

UFMG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS ESCOLA DE ENGENHARIA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Marcos César Isoni Silva

CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DE CARGAS INDUSTRIAIS COM DINÂMICA RÁPIDA

Belo Horizonte-MG Novembro/2009

Marcos César Isoni Silva

CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DE CARGAS INDUSTRIAIS COM DINÂMICA RÁPIDA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG (PPGEE) como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletrônica de Potência (aplicação em Qualidade da Energia)

Orientador: Prof. Braz J. Cardoso Filho, PhD.

Belo Horizonte-MG Novembro/2009

Agradecimentos

Ao **Prof. Braz de Jesus Cardoso Filho, PhD. (DEE-UFMG)**, meu orientador no Mestrado, pelo auxílio, pela paciência, pela inestimável boa vontade em transmitir conhecimentos e pelo empenho em criar as condições necessárias para o desenvolvimento desta Dissertação;

Ao **Prof. Flávio Vasconcelos, PhD. (DEE-UFMG)**, pela presteza no repasse de informações relacionadas a aspectos de amostragem e conversão analógico-digital em sistemas de medição de energia elétrica;

Ao amigo **Eng. Marcos Aguiar (Stola do Brasil Ltda)**, por permitir e viabilizar visitas técnicas para a realização de medições e monitoramentos elétricos utilizados no estudo de caso real apresentado nesta Dissertação;

Ao **Eng. Adelino Leandro Henriques (CEMIG)**, pelas importantes informações prestadas quanto aos equipamentos de medição utilizados pela concessionária de energia;

Ao amigo **Edevaldo Rocha (Fasor Tecnologia)**, pela inestimável colaboração, cedendo, instalando e desinstalando os registradores eletrônicos de grandezas elétricas quando da realização dos estudos em campo;

À minha colaboradora e amiga Ana Luíza Baêta Zille (Engeparc Engenharia) pelo apoio técnico e pela elaboração e adaptação de desenhos em software gráfico;

A toda a **equipe técnica da HPE** (**High Power Engineering**), pelo apoio e colaboração através do fornecimento de informações e documentações técnicas relativas aos módulos de potência tiristorizados (*ProFactor*[®]) por ela desenvolvidos;

À Nansen S.A. – Instrumentos de Precisão, na pessoa do Eng. Henrique Santos Duarte (Suporte Técnico), pela disponibilização de informações e documentações técnicas relativas à sua linha de medidores eletrônicos de energia elétrica;

Ao **Eng. Edgar Franco (fundador e ex-diretor da Engecomp)**, pelas informações prestadas no que se refere aos sistemas de monitoramento eletro-energético atualmente utilizados no mercado.

A todas as pessoas que, indiretamente, prestaram sua contribuição e auxílio para o desenvolvimento desta Dissertação.

Resumo

Em alguns ramos de atividade do segmento industrial, bem como em edificações / complexos comerciais de médio e grande portes, contingentes significativos de equipamentos elétricos apresentam, como uma de suas principais características, uma rápida dinâmica operacional, alternando repetitivamente, e em curtos intervalos de tempo, estados de operação em vazio (ou em regime "*stand-by*") e súbitas solicitações para funcionamento sob carga elevada ou carga plena.

Esses tipos carga apresentam, via de regra, um fator de potência médio operacional relativamente baixo, fundamentalmente por consumirem elevados níveis de energia reativa (se comparados com os níveis de energia ativa) nos rápidos intervalos de transição entre os estados em vazio ou em baixa carga (ou ainda em regime "stand-by") e em operação plena. Vários deles, como é o caso dos sistemas de soldagem (ponteadeiras), geralmente apresentam baixo fp mesmo ao atingirem suas potências plenas. É importante salientar que, dependendo das condições operacionais de uma planta industrial ou de uma grande edificação, grupos de carga que apresentem o binômio baixo fp e dinâmica rápida (o que aqui significa a súbita e repetitiva alteração dos níveis de potência ativa e reativa demandados da rede) podem ser determinantes no fator de potência global da instalação como um todo, posto que os atuais sistemas eletrônicos de medição das concessionárias de energia são capazes de registrar os consumos de energia ativa e reativa a partir das grandezas elétricas Tensão e Corrente medidas em intervalos de tempo relativamente curtos. Portanto, o trabalho aqui apresentado foi motivado pela necessidade de se avaliar mais pormenorizadamente a aplicação de sistemas de correção do fator de potência quando da presença de tais tipos de carga. O principal objetivo consiste na abordagem da tecnologia de correção dinâmica do fp com base em acionamentos de capacitores estáticos por meio de dispositivos tiristorizados, geralmente capazes de comutar bancos capacitivos e ajustar dinamicamente as necessidades de energia reativa em tempos extremamente curtos (tipicamente em até 1,5 ciclo da tensão da rede elétrica), desempenhando importante papel na garantia de compensação das cargas industriais com ciclos de operação da ordem de centenas de milisegundos. Além disso, pretendeu-se estender as análises e avaliar, preliminarmente e em nível conceitual, uma configuração com nível de implementação técnica mais avançado, adotando-se uma solução integrada contemplando, além de módulos dotados de tiristores, um sistema adicional operando para ajuste fino na correção do fp. Essa configuração mais implementada, baseada na concepção

genérica de um "STATCOM" (potencialmente aplicável em baixa tensão), pode ser avaliada objetivando-se a compensação contínua e precisa sem degraus fixos, sendo útil, por exemplo, na correção do fp nos períodos em que ocorrem rápidos picos oscilatórios na potência reativa requerida pelas cargas. É oportuno enfatizar desde já, como será visto ao longo desta Dissertação, que os sistemas convencionais existentes e largamente empregados, geralmente baseados em contatores e controladores automáticos do fp com estágios de controle comutados a relés, não são, via de regra, capazes de compensar plenamente as cargas com dinâmica rápida, simplesmente por não apresentarem resposta suficientemente adequada a esse propósito. Salienta-se que, para uma atuação segura e eficaz, os sistemas de correção do fp devem ser suficientemente rápidos para compensar a necessidade de reativos considerandose o limite de sensibilidade dos sistemas eletrônicos de medição das concessionárias de energia. Essa sensibilidade é refletida pelo tempo entre amostragens sucessivas de corrente e tensão, bem como pelo tempo efetivos de medição ("janela de medição"), a partir do qual são calculadas as grandezas eficazes (tensão e corrente rms). Essas, em última análise, serão a base para a determinação das potências (demandas) ativa e reativa, dos consumos cumulativos das energias ativa e reativa e, consequentemente, do fator de potência operacional em um dado intervalo de tempo.

Palavras-chave: Fator de Potência, Energia Reativa, Compensação de Reativos, Cargas Industriais com Dinâmica Rápida.

Abstract

In some activity branches of industrial segment, as well in medium and large buildings and commercial facilities, expressive contingents of electrical equipments presents, as one of their main characteristics, fast operational dynamics, alternating, and in short time intervals, repetitive cycles of *no-load* operation (or stand-by state) and sudden demands requesting for *full-load* operation.

These kinds of loads present, as a rule of thumb, a relatively poor average operational power factor, what can be atributted to their high reactive energy consumption level (if compared to their active energy consumption) on short transition intervals between *no-load* (or *light-load* or, still, stand-by state) and *full-load* operation. Lots of them, as in case of spot welding machines, generally operate with a low power factor, even under *full-load*. It is important to point out that, depending on the operational conditions of an industrial plant or a large building, groups of loads that present the binomial low power factor and fast dynamics (meaning fast and cyclic changes in active and reactive power levels demanded from the supply grid) can define the global consequent power factor, considering that the modern electronic power meters are capable to registrate active and reactive consumption based on measurements of the electrical parameters Voltage and Current on relatively short time intervals. Therefore, this Dissertation was motivated by the necessity of evaluating, in details, the application of power factor correction systems to compensate these kind of loads. The main target comprises on the approach of PF dynamics correction technology, performed by tyristor-based power modules, generally capable to switch capacitors banks and dinamically adjust the load reactive energy requirements on extremely short time intervals (up to 1,5 cycle of the Voltage grid, typically), carrying out the reactive compensation for industrial loads whose operational cycles are developed on hundreds of miliseconds. Furthermore, the analysis were extended, preliminarily and on a conceptual level, to an improved configuration, adopting an integrated solution considering tyristors power modules in association with an additional system operating for fine adjustments in PF correction. This complementary configuration, enhanced with a generic conception of a "STATCOM" (potentially applicable in low Voltage grids), can be evaluated for a continuous and precise compensation without fixed steps, being useful, for example, in momments when dynamic PF correction becomes necessary in front of fast reactive oscillatory peaks. By now, it is opportune to enphasize, as will be seen along this Dissertation, that the existing conventional systems, very widespread in

practice and generally based on contactors and PF controllers with relays outputs, are not capable to fully compensate fast dynamic loads, because of their insufficient response time for this application. For an assured and effective performance, PF control systems must be fast enough to compensate the reactive demands considering the sensitivity limits presented by eletronic power meters. This sensitivity is reflected by the time between Voltage and current successive sampling as well by the effective measurement time ("*measurement window*") that, at last, defines the calculation of *rms* electrical parameters (Voltage and current). These will be the base to determine active and reactive power demand, cumulative active and reactive energy consumptions and, consequently, the operational power factor on a time interval.

Keywords: Power Factor, Reactive Energy, Reactive Compensation, Fast Dynamics Industrial Loads.

Lista de figuras

Figuras em capítulos

Figura 2.1 – Triângulo de potências	31
Figura 2.2 – Ângulo de defasagem entre tensão e corrente	32
Figura 2.3 – Faixa permissível para o fator de potência pela atual legislação	33
Figura 2.4 – Variação das perdas de energia em condutores em função do fp	35
Figura 2.5 – Correção do fp por capacitores	35
Figura 2.6 – O triângulo de potências e a correção do fp	
Figura 2.7 – Capacitores controlados automaticamente	38
Figura 2.8 – Controle de capacitores alimentados por 2 (ou mais) transformadoeres	
em paralelo	39
Figura 2.9 – Correntes harmônicas presentes em uma instalação elétrica genérica	
Figura 2.10 – Correntes e tensões harmônicas amplificadas pela presença de	
capacitores	42
Figura 2.11 – Ressonância Paralela – Circuito equivalente	
Figura 2.12 – Ressonância Série	44
Figura 2.13 – Fator de potência em sistemas senoidais	46
Figura 2.14 – Tetraedro de potências em sistemas distorcidos	46
Figura 2.15 – Filtro desintonizado de baixa tensão – Esquemático simplificado	49
Figura 2.16 – Resposta em Freqüência (Z _h x h)	50
Figura 3.1 – Medição de reativos indutivo e capacitivo	60
Figura 4.1 – Medição de energia elétrica em média tensão	63
Figura 4.2 – Medição de energia elétrica em baixa tensão	63
Figura 4.3 – Medição em baixa tensão – Aspectos gerais	64
Figura 4.4 – Medição em média tensão (subestação abrigada) – Aspectos gerais	65
Figura 4.5 – Conceituação de DMCR e FER - Situação hipotética para f $p = 0,707$	67
Figura 4.6 – Conta de energia elétrica (CEMIG – Subgrupo A4)	72
Figura 4.7 – Medidores eletrônicos de energia elétrica	75
Figura 4.8 – Medidor eletrônico de energia elétrica – Esquemático de ligação	76
Figura 4.9 – Medição de energia elétrica – Esquemático em blocos simplificado	77
Figura 4.10 – Conversão analógico-digital	77
Figura 5.1 – Correção do fp – Sistema automático convencional	88

Figura 5.2 – Corrente de energização ("inrush") de um capacitor	
Figura 5.3 – Contator com resistores de pré-inserção	
Figura 5.4 – Redução da corrente de ''inrush'' de um capacitor com resistores	
de pré-inserção	
Figura 5.5 – Ligação de um capacitor em paralelo com um banco de capacitores	
já ligado à rede	
Figura 5.6 – Correção do fp – Sistema automático para compensação dinâmica	
ou em "tempo real"	
Figura 5.7 – Sistema de correção dinâmica do fp – Sinal de ativação e disparo	
dos tiristores	
Figura 5.8 – Sistema de correção dinâmica do fp – Energização dos capacitores	
sem "inrush"	
Figura 5.9 – Sinal de ativação e energização dos capacitores sem "inrush"	
Figura 5.10 – Sinal de ativação e energização dos capacitores sem "inrush"	
Figura 5.11 – Dispositivos baseados em módulos tiristorizados para a manobra	
de capacitores	
Figura 5.12 – Esquemáticos básicos de controladores automáticos do fp (saídas a	
relé e a transistor)	
Figura 5.13 – Sequenciamentos Linear e Circular ou Rotacional	101
Figura 5.14 – Inserção / retirada de capacitores nos sequenciamentos Linear e	
Circular ou Rotacional	101
Figura 5.15 – Ações de correção do fp: Progressiva e Direta	
Figura 5.16 – Inserção ou retirada de capacitores por ajuste de histerese	103
Figura 5.17 – Controlador automático - Informações disponibilizadas em display	
Figura 5.18 – Alguns controladores automáticos do fp disponíveis no mercado	
Brasileiro	108
Figura 5.19 – Tipos de capacitores de baixa tensão disponibilizados no mercado	
Brasileiro	111
Figura 5.20 – Capacitores em canecas de alumínio – proteção contra sobrepressão	
interna	113
Figura 5.21 – Reatores de desintonia	118
Figura 5.22 – Sistema desintonizado para correção do fp	119
Figura 5.23 - Sistema automático desintonizado de pequeno porte	

Figura 6.1 – Exemplo de folha de dados técnicos (Módulo ProFactor –	
Cortesia HPE)	122
Figura 6.2 – Data-sheet do módulo de tiristores IXYS – modelo MCC / MCD 95	123
Figura 6.3 – Correlação I x P _{DISSIPADA} (data-sheet do módulo de tiristores IXYS –	
modelo MCC / MCD 95)	125
Figura 6.4 – Diagrama em blocos (Módulo ProFactor – Cortesia HPE)	126
Figura 6.5 – Tensão residual no banco trifásico de capacitores após o desligamento	129
Figura 6.6 – Simulação computacional – Disparo da primeira chave tiristorizada	
sem a observância da seqüência correta de entrada das chaves	130
Figura 6.7 – Aspecto geral interno de um dispositivo baseado em módulos	
tiristorizados (ABB – Dynacomp)	130
Figura 6.8 – Esquemáticos básicos de conexão à rede c.a.: máquina síncrona e	
STATCOM-BT	132
Figura 6.9 – Esquemático básico – Sensoriamento de sinais e controle do	
STATCOM-BT	136
Figura 6.10 – Esquemático básico – Possível configuração para correção do fp	
baseada em capacitores acionados por módulos tiristorizados e no	
STATCOM-BT para ajuste fino	137
Figura 6.11 – Comparação entre a correção exclusivamente por capacitores e por	
capacitores + STATCOM-BT	139
Figura 7.1 – Pinça de soldagem a ponto	143
Figura 7.2 – Esquemático geral do eletrodo de uma pinça de soldagem	144
Figura 7.3 – Resistências elétricas envolvidas e possível perfil de temperatura em	
ponto de soldagem	144
Figura 7.4 – Vistas frontal e posterior de um equipamento de soldagem a ponto	
por resistência	146
Figura 7.5 – Operação de pínça de soldagem robotizada	147
Figura 7.6 – Ciclo básico de soldagem a ponto	147
Figura 7.7 – Estudo de caso – Diagrama unifilar de MT e BT	152
Figura 7.8 – Estudo de caso - Modelagem da rede elétrica no MATLAB / Simulink	153
Figura 7.9 – Alimentação elétrica dos equipamentos de soldagem a ponto	155
Figuras 7.10 e 7.11 – Registrador eletrônico digital de grandezas elétricas	157
Figura 7.12 – Instalação dos TCs flexíveis	157
Figura 7.13 – Parametrizações através de microcomputador portátil	157

Figuras 7.14 e 7.15 – Painel de instalação do registrador (detalhe da	
instrumentação frontal existente)	157
Figura 7.16 – Parte das planilhas de dados primários elaboradas a partir dos	
registros de medições	158
Figura 7.17 – Estudo de caso - Monitoramentos elétricos diurnos – 1º subintervalo	160
Figura 7.18 – Estudo de caso - Monitoramentos elétricos diurnos – 2° subintervalo	161
Figura 7.19 – Estudo de caso - Monitoramentos elétricos diurnos – 3º subintervalo	162
Figura 7.20 – Estudo de caso - Monitoramentos elétricos diurnos – 4º subintervalo	163
Figura 7.21 – Estudo de caso - Monitoramentos elétricos noturnos – 1º subintervalo	164
Figura 7.22 – Estudo de caso - Monitoramentos elétricos noturnos – 2° subintervalo	165
Figura 7.23 – Estudo de caso - Monitoramentos elétricos noturnos – 3º subintervalo	166
Figura 7.24 – Estudo de caso - Monitoramentos elétricos noturnos – 4° subintervalo	167
Figura 7.25 – Período noturno – 1º subintervalo (10 segundos)	169
Figura 7.26 – Período noturno – Subintervalo de 2 segundos compreendendo o	
instante de registro da máxima demanda de potência reativa	170
Figura 7.27 – Abordagem analítica / teórica preliminar para correção –	
Comportamento das potências ativa, reativa e do fp	174
Figura 7.28 – Interpolação da dinâmica da carga para a projeção de registros a	
cada 25 milisegundos	175
Figura 7.29 – Caracterização gráfica do processo de correção do fp a intervalos	
de 25 milisegundos	179
Figura 7.30 – Dinâmica de inserção e retirada de estágios capacitivos (intervalos	
de 25 milisegundos)	180
Figura 7.31 – Dinâmica operacional da carga (30 minutos de operação)	181
Figura 7.32 – Caracterização gráfica do processo de correção do fp a intervalos	
de 1 minuto	183
Figura 7.33 – Dinâmica de inserção e retirada de estágios capacitivos (intervalos	
de 1 minuto)	184
Figura 7.34 – Fatores de potência resultantes (intervalos de 1 minuto)	184
Figura 7.35 – Caracterização gráfica do processo de correção do fp a	
intervalos de 125 milisegundos	188
Figura 7.36 – Dinâmica de inserção e retirada de estágios capacitivos	
(intervalos de 25 milisegundos)	190

Figura 7.37 – Caracterização gráfica da compensação de reativos	
(Módulos+Capacitores e STATCOM-BT)	
Figura 7.38 – Dinâmica de atuação do STATCOM-BT (tempo de resposta = 5 ms)	194
Figura 7.39 – Compensação de reativos (Módulos+Capacitores, STATCOM-BT	
e compensação resultante)	194
Figura 7.40 – Potências reativas no alimentador antes e depois da correção	
Figura 7.41 – Sistema convencional – comportamento oscilatório do fp	
Figura 7.42 – Manobra e utilização efetiva dos bancos capacitivos disponíveis	

Figuras em apêndices

Figura A2.1 – Comparação entre as dinâmicas de correção convencional e	
"em tempo real"	230
Figura A2.2 – Arranjo de sistema de distribuição elétrica industrial para	
alimentação de grande número de estações de soldagem	231
Figura A2.3 – Estações de soldagem a ponto – Comportamento elétrico típico sem	
e com compensação de reativos	232
Figura A2.4 – Equipamentos de içamento e transporte vertical – Comportamento	
elétrico típico sem e com compensação de reativos	233
Figura A2.5 – Partida de motores – Comportamento elétrico típico sem e com	
compensação de reativos	235
Figura A3.1 – Chaveamento de capacitores "back-to-back"	237
Figura A3.2 – Chaveamento "back-to-back" – Esquemático unifilar para análise	

Lista de quadros e tabelas

Quadros e tabelas em capítulos

Tabela 2.1 – Exemplos de fatores de desintonia e freqüências de sinton	ia de filtros
desintonizados	
Tabela 3.1 – Fator de Potência de referência em diversos países	
Quadro 4.1 – Nomenclaturas adotadas por concessionárias de energia	para as
parcelas de reativos excedentes	
Quadro 4.2 – Funcionalidades e aplicações de medidores eletrônicos d	e energia
Elétrica	
Quadro 5.1 – Faixas de tempos de conexão e reconexão para diversos de conexão e reconexão e reconexão para diversos de conexão e reconexão e reconexão para diversos	controladores
automáticos do fp	
Quadro 5.2 – Principais critérios de dimensionamento elétricos de con	dutores e
dispositivos de seccionamento e proteção para capacitore.	s BT108
Tabela 5.1 – Classes de temperatura de capacitores	
Quadro 6.1 – Sistemas Convencionais x Sistemas Dinâmicos – Paralelo	o comparativo140
Tabela 7.1 – Resumo dos resultados dos monitoramentos elétricos	
Tabela 7.2 – Período noturno – Subintervalo de 2 segundos compreend	lendo o
instante de registro da máxima demanda de potência reat	iva —
Abordagem analítica / teórica preliminar para correção a	lo fp172
Tabela 7.3 – Detalhamento da abordagem analítica / teórica prelimina	ır para
correção do fp	
Tabela 7.4 – Cálculos das potências capacitivas para correção do fp a	intervalos
de 25 millisegundos	
Tabela 7.5 – Planilha de cálculos das potências capacitivas para corre	eção do fp
a intervalos de 25 ms	
Tabela 7.6 – Cálculos das potências capacitivas para correção do fp a	
intervalos de 125 millisegundos	
Tabela 7.7 – Potências capacitivas para correção do fp (Módulos+Cap	pacitores
e STATCOM-BT)	
Tabela 7.8 – Exatidão na Correção do fp – Paralelo comparativo	
Tabela 7.9 – Fatores de potência ajustados e operacionais – Paralelo c	omparativo200

Listas de siglas / abreviações, nomenclaturas técnicas, símbolos e unidades

Siglas / abreviações (em textos)

ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Eletroeletrônica
<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
AES Eletropaulo	American Power Electric Co. and Southern Co Eletropaulo
ANEEL	
ANSI	American National Standards Institute
<i>CEMIG</i>	Companhia Energética de Mionas Gerais
<i>CELPE</i>	Companhia Energética de Pernambuco
<i>CODI</i>	
<i>COPEL</i>	Companhia Paranaense de Eletricidade
CPFL Energia	
<i>DNAEE</i>	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
ELETROBRÁS	Centrais Elétricas Brasileiras
<i>IEC</i>	International Eletrotechnical Comission
<i>IEEE</i>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
Light	
MAE	Mercado Atacadista de Energia
NBR	Normas brasileiras
ONS	Operador Nacional do Sistema
<i>RTM</i>	

Nomenclaturas técnicas (em textos e/ou fórmulas)

Categoria de emprego de contatores – "Manobra de Capacitores"	AC-6b
	A/D
Alta tensão.	<i>AT</i>
	<i>BT</i>
	<i>c.a.</i>
Controlador automático do fator de potência	<i>CAFP</i>

