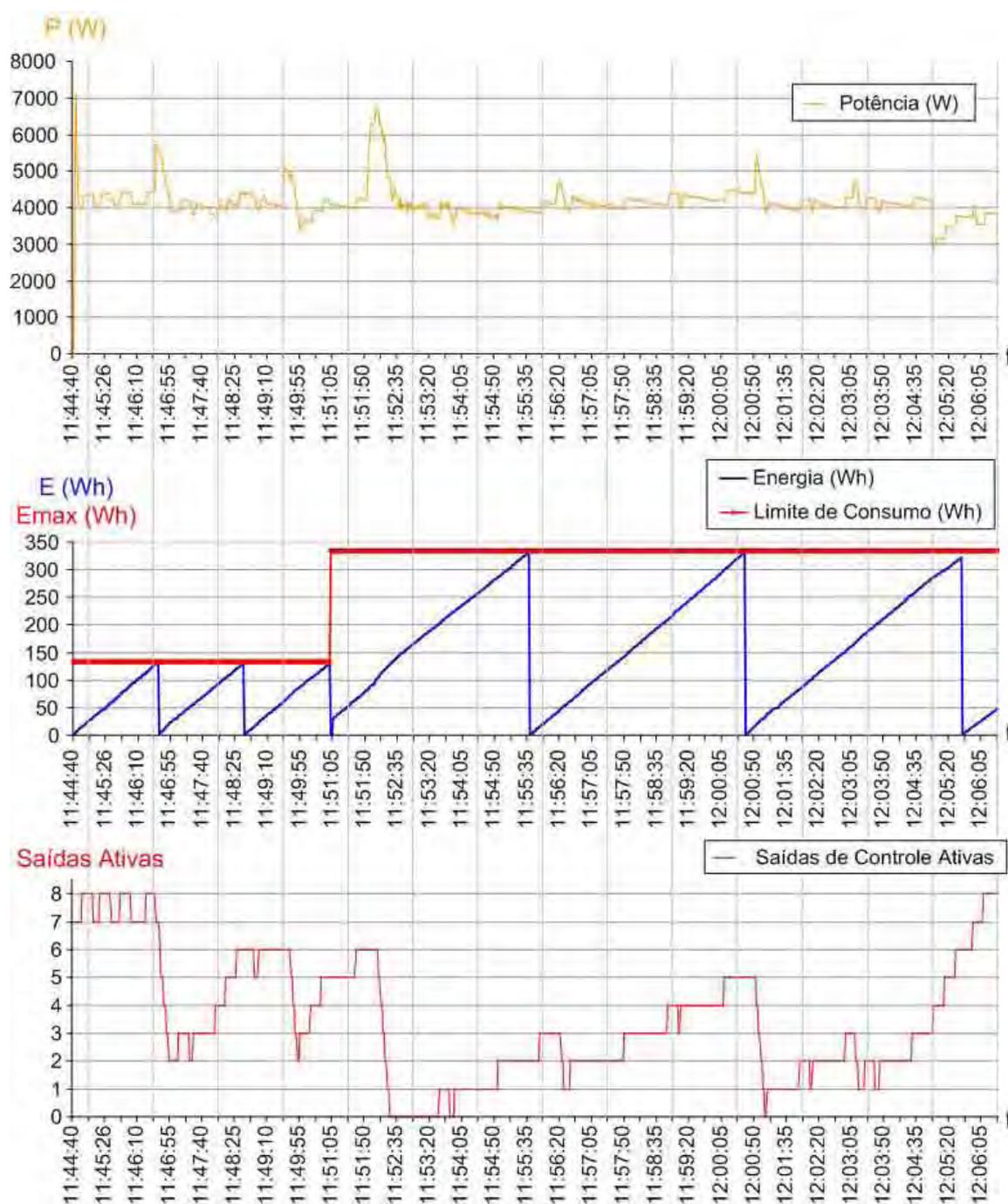


Figura 99 - Controle de Demanda Máxima com variação no Intervalo de Integração

A operação em condições de variação da demanda máxima em função do horário, como em sistemas onde se adota a tarifação horo-sazonal, também é uma característica de operação do equipamento proposto. Através de parâmetros configuráveis pelo usuário, determina-se a hora e o minuto de transição entre horários fora de ponta e horários de ponta, e também o valor de máxima demanda permitido para cada período. O controlador realiza então a limitação conforme a máxima demanda permitida para cada horário de operação, evitando que os limites contratuais sejam ultrapassados.

Na maioria dos casos, a diferença entre a demanda máxima fora de ponta e a demanda máxima de ponta é tal que se faz necessário o desligamento de grande parcela das cargas instaladas para que não ocorra a ultrapassagem do valor de demanda máxima contratada. A Figura 100 mostra o controlador atuando em uma transição para o horário de ponta (A) onde o desligamento parcial das saídas de controle foi suficiente para que desaparecesse a tendência à ultrapassagem do valor de demanda máxima para o intervalo.

Na Figura 101, a transição para o horário de ponta produz o desligamento de todas as saídas de controle, e ainda assim o controlador detecta a ocorrência efetiva de ultrapassagem do valor de demanda máxima. A reativação das cargas só ocorre após o início do novo intervalo de integração, após ser confirmado o desaparecimento da tendência à ultrapassagem do valor de demanda máxima.