Corrente con	tínua
Consumo de energia elétrica ativa (kWh) faturável no período de faturam	nento
	RTC
	cibel
	nento
Distorção harmônica total na cor	rente
	ensão
	етро
demanda (kW) medida durante o período de faturam	nento
	trada
	orção
	етро
"efective number of bits" (número de bits efe	etivo)
	dente
	dente
	ência
	indos
Insulated Gate Bipolar Trans	sistor
	ensão
"mean time between failures" (tempo médio entre fa	lhas)
contato normalmente al	berto
contato normalmente al	berto
	ulso)
	ensão
	ciada
	nável
"root mean squase" (raiz média quadrática ou valor ef	ficaz)
_{TC})Relação de transformação de transformador de cort	rente
	ncial
	tifier
1Syncronous Static Compensator ou Syncronous Static Conde	enser
Transformador de cor	rente
Transformador de cort	rente
Unidade de faturamento de demanda reativa exced	dente

UFER	Unidade de faturamento	de energia reativa	excedente
------	------------------------	--------------------	-----------

Símbolos e unidades (utilizados em expressões matemáticas e fórmulas de cálculo)

<i>A</i>	
С	
СА	
<i>C</i> ₁	
<i>C</i> ₂	Capacitância do primeiro banco de capacitores (a energizar)
<i>C/k</i>	Degrau mínimo em corrente reativa capacitiva ajustável no CAFP
<i>cosφ</i>	fator de potência (em sistemas senoidais)
$\cos \varphi_1 ou \cos \alpha_2 \dots$	fator de potência não corrigido
$\cos \varphi_2$ ou $\cos \alpha_1$	fator de potência corrigido
<i>C</i> _{<i>T</i>}	
<i>E</i>	
<i>F</i>	
<i>f</i>	
fefetiva	
f_N	
ffundamental	
fr-desintonia-inicia.	L
fr-desintonia-corri	GIDAFreqüência de desintonia corrigida em função de tolerâncias (Hz)
$f_{RESSONÂNCIA}$ ou f_R .	
fp_i	
<i>fp</i> _f	
fp _{REAL}	
fp_m	Fator de potência indutivo médio calculado para o período de faturamento
<i>fp</i> _r	
fp_t	
<i>h</i>	
Н	
I ou i	
$I_h ou I_H$	
I _{rms}	Corrente em valor eficaz (Ampéres)
I _{STEP} Menor	diferença de corrente reativa existente entre estágios capacitivos (Ampéres)

<i>I</i> ₁	
<i>I</i> ₃ ou <i>I</i> _{3H}	Componente harmônica de terceira ordem (180 Hz) na corrente (Ampéres)
<i>I</i> ₅ <i>ou I</i> _{5H}	Componente harmônica de quinta ordem (300 Hz) na corrente (Ampéres)
<i>I</i> ₇ <i>ou I</i> _{7H}	Componente harmônica de sétima ordem (420 Hz) na corrente (Ampéres)
I ₁₁ ou I _{11H.} Compone	ente harmônica de décima primeira ordem (660 Hz) na corrente (Ampéres)
I ₁₃ ou I _{13H} Compon	nente harmônica de décima terceira ordem (780 Hz) na corrente (Ampéres)
$k, k_1 \dots \dots$	Constante de proporcionalidade
<i>K</i>	
ki	Relação de transformação de transformador de corrente
ku	
kV	
kVA	
kVAr	QuiloVoltAmpére reativo
kVArh	QuiloVoltAmpére reativo - hora
<i>kW</i>	Quilowatt
kWh	
kΩ	Quiloohms
<i>L</i>	
$L_L ou L_n \dots$. Indutâ	incia da linha de alimentação, desde a fonte até o banco capacitivo (henry)
L_N	
<i>L</i> _S	
L ₁ Indutân	cia do circuito terminal de alimentação do capacitor já energizado (henry)
L ₂ Indutância	do circuito terminal de alimentação do capacitor a ser energizado (henry)
L_{σ} ou L_t	
<i>mH</i>	Milihenrys
<i>ms</i>	
MVA	
<i>MVAr</i>	
MVArh	
<i>MW</i>	
<i>MWh</i>	Megawatt – hora
N	
<i>n</i>	

<i>p</i>	
<i>p%</i>	
$P ou P_{kW}$	
<i>P</i> _{<i>C</i>}	Potência capacitiva (kVAr ou MVAr)
P_{CAP} ou S_{CAP}	Potência capacitiva (kVAr ou MVAr)
<i>P_{CC} ou S_{CC}</i>	
<i>P</i> _{<i>D</i>}	
<i>P</i> _{<i>J</i>}	Potência de perdas joulicas (W)
P _{PERDAS}	
<i>P</i> _T <i>ou S</i>	
P _{TOTAL}	
Q ou Q_{kVAr}	
Q _{CALOR}	Energia sob a forma de calor
$Q_{C\text{-}CORRIGIDA}$	Potência reativa corrigida corrigida (kVAr ou MVAr)
<i>Q</i> мі́ <i>NIMO</i>	Potência reativa mínima (kVAr ou MVAr)
Q_N	Potência reativa nominal (kVAr ou MVAr)
Q_n	Potência reativa nominal de cada estágio capacitivo (kVAr ou MVAr)
$Q_{N-EFETIVA}$	Potência reativa efetiva (kVAr ou MVAr)
Q _{STEP} Menor dij	ferença de potência reativa existente entre estágios capacitivos (Ampéres)
Q_{TOTAL} ou Qt	Potência reativa total (kVAr ou MVAr)
Q_1	Potência reativa associada à freqüência fundamental (kVAr ou MVAr)
<i>Q</i> ₃	Potência reativa associada à terceira harmônica (kVAr ou MVAr)
Q5	Potência reativa associada à quinta harmônica (kVAr ou MVAr)
<i>R</i>	
R_S	
<i>s</i>	
$S, S_1, S_2 ou S_{kVA} \dots$	
<i>t</i>	
ТСА	
<i>TDA</i>	
$tg(\delta)$	fator de dissipação dielétrica
<i>T_{RISE}</i>	
<i>V</i>	
V (ou U)	

VA	
Var	
V _C ou V _{CAPACI}	TORTensão sobre o banco de capacitores (Volts)
Vca	
V _{C-EFETIVA}	Tensão efetivamente aplicada sobre o banco de capacitores (Volts)
V _{C-NOMINAL}	
V _{EFETIVA}	
V_h ou V_H	
<i>V</i> _{<i>L</i>-<i>L</i>}	
<i>V</i> _{<i>L</i>-<i>N</i>}	
<i>V</i> _{<i>N</i>}	
<i>V_{NC}</i>	
V _{PARALELO}	
<i>V</i> _{rms}	
V _S ou V _{N-REDE}	Tensão nominal do sistema ou da rede (Volts)
<i>V</i> ₀	
<i>V(0)</i>	
<i>V</i> ₃ <i>ou V</i> _{3<i>H</i>}	Componente harmônica de terceira ordem (180 Hz) na tensão (Volts)
<i>V</i> ₅ <i>ou V</i> _{5<i>H</i>}	Componente harmônica de quinta ordem (300 Hz) na tensão (Volts)
<i>V</i> ₇ <i>ou V</i> _{7<i>H</i>}	
V ₁₁ ou V _{11H}	Componente harmônica de décima primeira ordem (660 Hz) na tensão (Volts)
$V_{13} ou V_{13H}$	Componente harmônica de décima terceira ordem (780 Hz) na tensão (Volts)
X_{BASE}	
<i>X_C</i>	
X _{CAP} 60 Hz	
X _{IND 60} Hz	
X_L (ou simple.	smente X)Reatância indutiva (ohms)
X_{L1}	
<i>X</i> _{L3}	
<i>X</i> _{<i>L</i>5}	
X_{PU}	
<i>W</i>	
ω ₀ , ω	frequência angular, múltiplo da freqüência f (radianos/segundo)
<i>Y_{EQ}</i>	

Ζ	Impedância (símbolo)
Z _{ESTÁGIO}	Impedância de um estágio do banco de capacitores (ohms)
$Z_h (pu)$	
Z _{PARALELO}	
<i>Z</i> ₍₀₎	impedância de surto entre a fonte e o capacitor (ohms)
Z%	
φ	Ângulo do fator de potência
$\varphi_1 ou \ \alpha_2$	Ângulo do fator de potência não corrigido
$\varphi_2 ou \alpha_1$	Ângulo do fator de potência corrigido
ΔI_{STEP} Percentual de I_S	TEP acima / abaixo do qual o estágio capacitivo será energizado /
desenergizado	
ΔV%Elevação percent	ual da tensão no ponto de instalação do banco de capacitores (%)
μF	
$\mu\Omega$	
Ω	
°С	Graus centígrados ou graus Celsius

Índice

1. Introdução	
1.1 Objetivos	25
1.2 Contribuições	
1.3 Organização do texto	27
2. Fator de Potência – Abordagem Geral e Revisão Teórica	
2.1 O fator de potência	
2.2 Revisão teórica	
2.2.1 Conceitos elementares	
2.2.1.1 Caracterização básica do fator de potência	
2.2.1.2 Problemas ocasionados pelo baixo fator de potência	
2.2.1.3 Principais causas do baixo fp em uma instalação elétrica	
2.2.1.4 Considerações gerais sobre as possibilidades de correção do fp	
2.2.3 Benefícios adicionais advindos da utilização de capacitores	
2.2.4 Bancos automáticos de capacitores	
2.2.5 Capacitores com tensão e frequência nominais diferentes da tensão	
e freqüência da rede elétrica	
2.2.6 O fator de potência perante a presença de harmônicas	40
2.2.6.1 Capacitores e distorções harmônicas	40
2.2.6.2 Fator de potência e Cosφ	45
2.2.6.3 Desintonia de bancos capacitivos – Teoria básica e abordagem preliminar	48
3. Fator de Potência em Instalações Consumidoras – Legislação em Vigor	55
3.1 Histórico breve da legislação do fator de potência em instalações	
consumidoras	55
3.2 Legislação	
3.2.1 Considerações preliminares – Energia elétrica – Grupos e modalidades	
tarifárias	
3.2.2 Síntese da atual legislação do fator de potência	

4. A Medição do Fator de Potência em Instalações Consumidoras e a Conta	
de Energia Elétrica	60
4.1 Medição de energia elétrica para fins de faturamento – Aspectos gerais	60
4.2 A medição da energia reativa e do fator de potência	66
4.3 A Conta de energia elétrica	71
4.4 Medidores eletrônicos de energia elétrica	74
4.4.1 Considerações gerais e aspectos técnicos	74
4.4.2 Taxa de amostragem e classe de exatidão	77
4.4.3 "Janela" de medição e cálculo dos valores rms para determinação das	
grandezas faturáveis	81
4.5 Especificações técnicas de medidores pelas concessionárias de energia	
5. Configurações e Caracterização Geral dos Sistemas de Correção do fp	87
5.1 Bancos automáticos para correção do fator de potência	
5.1.1 Correção por bancos automáticos convencionais	87
5.1.1.1 Caracterização geral	87
5.1.1.2 Contatores para manobra de capacitores - Principais critérios de	
dimensionamento / especificação	92
5.1.2 Compensação dinâmica utilizando eletrônica de potência para	
acionamentos em degraus rápidos	94
5.1.2.1 Caracterização geral	94
5.1.3 Controladores automáticos do fator de potência	99
5.1.3.1 Caracterização geral	99
5.1.3.2 Parametrizações básicas	
5.1.4 Condutores, dispositivos de seccionamento, proteção e manobra /	
acionamento para circuitos de capacitores	
5.1.5 Capacitores estáticos para correção do fator de potência (baixa tensão)	110
5.2 Indutores para sistemas desintonizados (aplicáveis a sistemas convencionais	
ou sistemas a tiristores)	118
6. A Eletrônica de Potência aplicada à Correção do fp	121
6.1 Tiristores e módulos de potência comerciais	121
6.1.2 O tiristor SCR	

6.1.3 Síntese geral das principais características técnicas e dimensionamentos /	
especificações de módulos tiristorizados através de "data-sheets"	121
6.1.4 Módulos de potência comerciais	
6.1.5 Módulos de potência - Recursos e funcionalidades	
6.2 Compensação dinâmica utilizando eletrônica de potência para acionamentos	
em degraus rápidos e implementação adicional para ajuste fino com base	
na tecnologia "STATCOM" (aplicada em baixa tensão)	131
6.2.1 Considerações preliminares	
6.2.2 A tecnologia "STATCOM" – Introdução teórica básica	
6.2.3 Possibilidade de investigação, pesquisa e desenvolvimento quanto à	
utilização de um "STATCOM" (BT) para ajuste fino na correção do fp	
6.3 Sistemas convencionais x Sistemas dinâmicos – Comparativo geral	
7. Estudo baseado em um caso real – Equipamentos de Sodagem na Industria	142
Automobilistica	
7.1 Cargas com dinâmica rápida na indústria automobilística (solda a ponto /	
ponteadeiras)	
7.1.1 Contextualização	143
7.1.1.1 Solda a ponto por resistência	
7.1.1.2 Equipamentos	145
7.1.1.3 Ciclo básico de soldagem	147
7.1.1.4 Vantagens e desvantagens do sistema de solda a ponto por resistência	
7.2 Estudo de caso – Ponteadeiras na indústria automobilística	149
7.2.1 Introdução	
7.2.2 Características gerais da instalação elétrica analisada	
7.2.3 Barramentos BT de interesse efetivo para o estudo	
7.2.4 Causas do baixo fp (instalação como um todo) e ônus mensal	154
7.2.5 Principais características técnicas dos equipamentos de soldagem a ponto	
7.2.6 Caracterização dos parâmetros elétricos operacionais nos barramentos	
de alimentação geral de estações de soldagem (medições / monitoramentos)	
7.2.7 Tabela-Resumo dos monitoramentos	
7.2.8 Análise das solicitações de reativos e o processo básico de compensação	
(sistemas dinâmicos e sistemas convencionais)	
7.2.8.1 Ordenamento / sistematização dos dados primários	

7.2.8.2 Avaliações iniciais	171
7.2.8.3 Avaliações para um sistema de correção dinâmica (tempo de resposta = 25 ms)	175
7.2.8.4 Avaliações para um sistema de correção com banco automático convencional	180
7.2.8.5 Avaliações para um sistema comercial de correção dinâmica (tempo de	
resposta = 125 ms)	185
7.2.8.6 Avaliações preliminares para um sistema conceitual baseado em	
módulos tiristorizados e em um STATCOM-BT conceitual	190
7.2.9 A performance dos sistemas sob a ótica da medição da concessionária de energia	196
7.2.10 Avaliações adicionais e conclusões técnicas sobre os sistemas investigados	197
8. Conclusões Finais	205
9. Propostas para Aprofundamento e Extensão	208
9. Propostas para Aprofundamento e Extensão Referências bibliográficas e demais fontes de consulta	208
9. Propostas para Aprofundamento e Extensão Referências bibliográficas e demais fontes de consulta Apêndices	208 211 224
 9. Propostas para Aprofundamento e Extensão Referências bibliográficas e demais fontes de consulta Apêndices Apêndice 1 – Atual Legislação do Fator de Potência (consumidores cativos) 	208 211 224 224
 9. Propostas para Aprofundamento e Extensão Referências bibliográficas e demais fontes de consulta Apêndices Apêndice 1 – Atual Legislação do Fator de Potência (consumidores cativos) Apêndice 2 - Considerações sobre a Aplicação de Sistemas de Correção do fp a 	208 211 224 224
 9. Propostas para Aprofundamento e Extensão	208 211 224 224

1. Introdução

Este capítulo tem por objetivo introduzir o tema abordado na Dissertação, apresentando os objetivos do trabalho, suas contribuições para o conhecimento na área e a estruturação geral do texto.

1.1 Objetivos

Considerado o contexto pretendido para este trabalho, definiu-se, como objetivo final, caracterizar os sistemas para correção do fator de potência em baixa tensão comercialmente disponíveis no mercado (fundamentalmente os sistemas automaticamente controlados, convencionais e dinâmicos ou em *"tempo real"*), bem como avaliar sua aplicabilidade e efetividade no que refere à compensação de reativos solicitados por cargas industriais com rápida dinâmica operacional.

Ressalta-se que o ponto de referência para as avaliações aqui apresentadas consiste, em última análise, da verificação dos efeitos de cada sistema analisado sobre o fator de potência efetivamente "enxergado" pelos sistemas de medição das concessionárias de energia elétrica. Portanto, trata-se de um trabalho focado fundamentalmente em *engenharia de aplicação e* que busca, sem pretender esgotar completamente o assunto, aprofundar e consolidar as diretrizes e os principais critérios de análise a serem considerados para o emprego de sistemáticas de correção do fator de potência, fundamentalmente nos segmentos industriais com utilização mais ampla de cargas cuja natureza de operação requeira soluções não convencionais.

Como objetivo adicional, ressalta-se o interesse em se investigar, ainda que em caráter preliminar, sistemas ainda não difundidos no mercado, cuja topologia incorpore novas funcionalidades capazes de promover a otimização das técnicas de correção do fator de potência / compensação de reativos. Nesse sentido, buscou-se investigar um sistema mais implementado, baseado em eletrônica de potência, utilizando a tecnologia do "*STATCOM*", para possibilitar um maior refinamento nas correções dos picos de demanda de potência reativa.

Finalmente salienta-se que, para o atingimento dos objetivos propostos, tornou-se necessário abordar conceitos da eletrotécnica convencional, da eletrônica de potência e da qualidade da energia, tomando-se, como base geral para as avaliações, aspectos relacionados à medição de

energia elétrica para fins de faturamento, bem como a legislação tarifária em vigor, especialmente no que tange ao fator de potência.

1.2 Contribuições

Considera-se que as contribuições deste trabalho para o conhecimento na área são:

-A caracterização mais promenorizada dos sistemas de correção do fator de potência em baixa tensão existentes no mercado, apresentando e sistematizando, em um único documento técnico-acadêmico, suas principais características técnico-operacionais. Salienta-se que as informações sobre o tema, embora amplamente difundidas, encontram-se, via de regra, esparsas e fragmentadas em diversas fontes, considerando-se ser importante e útil condensá-las de maneira objetiva para avaliação e consultas dos profissionais da área;

-O estabelecimento de paralelos comparativos entre as tecnologias de correção disponíveis;

aos disponibilização de maiores subsídios técnicos -A profissionais da área. fundamentalmente aos engenheiros atuantes nos segmentos industriais (nas áreas de consultoria, projetos e manutenção), no que refere aos aspectos a serem observados quando da abordagem de um problema relacionado ao fator de potência e às alternativas de mercado existentes para a correção em baixa tensão. É importante ressaltar que um grande contingente das unidades industriais e comerciais não corrigem adequadamente o fator de potência de suas instalações por desconhecimento técnico (ausência de corpo de engenharia próprio) e, também, pelo fato de que "a multa" por baixo fp é expressa nas contas de energia através de uma terminologia (UFDR, UFER, Consumo de Energia Reativa Excedente, Demanda Reativa Excedente, etc) que disfarça a caracterização de ônus passível de eliminação (AMORIM, 2008). Sendo assim, segundo (SENE, 2006), mais de um terço dos consumidores de pequeno e médio portes não corrigem adequadamente (ou simplesmente não adotam qualquer medida na tentativa de corrigir) o fator de potência, situação que gera, para eles mesmos, ônus mensais e o mau aproveitamento da energia, e, para as concessionárias, o maior carregamento de seus sistemas;

-A introdução de novos conceitos de correção, por meio da investigação e apresentação de tecnologias ainda não disponíveis comercialmente, porém, potencialmente aplicáveis em futuro próximo. Sob esse aspecto, acredita-se que a Dissertação constitua-se como um documento informativo / esclarecedor para a comunidade acadêmica no que se refere a possíveis oportunidades para pesquisa e aprofundamento no tema

1.3 Organização do texto

Os assuntos tratados neste trabalho estão organizados em 10 capítulos, conforme a estruturação apresentada a seguir.

O Capítulo 2 propõe-se a revisar alguns aspectos importantes relativos à teoria básica relacionada ao tema "*Fator de Potência*", objetivando o nivelamento inicial de informações e a apresentação de conceitos que constituem a base geral para o entendimento dos assuntos tratados nos capítulos seguintes. Nesse capítulo abordam-se, além dos princípios elementares associados ao tema, os principais problemas advindos do baixo fator de potência, suas principais causas em uma instalação elétrica e as possibilidades de correção. <u>Trata-se de um capítulo introdutório, cuja leitura não é considerada imprescindível para o entendimento do foco específico da Dissertação, podendo, em princípio, ser consultado posteriormente, e apenas se necessário.</u>

O Capítulo 3 concentra informações específicas acerca da legislação atualmente em vigor para monitoramento e faturamento do fator de potência em instalações consumidoras (consumidores cativos) por parte das concessionárias de energia elétrica. O texto encontra-se estruturado de maneira sucinta e objetiva, possibilitando ao leitor o acompanhamento da evolução histórica dos critérios de taxação por baixo fator de potência e a sistemática atualmente adotada para a quantificação de eventuais ônus incidentes nas contas de energia elétrica. Nesse capítulo também são apresentados conceitos e aspectos gerais da legislação tarifária em vigor, cujo conhecimento, ainda que básico, é fundamental para que se possa compreender a terminologia e os critérios empregados pelas concessionárias quando se trata do assunto *"fator de potência"*.

O Capítulo 4 apresenta as principais características dos sistemas de medição de energia elétrica adotados pelas concessionárias nos segmentos consumidores industriais (e comerciais) de médio e grande portes para fins de faturamento. O texto sistematiza as principais informações a partir das quais pode-se compreender, de maneira simples, a operação dos medidores no que se refere à captura dos sinais de tensão e corrente obtidos através de TP's (transformadores de potencial) e TC's (transformadores de corrente), bem como sua conversão nas grandezas de interesse para o tema aqui abordado, ou seja, as potências (e energias) ativa e reativa. A partir delas, como se sabe, definem-se os parâmetros necessários para a quantificação da demanda e da energia reativa excedentes e, em última instância, do fator de potência operacional. Aborda-se, também, a sensibilidade dos sistemas de medição

ou, em outras palavras, a velocidade com que os mesmos são capazes processar e de registrar as grandezas elétricas.

No Capítulo 5 são apresentadas as principais características e configurações dos sistemas automáticos em baixa tensão disponibilizados pelo mercado. O foco consiste na abordagem geral, e isoladamente, dos seguintes sistemas:

-sistemas convencionais, baseados em controladores automáticos com estágios comandados através de relés (contatos secos) e capacitores estáticos energizados / desenergizados através da manobra de contatores eletromecânicos;

-sistemas dinâmicos, baseados em controladores automáticos com estágios comandados a estado sólido através de transistores e capacitores estáticos energizados / desenergizados através módulos de potência tiristorizados.