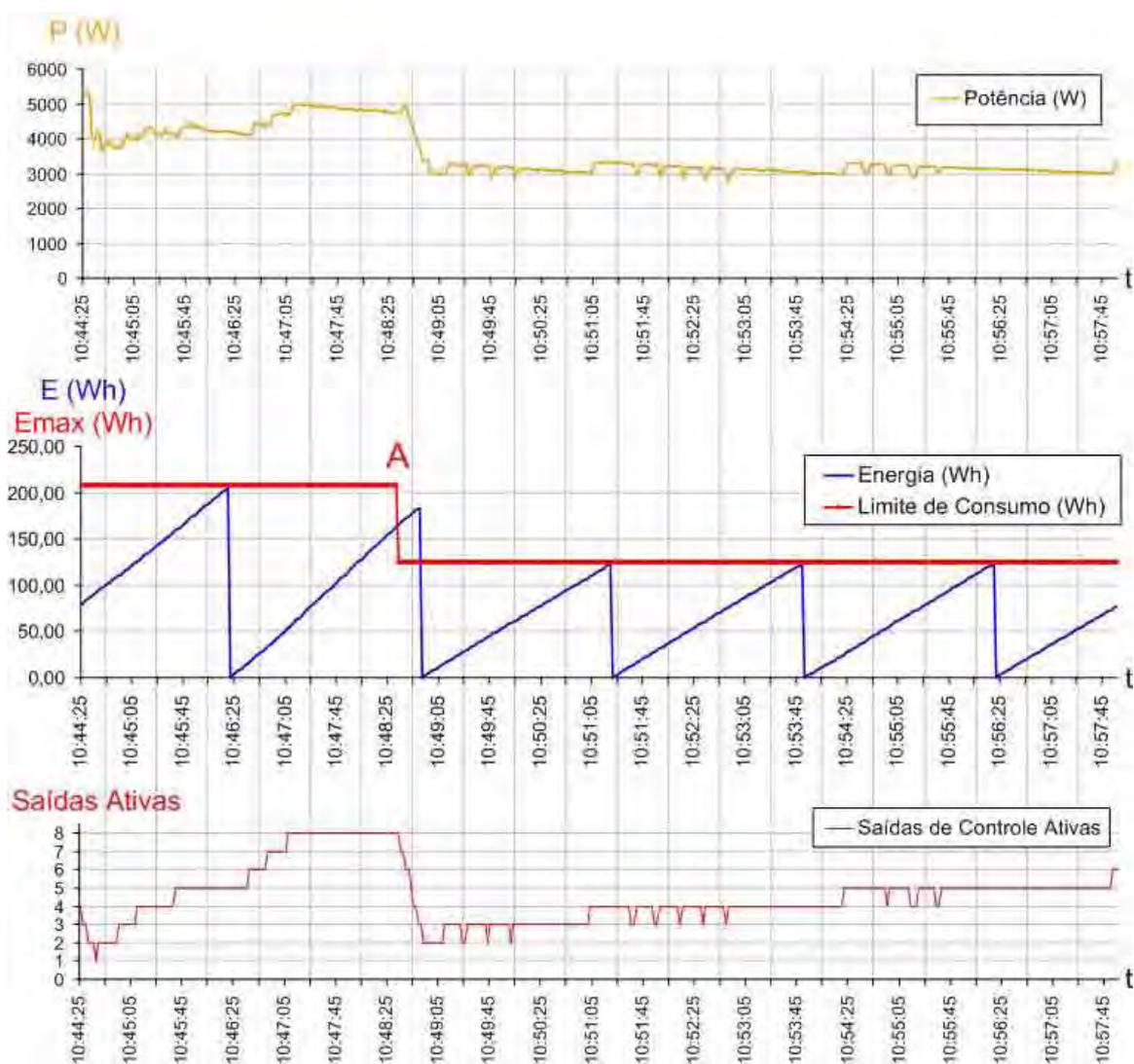


Figura 100 - Transição Horário Fora de Ponta → Horário de Ponta - Desligamento Parcial

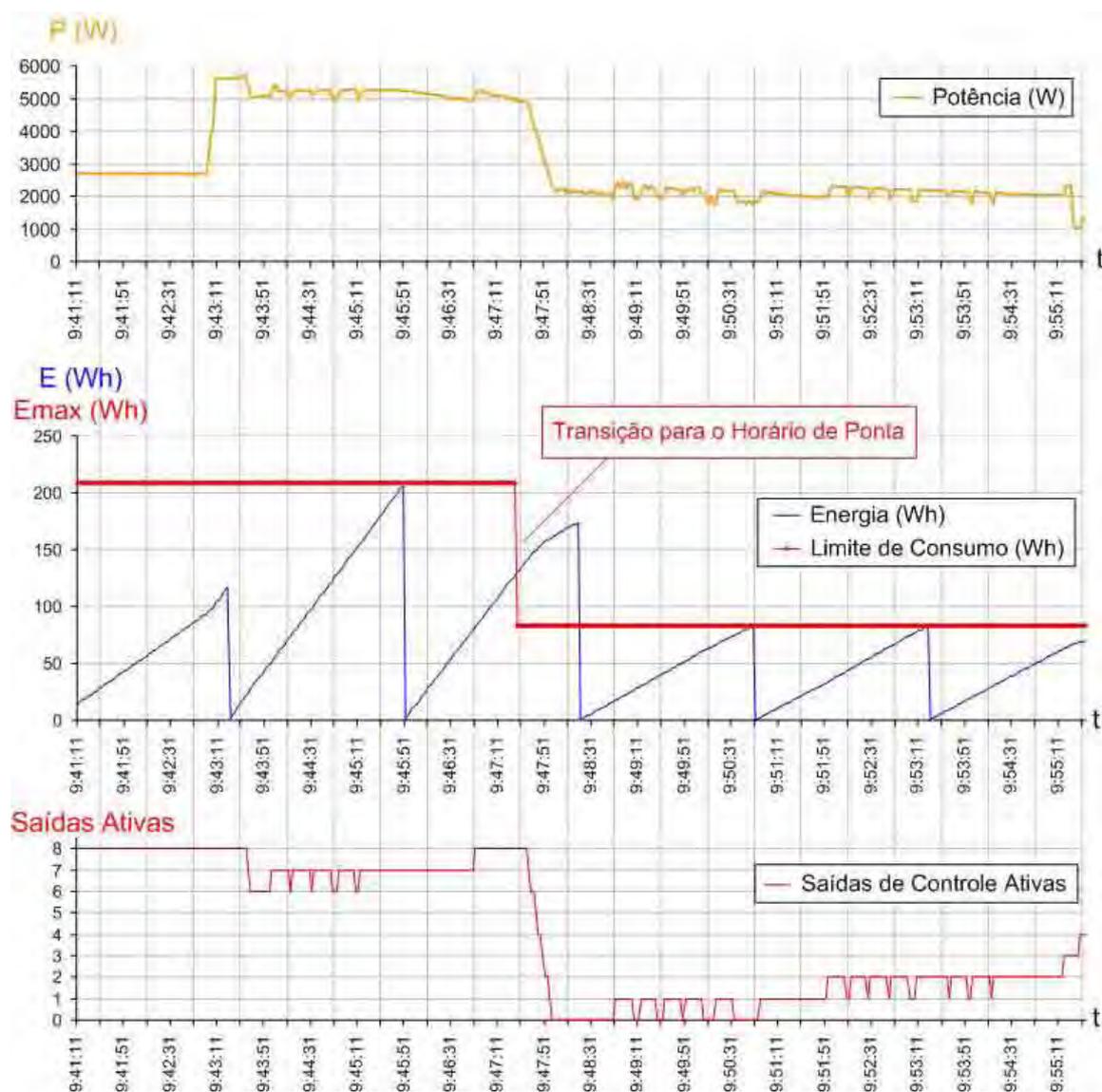


Figura 101 - Transição Horário Fora de Ponta→Horário de Ponta - Desligamento Total

A transição para o horário fora de ponta produz normalmente o aumento no valor máximo de consumo por intervalo de integração, visto que a demanda máxima para este período é maior que a demanda máxima permitida para o horário de ponta. Na transição, o controlador detecta a liberação no limite de consumo e atua no sentido de acionar as saídas de controle que eventualmente estejam desligadas. Caso ocorra uma tendência à ultrapassagem do novo valor de demanda máxima, ocorrem novas atuações do sistema de controle, como mostrado na Figura 102.