No Capítulo 6 enfatiza-se a eletrônica de potência aplicada à correção do fp. São abordadas as principais características dos módulos de potência tiristorizados comerciais para chaveamento de capacitores, suas funcionalidades e principais aspectos associados às especificações técnicas com base em *data-sheets* comerciais. Além dos sistemas comercialmente disponíveis, nesse capítulo busca-se também investigar e caracterizar as principais funcionalidades de um sistema com topologia baseada na tecnologia "*STATCOM*", potencialmente aplicável em baixa tensão, para um maior refinamento na correção do fp, principalmente para a compensação dinâmica de picos oscilatórios na demanda de potência reativa solicitada pelas cargas com rápidas dinâmicas operacionais.

O Capítulo 7, mais extenso, concentra-se na avaliação de um caso real, apresentando um estudo baseado em dados obtidos em campo. O objetivo final desse capítulo reside na avaliação do emprego das tecnologias de correção *convencional* e *dinâmica* para a correção do fator de potência de equipamentos de soldagem a ponto por resistência, largamente utilizados na indústria automobilística, e cuja operação apresenta uma rápida dinâmica operacional. Inicialmente, o capítulo contextualiza o tipo de carga em questão e, posteriomente, aborda seu comportamento elétrico, as necessidades de compensação de reativos e os principais relacionados aos sistemas de correção disponíveis. Ao final, comparam-se as performances dos sistemas *convencionais* e *dinâmicos* à luz dos requisitos impostos pela carga, pelo sistema de medição da concessionária de energia e por aspectos associados à *qualidade da energia*, de forma a se definir qual deles é mais compatível com essa aplicação.

Finalmente, nos Capítulos 8 e 9 apresentam-se, respectivamente, as conclusões finais do trabalho e algumas propostas para seu aprofundamento e extensão.

Adicionalmente, foram incluídos as Referências Bibliográficas (além de outras fontes consultadas) e os Apêndices 1 a 3, que contemplam informações gerais, complementando, detalhando alguns aspectos abordados ao longo do texto principal e ilustrando o trabalho desenvolvido.

2. Fator de Potência – Abordagem Geral e Revisão Teórica

Este capítulo apresenta os aspectos gerais e uma síntese da teoria básica associada ao assunto "Fator de Potência", concentrando-se, basicamente, na caracterização deste índice e na importância de seu monitoramento e controle nas instalações industriais e comerciais, fundamentalmente quando da presença de cargas com rápida dinâmica operacional.

Por se tratar de um capítulo destinado à revisão e nivelamento básico de informações, sua leitura poderá, em princípio, ser dispensada, de modo que o leitor possa concentrar-se em capítulos mais diretamente focados no tema específico da Dissertação.

2.1 O fator de potência

O *Fator de Potência* é um índice de utilização de energia cujo controle adequado em instalações consumidoras é extremamente importante, não apenas sob o ponto de vista eletroenergético, mas também, e fundamentalmente, pelo fato de ser monitorado pelos sistemas de medição das concessionárias, podendo incorrer em ônus (muitas vezes significativos) nas contas de energia elétrica.

Portanto, torna-se relevante a análise da aplicação de sistemas de correção que possibilitem ajustá-lo e mantê-lo acima do limite mínimo permitido pela normalização em vigor, principalmente perante a existência de blocos significativos de cargas cujas características de operação incorram em níveis de consumo de energia reativa que provoquem baixo fp em intervalos de tempo muito curtos e em ciclos repetitivos. Note-se que tais consumos reativos são registrados pelos medidores das concessionárias e que, nos casos em que os mesmos ocorrem subitamente, geralmente não há uma compensação satisfatória pelos sistemas de correção convencionais em função de sua resposta dinâmica insuficiente.

Atualmente, a expressão matemática que quantifica a cobrança por baixo fator de potência no caso dos consumidores atendidos em tensão primária (M.T. ou A.T.) e enquadrados nos sistemas de tarifação horo-sazonal, baseia-se na totalização dos consumos de energia ativa e reativa <u>acumulados a cada hora</u> de operação das plantas / edificações, gerando parcelas horárias de ônus, totalizadas ao final de um ciclo completo (1 mês) de faturamento (CODI, 2004) (ANEEL, 2000). Sendo assim, verifica-se que todas as parcelas de consumo de energia ativa e reativa efetivamente registradas a cada hora, e que incorram em baixo fp (sem a devida

compensação dos reativos), contribuem para o ônus final na conta de energia elétrica. Daí, a importância de se promover o controle do fator de potência praticamente em "tempo real", ou seja, em tempo compatível (preferencialmente inferior) com a sensibilidade dos sistemas eletrônicos de medição das concessionárias de energia, fundamentalmente para as cargas que apresentam dinâmica rápida. Note-se ainda que, conforme a legislação em vigor publicada em (ANEEL, 2000), são penalizados os consumidores com fatores de potência horários inferiores a 0,92_{INDUTIVO} nos períodos diurnos e à noite (geralmente entre 06:00 e 24:00 hs), e inferiores a 0,92_{CAPACITIVO} no período da madrugada (geralmente entre 0:00 às 06:00 hs), o que ressalta ainda mais a necessidade da aplicação adequada de sistemas de correção dinâmica do fp (maiores detalhes relativos à atual legislação sobre o fator de potência serão apresentados no Capítulo 3).

Além disso, é importante ressaltar o relativo desconhecimento e a inexperiência de vários profissionais de mercado no que se refere aos sistemas de correção dinâmica. Na prática, não é raro que as situações de baixo fp e, consequentemente, de ônus indesejáveis nas contas de energia, embora sendo detectadas, perdurem em decorrência da aplicação inadequada de sistemas de correção convencionais e/ou pelo desconhecimento das possíveis abordagens e das soluções mais aplicáveis para o problema.

2.2 Revisão teórica

2.2.1 Conceitos elementares

2.2.1.1 Caracterização básica do fator de potência

Em síntese, e em termos qualitativos, o Fator de Potência é um índice adimensional que indica a representatividade da energia ativa perante a energia total (aparente) absorvida por um equipamento (ou uma instalação). Varia entre 0 (zero) e 1 (um) indutivo ou capacitivo, ou seja, entre zero e 100%.

Pode ser definido recorrendo-se ao conhecido "*triângulo de potências*" apresentado na Figura 2.1 e expresso da seguinte forma (para sistemas puramente senoidais):



Figura 2.1 – Triângulo de potências Fonte: (CODI, 2004) – figura adaptada

onde:

 $P = pot \hat{e}ncia ativa, expressa em kW;$

Q = potência reativa, expressa em kVAr;

 $S = pot \hat{e}ncia a parente, expressa em kVA;$

 $\varphi = \hat{a}$ ngulo de defasagem entre tensão e corrente (graus elétricos), conforme Figura 2.2.



Figura 2.2 – Ângulo de defasagem entre tensão e corrente Fonte: (SIEMENS, 2005) – figura traduzida

Certas cargas como, por exemplo, as lâmpadas incandescentes ou os fornos resistivos, conseguem transformar toda a energia consumida em outras formas de energia (energia luminosa e térmica no caso das lâmpadas incandescentes, e, basicamente, energia térmica no caso dos fornos resistivos – calor por convecção e por radiação). Outras, tais como os motores de indução, utilizam parte da energia consumida para sua operação própria (manutenção de seus campos magnéticos internos) e parte para a transformando em trabalho útil e para o suprimento de suas perdas internas.

Na prática, quando se diz que uma instalação apresenta baixo fator de potência, isso significa que a energia total consumida pelo conjunto de seus equipamentos em operação compõe-se por uma parcela de energia ativa (kWh) e por uma parcela de energia reativa superior a 0,426 kVArh para cada kWh consumido, se tomada como base a faixa permissível para o fp (Figura 2.3) estabelecida pela atual legislação para consumidores cativos (entre 92_{INDUTIVO} e 0,92_{CAPACITIVO}, conforme já citado no subitem 2.2) (ANEEL, 2000).

No caso dos consumidores livres, para os quais existem especificidades abordadas em legislação complementar própria, tais limites variam, podendo ser superiores a 0,92.



Figura 2.3 – Faixa permissível para o fator de potência pela atual legislação Fonte: (CODI, 2004)

A potência reativa e a energia reativa são dadas, respectivamente, em VAr (Volt-Ampérereativo) e VArh (Volt-Ampére-reativo-hora), sendo usualmente adotados na prática o kVAr (quiloVolt-Ampére-reativo) e o kVArh (quiloVolt-Ampére-reativo-hora) ou, no caso de grandes instalações, com altos níveis de demanda e consumo, o MVAr (MegaVolt-Ampérereativo) e o MVArh (MegaVolt-Ampére-reativo-hora).

A potência ativa e a energia ativa, como se sabe, são dadas usualmente em kW (quilowatt) e kWh (quilowatt-hora) ou, no caso das grades instalações, em MW (Megawatt) e MWh (Megawatt-hora).

2.2.1.2 Problemas ocasionados pelo baixo fator de potência

Os problemas clássicos associados a um baixo fator de potência são (CODI, 2004):

-favorecimento à ocorrência de sobrecargas na rede elétrica;

-aumento das perdas de energia em condutores, em decorrência da circulação de maiores parcelas de correntes de natureza reativa (Figura 2.4);



Figura 2.4 – Variação das perdas de energia em condutores em função do fp Fonte: (CODI, 2004)

-redução dos níveis de tensão, principalmente em pontos mais distantes da origem da alimentação elétrica, devido às quedas de tensão originadas nos circuitos pela circulação de maiores níveis de corrente;

-comprometimento de parcela da capacidade dos transformadores e alimentadores apenas para suprimento da energia reativa (subutilização do sistema elétrico);

-incidência de ônus nas contas de energia.

2.2.1.3 Principais causas do baixo fp em uma instalação elétrica

Geralmente, as causas da ocorrência de baixo fator de potência nas instalações elétricas decorrem, conforme (CEMIG, 1997), (COTRIM(1), 2008), (MAMEDE, 2007), (WEG, 2001) e (TLA, 200-?):

-da presença predominante de motores elétricos de indução (e de máquinas de solda do tipo motor-gerador), fundamentalmente os de baixa e média potências, equipamentos que, mesmo operando à plena carga, em geral não atendem ao fator de potência de referência (0,92) exigido pela legislação;

-da presença de motores elétricos operando em vazio ou com baixas condições de carregamento, situações agravantes que reduzem drasticamente seus fatores de potência operacionais;

-da presença de máquinas de solda do tipo transformador-retificador, principalmente quando existentes em maior número e com elevadas jornadas de funcionamento diário;

-da presença de tensão elétrica elevada (nos equipamentos com princípios de funcionamento baseados na geração de campos magnéticos, a potência reativa é porporcional ao quadrado da tensão aplicada);

-da presença de reatores de sistemas de iluminação de descarga sem correção individual incorporada, por não atenderem ao fator de potência de referência (0,92);

-da existência de transformadores operando em vazio ou com baixas condições de carga por longos períodos, uma vez que a potência reativa necessária para a manutenção do fluxo magnético interno permanece inalterada desde que mantido o nível da tensão de alimentação;

-da utilização de acionamentos eletro-eletrônicos tiristorizados (eletrônica de potência);

-da operação de fornos a indução e fornos a arco;

-no caso dos consumidores com monitoramento horário do fp: excesso de capacitores em operação no período geralmente compreendido entre 0:00 e 6:00 horas da manhã.

Outras causas comuns encontradas na prática em unidades consumidoras com capacitores já instalados são: capacitores fora de operação, já degradados, com proteções queimadas / atuadas ou com dispositivos de controle ajustados inadequadamente.

2.2.1.4 Considerações gerais sobre as possibilidades de correção do fp

Basicamente, e em tese, há três métodos passíveis de utilização para a correção do fp (CEMIG, 1997) (COTRIM(2), 2008):

-Aumento do consumo de energia ativa;

- -Utilização de motores íncronos superexcitados; e
- -Utilização de capacitores (Figura 2.5):



Figura 2.5 – Correção do fp por capacitores Fonte: (EPCOS(1), 2007) – figura traduzida

Na prática, pode-se considerar que esse é o único método efetivamente utilizado tendo como objetivo principal a correção do fp; capacitores estáticos são equipamentos de custo relativamente baixo, dimensões reduzidas, fácil instalação e que operam permutando a energia reativa, por eles acumulada, com as cargas indutivas presentes; parte da energia reativa (ou toda ela) originalmente fornecida pela concessionária, passa a ser fornecida pelos bancos de capacitores.

Em linhas gerais, para a correção do fp por capacitores, calcula-se a potência capacitiva necessária por meio das seguintes expressões:

$$Q_{CAPACITOR} = Q - \left[P \cdot tg\left(\varphi_{2}\right)\right]$$
^(2.1)

$$Q_{CAPACITOR} = \left[\left(P \cdot tg(\varphi_1) \right) - \left(P \cdot tg(\varphi_2) \right) \right]$$
^(2.2)

$$P \cdot [tg(\varphi_1) - tg(\varphi_2)] = P \cdot [tg(ar\cos(FP_1)) - tg(ar\cos(FP_2))]$$
^(2.3)

onde:

 $Q_{CAPACITOR}$ = potência necessária em capacitores (kVAr);

.P = potência ativa demandada pela carga (kW);

.Q = potência reativa indutiva demandada pela carga (kVAr);

 $. \varphi_1 =$ ângulo relativo ao fator de potência antes da correção;

 $\varphi_2 =$ ângulo relativo ao fator de potência requerido após a correção;

 fp_1 = fator de potência antes da correção;

 $fp_2 =$ fator de potência requerido após a correção.

Pela Figura 2.6 pode-se visualizar e entender o conteúdo das expressões 2.1 a 2.3 e a alteração no "*triângulo de potências*" em decorrência da introdução da potência reativa capacitiva.



Figura 2.6 – O triângulo de potências e a correção do fp Fonte: figura obtida pelo autor (sem origem especificada)
2.2.3 Benefícios adicionais advindos da utilização de capacitores (BT)

Quando da realização de estudos de correção do fator de potência, é interessante que a instalação consumidora seja avaliada de uma forma mais abrangente e que, sempre que possível, a solução possa contemplar outros benefícios adicionais abordados em (MAMEDE, 2007) (CODI, 2004) (COTRIM(1), 2008) (COTRIM(2), 2008) (CEMIG, 1997) (WEG, 2001) e (TLA, 200-?), tais como:

-a liberação da capacidade de transformadores, devido à menor circulação de correntes de natureza reativa e, consequentemente, em decorrência da redução dos kVAs associados às parcelas adiconais de potência reativa suprida para as cargas;

-pelo mesmo motivo, a liberação da capacidade dos circuitos de distribuição geral e parcial, com a conseqüente redução das perdas de energia em condutores (a redução de perdas pode ser calculada percentualmente para uma determinada carga e uma dada potência capacitiva em operação, pela expressão a seguir);

$$REDUÇÃO \, das \, PERDAS(\%) = \left(I - \frac{FP_i^2}{FP_f^2}\right) \cdot 100 \tag{2.4}$$

onde:

 $fp_i = fator de potência inicial (antes da correção); e$

 $fp_f = fator de potência final (após a correção).$

-a melhoria dos níveis de tensão no ponto de instalação do banco de capacitores; na prática, o percentual de elevação na tensão relativamente à tensão na origem (geralmente o transformador a montante) pode ser calculado pela expressão a seguir.

$$\Delta V \% = \left(P_C \cdot X_L \cdot L \right) / \left(10 \cdot V^2 \right)$$
(2.5)

onde:

$$\Delta V\% = elevação percentual da tensão no ponto de instalação do banco de capacitores;$$

- $.P_c = potência capacitiva em operação (kVAr);$
- X_L = reatância indutiva unitária dos circuitos entre a origem e o banco (ohms/km);
- $L = comprimento \ dos \ circuitos \ entre \ a \ origem \ e \ o \ banco \ (km); e$
- V = tensão fase-fase (kV) na origem.

Esses benefícios adicionais podem ser obtidos por meio de uma avaliação mais criteriosa das possibilidades de localização dos capacitores ao longo da instalação.

2.2.4 Bancos automáticos de capacitores (com base em (MAMEDE, 2007), (COTRIM(1), 2008), (WEG, 2001), (SIEMENS(1), 2002) e (CODI, 2004))

Os sistemas para correção automática do fp são geralmente adotados para correção global ou correção por setores (instalações de médio e grande portes), considerando o suprimento de energia reativa capacitiva conforme as necessidades momentâneas da instalação (ou de parte dela) e promovendo o controle dinâmico do fator de potência. Um esquemático orientativo e bastante simplificado dessa configuração pode ser visualizado pela Figura 2.7.

O controle é exercido por um equipamento eletrônico (controlador automático do fp - CAFP). Monitoram-se os níveis de tensão (através de sinais obtidos a partir da rede monitorada) e os níveis de corrente em um alimentador geral obtidos a partir da rede monitorada) e os níveis de corrente em um alimentador geral (através do secundário de TCs - transformadores de corrente).



Figura 2.7 – Capacitores controlados automaticamente Fonte: (SIEMENS(1), 2002) – figura adaptada

O controlador executa um algorítimo interno, calculando o fator de potência instantâneo (ou resultante em um curto intervalo de tempo) e decidindo sobre a inserção ou retirada de capacitores a intervalos regulares de tempo com base em uma faixa admissível (pré-ajustada) ou, mais comumente, em um determinado fator de potência requerido; os controladores possuem relés de saída que abrem ou fecham seus contatos (ou transistores que permitem ou bloqueiam a condução de corrente), no sentido de promover a energização ou desenergização dos contatores (ou de módulos de potência tiristorizados) dos circuitos de alimentação dos

capacitores; em geral, as operações são cíclicas de maneira que haja uma alternância entre os capacitores a serem operados, buscando-se equalizar ao máximo possível a vida útil das unidades presentes; as parametrizações são feitas de modo que o sistema conheça qual é a potência reativa capacitiva associada a cada estágio de controle.

Quando se faz necessária a correção de um barramento alimentado por dois (ou mais) transformadores operando em paralelo, pode-se adotar a configuração apresentada na Figura 2.8. Nesse caso, pressupondo-se a utilização de um único controlador automático, podem-se utilizar TCs associados à mesma fase dos secundários de cada transformador, conectados a um TC somador (de mesma fase), a partir do qual o controlador "enxergará" os sinais da corrente global.



Figura 2.8 – Controle de capacitores alimentados por 2 (ou mais) transformadoeres em paralelo Fonte: (VISHAY, 2005)

2.2.5 Capacitores com tensão e frequência nominais diferentes da tensão e freqüência da rede elétrica (com base em (EPCOS(1), 2007))

Considerando-se que um capacitor seja utilizado em uma instalação elétrica cuja tensão e/ou freqüência sejam distintas de seus parâmetros nominais, sua potência reativa capacitiva de placa é alterada conforme a seguinte expressão:

$$Q_{C-Corrigida} = \left(\frac{V_{Efetiva}}{V_N}\right)^2 \cdot \frac{f_{Efetiva}}{f_N} \cdot Q_{C-Nominal}$$
(2.6)

onde:

 $.Q_{C-NOMINAL} = potência de placa do capacitor (sob tensão e frequência nominais), em kVAr;$

 $V_N e f_N = tensão e frequência nominais de projeto do capacitor, em V e Hz;$

 $V_{EFETIVA}$ e $f_{EFETIVA}$ = tensão e frequência da rede em que o capacitor será conectado, em V e Hz; e

 $Q_{C-CORRIGIDA} = potência efetiva do capacitor operando sob tensão e frequência distintas das de projeto, em kVAr.$

Na prática, e geralmente em alguns tipos de edificações comerciais ("shopping centers", por exemplo), eventualmente podem ser encontrados capacitores com tensão nominal superior à tensão da rede (exemplo: capacitores projetados para 440 V e utilizados em redes de 380 V) na tentativa de se obter alguma segurança extra e estender a vida útil dos bancos, principalmente nos casos em que não tenham sido realizados estudos prévios visando a avaliação da qualidade da energia local.

Todavia, quando se adota essa medida, a potência reativa capacitiva previamente calculada (ou estimada) para a correção do fp deve ser corrigida conforme a expressão anterior, empregando-se um número maior de capacitores (ou capacitores com potências nominais superiores) de modo a se compensar o efeito da aplicação de tensão inferior.

2.2.6 O fator de potência perante a presença de harmônicas

2.2.6.1 Capacitores e distorções harmônicas

Nas últimas décadas, os progressos da eletrônica de potência têm proporcionado uma verdadeira revolução na indústria e também no segmento comercial, trazendo uma série de vantagens no que se refere às possibilidades de refinamento nos automatismos, ao controle fino, à precisão e à produtividade.

Por outro lado, tais sistemas têm sido alguns dos principais responsáveis pela "poluição elétrica" nas redes internas dos usuários, gerando um grande contingente de problemas especialmente no âmbito da *qualidade da energia*. Nesse contexto, em uma instalação elétrica os capacitores estáticos tornam-se vítimas em potencial quando surgem distorções harmônicas na corrente e na tensão, distúrbios geralmente produzidos pela operação de cargas não lineares (equipamentos baseados na eletrônica de potência, equipamentos que operam por meio da produção de arcos elétricos e dispositivos ferromagnéticos).

Há um conceito errôneo de que os capacitores são causadores de distorções harmônicas. Segundo (ISONI, 2004), na realidade eles não geram harmônicas; porém, podem agravar os problemas potenciais das harmônicas como será abordado mais adiante. Inclusive, é relativamente comum a situação em que a presença das harmônicas (e suas conseqüências) em uma determinada instalação elétrica venha a ser conhecida apenas a partir do momento em que se utilizam capacitores para a correção do fator de potência. Perante a presença de correntes harmônicas (de freqüência mais elevada) na rede, os capacitores podem ser submetidos a esforços térmicos inadmissíveis com a possibilidade real de queimas prematuras, uma vez que a reatância capacitiva diminui com o aumento da freqüência. Sendo assim, as correntes harmônicas encontrarão um caminho de menor impedância através dos capacitores, elevando suas perdas ôhmicas e gerando sobreaquecimentos que reduzirão sua vida útil e que poderão, em situações mais extremas, provocar rupturas de carcaças em decorrência de explosões. Além disso, a aplicação de capacitores em instalações onde encontram-se cargas não lineares em operação (e, portanto, geradoras de harmônicas), requer a avaliação de potenciais problemas relativos à ocorrência de ressonância.