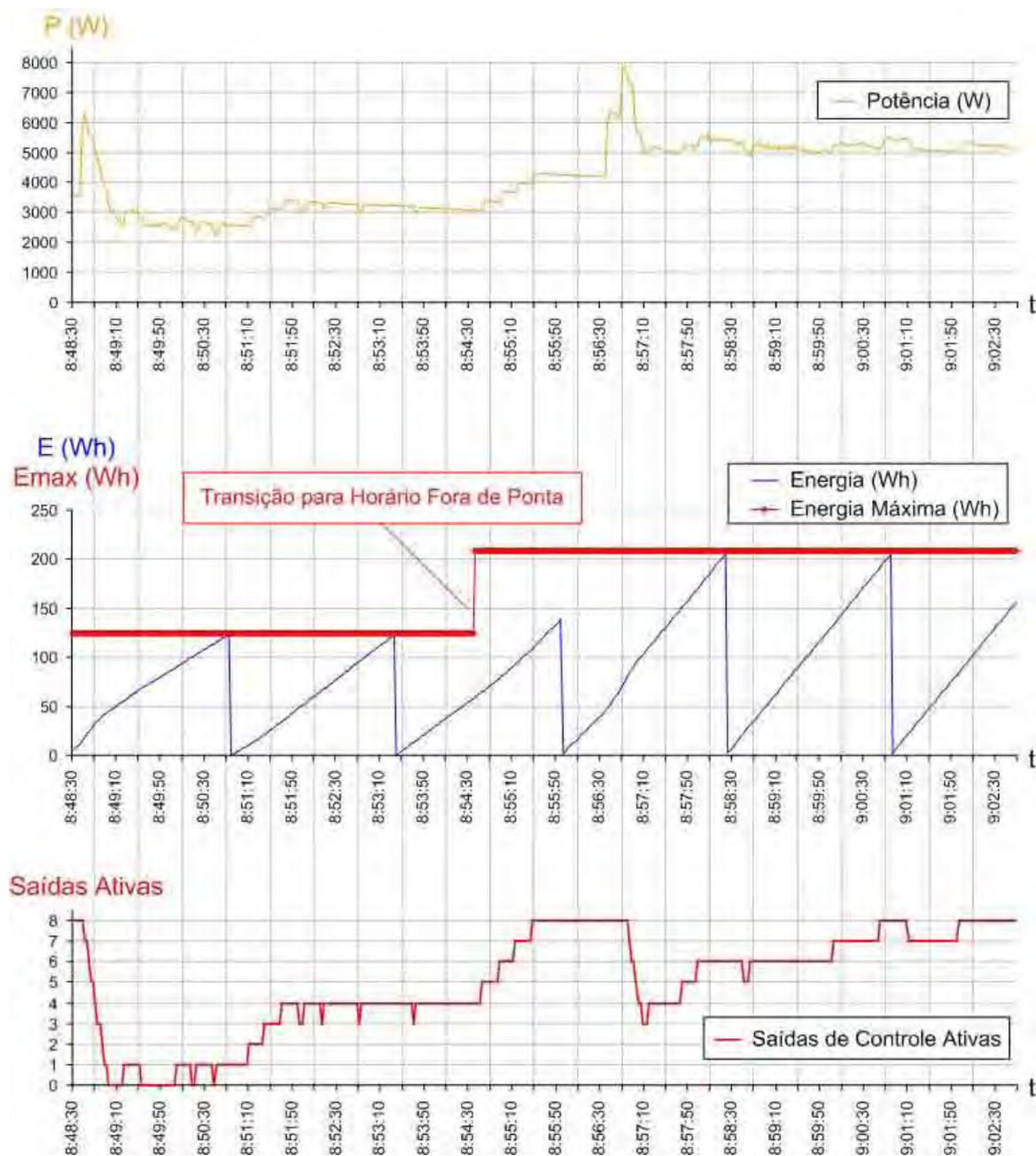
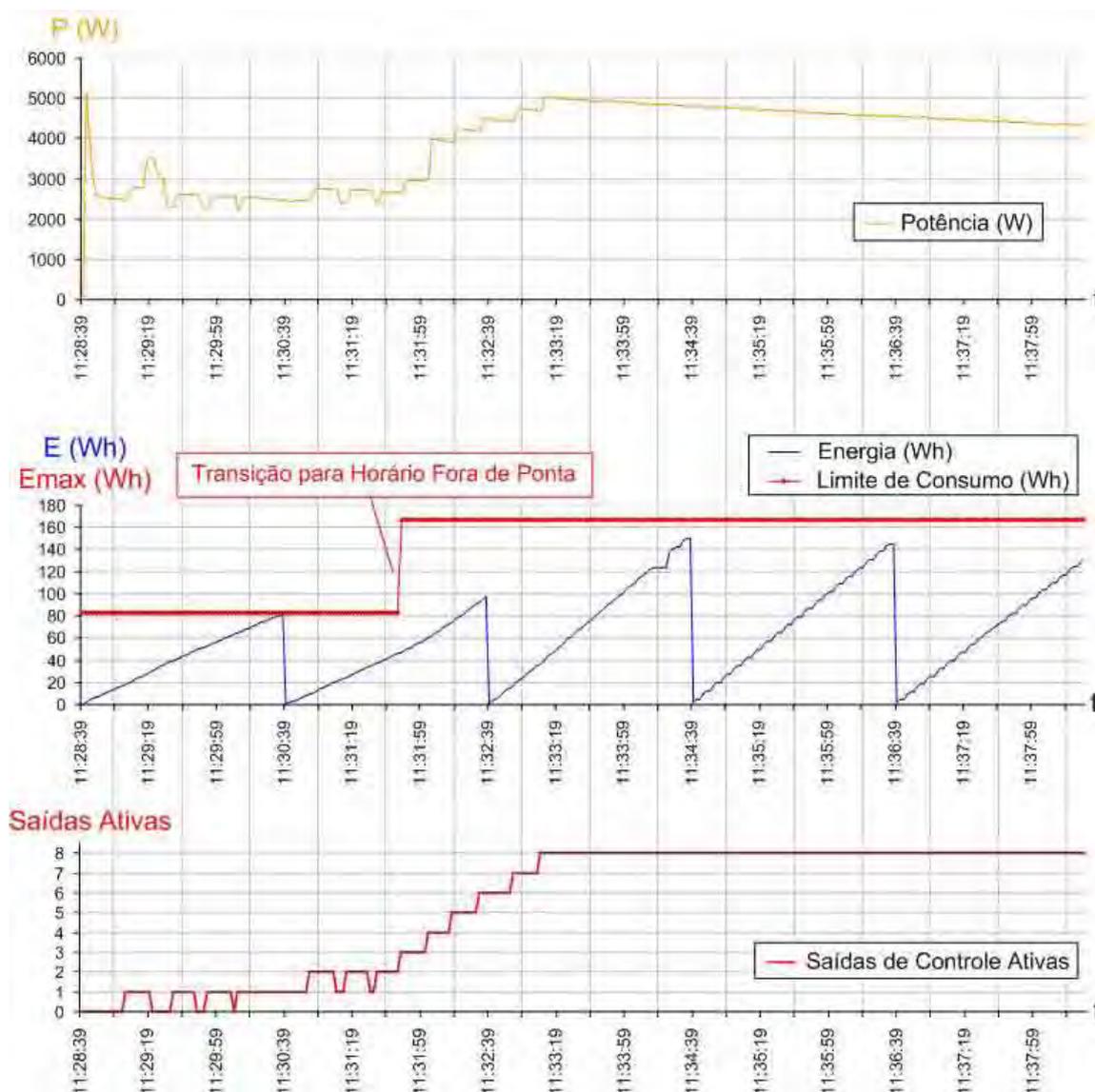


Figura 102 - Transição Ponta→Fora de Ponta - Nova tendência à ultrapassagem

Não ocorrendo uma elevação significativa na potência da instalação, o controlador ativa todas as saídas de controle e não executa mais nenhuma ação, até que seja novamente sensibilizado por outra tendência à ultrapassagem, como mostrado na Figura 103.