A título de revisão teórica, segundo (ISONI, 2004), "*Ressonância Elétrica*" é a situação que ocorre a uma dada freqüência particular para a qual os efeitos indutivo e capacitivo em um circuito se equivalem quantitativamente (em módulo). A ressonância pode ser do tipo "série" (quando o fluxo de corrente enxerga elementos indutivos e capacitivos em série) ou do tipo "paralela" (quando o fluxo de corrente enxerga elementos indutivos e capacitivos em série) ou do tipo "paralelo", ou mesmo uma conjugação de ambas as situações. Em ambos os casos (considerando-se desprezível a resistência ôhmica do circuito em relação às reatâncias indutiva e capacitiva) a freqüência de ressonância pode ser calculada através da expressão a seguir:

$$f = 1/(2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}) \tag{2.7}$$

onde:

f = frequência (Hz) para a qual um sistema (composto por uma indutância L e uma capacitância C) entra em ressonância;

L = indutância (henry), por exemplo, de um transformador (ou mesmo a indutância equivalente da instalação como um todo); e

C = capacitância (farad) de um banco de capacitores.

Na prática, os casos mais comuns ocorrem quando a indutância da fonte de alimentação (a associação do sistema de suprimento e de um transformador, por exemplo) entra em *ressonância paralela* com um banco de capacitores para a freqüência correspondente a uma das correntes harmônicas geradas por cargas não-lineares operantes na instalação (ou valor

próximo a ela) ou para a freqüência de uma harmônica eventualmente presente na tensão de alimentação, proveniente da rede externa (ISONI, 2004).

As Figuras 2.9, 2.10 e 2.11 ilustram essa situação, e são comentadas nos parágrafos seguintes.

Percebe-se pelas figuras, e com base em (DUGAN(1), 2002), que as fontes de corrente harmônicas "enxergam" a associação em paralelo entre o sistema de correção do fp e a indutância equivalente do sistema a montante (fonte de suprimento, transformador, cablagens).



Figura 2.9 – Correntes harmônicas presentes em uma instalação elétrica genérica Fonte: (DUGAN(1), 2002)



Figura 2.10 – Correntes e tensões harmônicas amplificadas pela presença de capacitores Fonte: (DUGAN(1), 2002) – figura traduzida



Figura 2.11 – Ressonância Paralela – Circuito equivalente Fonte: (DUGAN(1), 2002) – figura traduzida

Perante a ocorrência de ressonância paralela ($X_C e X_L$ equivalentes em módulo), a impedância aparente "enxergada" pelas fontes harmônicas (paralelo entre capacitor e indutâncias a montante) é expressa por:

$$Z_{PARALELO} = [(X_C \cdot (X_{Leq} + R))] / (X_C + X_{Leq} + R); se R \ll X_{Leq} \Rightarrow Z_{PARALELO} = X_{Leq}^2 / R = X_C^2 / R$$
(2.8)

Note-se que R (resistência equivalente da fonte de suprimento, transformador e cablagens) não se encontra representada nas figuras anteriores. Porém, é um parâmetro existente em situações reais, apresentando valor geralmente muito inferior à reatância equivalente X_{Leq} , principalmente na freqüência de ressonância. Portanto, $Z_{PARALELO}$ assume valor elevadíssimo e mesmo uma corrente harmônica de pequena magnitude causa uma elevada tensão no ponto de alimentação do capacitor, o que se percebe observando-se a expressão a seguir e levando-se em conta que R << X_{Leq} .

$$V_{PARALELO} = Z_{PARALELO} \cdot I_H = (X_{Leq}^2/R) \cdot I_H$$
(2.9)

Em alguns casos, segundo (DUGAN(1), 2002), o sistema de correção do fator de potência e a indutância equivalente a montante são "enxergados" pelas fontes harmônicas com um circuito LC série, conforme indica o esquemático unifilar apresentado na Figura 2.12.



Figura 2.12 – Ressonância Série Fonte: (DUGAN(1), 2002) – figura traduzida

Se a freqüência de ressonância corresponde a uma harmônica característica gerada pelas cargas não lineares presentes, o circuito LC drenará uma elevada parcela da corrente harmônica em circulação. A combinação série da indutância equivalente do circuito (cablagens e transformador) e da capacitância do sistema de correção do fp produzirá uma reatância desprezível (teoricamente nula, já que X_C e X_L se contrapõem), e a impedância $Z_{SÉRIE}$ será composta apenas pela resistência ôhmica do circuito (não representada na Figura 2.12), geralmente de valor bastante baixo.

$$\mathbf{Z}_{S \not\in R I E} = (X_L - X_C) + \mathbf{R} = \mathbf{R}$$
(2.10)

Analisando-se o circuito série em questão para a frequência de ressonância (e sabendo-se que X_C e X_L se cancelam), pode-se concluir:

$$I_H = V_C / X_C = V_S / (X_C + X_L + R) \Longrightarrow V_C. R = V_S. X_C \Longrightarrow V_C = (V_S. X_C) / R$$
(2.11)

Considerando-se que R $\leq X_C$, verifica-se que na ressonância série a tensão aplicada sobre o sistema de correção do fp assumirá valores elevados decorrentes da baixíssima impedância envolvida e da circulação de uma corrente harmônica de alta magnitude. Em resumo, o atingimento de condições de ressonância (paralela ou série) tenderá a impor aos bancos capacitivos elevados níveis de sobrecorrentes e/ou sobretensões cujas magnitudes dependerão das características dos bancos e da resistência ôhmica presente no circuito (esta, dependendo

de sua magnitude, atuará como elemento dificultador ou facilitador para a severidade do fenômeno).

Objetivando uma análise inicial, pode-se estimar a ordem da frequência de ressonância entre as indutâncias da instalação e um banco capacitivo através do desenvolvimento apresentado abaixo.

Se $X_{IND} = X_{CAP}$ para a ordem (h) da freqüência de ressonância, vem que:

$$h \cdot X_{IND \ 60 \ Hz} = \frac{X_{cap \ 60 \ Hz}}{h} \Rightarrow X_{cap \ 60 \ Hz} = h^2 \cdot X_{IND \ 60 \ Hz} \Rightarrow h = \sqrt{\frac{X_{cap \ 60 \ Hz}}{X_{IND \ 60 \ Hz}}}$$
$$h = \sqrt{\frac{\frac{V^2}{P_{cap}}}{\frac{V^2}{P_{cc}}}} \Rightarrow h = \sqrt{\frac{P_{cc}}{P_{cap}}}$$
(2.12)

onde:

 P_{cc} = potência de curto-circuito trifásico simétrico calculada na barra de ligação dos capacitores, em kVA;

 $P_{cap} = potência do banco de capacitores conectado à barra, em kVAr; e$

 $h = ordem da frequência harmônica de ressonância (h x f_{FUNDAMENTAL} = f_{RESSONÂNCIA}).$

Obs.: Analisando a expressão anterior, verifica-se que para os bancos capacitivos automáticos largamente adotados nos dias de hoje, a freqüência de ressonância se altera a cada inserção ou retirada de capacitores em função das variações de carga e das necessidades instantâneas de manutenção do fator de potência dentro de limites previamente programados nos controladores. Sendo assim, a ressonância no ponto de ligação de um banco capacitivo automático poderá ocorrer para várias freqüências, o que agrava a situação e requer avaliações técnicas pormenorizadas e o desenvolvimento de projetos mais criteriosos.

2.2.6.2 Fator de potência e Cosq

O fator de potência em um sistema senoidal puro é expresso matematicamente pelo cosseno do ângulo formado entre os vetores que representam a potência ativa (W) e a potência aparente (VA), como pode ser observado pela Figura 2.13.



Figura 2.13 – Fator de potência em sistemas senooidais Fonte: (ISONI, 2004)

Perante a presença de harmônicas, as grandezas elétricas passam a não mais ser expressas matematicamente por funções senoidais puras e lineares, o que incorre no surgimento de um desvio entre o fator de potência e o cos φ . Nesse caso, o fator de potência é expresso pela relação entre a potência ativa e a potência aparente relativas ao sinal distorcido (sinal periódico não senoidal) e o cos φ corresponde à relação entre a potência ativa e a potência da tensão e da corrente (ISONI, 2004).Quando há distorções geradas por harmônicas, as reatâncias indutivas elevam-se proporcionalmente com a elevação da freqüência e o triângulo de potências é alterado (transformado em um *"tetraedro de potências"*), introduzindo-se uma nova (terceira) dimensão decorrente dos VAs necessários para sustentar a distorção do sinal, conforme observa-se na Figura 2.14.



Figura 2.14 – Tetraedro de potências em sistemas distorcidos Fonte: (ISONI, 2004)

Nesse caso, a potência aparente (S) será calculada pela segunite expressão:

$$S_{kVA} = \left(P^{2} + Q^{2} + D_{kVAD}^{2}\right)^{\frac{1}{2}}$$
(2.13)

O termo \mathbf{D}_{kVAD} (kVA de distorção) guarda uma relação física com as perdas no sistema e, matematicamente, significa um acréscimo (não linear) na potência aparente quando há componentes harmônicas geradas pela carga (ARRILAGA, 1985) (KOLLAR, 1989).

Pode-se concluir que o fator de potência equivale ao $\cos \phi$ somente para senóides puras (tensão e corrente). Na presença de ondas distorcidas o fator de potência pode ser expresso por duas grandezas distintas, a saber:

-Fator de Potência Real: Considera os ângulos de fase de cada harmônica e a potência reativa necessária para produzi-las. Para um sistema trifásico equilibrado esse índice pode ser expresso conforme indicado a seguir de forma genérica, considerando-se a presença de harmônicas na tensão e na corrente.

$$FP_{real_{sistem3} \Theta equilibrade} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 + \sqrt{3} \cdot V_3 \cdot I_3 \cdot \cos\varphi_3 + \sqrt{3} \cdot V_5 \cdot I_5 \cdot \cos\varphi_5 \dots + \sqrt{3} \cdot V_n \cdot I_n \cdot \cos\varphi_n}{\sqrt{3} \cdot V_{totalefica} \cdot I_{totalefica}}$$

(2.14)

Na expressão acima pressupôs-se a ausência de harmônicas pares, situação mais comum na prática (tais harmônicas também devem ser consideradas, caso presentes). O índice 1 refere-se à freqüência fundamental. Os índices 3,5,...,n referem-se a cada harmônica ímpar eventualmente presente. Os valores eficazes V_{total} e I_{total} referem-se às ondas resultantes distorcidas, decorrentes da composição das harmônicas presentes.

-Fator de Potência de Deslocamento: Considera apenas a defasagem entre tensão e corrente para a freqüência fundamental. Havendo a presença de harmônicas, é sempre mais elevado que o fator de potência real. Não havendo harmônicas, o fator de potência de deslocamento equivale ao fator de potência real.

Considerada a ausência de harmônicas na tensão (apenas para o exercício de um raciocínio teórico básico), e levando-se em conta que a tensão fundamental e as correntes em outras frequências não produzem potência, a expressão anteriormente apresentada reduz-se a:

$$FP_{real_{(sistema 3 @equilibra do)}} = \frac{V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi_1}{I_{rms} \cdot V_{rms}} = \frac{I_1 \cdot \cos \phi_1}{I_{rms}}$$
(2.15)

Por essa expressão torna-se claro o conceito de que o fator de potência real é sempre inferior ao fator de potência de deslocamento, uma vez que, na presença de harmônicas, o módulo da corrente à freqüência fundamental (I₁) é necessariamente inferior ao módulo da corrente total (I_{rms}, que contempla a corrente fundamental e todas as demais componentes). Essa expressão pode ser facilmente modificada substituindo-se I_{rms} pela raiz quadrada da soma dos quadrados de todas as correntes harmônicas presentes (incluindo-se a fundamental), elevando-se ambos os lados ao quadrado e dividindo o numerador e o denominador à direita do sinal de igualdade por I_1^2 . Com mais alguns arranjos matemáticos bastante simples, e conhecendo-se o conceito de *distorção harmônica total na corrente* (DHT_i ou THD_i = [(ΣI_h^2)^{1/2}] / I₁, para h ≥ 2), obter-se-á a expressão abaixo (MOHAN(2), 1989):

$$FP_{real_{(sistema \, 3 \, \emptyset equilibrado)}} = \cos \phi_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(THD_i \,/\, 100\right)^2}} \tag{2.16}$$

Esta expressão correlaciona o fator de potência de deslocamento $(\cos \varphi_1)$, o fator de potência real e a DHTi perante a ausência de harmônicas na tensão de alimentação, evidenciando que quanto mais distorcida for a corrente, mais desviados estarão o fp real e o $\cos \varphi_1$.

Para altos conteúdos harmônicos, ou seja, quanto mais significativa for a presença de harmônicas na rede, mais difícil e complexa torna-se a tarefa de corrigir satisfatoriamente o fator de potência. A inserção de capacitores na rede pode se tornar insuficiente uma vez que o baixo fator de potência passa não mais a ser atribuído apenas à presença de cargas indutivas, havendo a contribuição adicional da potência reativa necessária para sustentar a distorção do sinal.

É importante salientar que, em instalações sujeitas à presença de harmônicas (e caso tais harmônicas também fluam pela alimentação geral), <u>os sistemas de medição das concessionárias de energia que determinem o fator de potência levando em conta apenas a relação entre as potência ativa e aparente à freqüência fundamental (seja o cálculo feito pelos parâmetros de consumo mensais ou horários) estarão registrando fatores de potência superiores aos reais, uma vez que o $\cos\varphi$ (ou fator de potência real) não estará sendo medido.</u>

2.2.6.3 Desintonia de bancos capacitivos – Teoria básica e abordagem preliminar

Quando bancos de capacitores são conectados a uma rede elétrica, existe a possibilidade real de que esses entrem em ressonância com a indutância equivalente de Thévenin a montante, composta primordialmente pela indutância do transformador e dos circuitos de distribuição (ACEVEDO(1), 200-?) (a questão da ressonância elétrica já foi sucintamente abordada

anteriormente, no subitem 2.2.5.1). "Desintonizar" um banco capacitivo significa, em última análise, prover meios de proteção para que sejam evitados os problemas potencialmente existentes em uma instalação elétrica em decorrência da instalação dos bancos, fundamentalmente perante a presença de harmônicas em seus barramentos de alimentação. Para essa finalidade, é usual a utilização de reatores (indutores) de desintonia (também conhecidos como reatores anti-ressonantes).

O conjunto composto pelo banco de capacitores (elementos responsáveis pela correção do fator de potência em 60 Hz) e pelos indutores (elementos responsáveis pela desintonia e, por conseguinte, pela proteção do banco de capacitores) perfaz um circuito cujo dimensionamento permite a escolha de uma freqüência de sintonia que favoreça a preservação da integridade do conjunto, evitando-se o fenômeno da ressonância perante as harmônicas presentes na rede. Quando a freqüência de sintonia escolhida para o dimensionamento e especificação dos indutores é propositalmente desviada das freqüências harmônicas potencialmente perigosas para o banco de capacitores, tem-se um sistema desintonizado (muitas vezes denominado "filtro desintonizado") (EPCOS(5), 2007).

Um esquemático simplificado de um sistema de baixa tensão típico é apresentado na Figura 2.15.



Figura 2.15 – Filtro dessintonizado de baixa tensão – Esquemático simplificado

Na prática, os filtros desintonizados são calculados de forma que haja o deslocamento da freqüência de ressonância para um ponto localizado abaixo da menor frequência harmônica presente em seus barramentos de conexão (ACEVEDO(2), 200-?) (EPCOS(5), 2007). Dessa forma, evita-se a ressonância, protegendo-se os bancos de capacitores.

A Figura 2.16 ilustra esse aspecto mostrando curvas de resposta em freqüência ($Z_h x h$) de um sistema para uma situação genérica / hipotética.



Figura 2.16 – Resposta em Freqüência $(Z_h(pu) x h)$ Fonte: (DUGAN(2), 2002) – figura traduzida e adaptada

Preliminarmente, um estudo dessa natureza deve contemplar, basicamente:

o conhecimento detalhado da rede em questão, através de um diagrama elétrico unifilar atualizado e confiável, que contemple todas as características do sistema desde a fonte (ponto de entrega de energia) até o(s) ponto(s) previsto(s) para a instalação dos bancos de capacitores;

.medições / monitoramentos das harmônicas presentes no(s) barramento(s) de interesse;

o pré-dimensionamento do(s) banco(s) capacitivos, em função das necessidades de suprimento de reativos à(s) carga(s);

.o cálculo da potência de curto-circuito no(s) ponto(s) previsto(s) para a instalação dos bancos de capacitores, de forma que se possa estimar a(s) ordem(ns) harmônica(s) potencialmente geradora(s) de ressonância.

Com esse elementos previamente definidos, torna-se possível a realização de aprofundamentos para a determinação da necessidade de utilização de filtros desintonizados ou para se constatar se os bancos capacitivos puros são, pelo menos em princípio, aplicáveis com segurança. Todavia, considerada a tendência sempre crescente de utilização de cargas não lineares nas instalações industriais e em complexos comerciais, ressalta-se que os estudos

para correção do fator de potência têm, cada vez mais, apontado na direção do emprego de indutores em série com os capacitores.

Constatada a necessidade de utilização de sistemas desintonizados, um dos principais parâmetros de análise denomina-se *Fator de Desintonia*, geralmente expresso em percentual e indicado pela letra "*p*". Esse fator indica a relação entre a reatância do indutor (X_L) e a reatância do capacitor (X_C) (EPCOS(5), 2007) ou, em uma outra abordagem, a relação entre as tensões aplicadas ao indutor e ao capacitor. Ambas as abordagens (equivalentes) são apresentadas nas expressões a seguir.

$$p \% = 100 \cdot \frac{X_{\rm L}}{X_{\rm C}} = 100 \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot L \cdot C$$
(2.17)

$$p\% = 100 \cdot \frac{V_L}{V_C}$$
(2.18)

Note-se que, como a freqüência de ressonância (f_R) equivale a 1 / [2 . π .(L.C)^{1/2}], resulta que L.C = 1 / (4. π^2 . f_R^2). Portanto, substituindo-se o produto L.C na expressão 2.17, obtem-se:

$$p \% = \frac{100 \cdot f^2}{f_R^2} = 100 \cdot \left(\frac{f}{f_R}\right)^2$$
(2.19)

Então, vem que:

$$f_{R} = f_{1} \cdot \frac{1}{\sqrt{(p\%/100)}}$$
(2.20)

Essa é a expressão a partir da qual obtem-se a freqüência de sintonia (f_R) para o filtro desintonizado em função da freqüência fundamental do sistema ($f = f_I$) e do fator de desintonia (p).

Geralmente os fabricantes apresentam em suas documentações técnicas as características técnicas dos reatores de desintonia de sua linha de oferta e os parâmetros f_R (em Hz) e p (em %). Também é usual que se apresente um índice que expressa a relação entre a freqüência de sintonia e a freqüência fundamental do sistema. Exemplos são apresentados na Tabela 2.1 a seguir.

p (%)	60 Hz		50 Hz	
	$f_R(Hz)$	f_R/f_1	$f_R(Hz)$	f_R/f_1
5,67	252	4,2	210	4,2
7	227	3,8	189	3,8
12,5	170	2,8	141	2,8
14	160	2,7	134	2,7

Tabela 2.1 – Exemplos de fatores de desintonia e freqüências de sintonia de filtros desintonizados

Conforme dito anteriormente, um filtro é calculado de forma que esteja sintonizado em uma freqüência inferior à menor ordem harmônica presente no local de sua ligação. Isso se deve ao fato de que, geralmente, o ponto de ressonância para um banco de capacitores puro se move constantemente, fundamentalmente em função do crescimento do sistema da concessionária (elevação dos níveis de curto-circuito), o que promove a elevação da ordem harmônica associada à freqüência de ressonância (note-se a expressão $h = (P_{cc}/P_{cap})^{1/2}$, apresentada ao final do subitem 2.2.6.1). Sendo assim, optando-se pelo ponto de sintonia do filtro em uma freqüência inferior à da menor harmônica presente, evita-se qualquer problema futuro, considerada a tendência de elevação das freqüências perigosas e não o seu decréscimo.

Pela Tabela 2.1 consegue-se facilmente estabelecer uma correlação entre os fatores de desintonia mais usuais ofertados pelos fabricantes e as harmônicas de menor ordem geralmente presentes nas instalações elétricas industriais e comerciais. Percebe-se, por exemplo que, em um sistema de 60 Hz em que a quinta harmônica (comum em ambientes industriais) seja a de menor ordem no local, pode-se optar por fatores de desintonia de 5,67 ou de 7% que associam-se, respectivamente, às freqüências de sintonia de 252 e 227 Hz. Ambas são, portanto, inferiores à freqüência de 300 Hz (5^a harmônica em sistemas de 60 Hz). Nesse caso, a opção dependerá da magnitude (amplitude) da harmônica aqui considerada, uma vez que o filtro, embora desintonizado, absorverá alguma parcela da corrente harmônica. Para magnitudes harmônicas mais pronunciadas, é prudente que se eleve o fator de desintonia buscando-se garantir, tanto quanto possível, a preservação dos capacitores. De maneira geral, o fator de desintonia de 7% representa um compromisso razoável entre custo e benefício perante a presença da quinta harmônica, sendo esta a de menor ordem presente no ponto de ligação do filtro. Se, no entanto, a menor harmônica corresponder à terceira (180 Hz), deve-se optar por fatores de desintonia bem superiores (14%, por exemplo). Em suma, o espectro harmônico pode ser considerado como o instrumento definidor do fator de desintonia a utilizar.

A indutância do reator a ser empregado em cada fase (em série com o banco capacitivo trifásico) é calculada em função da reatância capacitiva do banco à frequência fundamental (X_C) e do fator de desintonia (p), lembrando-se que $p \cdot X_C = X_L$ e que $L = X_L / 2\pi f$.

Dois outros importantes aspectos a serem considerados quando do dimensionamento e especificação de filtros desintonizados são:

.o nível de tensão a que os capacitores são submetidos, calculado pela seguinte expressão a seguir (COTRIM(1), 2008).

$$V_{C} = V_{N} \cdot \left[\frac{1}{1 - \left(\frac{p}{100}\right)}\right]$$
(2.21)

onde:

 V_C = tensão fase-fase aplicada sobre os capacitores do banco em Volts; a tensão nominal dos capacitores a serem utilizados deverá corresponder, no mínimo, a esse valor, sendo recomendável a adoção de valor comercial superior;

 $V_N = tensão fase-fase nominal do sistema, em V; e$

p = fator de desintonia, em %.

.a redução da potência reativa capacitiva em função da introdução dos indutores, calculada conforme abaixo (DÍAZ, 2004).

$$Q_{C} = \left(1 - \left(\frac{p}{100}\right)\right) \cdot \left(\frac{V_{N}}{V_{NC}}\right)^{2} \cdot Q_{N}$$
(2.22)

onde:

 $.Q_N = potência nominal (de placa) do banco de capacitores em kVAr;$

 V_{NC} = tensão fase-fase nominal escolhida (valor comercial, de placa) para o banco de capacitores em V;

 $V_N = tensão fase-fase nominal do sistema, em V (ou em kV);$

p = fator de desintonia, em %; e

 $Q_C = potência capacitiva real do banco de capacitores em kVAr, "enxergada" pelo sistema;$ essa será a potência que contribuirá efetivamente para a correção do fator de potência em60 Hz. As duas expressões anteriores permitem que se tirem as seguintes conclusões:

.capacitores preexistentes em uma instalação, especificados de acordo com a tensão nominal do sistema, não poderão ser reaproveitados para a montagem de um novo sistema antiressonante para a mesma instalação; e

.à medida em que o fator de desintonia se eleva, também se eleva a tensão fase-fase a que o banco de capacitores estará submetido.

Demais aspectos técnicos relativos aos indutores utiolizados nos filtros desintonizados serão abordados no subitem 5.2.

3. Fator de Potência em Instalações Consumidoras – Legislação em Vigor

Este capítulo aborda a legislação associada ao fator de potência, apresentando, de maneira pormenorizada, os critérios e aspectos legais relativos à medição e cobrança de parcelas adicionais nas contas de energia em decorrência do baixo fp.

3.1 Histórico breve da legislação do fator de potência em instalações consumidoras

De acordo com (CODI, 2004), em consonância com o estabelecido pelo Decreto nº 62.724 de maio de 1968 e com a nova redação dada pelo Decreto nº 75.887 de junho de 1975, as concessionárias de energia elétrica adotaram, à época, o fator de potência igual a 0,85 como patamar de referência para limitar o fornecimento de energia reativa sem a incidência de ônus adicional para os consumidores. Em março de 1992, o Decreto nº 479 reiterou a obrigatoriedade de se manter o fator de potência o mais próximo possível da unidade (1,00) tanto pelas concessionárias quanto pelos consumidores, recomendando, ainda, ao então Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE, órgão hoje já extinto, o estabelecimento de um novo limite de referência para fator de potência indutivo e capacitivo, bem como a forma de avaliação e de critério de faturamento da energia reativa excedente perante esse novo limite. Nessa época, portanto, foram estabelecidas pela Portaria nº 1.569 de 23 de dezembro de 1993 do DNAEE, as bases da renovação dessa legislação, introduzindo-se uma nova forma de abordagem do ônus por baixo fator de potência, com os seguintes aspectos relevantes:

-aumento do limite mínimo de 0,85 para 0,92;

-faturamento da energia reativa capacitiva excedente; e

-redução do período de avaliação / monitoramento do fator de potência, passando-o de mensal para horário a partir de 1996.

O controle mais apurado da energia reativa visava, fundamentalmente, estimular os consumidores a melhorarem o fator de potência de suas instalações elétricas, com benefícios imediatos para eles próprios, através da redução de perdas e melhor desempenho de suas instalações, como também para o setor elétrico nacional, pela melhoria das condições

operacionais e a liberação do sistema para atendimento a novas cargas com investimentos menores.

A portaria nº 1.569 estabeleceu um nível máximo para a utilização de energia reativa indutiva ou capacitiva, em função da energia ativa consumida (kWh). Por esse principio, para cada kWh consumido em um determinado intervalo de tempo, a concessionária permitiria o consumo de aproximadamente 0,426 kVArh, indutivo ou capacitivo (em função do horário do dia) no mesmo intervalo, sem acréscimo nos custos com energia elétrica para as instalações consumidoras, situação que até hoje se mantém.

A título de comparação, a Tabela 3.1 apresenta o fator de potência de referência (patamar mínimo) atualmente adotado em alguns outros países.

País	fp mínimo permitido	
França	0,93	
Portugal	0,93	
Bélgica	0,95	
Alemanha	0,96	
Suiça	0,93	
Argentina	0,95	
Coréia	0,93	
Espanha	0,92	

Tabela 3.1 – Fator de Potência de referência em diversos países

Fonte: (AMORIM, 2008)

Segundo (AMORIM, 2008), há uma tendência mundial em se elevarem os limites mínimos visando a melhoria da eficiência operacional dos sistemas elétricos.

3.2 Legislação

3.2.1 Considerações preliminares – Energia elétrica – Grupos e modalidades tarifárias

Antes de que seja apresentada a síntese da atual legislação relativa ao fator de potência em instalações consumidoras, é conveniente que sejam definidos os atuais grupos e subgrupos de fornecimento aos quais se enquadram os consumidores e as atuais modalidades tarifárias disponíveis, uma vez que muitos dos termos associados a esses assunto são citados em tal legislação.

Atualmente, o fator de potência é avaliado pela concessionária e passível de cobrança para consumidores atendidos em tensão primária (ou faturados como tal), ou seja, consumidores enquadrados no Grupo A, conforme as classificações abaixo (ANEEL, 2000):

-Grupo "A": grupamento composto por unidades consumidoras atendidas pelas concessionárias de energia em tensão igual ou superior a 2,3 kV ou, ainda, atendidas em tensão inferior a 2,3 kV a partir de sistemas subterrâneos de distribuição e faturados pelo grupo A; caracteriza-se pela estruturação tarifária binômia (faturamento de demanda em kW e consumo de energia em kWh) e subdivide-se nos seguintes subgrupos:

a) Subgrupo A1 – tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV;

b) Subgrupo A2 – tensão de fornecimento situada entre 88 kV a 138 kV;

c) Subgrupo A3 – tensão de fornecimento equivalente a 69 kV;

d) Subgrupo A3a – tensão de fornecimento situada entre 30 kV e 44 kV;

e) Subgrupo A4 – tensão de fornecimento situada entre 2,3 kV e 25 kV;

f) Subgrupo AS (subterrâneo) – tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, com atendimento a partir de sistema subterrâneo de distribuição e faturamento pelo grupo A em caráter opcional.

No Grupo "B" encontram-se as unidades consumidoras atendidas pelas concessionárias de energia em tensão inferior a 2,3 kV (geralmente em baixa tensão) e faturadas neste Grupo; esse grupo caracteriza-se pela estruturação tarifária monômia (faturamento de consumo de energia (kWh)) e subdivide-se em vários subgrupos.

Via de regra, o fator de potência não tem sido avaliado para consumidores do Grupo B, já que, em suas instalações, geralmente não há sistemas de medição que monitorem o consumo de energia reativa. Todavia, conforme (ANEEL, 2000), autorizou-se a cobrança de energia reativa excedente através de medições transitórias em consumidores do Grupo B.

Quanto às modalidades tarifárias disponíveis, pode-se caracterizá-las da seguinte forma (ANEEL, 2000):

-Tarifação Convencional - estrutura caracterizada pela aplicação de tarifas de consumo de energia elétrica (kWh) e/ou demanda de potência (kW) independentemente dos horários de utilização no dia e dos períodos do ano.

-Tarifação Horo-sazonal - estrutura caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência (kW) de acordo com as horas de utilização no dia e dos períodos do ano, conforme especificação a seguir:

a) Tarifa Azul: modalidade estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia (horário de ponta e fora de ponta) e os períodos do ano (período seco e período úmido), bem como de tarifas diferenciadas de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia.

Aplica-se compulsoriamente a:

-consumidores atendidos em tensão igual ou superior a 69 kV, ou seja, consumidores dos subgrupos A3, A2 e A1;

-consumidores atendidos em tensão inferior a 69 kV (sub-grupos A3a, A4 e AS) com demanda de potência igual ou superior a 300 kW, desde que não exerçam opção pela tarifa verde.

-consumidores faturados na estrutura tarifaria convencional que apresentem, nos últimos 11 (onze) ciclos de faturamento, 3 (três) registros consecutivos ou 6 (seis) alternados de demandas medidas iguais ou superiores a 300 kW, desde que não exerçam opção pela Tarifa Verde.

Aplica-se opcionalmente a:

-consumidores atendidos em tensão inferior a 69 kV (sub-grupos A3a, A4 e AS), com demanda de potência entre 30 kW e 300 kW.

b) Tarifa Verde: modalidade estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização no dia (horário de ponta e fora de ponta) e os períodos do ano (período seco e período úmido), bem como de uma única tarifa de demanda de potência.

c) Horário de Ponta (P): período definido pela concessionária de energia e composto por 3 (três) horas diárias consecutivas entre 17:00 e 22:00, exceção feita aos sábados, domingos e feriados nacionais, considerando as características do seu sistema elétrico.

d) Horário Fora de Ponta (F): período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares aquelas definidas no horário de ponta.

Obs.: Durante o horário de ponta as tarifas de energia elétrica são mais onerosas que no horário fora de ponta.

e) Período Úmido (U): período de 5 (cinco) meses consecutivos compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de dezembro de um ano a abril do ano seguinte.

f) Período Seco (S): período de 7 (sete) meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de maio a novembro.

Obs.: Durante o período seco as tarifas de energia elétrica são mais onerosas que no período úmido.

3.2.2 Síntese da atual legislação do fator de potência

A atual legislação do fator de potência (consumidores cativos) é regida pela referência (ANEEL, 2000). Nela são estabelecidos como pontos principais :

-fator de potência de referência (fp_r) indutivo ou capacitivo: 0,92;

-expressões de cálculo dos faturamentos correspondentes ao consumo de energia elétrica e à demanda de potência reativa excedentes (para consumidores horo-sazonais ou consumidores convencionais com medição apropriada), $FER_{(P)}$ e $FDR_{(P)}$ respectivamente:

$$FER_{(p)} = \left\{ \sum_{t=1}^{n} \left[CA_t \cdot \left(\frac{0.92}{fp_t} - 1 \right) \right] \right\} \cdot TCA_{(p)}$$

$$(3.1)$$

$$FDR_{(p)} = \left[\max_{t=1}^{n} \cdot \left(DA_{t} \cdot \frac{0.92}{fp_{t}}\right) - DF_{(p)}\right] \cdot TDA_{(p)}$$
(3.2)

-durante o período de 6 horas consecutivas, compreendido, a critério da concessionária, entre 23:30 hs e 06:30 hs, apenas os fatores de potência " fp_t " inferiores a 0,92_{CAPACITIVO} verificados em cada intervalo de 1 (uma) hora "t" contribuem para os ônus associados aos reativos excedentes; durante o período diário complementar, apenas os fatores de potência " fp_t " inferiores a 0,92_{INDUTIVO} são monitorados (Figura 3.1).

O texto relativo à legislação do fator de potência extraído de (ANEEL, 2000), onde encontram-se as definições de cada termo presente nas expressões de faturamento acima, é apresentado no Apêndice 1.

Para os consumidores livres existe legislação própria e os limites de referência para o fator de potência variam, podendo ser superiores a 0,92.



Figura 3.1 – Medição de reativos indutivo e capacitivo (figura não presente na Resolução ANEEL 456-2000) Fonte: (CODI, 2004)

4. A Medição do Fator de Potência em Instalações Consumidoras e a Conta de Energia Elétrica

Este capítulo aborda os principais aspectos relativos às medições das concessionárias de energia para fins de faturamento de consumidores, com ênfase no que se refere ao fator de potência. Os parâmetros mais relevantes da conta de energia de um consumidor industrial (sub-grupo A4) também são abordados. Além disso, discutem-se alguns conceitos aplicados à tecnologia de medidores eletrônicos de energia elétrica.

4.1 Medição de energia elétrica para fins de faturamento – Aspectos gerais

A Resolução ANEEL nº 456, de 29 de novembro de 2000 ("*Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica*") (ANEEL, 2000), é a atual referência com base na qual as concessionárias de energia norteam suas relações técnico-comerciais com os consumidores em suas regiões de concessão. Reproduzinho parcialmente o disposto nessa Resolução relativamente à medição de energia elétrica, tem-se:

Art. 32. A concessionária é obrigada a instalar equipamentos de medição nas unidades consumidoras, exceto quando:

I -

II **-**

III **-**

IV -

(Redação dada pela Resolução ANEEL nº 539, de 01.10.2002)

Art. 33. O medidor e demais equipamentos de medição serão fornecidos e instalados pela concessionária, às suas expensas, exceto quando previsto em contrário em legislação específica.

§ 1°

§ 2° Fica a critério da concessionária escolher os medidores e demais equipamentos de medição que julgar necessários, bem como sua substituição ou reprogramação, quando considerada conveniente ou necessária, observados os critérios estabelecidos na legislação metrológica aplicáveis a cada equipamento.

§ 3°.....

§ 4°

Art. 34. O fator de potência das instalações da unidade consumidora, para efeito de faturamento, deverá ser verificado pela concessionária por meio de medição apropriada, observados os seguintes critérios:

I - unidade consumidora do Grupo "A": de forma obrigatória e permanente; e

II - unidade consumidora do Grupo "B": de forma facultativa, sendo admitida a medição transitória, desde que por um período mínimo de 7 (sete) dias consecutivos.

Art. 35. Quando a concessionária instalar os equipamentos de medição no lado de saída dos transformadores, para fins de faturamento com tarifas do Grupo "A", deverá também colocar equipamentos próprios de medição das perdas de transformação ou fazer os acréscimos de que trata o Art. 58 (artigo citado a seguir).

(Art. 58. No caso de que trata o art. 35, se não forem instalados os equipamentos destinados à medição das perdas de transformação, deverão ser feitos os seguintes acréscimos aos valores medidos de demandas de potência e consumos de energia elétrica ativas e reativas excedentes, como compensação de perdas: I - 1% (um por cento) nos fornecimentos em tensão superior a 44 kV; e II - 2,5% (dois e meio por cento) nos fornecimentos em tensão igual ou inferior a 44 kV.)

Art. 36.

Art. 37. A verificação periódica dos medidores de energia elétrica instalados na unidade consumidora deverá ser efetuada segundo critérios estabelecidos na legislação metrológica, devendo o consumidor assegurar o livre acesso dos inspetores credenciados aos locais em que os equipamentos estejam instalados.

Art. 38. O consumidor poderá exigir a aferição dos medidores, a qualquer tempo, sendo que as eventuais variações não poderão exceder os limites percentuais admissíveis.

Para as unidades consumidoras do Grupo A (definidas no subitem 3.2.1), a medição de energia elétrica é realizada de duas formas possíveis: em alta / média tensão ou em baixa tensão. Tomando como exemplo o que dispõe (CEMIG, 2005), tem-se:

-para os fornecimentos com demanda de projeto de até 300 kW (se através de subestação com transformador em poste – *Subestação nº 1*), a medição se faz na baixa tensão;

-para os fornecimentos através dos demais tipos de subestações, a medição se faz na média tensão.

-em qualquer caso, a medição configura-se sempre a três elementos (3 TPs e 3 TCs, ou apenas os TCs no caso da medição em BT, desde que os equipamentos de medição possam ser diretamente conectados à tensão de rede).

As Figuras 4.1 e 4.2 ilustram respectivamente, de maneira genérica e simplificada, as formas de medição acima citadas.

Independentemente da demanda (kW), para todos os fornecimentos em média e alta tensão a medição constitui-se, no mínimo, de medidores de energia ativa (com indicação de demanda caso o consumidor não esteja enquadrado no sistema tarifário horo-sazonal - THS) e energia reativa, podendo ser utilizado medidor eletrônico. Para os consumidores enquadrados em THS, a medição é invariavelmente realizada por medidor eletrônico.



Figura 4.1 – Medição de energia elétrica em média tensão Fonte: (ANEEL, 2005)



Figura 4.2 – Medição de energia elétrica em baixa tensão Fonte: (ANEEL, 2005)

As Figuras 4.3 e 4.4 ilustram respectivamente, os aspectos gerais de uma subestação com medição na baixa tensão (transformador em poste com proteção e medição instaladas em mureta) e de uma subestação abrigada (com entrada e saídas subterrâneas) com medição na média tensão. Em ambas as figuras, o posicionamento dos transformadores para instrumentos (TPs e TCs) encontram-se circundados em destaque.



Figura 4.3 – Medição em baixa tensão – Aspectos gerais Fonte: (CEMIG, 2005) – figura adaptada



Figura 4.4 – Medição em média tensão (subestação abrigada) – Aspectos gerais Fonte: (CEMIG, 2005) – figura adaptada

4.2 A medição da energia reativa e do fator de potência

Conforme já abordado no subitem 3.1, a Portaria nº 1.569 (DNAEE), de 23 de dezembro de 1993, introduziu alterações na forma de abordagem do fator de potência, associando o seu faturamento à energia e à demanda reativas excedentes aos valores permitidos pelo novo fp de referência também estabelecido à época (0,92). A partir disso, as concessionárias passaram a permitir o consumo de aproximadamente 0,426 kVArh, indutivo ou capacitivo (em função do horário do dia), para cada kWh consumido, sem acréscimo nos custos com energia elétrica para as instalações consumidoras. Outra importante alteração introduzida por esta Portaria, aplicável principalmente aos consumidores enquadrados no sistema tarifário horo-sazonal, foi a apuração da energia reativa a cada intervalo de uma hora e não mais pela média mensal, como se fazia anteriormente. Portanto, desde então, a cobrança por baixo fp se faz de forma indireta, aplicando-se as tarifas sobre os valores de energia e demandas ativas correspondentes aos valores de energia e demanda reativas excedentes medidos no mesmo intervalo de integração (1 hora). O faturamento mensal se faz com base na soma das parcelas horárias que reflitam a ocorrência de baixo fp ao longo de um ciclo completo de faturamento (algo próximo de 1 mês).

As nomenclaturas adotadas para expressar tais parcelas excedentes variam de concessionária para concessionária. Porém, todas elas significam as mesmas transgressões relativas ao limite mínimo permitido para o fator de potência de referência. Algumas delas são apresentadas no Quadro 4.1 a seguir.

Concessionária de Energia Elétrica	Nomenclatura	
AES - Eletropaulo	Consumo Reativo Excedente	
ALS - Lieuopaulo	Demanda Reativa Excedente	
Light	Energia Reativa Excedente	
Light	Demanda Reativa Excedente	
CPEL Energia	FER - kWh	
CITE Energia	FDR - kWh	
COPEI	UFER (Unidade de faturamento de energia reativa)	
COTEE	UFDR (Unidade de faturamento de demanda reativa)	
CEMIG	UFER (Unidade de faturamento de energia reativa)	
e l'ind	UFDR (Unidade de faturamento de demanda reativa)	

Quadro 4.1 – Nomenclaturas adotadas por concessionárias de energia para as parcelas de reativos excedentes

Fonte: (AMORIM, 2008)

Compatibilizando-se a essa nova sistemática, os medidores / registradores eletrônicos digitais passaram a monitorar o fator de potência médio horário e a calcular a UFER (*Unidade para Faturamento de Energia Reativa Excedente*) e a UFDR (*Unidade para Faturamento de Demanda Reativa Excedente*), esta última através da DMCR (*Demanda Máxima Corrigida Registrada*), em função do baixo fator de potência medido.

Para a melhor compreensão dos conceitos de UFER e de DMCR, e tomando-se como base (BITTENCOURT, 200-?), pode-se recorrer ao auxílio do gráfico apresentado na Figura 4.5, que ilustra uma situação hipotética qualquer, ocorrida em um intervalo de 1 hora. Nesse caso, por se tratar de um período de 1 hora, os valores numéricos de potências (kW) e consumos (kWh) se equivalem, já que kWh = kW x 1 hora = kW.

No gráfico, as grandezas elétricas operacionais (potências ativa, reativa e aparente) são caracterizadas pelo índice 1 (P_1 , Q_1 e S_1). O ângulo de defasagem entre P_1 e S_1 equivale a 45° elétricos, o que corresponde a um fator de potência de 0,7071. $Q_{PERMITIDA}$ corresponde ao limite de potência (ou energia) reativa permitida considerando-se P_1 e o fp igual a 0,92.



Figura 4.5 – Conceituação de DMCR e UFER - Situação hipotética para fp = 0,707 Fonte: (BITTENCOURT, 200-?)

Considerando constante o módulo de S_1 , mantendo sua origem fixa e rotacionando esse vetor até a linha associada ao fator de potência de referência (ângulo de 23,07° em relação ao eixo da potência / energia ativa) serão obtidos os vetores P_2 , Q_2 e S_2 , que representam os valores que seriam demandados se o fator de potência operacional equivalesse ao valor de referência (0,92). A nova demanda de potência ativa P_2 denomina-se DMCR e pode ser calculada como se segue (BITTENCOURT, 200-?).

Sabe-se que o fator de potência é a razão entre a potência ativa e a potência aparente demandadas por uma instalação ou carga elétrica, ou seja:

$$S_1 = \frac{P_1}{\cos \alpha_1}$$
 (4.1) $S_2 = \frac{P_2}{\cos \alpha_2}$ (4.2)

Como, no gráfico da Figura 4.5, os módulos de S_1 e S_2 se equivalem (pois S_2 foi originado pela rotação de S_1), tem-se:

$$S_1 = S_2 \Longrightarrow \frac{P_1}{\cos \alpha_1} = \frac{P_2}{\cos \alpha_2}$$
(4.3)

Expressando P₂ em função de P₁ e substituindo o valor de *cos* α_1 (fator de potência de referência) por 0,92, tem-se:

$$P_2 = P_1 \cdot \frac{0.92}{\cos \alpha_1} \Longrightarrow DMCR = P_1 \cdot \frac{0.92}{\cos \alpha_1}$$
(4.4)

ou ainda:

$$DMCR = S_1 \cdot 0.92 \tag{4.5}$$

A UFER corresponde à diferença entre a potência ativa corrigida (P_2) e a potência ativa operacional (P_1) da instalação no período considerado, ou seja:

$$UFER = P_2 - P_1 \tag{4.6}$$

Portanto, com base nas equações anteriores, a UFER pode ser expressa da seguinte forma:

$$UFER = P_1 \cdot \left(\frac{0.92}{\cos \alpha_1} - 1\right) \qquad UFER = S_1 \cdot \left(0.92 - \cos \alpha_1\right)$$
^(4.7)

Ao longo de um ciclo completo de monitoramento por parte da medição da concessionária de energia, a UFER total (expressa em kWh) será contabilizada para cada posto horário, ou seja, *ponta e fora de ponta*, somando-se todas as parcelas dos intervalos de 1 hora na *ponta* e *fora de ponta* em que tenham ocorrido baixos fp's. Os valores a serem faturados (FER_(P) – faturamento da energia reativa excedente) serão obtidos aplicando-se a tarifa de energia (TCA_(P)) relativa a cada posto horário (*ponta e fora de ponta*), conforme a expressão a seguir, já apresentada ao longo do subitem 3.2.2. Nessa expressão, o termo entre os colchetes corresponde à UFER em cada intervalo de monitoramento horário.

$$FER_{(p)} = \left\{ \sum_{t=1}^{n} \left[CA_t \cdot \left(\frac{0.92}{fp_t} - 1 \right) \right] \right\} \cdot TCA_{(p)}$$

$$(4.8)$$

No caso do faturamento associado à DMCR, a parcela de demanda reativa excedente e seu faturamento são geralmente denominados UFDR (*Unidade para Faturamento de Demanda Reativa Excedente*) e FDR_(p) (*faturamento da demanda reativa excedente*), respectivamente. Ao longo de um ciclo completo de monitoramento por parte da medição da concessionária de energia, será contabilizada para cada posto horário, ou seja, *ponta e fora de ponta*, <u>a máxima UFDR</u> (expressa em kW) dentre as verificadas nos intervalos de 1 hora na *ponta* e *fora de ponta e fora de ponta* e *fora de ponta* a máxima contrato baixos fp's. Os valores a serem faturados serão obtidos aplicando-se a tarifa de demanda (TDA_(P)) relativa a cada posto horário (*ponta e fora de ponta e fora de ponta*) conforme a expressão a seguir, já apresentada ao longo do Capítulo 3, subitem 3.2.2.

$$FDR_{(p)} = \left[\max_{t=1}^{n} \cdot \left(DA_{t} \cdot \frac{0.92}{fp_{t}}\right) - DF_{(p)}\right] \cdot TDA_{(p)}$$

$$(4.9)$$

Nessa expressão, o termo $DA_t \times 0.92/fp_t$ corresponde à DMCR em cada intervalo de monitoramento horário. O termo $DF_{(P)}$ corresponde à *demanda faturável em cada posto horário "p" no período de faturamento*. Todo o termo entre colchetes corresponderá à UFDR. Portanto, o faturamento da demanda reativa excedente em cada posto horário só se realizará caso a máxima DMCR verificada ao longo de um ciclo completo de faturamento (geralmente 1 mês) seja superior à demanda (kW) faturável. Em outras palavras, não haverá FDR_(p) caso a expressão anterior resulte em valor negativo.