**Figura 103 - Transição Horário de Ponta→Horário Fora de Ponta - Religamento total**

Analisando as características de operação do protótipo, e visando explorar as potencialidades do equipamento, podemos sugerir algumas melhorias que expandiriam ainda mais o campo de aplicação do dispositivo. Entre estas melhorias propostas, podemos citar:

- Explorar todas os recursos oferecidos pelo circuito medidor de energia, incluindo capturas de formas de onda, detecção de afundamentos e picos, ativação de alarmes em condições anormais de fornecimento, entre outras.
- Desenvolver um software autônomo de comunicação entre um microcomputador e o equipamento, para uso ponto a ponto ou em rede, capaz de operar em sistemas operacionais comerciais e em equipamentos portáteis (*handheld*), de forma a

agilizar as operações de parametrização e coleta de dados sem a dependência de uma plataforma dedicada ou de um sistema supervisorio

- Incluir rotinas de tratamento e análise de sinais com distorções harmônicas, otimizando as rotinas de controle de fator de potência para circuitos onde existam correntes harmônicas produzidas por cargas não-lineares.
- Implementar outros padrões físicos e protocolos de comunicação, permitindo a conexão do equipamento a vários tipos de redes industriais, ampliando assim seu campo de aplicação.
- Implementar rotinas destinadas ao gerenciamento de variáveis para armazenamento em memória de massa, permitindo que o equipamento realize a coleta e registro de dados para posterior descarga em outros sistemas.

## 9 CONCLUSÕES GERAIS

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um equipamento para o controle de demanda e fator de potência com sistema de medição integrado, dotado de capacidade de comunicação e supervisão, para aplicação em instalações elétricas de pequeno e médio porte e onde não fosse justificável a utilização de dispositivos de elevado custo para o gerenciamento de energia. O protótipo desenvolvido foi submetido a ensaios em uma instalação elétrica simulada que permitiu a avaliação de seu desempenho dinâmico e que, em conjunto com as revisões bibliográficas realizadas, possibilitou elaborar as seguintes considerações:

▪ Com relação a sistemas de medição de energia, as conclusões obtidas foram as seguintes:

- O uso de medidores eletrônicos de energia permite a medição simultânea de vários parâmetros de operação da instalação, facilitando a aplicação de tarifas diferenciadas horo-sazonais, e registrando de forma bastante confiável os limites de demanda máxima e de fator de potência atingidos pela unidade consumidora.

- A versatilidade dos medidores eletrônicos de energia permite que os dados originados de suas medições sejam utilizados por sistemas de gerenciamento de energia pelo lado da demanda, sem necessidade de transdutores adicionais.
  - O surgimento de circuitos integrados dedicados à função de medição de energia e de parâmetros associados permitiu o desenvolvimento de medidores de baixo custo e boa precisão e confiabilidade, empregando um número bastante reduzido de componentes.
- As conclusões relacionadas aos sistemas de gerenciamento de energia pelo lado da demanda são as seguintes:
- O emprego de técnicas de gerenciamento de energia pelo lado da demanda (GELD) traz benefícios imediatos ao consumidor, com baixos investimentos e pequenas alterações no sistema existente. Em contrapartida, as vantagens alcançadas podem desaparecer caso ocorram ultrapassagens nos parâmetros de demanda delimitados por contrato para a unidade consumidora, resultando na aplicação de cobrança de multa sobre os valores excedidos.
  - Para que inconvenientes com ultrapassagens sejam minimizados, é desejável que a instalação conte com equipamentos destinados ao gerenciamento automático da demanda, inclusive levando em conta os segmentos horários de operação, que reduzem de maneira quase completa a possibilidade de ultrapassagens involuntárias no valor de demanda máxima.
  - O controle automático de demanda máxima executa de forma automática o gerenciamento de energia da instalação, habilitando o funcionamento de determinadas cargas conforme a disponibilidade do sistema. Os modos como este controle é realizado são definidos pelos algoritmos de controle empregados pelos equipamentos de gerenciamento.
  - A maioria dos equipamentos destinados ao gerenciamento de energia emprega o medidor de energia da concessionária como fonte de dados para sua operação, dificultando sua aplicação em instalações onde não são utilizados medidores eletrônicos de energia. Em outros casos, são necessários transdutores de grandezas elétricas para fornecer as variáveis da instalação ao equipamento de gerenciamento de energia.

- O sistema de controle proposto, com medidor incorporado, pode ser empregado mesmo em instalações desprovidas de medidores eletrônicos, possibilitando a realização do gerenciamento de energia pelo lado da demanda em qualquer tipo de unidade consumidora
- A revisão bibliográfica sobre o fator de potência em instalações elétricas nos permitiu chegar às seguintes conclusões:
- O fator de potência de uma instalação é elemento de grande influência no dimensionamento dos componentes do sistema e parâmetro limitante da capacidade do sistema de distribuição, e representa a relação entre a potência ativa e a potência aparente solicitada pelas cargas de uma instalação. Com o objetivo de aumentar a eficiência global do sistema elétrico, várias ações devem ser tomadas para que o fator de potência se mantenha nos níveis mais elevados possíveis, e estas ações devem partir não somente da concessionária de distribuição, mas principalmente das unidades consumidoras.
  - Para que o carregamento dos componentes do sistema de distribuição apresente melhor aproveitamento, as empresas de distribuição realizam a medição do fator de potência das instalações consumidoras e aplicam multas sobre a energia reativa excedente solicitada, como forma de estimular a correção do fator de potência destes consumidores.
  - A correção do fator de potência, realizada na maioria das instalações industriais através da instalação de capacitores para o fornecimento de energia reativa, pode ser realizada de maneira fixa, isto é, sem controle, ou de maneira automática, onde um sistema de controle é responsável pelo monitoramento e manutenção do fator de potência da instalação através do comando de bancos de capacitores.
  - O controle automático do sistema de correção de fator de potência, quando corretamente dimensionado, reduz a níveis aceitáveis o trânsito de energia reativa, tanto de caráter indutivo quanto capacitivo, impedindo a tarifação de excedentes reativos e melhorando o rendimento da instalação de forma geral.
- O desenvolvimento do protótipo permitiu concluir que:

- A proposta de desenvolvimento de um controlador de demanda máxima e de fator de potência reúne em um único dispositivo as condições para o gerenciamento de energia e o aumento do rendimento da instalação, além de permitir sua utilização como medidor de grandezas elétricas do sistema de forma independente do medidor de energia da concessionária.
  - A preocupação com o baixo custo do equipamento proposto é justificável para que seu uso possa se difundir ao maior número possível de unidades consumidoras, para que os desejáveis efeitos de seu emprego possam se fazer sentir no sistema de distribuição, especialmente a redução de perdas e melhor aproveitamento do sistema.
  - A conceituação do equipamento proposto, baseado no estado da arte dos equipamentos de controle de demanda e fator de potência disponíveis no mercado, proporciona a confiabilidade e resposta dinâmica encontradas em dispositivos destinados às aplicações industriais de grande porte. Estas características, em conjunto com a capacidade de expansão, permite a aplicação deste equipamento em instalações de maior complexidade sem a necessidade de se alterar o sistema de medição e controle.
- As avaliações de desempenho do equipamento permitiram atingir as conclusões apresentadas a seguir:
- O comportamento do protótipo do equipamento acoplado à instalação experimental, durante a fase de coleta de dados para a validação do experimento, revelou-se dentro das expectativas, como pode ser comprovado pelos gráficos de resposta dinâmica apresentados, mostrando que o controle foi realizado de forma satisfatória, com qualidade de resposta compatível com a proposta inicial do projeto.
  - Na operação do sistema de controle de demanda máxima, a habilitação das cargas de potência fixa designadas como cargas controláveis foi tal que o consumo ao final dos intervalos de integração avaliados não superou o máximo permitido pelo ajuste do parâmetro de demanda máxima.
  - Nas operações envolvendo transições entre segmentos horários, o controlador demonstrou velocidade de atuação suficiente para evitar ultrapassagens

indesejadas, bem como possibilitou o rápido restabelecimento de cargas quando o valor da demanda ajustada assim permitia.

- O desempenho do controlador de fator de potência é mostrado pelos gráficos relativos à aplicação do equipamento em uma instalação com grande variação no valor da potência reativa instalada. Através do contínuo monitoramento, as saídas de controle foram manipuladas para que o valor do fator de potência se mantivesse dentro dos limites definidos pela parametrização do dispositivo.
- Para a coleta e acompanhamento da operação do equipamento foi utilizado o software SCADA Elipse Pro comunicando-se com o protótipo através de protocolo MODBUS, e registrando os dados colhidos em uma planilha de dados padrão Microsoft Excel.
- Para cada ensaio de validação foi selecionado um conjunto de parâmetros lidos no equipamento medidor, de forma a compor a matriz de dados correspondente ao parâmetro de validação desejado.
- Após a análise de operação do conjunto, verificou-se a possibilidade de se implementar várias melhorias no equipamento, e entre elas podemos citar:
  - ✓ Implementação de rotinas para permitir o uso de todas as potencialidades oferecidas pelo circuito integrado medidor de energia.
  - ✓ Desenvolvimento de software de comunicação e parametrização para uso independente de sistemas supervisórios
  - ✓ Alterações no algoritmo de controle de fator de potência que considerem a presença de correntes harmônicas no circuito.
  - ✓ Implementação de interface de comunicação compatível com outros padrões industriais
  - ✓ Implementação de rotinas para armazenamento programável de parâmetros em memória de massa, com o equipamento operando em modo *stand-alone*.
- Embora as melhorias propostas não sejam imprescindíveis, suas implementações trariam significativo aumento nas potencialidades de emprego do equipamento, e tornariam sua operação ainda mais confiável e prática.

## 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB LTD. **ABB Global Website**. Apresenta informações sobre a linha de produtos da indústria. Disponível em: <<http://www.abb.com>>. Acesso em: 18 fevereiro 2005.

ACKERMAN, W. J.; BLOCK, W. R. Understanding Supervisory Systems. **Computer Applications in Power**, IEEE, out. 1992. p. 37-40. Disponível em: <<http://rictec.capes.gov.br>>. Acesso em: 02 Abril 2003.

ANALOG DEVICES. **ADE7758 PolyPhase Multi-Function Energy Metering IC with per phase information – Preliminary Technical Data**. 1<sup>st</sup> ed. USA. Analog Devices Inc. 2003. 44p.

\_\_\_\_\_. **ADE7758 PolyPhase Multi-Function Energy Metering IC with per phase information – Rev. 0. (Initial Version)**. USA. Analog Devices Inc. janeiro 2004. 88p.

\_\_\_\_\_. **ADE7758 PolyPhase Multi-Function Energy Metering IC with per phase information – Rev. A**. USA. Analog Devices Inc. setembro 2004. 68p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **ANEEL Website**. Apresenta informações gerais sobre o setor elétrico brasileiro e a legislação pertinente. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 05 julho 2004

\_\_\_\_\_. Estabelece, de forma atualizada e consolidada, as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica. Resolução nº 456, de 29 de Novembro de 2000. Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). 4a Edição. Brasília, 2002. 76p. Contém as alterações introduzidas pelas resoluções nº 68, de 23/02/01 e nº 90, de 27/03/01.

BOGART JR, T. F. **Electronic Devices and Circuits**. 3. ed. New York: Macmillan, 1993. 988 p. Inclui índice. ISBN 0-02-311701-X.

BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. **Electronic Devices and Circuit Theory**. 5. ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1992. 916 p. Inclui índice. ISBN 0-13-249517-1.