Portanto, em resumo, pode-se relacionar a seqüência de procedimentos implementados nos nos sistemas de medição das concessionárias de energia elétrica para a determinação das parcelas horárias a serem utilizadas para os faturamentos mensais associados ao baixo fator de potência (se este ocorrer) da seguinte forma:

a) calculam-se, a cada hora, os valores da potência ativa (P_1), potência aparente (S_1) e potência reativa (Q_1); determina-se, também, o ângulo entre P_1 e S_1 (<u>note-se que, por se</u> <u>tratar de período de 1 hora, a potência P_1 equivale numericamente tanto à demanda de</u> <u>potência ativa DA_t quanto ao consumo de energia ativa CA_t);</u>

b) calcula-se o fp_t para o intervalo considerado ($fp_t = P_1/S_1$);

c) calcula-se uma nova potência ativa P_2 mantendo-se a potência aparente S_1 e considerandose o ângulo de 23,07° (associado ao fator de potência de referência de 0,92); note-se que $P_2 = [(P_1 x 0,92) / fp_t] = S_1 x 0,92;$

d) calcula-se a diferença $P_2 - P_1$ e obtem-se a UFER em kWh (note-se que, por se tratar de período de 1 hora, $P_2 = [CA_t \times (0.92 / fp_t)] e P_1 = CA_t$);

e) a DMCR (em kW) é obtida pela expressão: $[(DA_t \times 0.92) / fp_t] = S_1 \times 0.92;$

f) o FER mensal é calculado conforme a equação (4.8);

g) o FDR mensal é calculado conforme a equação (4.9).

Finalmente é importante frisar que as expressões para cálculo de $FER_{(p)} e FDR_{(p)}$ somente consideram:

a) durante o período de 6 horas consecutivas, compreendido, a critério da concessionária, entre 23 h e 30 min e 06h e 30 min, <u>apenas os fatores de potência "fp₁" inferiores a</u> $0.92_{CAPACITIVO}$, verificados em cada intervalo de 1 (uma) hora "t"; e

b) durante o período diário complementar ao definido em "a", <u>apenas os fatores de potência</u> <u>"fp_t" inferiores a 0,92 _{INDUTIVO}, verificados em cada intervalo de 1 (uma) hora "t".</u>

Outros aspectos relacionados à medição de energia elétrica, envolvendo a questão da determinação dos valores *rms* da tensão e corrente medidas, bem como das demais grandezas elétricas calculadas pelos medidores, serão abordados ao longo do subitem 4.4.3.

4.3 A Conta de energia elétrica

A Figura 4.6 reproduz a conta de energia elétrica (CEMIG) de um consumidor do subgrupo A4 (enquadrado em THS, modalidade Azul). Os parâmetros associados à energia reativa e, por conseguinte, ao fator de potência, encontram-se circundados por elipses.

A título de informação, os parâmetros indicados por códigos numéricos na conta de energia apresentada são, conforme (CEMIG, 2003):

.01 e 02: datas das leituras anterior e atual, respectivamente; esse intervalo corresponde ao ciclo de faturamento (geralmente 1 mês, com número de dias entre leituras consecutivas não inferior a 27 e não superior a 33);

.03: códigos de classificação do consumidor junto à concessionária de energia (industrial, tarifação horo-sazonal e outros);

.04: modalidade tarifária; no caso, THS (tarifação horo-sazonal, modalidade Azul);

.05: período do ano (no caso, período úmido, compreendido entre os meses de dezembro a abril;

.06 e 07: consumos registrados de energia ativa (kWh) nos horários fora de ponta e de ponta, respectivamente;

.08 e 09: demandas máximas registradas (kW) nos horários fora de ponta e de ponta, respectivamente;

.10 e 11: demandas contratadas (kW) nos horários fora de ponta e de ponta, respectivamente;

.12 e 13: demanda de ultrapassagem (kW) nos horários fora de ponta e de ponta, respectivamente; a ultrapassagem caracteriza-se pela ocorrência de registros de demanda que superem os valores contratuais em mais de 10% (para consumidores do sub-grupo A4 e A3a) ou em mais de 5% (para consumidores dos sub-grupos A3, A2 e A1); nessas situações, toda a parcela da demanda registrada que excede o valor contratual é faturada aplicando-se uma tarifa cerca de 3 vezes mais onerosa que a tarifa de demanda normal, conhecida como *tarifa de ultrapassagem* (no caso específico da conta apresentada, não houve ultrapassagem de demanda no horário de ponta); perante a ocorrência de demandas máximas registradas que não superem os valores contratuais além dos percentuais acima mencionados, as tarifas de ultrapassagem não se aplicam e os valores registrados são integralmente faturados aplicando-se as tarifas normais;



Figura 4.6 – Conta de energia elétrica (CEMIG – Subgrupo A4) Fonte: (CEMIG, 2003) – figura adaptada
.14 e 15: Energia reativa excedente (UFER em kVArh) nos horários fora de ponta e ponta; nesse caso específico, não houve UFER no horário de ponta;

.16: Demanda máxima corrigida registrada (DMCR em kW) no horário fora de ponta;

.17: Demanda máxima corrigida registrada (DMCR em kW) no horário de ponta (no caso específico, não houve DMCR nesse posto horário);

.18, 19 e 20: constantes de faturamento para cálculo, respectivamente, das demandas (kW), consumos (kWh) / UFER (kWh) / DMCR (kW), e consumos (kVArh); a constante de faturamente resulta do produto entre as relações de transformação dos TPs e TCs da medição ($cf = RTC \times RTP$);

.21: Fator de Potência – note-se que o valor do fp não é explicitamente apresentado;

.22 e 23: fator de carga fora de ponta e na ponta, respectivamente; o fator de carga é definido como o quociente entre o consumo de energia ativa (kWh) e o produto da demanda máxima registrada e do número de horas efetivas contabilizadas no ciclo de faturamento em cada posto horário (fora de ponta e ponta), ou seja, $FC = (kWh / (kW_{MAX} x horas))$;

.24: RTP (relação de transformação dos transformadores de potencial da medição);

.25: RTC – nesse caso, embora a sigla do parâmetro sugira tratar-se da "*relação de transformação dos transformadores de corrente*", RTC refere-se, na realidade, à corrente nominal primária dos TCs;

.26: % perdas – trata-se de um valor percentual aplicado aos valores registrados de consumo e demanda para compensar as perdas internas no transformador quando a medição de energia elétrica se faz em baixa tensão (nesse caso, as perdas por transformação não são "enxergadas" pela medição e precisam ser compensadas); assumem-se os percentuais de 1% nos fornecimentos em tensão superior a 44 kV e de 2,5% (dois e meio por cento) nos fornecimentos em tensão igual ou inferior a 44 kV; quando a medição é feita no primário, o % *perdas* não precisa ser considerado, por já estar contemplado nos valores medidos;

.27 e 28: demandas (kW) faturadas nos horários fora de ponta e de ponta respectivamente, com tarifas normais;

.29: demanda (kW) de ultrapassagem no horário fora de ponta, correspondente à diferença entre o valor máximo registrado; note-se que o valor máximo registrado superou em mais de 10% o valor contratual ($kW_{MAX} > 1,1 \times kW_{CONTRATADO}$); no caso específico da conta apresentada, não houve ultrapassagem de demanda no horário de ponta.

.30: Demanda reativa excedente (UFDR em kVAr) no horário fora de ponta; note-se que esse valor (399 kVAr) decorre da diferença entre a DMCR (3.717 kW, valor máximo mensal) e a máxima demanda faturável no horário fora de ponta (3.318 kW, indicada com o código 08); os valores em Reais (R\$) relativos ao FDR e ao FER também encontram-se circundados;

A conta de energia elétrica é um documento fiscal. Sua estruturação geral e *lay-out* podem variar de uma concessionária para outra. Porém, os princípios básicos de monitoramento / medição, cálculo das grandezas elétricas e determinação dos valores são os mesmos e seguem, atualmente, as diretrizes impostas por (ANEEL, 2000).

4.4 Medidores eletrônicos de energia elétrica

4.4.1 Considerações gerais e aspectos técnicos

A partir da Portaria nº 1.569 do DNAEE (23/12/1993), porém, fundamentalmente a partir de 1996, os sistemas de medição de energia baseados em medidores eletrônicos (para faturamento dos consumidores enquadrados em tarifação horo-sazonal) começaram a se disseminar pelo país. Até então, utilizavam-se registradores eletrônicos do tipo RDTD (Registrador Digital de Tarifa Diferenciada), RDMT (Registrador Digital de Média Tensão) ou REP (Registrador Eletrônico Programável), que recebiam pulsos gerados por medidores eletrônicos (do tipo a indução). A principal diferença entre um registrador e um medidor eletrônico reside no fato de que este último dispensa o uso dos medidores eletromecânicos.

Os medidores eletrônicos são tecnologicamente mais avançados, mais facilmente calibráveis e possibilitam maiores facilidades na instalação e na realização de testes. Além disso, o custo de aquisição de um medidor eletrônico tornou-se mais atrativo se comparado ao custo de um conjunto composto por medidores eletromecânicos e registrador eletrônico.

Ainda há em funcionamento no país um importante contingente de sistemas baseados em medidores eletromecânicos e registradores. Porém, essa base já instalada vem sendo eliminada pelas concessionárias a partir do final da década de 1990 e tem sido amplamente substituída pelos medidores eletrônicos. Segundo informações publicadas em (BARBIERI, 2008), previase, para 2008, que 60% dos sistemas de medição de energia elétrica para consumidores enquadrados ou enquadráveis no sistema tarifásio horo-sazonal já estariam contemplando os medidores eletrônicos. Atualmente, o mercado de substituição desses sistemas no Brasil situase na faixa entre 700 mil e 1 milhão de unidades a cada ano, com tendência ao crescimento. Segundo (RÉCHE, 2003), a partir de 2002 iniciou-se de maneira mais sistematizada um

programa de controle metrológico e regulamentação de medidores eletrônicos de energia elétrica. Descreve-se abaixo, de maneira sintética, as principais etapas desse programa:

-portaria INMETRO 262 de 30 de dezembro de 2002, para aprovação provisória de modelo de medidores de energia elétrica eletrônicos, monofásicos e polifásicos, para as classes 0,2; 0,5; 1 e 2;

-criação de um grupo de trabalho para elaboração das regulamentações, composto pelos componentes ANEEL, ABRADEE, ABINEE, ONS, INMETRO e outros, tendo como referência as normas editadas pela OIML (Organização Internacional de Metrologia Legal) e ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), para consideração de necessidades nacionais;

-desenvolvimento de metodologias para verificação de medidores no campo; -aprovação de modelos e ensaios (INMETRO).

Conforme (RÉCHE, 2003), oito fabricantes de medidores eletrônicos já estavam associados a esta instituição em 2008 (Actaris, Elo, Elster, Fae, Genus, Itron, Landis & Gyr e Nansen).

Dentre os modelos mais comuns na categoria de medidores eletrônicos de energia elétrica, podem ser destacados: SAGA-1000 (ex-ESB, atualmente Landis & Gyr), ELO 2180 (Elo) e SPECTRUM (Nansen).

Pela Figura 4.7 pode-se visualizar o aspecto geral de alguns medidores eletrônicos de mercado.



Landis & Gyr (ESB) SAGA 1000

Nansen SPECTRUM K

Actaris ACE SL 7000

Figura 4.7 – Medidores eletrônicos de energia elétrica Fontes: (LANDIS, 2008), (NANSEN, 2008), (ELO, 2008) e (ACTARIS, 2003)

A Figura 4.8 mostra a forma de ligação de um medidor eletrônico à rede de energia elétrica em média tensão, tomando-se como referência sua parte posterior (onde geralmente encontram-se os bornes para as conexões), além de sua parte frontal (à direita). Os TPs e TCs apresentados na figura são posicionados em cavaletes de sustentação apropriados situados em cubículos específicos, geralmente a alguns poucos metros da caixa metálica onde o medidor eletrônico é instalado.



Figura 4.8 – Medidor eletrônico de energia elétrica – Esquemático de ligação Fonte: (ELO, 2008)

Os medidores eletrônicos de mercado possuem uma saída serial através da qual os consumidores podem ter acesso, mediante solicitação à concessionária, a sinais a serem utilizados em medições filiais e dispositivos de gerenciamento energético, tais como os controladores de demanda e os controladores automáticos do fator de potência. A comunicação de dados é regida por um padrão nacional, explicitado em (ABNT(3), 2000).

No que se refere à energia reativa, é importante ressaltar que, durante o período de tarifação capacitiva (período da madrugada), os medidores não fornecem pulsos de energia indutiva. Portanto, caso o fator de potência esteja indutivo nesse período, os sinais relativos a ele serão nulos. Nessa situação, e na hipótese de haver um controlador capturando dados a partir da medição da concessionária, este "enxergará" um fator de potência unitário. Analogamente,

durante o período indutivo (período diurno e à noite), caso o fator de potência esteja capacitivo, os medidores não emitirão sinais que contabilizam a energia reativa.

4.4.2 Taxa de amostragem e classe de exatidão

Resumidamente, a operação de um sistema de medição de energia elétrica baseado em medidor eletrônico digital típico contempla o sensoriamento de tensões e correntes, o emprego de circuitos de referência de tensão, conversores corrente-tensão, conversores A/D (analógico-digitais) para corrente e tensão, multiplicadores digitais, acumuladores e circuitos para processamento dos pulsos de energia a serem disponibilizados para um sub-sistema registrador. A Figura 4.9 apresenta, de maneira orientativa e bastante simplificada, um esquemático em blocos.



Figura 4.9 – Medição de energia elétrica – Esquemático em blocos simplificado

Os sinais analógicos de corrente e tensão, capturados a partir dos secundários de TPs e TCs, são conformados e amostrados, convertendo-se em sinais digitais por meio de conversores A/D (Figura 4.10). Realizada a conversão, os circuitos digitais subseqüentes processam as informações e calculam as grandezas elétricas de interesse.



Figura 4.10 – Conversão analógico-digital

Um dos parâmetros importantes no processo de conversão analógico / digital realizado em um medidor eletrônico é a *Taxa de Amostragem* (ou freqüência de amostragem). Em uma abordagem simples, pode se dizer que ela se refere à freqüência com que os conversores A/D "capturam" os sinais analógicos instantâneos de tensão e corrente em 1 ciclo completo (16,7 milisegundos em 60 Hz) para realizar a conversão. Essa característica (além da resolução em bits) reflete a habilidade dos conversores A/D em reconstruir digitalmente os sinais analógicos com maior ou menor fidelidade / precisão. A partir dessa reconstrução digital, serão determinados os valores rms (eficazes) de tensão e corrente em um dado intervalo de tempo, de forma que as demais grandezas mensuráveis possam ser calculadas e registradas.

Segundo (SCHLOBOHM, 2005), considera-se que uma taxa de 16 amostras por ciclo (o que corresponde à freqüência de amostragem de 960 Hz) seja um mínimo necessário para que se possa determinar satisfatoriamente (classe de exatidão da ordem de 1%) valores rms de tensão e corrente, levando-se em conta a necessidade de se expressar grandezas à freqüência fundamental da rede (60 Hz) para fins de faturamento, sem que haja a intenção de manipular valores em freqüências harmônicas superiores e/ou caracterizar fenômenos transitórios mais rápidos. Como exemplo, a documentação técnica de um medidor eletrônico apresentada em (ACTARIS, 2003), que atende à normalização brasileira, cita que corrente e tensão são amostradas a cada intervalo de 0,5 milisegundo, o que corresponde a uma taxa de amostragem de aproximadamente 32 amostras por ciclo (cerca de 1,9 kHz), conferindo-lhe a classe de exatidão (declarada na documentação) de 0,5%. É importante ressaltar que a grande maioria dos fabricantes não divulga essa informação nas documentações técnicas de seus equipamentos por considerá-la, dentre outras informações, como segredo industrial.

A título de comparação, conforme (SCHLOBOHM, 2005), um medidor usado para a detecção de distorções harmônicas totais (DHT) deve ser capaz de realizar algo da ordem de 64 amostras por ciclo (3.840 Hz). Para a análise detalhada e confiável de um espectro harmônico, seriam necessárias 256 amostras por ciclo (aproximadamente 15 kHz). Medidores capazes de amostrar sinais a 512 amostras por ciclo (aproximadamente 30 kHz) seriam suficientes para análises mais pormenorizadas de formas de onda. Portanto, sob o ponto de vista da precisão da reconstrução digital de sinais elétricos analógicos e, consequentemente, da obtenção e processamento de grandezas a partir disso, quanto maior for a taxa de amostragem, melhor. Todavia, há que se considerar que a taxa de amostragem e a necessidade de se registrar e de se manter, "*on-board*", uma grande massa de dados para manipulação, resulta na necessidade de grande capacidade de memória / armazenamento.

Percebe-se, analisando as documentações técnicas de fabricantes de medidores eletrônicos para fins de faturamento de energia elétrica (LANDIS, 2008) (NANSEN, 2008) (ELO, 2008), que a taxa de amostragem adotada em seus equipamentos geralmente não é explicitada. Além disso, as especificações técnicas das concessionárias de energia para a aquisição de medidores geralmente não contemplam esse parâmetro (CELPE, 2006) (COPEL, 2008). As próprias normas brasileiras relativas a sistemas de medição de energia elétrica (adotadas pelos fabricantes) são omissas sob esse aspecto. Uma possível explicação para isso reside no fato de que há várias possibilidades para a determinação de uma taxa de amostragem em nível de projeto de um equipamento de medição. Tal taxa determinará, inclusive, as características do filtro anti-aliasing (filtro passa-baixas) que será adotado. Há um limite teórico inferior para essa taxa que seria definido pelo chamado "Teorema de Nyquist" ou "Teorema da Amostragem". De acordo com esse teorema, o valor da taxa de amostragem (frequência de amostragem) deve ser igual ou superior a duas vezes a frequência do componente harmônico com a mais alta frequência de interesse. Essa afirmativa, no entanto, pressupõe um filtro passa-baixas ideal à entrada do conversor A/D, o que, na prática, não existe. Conforme (VASCONCELOS, 2004), o filtro apresentará uma banda de transição (banda de freqüências) finita, impondo uma taxa de amostragem efetiva tal que possam ser atenuadas as componentes do sinal por uma amplitude [A(f)=6.02ENOB+1,76 dB] imperceptivel pelo conversor A/D (isto é, inferior ao bit menos significativo). Portanto, há vários valores adequados para esses dois parâmetros (taxa de amostragem e característica do filtro passa-baixa).

No que se refere a medições relacionadas à Qualidade da Energia, ou seja, medições para fins monitoramento de limites buscando-se dirimir dúvidas e divergências oriundas de reclamações (e não para fins de faturamento), há especificações mais claras quanto às taxas de amostragem a serem adotadas nos equipamentos. Em novembro de 2001, a referência (ANEEL, 2001) (elaborada com o objetivo de estabelecer, de forma consolidada e atualizada, as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão em regime permanente), já indicava, nos artigos 14 e 15:

Art. 14. As medições de tensão solicitadas ou amostrais devem ser realizadas utilizando-se equipamentos com as características mínimas a seguir:

I- taxa de amostragem de 16 amostras por ciclo de 60 Hz;
II- conversor A/D (Analógico/Digital) do sinal de tensão de 12 bits; e
III- precisão de até 0,5 % (meio porcento) da leitura.

Parágrafo único. A partir de 2005, as medições amostrais deverão utilizar equipamentos de medição com taxa de amostragem mínima de 64 amostras por ciclo de 60 Hz.

Art. 15. O equipamento de medição deverá permitir o cálculo dos valores eficazes de tensão utilizando intervalos de medição de 10 (dez) minutos, com janelas fixas e consecutivas de 12 a 15 ciclos de 60 Hz, e apresentar as seguintes informações:

I- valores calculados dos indicadores individuais;

II- tabela de medição; e

III- histograma de tensão.

Parágrafo único. O equipamento deverá expurgar os registros de leituras de tensão quando houver interrupção de energia elétrica.

Em dezembro de 2003, a referência (ANEEL, 2003) (elaborada com o objetivo de alterar dispositivos e proceder ajustes em (ANEEL, 2001)) indicava, também nos artigos 14 e 15:

Art. 14. As medições de tensão oriundas de reclamação ou amostrais devem ser realizadas utilizando-se equipamentos com as características mínimas a seguir:

I- taxa de amostragem de 16 amostras por ciclo;

II-....; *e*

III- precisão de até 1 % (um porcento) da leitura."

"Art. 15. O equipamento de medição deverá permitir o cálculo dos valores eficazes de tensão utilizando intervalos de medição de 10 (dez) minutos, com janelas fixas e consecutivas de 12 a 15 ciclos, e apresentar as seguintes informações:

.....

Parágrafo único. Quando houver registro de valores referentes à interrupção de energia elétrica, afundamentos e/ou elevações momentâneas de tensão, o intervalo de medição de 10 (dez) minutos deverá ser expurgado.