CCK AUTOMAÇÃO LTDA. **CCK Automação Website**. Apresenta a linha de produtos e serviços disponibilizados pela empresa. Disponível em: <<http://www.cck.com.br>>. Acesso em: 10 janeiro 2005.

CHO, M.Y.; GAU, S.W.; HUANG, C.W. - Development of Microprocessor Based Demand Control System for Industrial and Commercial Customer: **Industrial and Commercial Power System Technical Conference, 2001**. Conference Record. Papers Presented at the 2001 Annual Meeting 2001 IEEE. 15-16 Maio 2001. p. 1-6

COLLINS, A. Solid State Solutions for Electricity Metrology. **Metering and Tariffs for Energy Supply, 1999. Ninth International Conference on (Conf. Publ. nº462)**. 25-28 Maio 1999. p.51-57

CURTIS INSTRUMENTS, INC. **Curtis Instruments Homepage**. Apresenta linha de produtos de controle e instrumentação eletro-eletrônica. Disponível em: <<http://www.curtisinst.com>>. Acesso em: 18 fevereiro 2005.

DAHLE, D. **Dave's Old Watthour Meter Webpage**. Apresenta histórico de instrumentos de medição de energia elétrica. Disponível em: <<http://www.watthourmeters.com>>. Acesso em: 20 setembro 2004.

DALLAS SEMICONDUCTOR. **DS1302 Trickle Charger Timekeeping Chip Datasheet**. 1<sup>st</sup> Edition, USA, Dallas Semiconductor, 2001. 15p.

ELIPSE SOFTWARE LTDA. **Elipse Windows Sistema de Controle e Supervisão: Manual do Usuário**, Porto Alegre: ELIPSE, 1999. 278 p.

EMBRASUL INDÚSTRIA ELETRÔNICA LTDA. **EMBRASUL Website**. Apresenta linha de produtos, catálogos e informações sobre a empresa. Disponível em: <<http://www.embrasul.com.br>>. Acesso em: 12 janeiro 2005.

ENGECOMP TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO E CONTROLE LTDA. **ENGECOMP Website**. Disponibiliza informações sobre os produtos e soluções oferecidos pela empresa. Disponível em: <<http://www.engecomp.com.br>>. Acesso em: 11 janeiro 2005.

EUROTHERM INC. **Invensys - Eurotherm Controls Homepage**. Apresenta instrumentos de medição e controle de processos industriais. Disponível em: <<http://www.eurotherm.com>>. Acesso em: 18 fevereiro 2005.

GESTAL GESTÃO DE ENERGIAE UTILIDADES LTDA. **GESTAL Website**. Apresenta informações sobre a linha de produtos e serviços oferecidos pela empresa. Disponível em: <<http://www.gestal.com/home>>. Acesso em: 11 janeiro 2005.

HITACHI, LTDA. **HD44780U Dot-Matrix Liquid Crystal Display Controller/Driver Datasheet**. Rev. 0.0. Japan,. Hitachi Ltd. 1998. 60p.

JOHNSON, C. **Process Control Instrumentation Technology**. 4. ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993. 592 p. Inclui índice. ISBN 0-13-721150-3.

JORGE, H.; MARTINS, A.; GOMES, A. Maximum Demand Control: A Survey and Comparative Evaluation of Different Methods. **Power System, IEEE Transactions on**. Volume 8, 3<sup>a</sup> Ed. Agosto 1993. p.1013-1019

KATZ, E. **Famous Scientists - Homepage of Professor Eugenii Katz**. Apresenta Biografias e Realizações de Cientistas voltados à Eletricidade, Eletromagnetismo, Eletrônica e áreas afins. Disponível em: <<http://chem.ch.huji.ac.il/~eugeniik/history/electrochemists.htm>>. Acesso em: 21 fevereiro 2005.

\_\_\_\_\_. **Virtual Museum of Old Electric, Electronic and Electrochemical Instruments**. Apresenta descrição e histórico de antigos instrumentos de medição elétrica. Disponível em: <<http://chem.ch.huji.ac.il/~eugeniik/instruments>>. Acesso em: 21 fevereiro 2005.

LANDIS+GYR AG. **Landys+Gyr Website**. Descreve linha de produtos da empresa destinados à medição de energia elétrica. Disponível em <<http://www.landisgyr.com>>. Acesso em: 18 fevereiro 2005.

LEM Holding SA. **LEM GROUP WEBSITE**. Apresenta sensores e produtos destinados à medição de grandezas elétricas. Disponível em: <<http://www.lem.com>>. Acesso em: 16 agosto 2004.

MALVINO, A. P. **Eletrônica: Volume I**. 4. ed. São Paulo: Makron Books, 1997. 747 p. Inclui índice. ISBN 85-346-0378-2.

\_\_\_\_\_. **Eletrônica: Volume II**. 4 ed. São Paulo: Makron Books, 1997. 558p. Inclui índice. ISBN 85-346-0455-X.

MATSUMOTO, E. Edward Weston made his mark on History of Instrumentation. **Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE**. Volume 6, 2<sup>a</sup> Edição, p. 46 - 50, Junho 2003.

MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, INC. **Dallas Semiconductors / Maxim Homepage**. Apresenta informações sobre os componentes eletrônicos produzidos pela empresa. Disponível em: <<http://www.maxim-ic.com>>. Acesso em: 29 junho 2004.

\_\_\_\_\_. **MAXIM Low-Power, Slew-Rate-Limited RS-485/RS-422 Transceivers Datasheet**. Rev. 08. USA, Maxim Integrated Products, Inc. outubro 2003. 19p.