Além da taxa de amostragem, as "janelas" de medição citadas no Artigo 15 em (ANEEL, 2003) e (ANEEL, 2001) constituem um outro parâmetro utilizado nos medidores para faturamento objetivando o cálculo dos valores eficazes de tensão e corrente, os quais serão a base para a determinação dos valores de potências (demandas) e consumos ativos e reativos faturáveis. Esse parâmetro será abordado no subitem 4.4.3.

Quanto à *Classe de Exatidão*, este é um dos parâmetros mais claramente especificados quando se trata de medição de energia elétrica. A essa altura, é importante caracterizar os termos

Exatidão e *Classe de Exatidão*. Segundo (INMETRO, 2007), o conceito de *Exatidão* é qualitativo e traduz-se como a aptidão de um equipamento de medição para dar respostas próximas a um valor verdadeiro. A *Classe de Exatidão* é quantitativa e usualmente indicada por um número ou símbolo adotado por convenção e denominado índice de classe. No Brasil, consideradas as especificações técnicas das concessionárias de energia publicadas em editais de licitação e em seus manuais internos, verifica-se, como prática comum, ser exigida uma classe de exatidão igual ou melhor a 1%, o que significa a obtenção de desvios não superiores a um ponto percentual relativamente à grandeza medida. É importante lembrar que um sistema de medição como um todo incorpora um erro global que não depende apenas do medidor em sí, sendo afetado pelos erros introduzidos pelos TCs e TPs. Portanto, todo o conjunto é especificado na tentativa de se obter um erro global aceitável relativamente aos valores verdadeiros convencionais (ou melhores estimativas possíveis) das grandezas medidas.

4.4.3 "Janela" de medição e cálculo dos valores *rms* para determinação das grandezas faturáveis

A julgar pelo conteúdo de (ABNT(3), 2000), documento adotado como referência por todos os fabricantes que disponibilizam medidores eletrônicos no mercado nacional, entende-se que o medidor processe os valores *rms* de tensão e corrente <u>a cada segundo cheio</u>. Portanto, inferese que a medição para faturamento perfaz "janelas" fixas e consecutivas de 60 ciclos, período adotado para o cálculo dos valores eficazes. Com base no que foi exposto relativamente à taxa de amostragem (no subitem 4.4.2) e à "janela" de medição, pode-se, em princípio, considerar que um sistema de medição para fins de faturamento de grandezas em 60 Hz deva ser projetado de forma a amostrar sinais analógicos de tensão e corrente com taxas de, no mínimo, 16 amostras por ciclo (960 Hz) e calcular valores eficazes a cada segundo consecutivo. As equações básicas implementadas nos medidores eletrônicos digitais para o cálculo dos parâmetros elétricos das redes sob medição encontram-se indicadas a seguir (FUCHS, 2006).

.Tensão *rms* (U):
$$U = k_u \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i^2}$$
 (4.10)

$$I = k_i \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} i_i^2}$$
(4.11)

Potência Ativa (P):
$$P = \frac{k_u k_i}{N} \sum_{i=1}^{N} u_i i_i$$
(4.12)

.Corrente *rms* (I):

Potência Aparente (S):
$$S = UI$$
 (4.13)

.Potência Reativa (Q):

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \tag{4.14}$$

onde:

 $k_u = relação de transformação do transformador de potencial;$

.ki = relação de transformação do transformador de corrente;

.N = número de pontos amostrados (conversão analógico-digital) em uma "janela de medição";

 $.u_i = valor instantâneo da tensão amostrada;$

 $i_i = valor instantâneo da corrente amostrada.$

Especificamente no que se refere ao faturamento da energia elétrica consumida, é importante salientar que atualmente os medidores processam os cálculos conforme as expressões 4.10 a 4.14 levando em conta apenas as grandezas em 60 Hz (esse aspecto poderá ser visto em uma especificação típica das concessionárias de energia, apresentada no subitem seguinte).

Note-se que os valores *rms* da tensão (U) e corrente (I) são determinados digitalmente por uma sistemática que equivale à determinação do valor eficaz de um sinal analógico expresso em função do tempo; como exemplo, pode-se apresentar a expressão clássica para um sinal de tensão:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T}} \times \int_{0}^{T} V^{2}(t) dt$$
(4.15)

Também é importante salientar que o parâmetro N está intimimamente associado à taxa de amostragem dos sinais, ou seja, quanto maior for a taxa (freqüência de amostragem), maior será o número de pontos amostrados em uma mesma "janela de medição" e mais precisos serão os valores *rms* calculados para as grandezas primárias (U e I), das quais decorrem todos os demais parâmetros medidos / calculados.

O consumo de energia reativa excedente (UFER em kWh), se houver baixo fp horário, será determinado a cada hora pela soma das parcelas ocorridas a cada segundo. O valor mensal a ser faturado será obtido pela soma das parcelas horárias relativas aos intervalos com baixo fp. Por sua vez, a demanda reativa excedente (UFDR em kW) a ser faturada será a máxima verificada ao longo do ciclo de faturamento mensal, comparando-se os valores relativos aos intervalos de 1 hora em que tenha havido a ocorrência de baixo fp. Conforme já citado no

subitem 4.2, a UFDR somente será faturada caso seu valor máximo exceda a demanda faturável.

4.5 Especificações técnicas de medidores pelas concessionárias de energia

A seguir são reproduzidos os requisitos específicos que constam de uma especificação técnica para aquisição de lotes de medidores de energia eletrônicos para tarifação horo-sazonal, conforme(COPEL, 2008). De maneira geral, tais requisitos são exigidos por todas as grandes concessionárias de energia do país.

Os aspectos associados à energia reativa e/ou ao fator de potência encontram-se negritados.

REQUISITOS ESPECÍFICOS

-Arquitetura

O equipamento deve englobar, em um mesmo invólucro, o medidor de energia ativa e reativa e o registrador digital, sendo o medidor integrado na tecnologia do estado sólido (eletrônico).

-Características Funcionais

a) O equipamento deve medir e registrar a energia ativa, energia reativa indutiva e energia reativa capacitiva em canais distintos, isto é, energia ativa no canal 1, energia reativa indutiva no canal 2 e energia reativa capacitiva no canal 3;

b) Apresentar em display as tensões e as correntes instantâneas das três fases, com resolução mínima de uma casa decimal;

c) <u>A medição de energia elétrica não deve considerar para efeito de cálculos e registros das</u> <u>energias e demandas a contribuição proveniente das freqüências harmônicas;</u>

d) O mesmo equipamento deve possibilitar a ligação em circuitos a 2 ou 3 elementos, 3 ou 4 fios, em delta ou estrela;

e) Deve emitir pulsos para aferição através do conector ótico;

f) O equipamento deve registrar em memória de massa, em intervalos de integração de 5 minutos, a energia ativa, a energia reativa indutiva e reativa capacitiva, por um período superior a 35 dias;

g) O equipamento deve processar e armazenar em memória os valores em pulsos equivalentes a energia ativa, **reativa indutiva e capacitiva além da demanda, UFER e DMCR, separados em postos horários programáveis (mínimo 3), chamados ponta, fora ponta e reservado;**

h) Deve acusar no mostrador de forma instantânea o registro das energias ativa e reativa;

i) Deve apresentar no mostrador as grandezas elétricas constantes na tabela 1 em anexo;

j) Deve possuir relógio interno em tempo real;

k) Deve possuir um dispositivo de alimentação auxiliar para, no caso de falta de energia, preservar o conteúdo das memórias e manter o relógio interno por um período superior a 120 horas;

l) Deve permitir a programação de intervalos de integração de 15 minutos e 60 minutos para o faturamento de demanda de potência e da **demanda e energia reativas excedentes ao fator** *de potência de referência,* respectivamente;

m) O software de comunicação deve ser compatível com o protocolo nacional padronizado, possibilitando, com isso, o uso das leitoras / programadoras hoje disponíveis (NBR 13085 da ABNT), tanto para programação quanto leitura dos equipamentos;

n) Deve possuir uma saída de sinais seriais para uso do consumidor conforme padrão nacional (NBR 14522 - Intercâmbio de Informações para Sistemas de Medição de Energia Elétrica – Padronização);

-Características Elétricas

a) Tensão nominal de 120V;

b) Corrente de acordo com a requisição;

c) Freqüência nominal de 60Hz;

d) Classe de exatidão 1% ou superior;

e) Número de elementos e fios de acordo com a requisição;

f) A tensão de alimentação do circuito eletrônico deve ser de 120 V e 240 V, selecionável automaticamente, com uma faixa de operação de -30% a +15%.

-Características Construtivas

a) Dimensões máximas e demais características físicas conforme ETC 4.04;

b) Os registradores do medidor não podem perder as informações no caso de uma falta de energia;

c) Deve possuir a descrição dos códigos e das grandezas no mostrador, ou na placa de identificação, ou no painel frontal do medidor;

d) Demais características operacionais conforme NBR-14519.

-Características Não Funcionais

<u>Segurança</u>

a) Os equipamentos devem ter dispositivos que permitam a selagem;

b) O acesso ao botões de controle e programação do relógio devem estar protegidos por lacres distintos dos lacres da tampa do medidor;

<u>Confiabilidade</u>

a) Os terminais dos equipamentos devem apresentar ligação segura e permanente dos condutores de entrada e saída;

b) Os equipamentos de tecnologia eletrônica devem apresentar um MTBF superior a 30.000 horas.

Conectividade

a) Deve possuir um dispositivo de saída do tipo emissor de pulsos (simulador de manchas do disco ou emissor de luz vermelha) para fins de calibração. Esta saída deve estar permanentemente ativa.

b) Quando o medidor utilizar o "modo calibração" este não deverá ser interrompido por falta de energia e sim ao final de um determinado período, a critério do operador, ou automaticamente às 00:00h.

<u>Exatidão</u>

a) Os medidores devem ter uma classe de exatidão de 1% ou melhor;

b) A base de tempo do relógio quando este existir, deve apresentar um desvio inferior a 30 ppm em toda faixa de temperatura.

<u>Suportabilidade</u>

a) Os medidores deverão ser construídos com rigidez mecânica suficiente para evitar riscos de danos no seu manuseio normal e dispor de proteção contra penetração de água, poeira e objetos sólidos. As partes sujeitas a corrosão devem ser protegidas, e, caso haja revestimento

protetor, o mesmo deve apresentar boa resistência a abrasivos, não permitindo danos por manuseio normal de operação;

b) material utilizado na construção dos medidores deve oferecer blindagem suficiente a campos eletromagnéticos externos, de modo a assegurar a estabilidade de desempenho e confiabilidade nas condições normais de operação;

c) bloco de terminais deve ser construído com material isolante não higroscópico, capaz de suportar temperaturas elevadas sem apresentar deformações ao longo da vida útil do medidor. A isolação elétrica deve ser compatível com o previsto nas normas aplicadas e com o valor da tensão nominal do medidor; terminais para alimentação de tensão e corrente dos medidores e dispositivos de comunicação devem ser galvanicamente isolados entre si e a base, oferecendo isolação elétrica mínima de 2,0 KV.

-Condições de Funcionamento

a) Os equipamentos devem funcionar corretamente na presença de campos magnéticos de até 0,5 mili-Tesla a 60 Hz, e de até 0,5 Tesla em campos contínuos;

b) Os equipamentos devem funcionar corretamente na presença de perturbações transitórias de baixa freqüência (50Hz a 100khz) e de alta freqüência (100 khz até a faixa de microondas).

-Anexo

Tabela	1		
Código	Grandeza	Código	Grandeza
1	Data atual	31	Total geral do canal 3
2	Hora atual	32	Estado da alimentação auxiliar
3	Total geral do canal 1	33	Número do equipamento
4	Total do horário de ponta do canal 1	47	Número de pulsos do canal 1 no int. de integração atual
6	Total do horário reservado canal 1	48	Número de pulsos do canal 2 no int. de integração atual
8	Total do horário fora ponta do canal 1	49	Número de pulsos do canal 3 no int. de integração atual
10	Dem máx horário de ponta canal 1	66	UFER no horário de ponta
12	Dem máx horário reservado canal 1	67	UFER no horário reservado
14	Dem máx horário fora ponta canal 1	68	UFER no horário fora ponta
16	Dem último intervalo	69	DMCR no horário de ponta
17	Dem acum horário de ponta canal 1	70	DMCR no horário reservado
19	Dem acum horário reservado canal 1	71	DMCR no horário fora ponta
21	Dem acum horário fora ponta canal 1	73	DMCR acum no horário de ponta
23	Número de reposições de demanda	74	DMCR acum no horário reservado
24	Total geral do canal 2	75	DMCR acum no horário fora ponta
25	Total do horário de ponta do canal 2	85	Total do horário de ponta do canal 3
27	Total do horário reservado canal 2	86	Total do horário reservado do canal 3
29	Total do horário fora ponta do canal 2	87	Total do horário fora de ponta do canal 3

Obs.: É comum que os medidores mostrem em seus displays outras grandezas além das citadas na Tabela 1, integrante das especificações aqui apresentadas. Como exemplo pode-se citar a o *fator de potência do intervalo de integração anterior ao intervalo do instante em que se lê o display*. Esse valor é geralmente mostrado no campo de código 93. As grandezas são geralmente exibidas continuamente, de forma cíclica e em ordem crescente dos códigos, permanecendo em exibição por 6 segundos.

No Quadro 4.2, elaborado com base em (BARBIERI, 2008), são indicadas as funcionalidades / aplicações dos medidores eletrônicos (tarifação horo-sazonal) geralmente previstas na maioria dos modelos básicos (funções *default*, assinaladas com X), bem como outras funcionalidades passíveis de inclusão (assinaladas com o código Opc = opcional). Relativamente às funções opcionais, a coluna à direita procura mostrar, orientativamente, o aumento dos custos do medidor (os códigos estão indicados no rodapé do quadro).

APLICAÇÃO / FUNÇÃO	Comercial / Industrial THS	Investimento Adicional					
kWh	x	Básico					
kVArh	Орс	Básico					
UFER / DMCR	x	Básico					
kVA	Орс	Básico					
kW (max demanda)	x	Básico					
FP	Орс	Básico					
Tensão	Орс	Básico					
Corrente	Орс	Básico					
Auto Range	x	Básico					
Relógio (Time stamp)	x	Básico					
Calendário/ tarifas	x	Básico					
Memória de massa	x	Básico					
Auto diagnóstico	Орс	+					
Classe 1	NR	NR					
Classe 0,5	x	Básico					
Clasee 0,2	Орс	+					
4 Quadrantes	Орс	++					
DIC/FIC (necessidade de relógio)	Орс	+					
PQVQ	Орс	+					
PQ THD	Орс	++					
PQ HD	Орс	+++					
PQ Oscilografia / Flicker	Орс	++++					
Anti fraude 2 (Detecção eletrônica, abertura tampa, etc)	Орс	++					
Anti fraude 3 Software (Unidirecional/ Energia Reversa, etc)	Орс	+					
Saída controle de Demanda	х	Básico					
Porta optica	х	Básico					
Saída inteligente	Орс						
RS 485/ 232/ Euridis/ Mbus	Орс	++					
Ethernet	Орс	++++					
Comunicação Integrada	Орс						
RF	Орс	+++					
PLC	Орс	+++					
GPRS	Орс	++++					
Firmware Download	Орс	+					
Invest. Adicional em relação ao medidor básico: + Baixo ++ Médio +++ Alto ++++ Muito Alto Opc = opcional NR = Não requerido							

Quadro 4.2 – Funcionalidades e aplicações de medidores eletrônicos de energia elétrica

Fonte: (BARBIERI, 2008) – figura adaptada pelo autor

5. Configurações e Caracterização Geral dos Sistemas de Correção do Fator de Potência

Este capítulo apresenta as principais características técnicas e operacionais dos tipos de sistemas automáticos usualmente adotados na indústria para a correção do fator de potência na baixa tensão. Também são abordados os princípios e características gerais de sistema com um maior grau de sofisticação, utilizando a tecnologia do "STATCOM" para uma compensação mais fina e precisa. Ao final, são comparados os sistemas convencionais e os sistemas dinâmicos.

5.1 Bancos automáticos para correção do fator de potência

Provavelmente, a utilização de bancos capacitivos automáticos seja a solução técnica mais atrativa para a correção do fator de potência em instalações elétricas de baixa tensão de médio e grande portes. Nessa configuração, conforme o que já foi citado ao longo do subitem 2.4.2.2, os bancos de capacitores são instalados de forma centralizada, geralmente em subestações abrigadas ou salas elétricas, ligados aos barramentos de distribuição geral ou a barramentos de subdistribuição. Comandadas por controladores automáticos que monitoram continuamente a alimentação geral para as cargas, as unidades capacitivas são energizadas / desenergizadas individualmente ou em subgrupos, para atendimento às necessidades de suprimento de energia reativa de acordo com parâmetros pré-definidos.

5..1.1 Correção por bancos automáticos convencionais

5.1.1.1 Caracterização geral

Sistemas de correção do fator de potência compostos por bancos de capacitores acionados por contatores eletromecânicos são usualmente denominados sistemas "convencionais".

Na Figura 5.1 pode-se visualizar a configuração genérica de um sistema automático convencional, geralmente composto por TC(s), controlador automático com saídas a relés, contatores e unidades capacitivas comerciais trifásicas (ou bancos trifásicos obtidos pela associação de capacitores comerciais monofásicos), além dos dispositivos de proteção / seccionamento e interligações elétricas.



Figura 5.1 – Correção do fp – Sistema automático convencional Fonte: (LOVATO, 2004) – figura traduzida / adaptada

O sistema captura informações relativas às condições de operação da carga (via TC(s) e sinais de tensão da rede) e o controlador automático processa tais informações por meio de um programa interno pré-configurado, a partir do qual são tomadas decisões quanto aos estados dos relés de saída (contatos secos abertos ou fechados), energizando ou desenergizando as bobinas dos contatores que, por sua vez, se incumbirão de energizar ou desenergizar os bancos de capacitores à medida do necessário.

Os controladores automáticos nos sistemas convencionais geralmente operam ajustados para energizar os capacitores apenas quando esses estiverem descarregados (por meio de resistores de descarga a eles incorporados), de modo a se prevenir a ocorrência de diferenças de potencial elevadas entre as tensões instantâneas na rede e nos capacitores (note-se que, na prática, não são raros os casos de queimas ocorridas após o desligamento manual de um capacitor e seu religamento imediato; tal situação é potencialmente perigosa pelo fato de poder ocasionar a aplicação, sobre o capacitor, de até duas vezes a tensão de pico da rede. Queimas poderão ocorrer caso a reenergização se dê no instante em que a tensão de pico da rede esteja em oposição relativamente à tensão residual armazenada no capacitor (sinais opostos), estando esta última com o módulo instantaneamente equivalente ou próximo do valor de pico.

As faixas para ajuste do tempo de retardo nas reenergizações variam para os diversos modelos de controladores convencionais disponíveis no mercado, podendo ser encontrados tempos mínimos de 1 segundo e tempos máximos da ordem de 1.000 segundos (alguns modelos comerciais disponibilizam ajustes de tempo superiores a duas horas). Os resistores de descarga comercialmente disponíveis (e geralmente já incorporados de fábrica aos bornes de ligação dos capacitores) geralmente são capazes de promover a descarga a taxas de decaimento da tensão residual situadas entre 4 e 10 volts/segundo (nos capacitores ofertados pelos grandes fabricantes, geralmente a tensão residual reduz-se a algo entre 50 e 75 V em cerca de 60 segundos). Segundo (IEEE, 2002), os capacitores devem ser equipados com dispositivos de descarga que promovam a redução da tensão residual a 50 V ou menos em 1 minuto, considerada uma desconexão no instante de pico da tensão nominal de operação. Considerando-se a tensão residual recomendável para uma reenergização, para uma taxa de decaimento média de 7 volts/segundo pode-se inferir que um tempo mínimo de retardo considerado adequado para capacitores alimentados, por exemplo, em 440 V, estaria em torno de 80 segundos (1,33 minuto). O retardo na energização se faz necessário fundamentalmente em bancos automáticos uma vez que, no momento da reenergização, deseja-se uma tensão residual significativamente inferior à tensão rms nominal; note-se que cada reenergização sucessiva conectará o capacitor a outras unidades já em operação.

Nas situações de reenergização em bancos automáticos (reenergizações usualmente denominadas "*back-to-back*" – consultar o Apêndice 3), o efeito que se pode ter é similar a um curto-circuito e a corrente de pico pode atingir, segundo (EPCOS(2), 2008), valores elevadíssimos, da ordem de até 200 x In (In = corrente nominal do capacitor) em casos extremos, se não houver algum recurso que promova a sua limitação. Tal transitório, de freqüência e amplitude elevadas, pode ser prejudicial aos dispositivos e componentes presentes no sistema, causando repetitivas situações de estresse térmico e eletrodinâmico. Além disso, as rápidas taxas de variação di/dt através das indutâncias presentes nos circuitos são responsáveis pelo surgimento de surtos na tensão da rede de alimentação, elevando o risco de ocorrência de curto-circuitos por rompimento das isolações e a operação errática de sistemas e instrumentos eletrônicos sensíveis. A Figura 5.2 mostra a magnitude que a corrente de energização pode atingir em curtíssimos intervalos de tempo (gráfico à esquerda) e os surtos transitórios de tensão decorrentes das elevadas taxas di/dt (gráfico à direita).



Figura 5.2 – Corrente de energização ("inrush") de um capacitor Fonte: (EPCOS(1), 2008) – figura traduzida / adaptada

Para minimizar esses efeitos indesejáveis, o mercado dispõe de contatores já equipados com resistores de pré-inserção (ou pré-carga), capazes de limitar as correntes de *inrush* dos capacitores a níveis bem inferiores (no caso dos bancos que contenham filtros dessintonizados - associações de capacitores e indutores - os próprios indutores podem exercer a função de elementos limitadores). Na prática (WEG, 2001), utilizam-se resistores com potência de algumas dezenas a algumas centenas de watts e resistências ôhmicas na faixa de frações de ohms a até 2 Ω , dependendo da potência nominal do capacitor (considerada uma mesma tensão de alimentação, potências capacitivas superiores requerem resistores com menor resistência ôhmica e maior capacidade de dissipação de potência). A Figura 5.3 ilustra essa funcionalidade adicional incorporada aos contatores apropriados para a manobra de capacitores, apresentando um digrama trifilar, um esquemático funcional e fotografías de alguns contatores de mercado apropriados para a manobra de capacitores.