\_\_\_\_\_. **MAXIM +5V Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers Datasheet**. Rev. 11. USA, Maxim Integrated Products, Inc. fevereiro 2003. 36p.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. **MPLAB-C User's Guide**. Chandler: MICROCHIP, 1997. 150 p.

\_\_\_\_\_. **PIC18Fxx2 Data Sheet High Performance Enhanced FLASH Microcontroller**. 1<sup>st</sup>. ed. USA, Microchip Technology Inc., 2002. 330p.

MILLMAN, J.; HALKIAS, C. C. **Integrated Electronics: Analog and Digital Circuits and Systems**. Tokio: McGraw-Hill Kogakusha, 1972. 911 p.

MODICON INC. **Modicon Modbus Protocol Reference Guide**. North Andover: MODICON, 1996. 115 p.

MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. L. **Engenharia de Automação Industrial**. São Paulo: LTC, 2001. 295 p. Inclui índice. ISBN 85-216-1269-9.

NANSEN S.A. INSTRUMENTOS DE PRECISÃO. **Nansen Instrumentos de Precisão**. Apresenta linha de instrumentos de medição produzidos pela indústria. Disponível em: <<http://www.nansen.com.br>>. Acesso em: 16 agosto 2004.

NASCIMENTO, J. **Telecomunicações**. São Paulo: Makron Books, 1992. 542 p. Inclui índice. ISBN 0-07-460878-9.

NAZARKO, J.; JURCZUK, A. Residential Customer Preferences in the DSM Programmes. **Eletrotechnical Conference, 2000. MELECON 2000 10th Mediterranean**. Vol. 3. 29-31 maio 2000.p. 1111-1114.

NGUYEN, D.; WIDROW, B. Neural Networks for Self-Learning Control Systems. **IEEE Control Systems Magazine**, p. 18-23, Abril 1990.

NORTON, H. N. **Sensor and Analyzer Handbook**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1982. 562 p. Inclui índice. ISBN 0-13-806760-0.

PARKER, D. B. Learning Logic. **Technical Report TR-47**, Center of Computational Research in Economics and Management Science, MIT, Cambridge, 1985.

RUSSEL, B. **The Meter Guy**. Apresenta informações sobre sistemas de medição de energia elétrica. Disponível em <<http://www.themeterguy.com>>. Acesso em: 13 setembro 2004.

SCHWENDTNER, M. F. Technological Developments in Electricity Metering and Associated Fields. **Metering and Tariffs for Energy Supply, Eighth Conference on (Conf. Publ. nº 426)**. 3-5 Julho 1996. p.240-242. Disponível em: <<http://rictec.capes.gov.br>>. Acesso em: 02 abril 2003.

SEDRA, A. S., SMITH, K. C. **Microeletrônica**. 4. ed. São Paulo: Makron Books, 2000. 1270 p. Inclui índice. ISBN 85-346-1044-4.

SILVEIRA, P. R.; SANTOS, W. E. **Automação e Controle Discreto**. São Paulo: Érica, 1998. 229 p. Inclui índice. ISBN 85-7194-591-8.

SOLCON INDUSTRIES LTD. **Solcon Industries Website**. Apresenta informações sobre produtos e serviços disponibilizados pela empresa. Disponível em: <<http://www.solcon.co.il>>. Acesso em: 11 janeiro 2005.

SOUZA, D. J. **Desbravando o PIC**. 3. ed. São Paulo: Érica, 2000. 200 p. Inclui índice. ISBN 85-7194-686-8.

STEPHENS, R.E. Load Control Demand Reduction Estimation, **IEEE Transactions on Power System**, Vol. 3, No.1. Fev. 1988. p.59-66. Disponível em: <<http://rictec.capes.gov.br>>. Acesso em: 02 abril 2003.

TANENBAUM, A. S. **Computer Networks**. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1996. 813 p. Inclui índice. ISBN 0-13-349945-6.

TEXAS INSTRUMENT INCORPORATED. **Texas Instruments Incorporated Homepage**. Apresenta dados dos componentes eletrônicos produzidos pela empresa. Disponível em: <<http://www.ti.com>>. Acesso em 29 junho 2004.

TINGREEN, R.; HU, Y.; TANG, L.; MATHEWS, H.; TYNER, R.- Power Factor Controller- An integrated Power Quality Device. **IEEE Transactions on Power System**, Vol. 4, No.2, Jun. 1999. p. 572-578. Disponível em: <<http://rictec.capes.gov.br>>. Acesso em: 02 abril 2003.

TIPSUWANPORN, V.; SRISUWAN, K.; KULPANICH, S.; SUESUT, T; NUMSOMRAN, A. Development of Load Control and Management System. Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES Vol.3, 6-10 Outubro 2002. p.2139-2142, Vol. 3

TOADER, C.; POSTOLACHE, P.; SCUTARIU, M.; SURDU, C. Penalty Options for Over-Compensated Reactive Energy at Medium and Small Customers Level. Power Tech Proceedings, 2001 IEEE, Porto Vol. 3. 10-13 Setembro 2001. 6pp. vol.3.

WAKERLY, J. F. **Digital Design Principles and Practices**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1990. 716 p. Inclui índice. ISBN 0-13-212838-1.

WEG S.A. **Portal WEG**. Apresenta informações sobre produtos da empresa. Disponível em: <<http://www.weg.com.br>>. Acesso em: 13 setembro 2004.

YOKOGAWA ELECTRIC CORPORATION. **Yokogawa Global Website**. Apresenta características de produtos destinados à medição de grandezas elétricas. Disponível em <<http://www.yokogawa.com>>. Acesso em: 18 fevereiro 2005.