Figura 5.3 – Contator com resistores de pré-inserção Fontes: (EPCOS(1), 2007), (EPCOS(2), 2008) e (ELECTROMECHANICA, 2002) – figura traduzida

Observando-se a Figura 5.3 percebe-se, nitidamente, os resistores (externos) bem como o bloco de contatos auxiliares a eles associado. No diagrama funcional (parte central da figura), verifica-se que o dispositivo é projetado de forma que, aplicada a tensão de comando para energização da bobina do contator, os contatos auxiliares que manobram os resistores (contatos adiantados do tipo *"make-before-break"*) se fecham ligeiramente antes do fechamento dos contatos principais, permanecendo nesse estado por intervalos de tempo de até 10 ms, valor orientativo (esse intervalo pode variar dependendo do fabricante / modelo do contator). Após fechados os contatos principais, os contatos auxiliares retornam à posição de repouso. Essa sistemática é suficiente para que as correntes de pico na energização sejam reduzidas a algo entre um quinto e um terço da corrente de *inrush* que seria verificada sem a presença dos resistores, conforme pode-se observar pela Figura 5.4.



Figura 5.4 – Redução da corrente de "inrush" de um capacitor com resistores de pré-inserção Fonte: (EPCOS(1), 2008) – figura traduzida / adaptada

Diante dos aspectos abordados nesse subitem, fundamentalmente no que se refere ao tempo de retardo necessário para as reenergizações dos capacitores após um desligamento, pode-se concluir que, em princípio, os sistemas automáticos do tipo convencional são aplicáveis, de maneira segura e eficaz, à correção do fator de potência de cargas cujas dinâmicas operacionais (e, consequentemente, cujas oscilações nas demandas de potência reativa) sejam relativamente lentas, preferencialmente da ordem de dezenas de segundos ou tempo superior.

Pode-se, a essa altura, ir um pouco mais além e extrapolar tal raciocínio presumindo-se que, se aplicados para o suprimento da energia reativa requerida por cargas de dinâmica muito rápida, um sistema convencional provavelmente não atenderá com eficácia à função requerida, uma vez que o sistema de medição da concessionária de energia poderá, em vários períodos de tempo durante o ciclo de faturamento, contabilizar os kVArh indutivos excedentes sem que a correção necessária seja efetivamente realizada.

5.1.1.2 Contatores para manobra de capacitores - Principais critérios de dimensionamento / especificação

Um exemplo de uma possível especificação técnica, tal como se faz na prática em memoriais descritivos de projeto (baseada em (EFFICIENTIA, 2007)), é apresentada a seguir considerando-se um contator para acionamento / alimentação de um capacitor trifásico (ou a associação de capacitores monofásicos) com potência nominal de 50 kVAr / 440 V.

-contator tripolar específico para a manobra de capacitor(es) estático(s), categoria de emprego AC-6b, dotado de contatos auxiliares adiantados e em série com resistores de préinserção (amortecimento de "inrush"), objetivando a pré-carga dos capacitores antes que os contatos principais sejam fechados e a redução dos picos de corrente na energização, com as seguintes características elétricas:

.capacidade para a manobra de, no mínimo, 50 kVAr em 440 V (em 60 °C);

.tensão nominal de comando: 220 Vca (faixa de operação: 0,8 a 1,1 x V_N);

.no mínimo 1 contato auxiliar <u>NA</u> (a ser utilizado para sinalização);

.tensão de isolação: 600 V ou superior;

.frequência de chaveamento admissível: 120 manobras / hora;

vida mecânica dos contatos: mínimo de 250.000 manobras;

.aplicação em ambiente industrial.

No caso dos contatores destinados ao comando de capacitores, o interesse maior concentra-se no processo de ligação, quando surgem níveis de correntes que podem levar à rápida queima dos contatos ou, sob condições mais desfavoráveis, à soldagem das peças de contato. Essa situação motivou o desenvolvimento dos contatores apropriados para a categoria de emprego (ou categoria de utilização) denominada *AC-6b – "Manobra de Capacitores Estáticos*".

Caso os contatores AC-6b não venham a ser utilizados (situação desaconselhável já que a redução das correntes de *inrush* traz benefícios adicionais além da preservação do próprio contator), a utilização de contatores comuns é possível desde que alguns critérios de dimensionamento sejam previamente adotados. Nesses casos, é importante que duas situações sejam consideradas:

.a ligação de um único capacitor; e

.a ligação de um capacitor em paralelo com um banco de capacitores já ligado à rede.

Em se tratando de bancos automáticos para a correção do fator de potência, a segunda situação (Figura 5.5) é mais freqüente na prática e o dimensionamento e a especificação corretos para a escolha do contator adequado dependerão acentuadamente das características da rede de alimentação.



Figura 5.5 - Ligação de um capacitor em paralelo com um banco de capacitores já ligado à rede Fonte: (SIEMENS(1), 1975)

Os parâmetros e grandezas importantes para essa análise são:

.a relação entre as potências do banco já ligado à rede (Q_1) e do capacitor a ser energizado (Q_2) : $x = Q_1/Q_2$; para valores crescentes de x, também será crescente a solicitação sobre o contator que energiza o capacitor inserido;

.a indutância equivalente (L_1) do circuito terminal de alimentação dos capacitores já ligados à rede (banco já energizado) e a indutância do circuito terminal de alimentação do capacitor a ser energizado (L_2) ; quanto menores forem tais indutâncias (o que geralmente ocorre na prática, devido aos comprimentos curtos dos cabos nos circuitos terminais), mais rigorosas serão as solicitações sobre o contator;

.a indutância da linha de alimentação do banco de capacitores (L_L) , considerando-se o percurso dos cabos desde o transformador até o barramento de alimentação do banco capacitivo; quanto menor for o comprimento dos cabos nesse trecho, maior será a solicitação sobre o contator;

.a potência nominal do transformador (P_T); quanto maior for a potência do transformador, maior será a solicitação sobre o contator no momento da energização.

Em (SIEMENS(1), 1975) apresenta-se, detalhadamente, uma metodologia específica para avaliação e especificação de contatores (comuns) para manobra de capacitores com base nas grandezas elétricas acima citadas. No Apêndice 3 desta Dissertação aborda-se de maneira mais pormenorizada o processo de energização de capacitores "*back-to-back*".

5.1.2 Compensação dinâmica utilizando eletrônica de potência para acionamento em degraus rápidos

5.1.2.1 Caracterização geral

Nos sistemas para correção rápida ou dinâmica (ou ainda sistemas para compensação em "tempo real") os capacitores são acionados por módulos de potência configurados com tiristores, capazes de chavear os bancos em tempos extremamente curtos mediante ações de comando exercidas por controlador automático com estágios de controle a transistor. Através da Figura 5.6 pode-se visualizar a configuração genérica de um sistema típico para correção dinâmica do fator de potência em instalações industriais.

Tal sistema, baseado em eletrônica de potência, é geralmente composto por TC(s), controlador automático com saídas a transistor, módulos tiristorizados contendo também o circuito de controle e unidades capacitivas comerciais trifásicas (ou bancos trifásicos obtidos pela associação de capacitores comerciais monofásicos), além dos dispositivos de proteção / seccionamento, ventilação/ exaustão forçada, sinalizações e interligações elétricas.



Figura 5.6 – Correção do fp – Sistema automático para compensação dinâmica ou em "tempo real" Fonte: (EPCOS(1), 2007) – figura traduzida

Nota: Embora seja usual a utilização de fusíveis ultra-rápidos nos sistemas comercialmente disponíveis, salienta-se que tais dispositivos não atuam perante a queima (curto-circuito anodo-catodo) dos tiristores, apenas protegendo-os para curtos na carga e/ou curtos nos terminais de conexão de força dos módulos tiristorizados.
Em uma configuração mais adequada, pode-se adotar a sistemática de desenergizar o módulo a partir de um sinal gerado perante a ocorrência de defeito no(s) tiristor(es), o que pode ser realizado prevendo-se, além dos fusíveis ultra-rápidos, um contator (ou disjuntor) no circuito, inistalado eletricamente a montante do módulo.

Da mesma forma que para os sistemas convencionais, esse sistema captura informações relativas às condições de operação da carga (via TC(s) e sinais de tensão da rede). O controlador automático processa tais informações por meio de um programa interno préconfigurado e toma decisões quanto aos estados dos transistores dos estágios de controle (condução ou bloqueio), enviando sinais de comando aos módulos de potência tiristorizados que se incumbirão de energizar ou desenergizar os bancos de capacitores à medida do necessário.

Nos sistemas comerciais mais rápidos, o processamento das informações quanto à necessidade de injeção de energia reativa, a tomada de decisões pelo controlador, o disparo adequado dos tiristores e a inserção ou retirada dos capacitores na rede pode ocorrer em tempos de aproximadamente 1,5 ciclo da freqüência da tensão da rede (cerca de 25 ms em 60 Hz) (ABB(2), 2007), podendo, em determinados instantes e dependendo do sistema, ser inferiores a 1 ciclo (ELSPEC(2), 200-?). Portanto, nos sistemas dinâmicos, os tiristores energizam os capacitores virtualmente sem atraso (o atraso entre a emissão do sinal pelo controlador e o disparo efetivo dos tiristores, consiste apenas no tempo necessário para aguardar o instante em que as tensões de rede, em cada fase, e as tensões residuais nos capacitores, em suas respectivas fases de alimentação, sejam equivalentes).

A Figura 5.7 ilustra a situação aqui descrita.



Figura 5.7 – Sistema de correção dinâmica do fp – Sinal de ativação e disparo dos tiristores Fonte: (EPCOS, 2003) – figura traduzida e adaptada

Sendo assim, pode-se concluir que a velocidade de chaveamento / manobra é uma característica fundamental dos sistemas rápidos / dinâmicos.

Além da velocidade de manobra, outra característica dessa tecnologia consiste na isenção de transientes quando da energização dos capacitores (STAROSTA, 2002) (ABB(2), 2007) (HPE(1), 2008). Como a energização ocorre apenas em momentos de nulidade da diferença de potencial entre a rede e os capacitores (*"zero-crossing"*), evitam-se os surtos típicos que se verificam nos sistemas convencionais, nos quais os bancos são energizados por contatores ou outro dispositivo eletro-mecânico (conforme já citado anteriormente, nos sistemas convenconais os surtos são bem mais pronunciados quando não há mecanismos capazes de limitar as correntes de *inrush*).

Portanto, como não há a circulação de correntes de *inrush* com elevadas taxas *di/dt*, a compensação em "tempo real" possibilita a inserção e a desconexão dos capacitores na rede elétrica sem surtos transitórios na tensão de alimentação. A Figura 5.8 ilustra essa situação de maneira genérica, indicando que, após o sinal do controlador e aguardado o tempo necessário para chaveamento dos tiristores, os capacitores são energizados praticamente sem qualquer ocorrência de surtos.



Figura 5.8 – Sistema de correção dinâmica do fp – Energização dos capacitores sem "inrush" Fonte: (EPCOS(4), 2007) – figura traduzida

As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam resultados experimentais oscilografados quando de ensaios laboratoriais visando a avaliação do acionamento de bancos de capacitores por dispositivos baseados em módulos de potência tiristorizados. Em ambas, pode-se observar a rápida energização dos bancos após o envio do sinal de comando (na parte inferior do gráfico na Figura 5.9, e em vermelho na Figura 5.10) sem que se observem surtos significativos na corrente, o que se compatibiliza com a curva genérica apresentada na Figura 5.8.



Figura 5.9 – Sinal de ativação e energização dos capacitores sem "inrush" Fonte: (EPCOS(1), 2008)



Figura 5.10 - Sinal de ativação e energização dos capacitores sem "inrush" Fonte: (HPE(1), 2008)

A manutenção da tensão operacional de uma instalação próxima de seu valor nominal (sem oscilações significativas) quando da injeção de elevadas parcelas de reativos em "tempo real" de acordo com as demandas da própria carga, possibilita a redução de fluxos em excesso nos circuitos magnéticos, o que também auxilia na melhoria do fator de potência. Essa afirmativa pode ser melhor compreendida quando se observa um procedimento não raro na indústria (STAROSTA, 2006): a ligação de transformadores em *taps* primários que possibilitem obter tensões secundárias mais elevadas que a nominal, visando minimizar afundamentos e oscilações de tensão causados pela operação de cargas com alto consumo de energia reativa, correntes extremamente variáveis e dinâmica operacional rápida. Note-se que nessa situação, os núcleos dos transformadores operam com fluxos magnéticos mais elevados e, portanto, consomem mais energia reativa indutiva.

Portanto, além de promover a correção adequada do fator de potência para cargas com rápida dinâmica operacional, a tecnologia de compensação em "tempo real" possibilita a melhoria dos indicadores de regulação de tensão e, sob esse aspecto, favorece a qualidade da energia nas instalações.

Na Figura 5.11 podem-se visualizar fotografias de alguns dispositivos de mercado (baseados em módulos de potência tiristorizados) projetados para a manobra rápida / dinâmica de capacitores.



Figura 5.11 – Dispositivos baseados em módulos tiristorizados para a manobra de capacitores Fontes: (HPE(1), 2008) e (EPCOS, 2006)

5.1.3 Controladores automáticos do fator de potência

5.1.3.1 Caracterização geral

Os atuais controladores automáticos ofertados no mercado geralmente disponibilizam 4, 6, 8, 12 e 14 estágios de controle (ou saídas para energização de capacitores), sendo mais usuais os modelos com 6 e 12 estágios (pouquíssimos fabricantes ofertam controladores com número de estágios diferentes dos aqui citados e, geralmente, em modelos bastante específicos). Alguns fabricantes disponibilizam controladores com todas as saídas a transistor, todas a relé ou metade delas a transistor e metade a relé (exemplo: modelo BR-6000T6R6, de fabricação Epcos, que contempla 6 saídas a relé e 6 a transistor). A Figura 5.12 mostra esquemáticos básicos com saídas a relé e a transistor.

Nos controladores com saídas a transistor (geralmente adotados em sistemas de correção dinâmica do fp), utiliza-se a configuração NPN, emissor comum e coletor aberto (SILVA, 2009) (ABB, 2002) (usual para a aplicação de transistores operando como chaves), com capacidade de corrente tipicamente da ordem de dezenas de mA. Quando comandados pelo controlador, os transistores permitem a aplicação do sinal de ativação (proveniente de fonte c.c. externa) aos respectivos sistemas de controle dos módulos de potência tiristorizados aos quais estejam associados.



Figura 5.12 – Esquemáticos básicos de controladores automáticos do fp (saídas a relé e a transistor) *Fonte: (JANITZA, 2003) – figura traduzida e adaptada*

5.1.3.2 Parametrizações básicas

Os controladores automáticos de última geração disponibilizam funções parametrizáveis capazes de estabelecer previamente várias sistemáticas operacionais desejadas. Dentre as possibilidades ofertadas por alguns fabricantes, merecem destaque (abordagens com base em (ABB, 2002)):

a) Quanto à sistemática de controle

.controle em malha fechada – tipicamente aplicável quando o objetivo principal consiste na compensação de reativos objetivando-se o atingimento de um fator de potência desejado; nesse tipo de controle, mede-se a corrente total no alimentador da *carga* + *banco de capacitores* e a principal aplicação é a correção do fator de potência de cargas com dinâmica rápida; obtem-se boa precisão, porém, com um tempo médio de resposta (da ordem de 2 a 3 ciclos) superior ao obtido com o *controle em malha aberta*;

.controle em malha aberta – tipicamente aplicável quando o objetivo principal consiste na compensação de reativos objetivando-se a manutenção de uma boa regulação de tensão (bem como a correção de *flicker*); nesse tipo de controle, mede-se apenas a corrente da carga e a principal aplicação é a compensação de reativos objetivando-se a minimização de oscilações de tensão; obtem-se uma precisão inferior à obtida com o controle em malha fechada, porém, com um melhor tempo médio de resposta (da ordem de 1 ciclo);

.controle / gatilhamento por sinal externo – possível pela introdução de sinais de controle externos em entradas digitais (Vdc) configuráveis (ON-OFF); essa funcionalidade pode ser útil quando se deseja que um sinal proveniente do próprio sistema de alimentação / comando / acionamento de uma carga individual controle a introdução ou a retirada de uma potência capacitiva pré-estabelecida para a compensação de reativos; nesse caso, a medição de corrente é dispensável e obtem-se uma resposta dinâmica praticamente instantânea.

b) Quanto à sistemática de introdução e retirada de bancos capacitivos

Dependendo do modelo do controlador, a forma como esses estágios são sequencialmente energizados para a compensação de reativos pode ser pré-definida pelo usuário. Os sequenciamentos comumente disponibilizados são:

.Linear (ou LIFO: Last in – First Out)

.Circular ou Rotacional (ou FIFO: *First In – First Out*)

O princípio de sequenciamento circular (FIFO) é mais frequentemente adotado na prática por favorecer a vida útil dos capacitores de maneira balanceada / equalizada.

As Figuras 5.13 e 5.14 ilustram as sistemáticas de sequenciamento citadas.



Figura 5.13 – Sequenciamentos Linear e Circular ou Rotacional Fonte: (AREVA, 2004) – figura traduzida

Linear				Cir	Circular ou Rotacional									
	C1	C2 ₩	C3 - -	C4 -⊪	 C11 ₩	C12		C1 ₩	C2 ₩	C3 ₩	C4 ₩		C11 -⊪	C12
inguarm	v 1	- I -	1	1	- 1 ·	212	Neganin	1 50	1	1	1		<u></u>	- 1
×														
*							7							
¥							×							
×							*							

Comando para Inserio i Estágio
 Comando para Retirar 1 Estágio

- Estágio Ativado
- Estágio Desativado

Figura 5.14 – Inserção / retirada de capacitores nos sequenciamentos Linear e Circular ou Rotacional Fonte: (ABB, 2002) – figura traduzida

Outra funcionalidade disponibilizada pelos modelos tecnologicamente mais modernos de controladores automáticos refere-se ao tipo de ação de correção. Essa ação pode ser *Progressiva* ou *Direta*. Na ação progressiva, efetua-se o chaveamento dos capacitores sequencialmente, estágio por estágio, até que a potência capacitiva requerida seja atingida. Na ação direta, o controlador comanda o chaveamento imediato do(s) estágio(s) necessários para o atingimento do fator de potência desejado, evitando-se chaveamentos intermediários muitas vezes desnecessários.

A Figura 5.15 ilustra as ações de correção citadas.



Figura 5.15 – Ações de correção do fp: Progressiva e Direta Fonte: (ABB, 2002) – figura traduzida

c) Quanto à sensibilidade para a efetivação de chaveamentos

Uma funcionalidade presente nos controladores mais modernos refere-se à *menor diferença de potência reativa existente entre estágios* (algumas vezes denominada Q_{STEP}) do banco de capacitores a ser controlado, parâmetro que é a base para a definição da sensibilidade das ações de controle. Em linhas gerais, a *sensibilidade* é um parâmetro que permite regular a freqüência e/ou a velocidade de intervenção do controlador. Com sensibilidade baixa (o que significa controle mais refinado), obtém-se uma regulação mais rápida e um maior número de chaveamentos. Com sensibilidade mais elevada (controle menos refinado), a regulação é mais lenta e o número de chaveamentos decresce para um mesmo intervalo de tempo e um mesmo comportamento de uma carga com dinâmica rápida. Em linhas gerais, pode-se considerar que o nível de sensibilidade representa a inércia no tempo de resposta do sistema de controle a uma necessidade de potência reativa equivalente ao menor capacitor programado para um determinado estágio ou à menor diferença de potência reativa existente entre os estágios (Q_{STEP}). Perante a necessidade do suprimento de potências reativas superiores, o tempo de reação do controlador será, obviamente, mais curto. Exemplos de Q_{STEP} são apresentados a seguir para controladores de 4 estágios, a partir das potências reativas hipotéticas parametrizadas para cada estágio:

Seqüência 1-1-1-1: 1 (50 kVAr) - 1 (50 kVAr) - 1 (50 kVAr) - 1 (50 kVAr) $\Rightarrow Q_{STEP} = 50 kVAr$ Seqüência 1-2-2-2: 1 (25 kVAr) - 2 (50 kVAr) - 2 (50 kVAr) - 2 (50 kVAr) $\Rightarrow Q_{STEP} = 25 kVAr$ Seqüência 2-4-5-5: 2 (100 kVAr) - 4 (200 kVAr) - 5 (250 kVAr) - 5 (250 kVAr) $\Rightarrow Q_{STEP} = 50 kVAr$

De posse do Q_{STEP} , os controladores podem definir a sensibilidade de controle e, por meio de seus algoritimos internos, decidir quando inserir ou retirar o menor degrau de potência reativa possível.

Uma possível sistemática para implementação dessas ações de avaliação, decisão e controle encontra-se no gráfico genérico da Figura 5.16 que apresenta, como variável analisada, a corrente reativa capacitiva necessária para a correção do fp. Todavia, a mesma análise pode ser realizada considerando-se a potência capacitiva necessária.



Figura 5.16 – Inserção ou retirada de capacitores por ajuste de histerese Fonte: (ABB, 2002) – figura traduzida

Na Figura 56, ΔI_{STEP} refere-se à corrente relativa à menor diferença de potência reativa existente entre os estágios (Q_{STEP}). ΔI_{STEP} corresponde a um valor percentual (parametrizável) de I_{STEP} acima / abaixo do qual o estágio será energizado / desenergizado, levando-se em

conta um valor de histerese (também parametrizável). A *histerese* refere-se a um valor percentual acima e abaixo de ΔI_{STEP} que determina, em última análise, a sensibilidade do processo de controle / chaveamento (quanto maiores forem as faixas de histerese, menos sensível será o sistema de controle, o que ocasionará um menor número de chaveamentos).

Alguns fabricantes adotam em seus controladores uma sistemática similar para o ajuste da sensibilidade do processo de correção do fp, disponibilizando o índice parametrizável denominado *C/k*. Esse índice representa o degrau mínimo em corrente reativa capacitiva a ser provido pelo controlador, sendo expresso por:

$$\frac{C}{k} = \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U \cdot k_{tc}}$$
(5.1)

onde:

.U = tensão fase-fase (V);

 k_{TC} = relação de transformação do transformador de corrente (TC).

 $Q = potência reativa capacitiva do menor degrau possível para inserção / retirada (equivalente a <math>Q_{STEP}$) em Var, o que dependerá das potências capacitivas previstas para cada estágio;

Obs.: Note-se que C/k equivale a I_{STEP} / k_{TC} .

Geralmente, disponibiliza-se uma faixa de ajuste para o parâmetro C/k. Um exemplo é mostrado a seguir:

Assumindo-se um valor mínimo de C/k equivalente a 0,025 (menor valor da faixa disponível para ajuste no controlador), a tensão nominal fase-fase equivalente a 440 Volts e $k_{TC} = 400$, tem-se:

 $Q_{MINIMO} = 1,732 \times 440 \times 400 \times 0,025 = 7.620,8 Var \approx 7,62 kVAr.$

O resultado obtido significa que a menor potência reativa capacitiva passível de inserção ou retirada pelo controlador equivalerá a 7,62 kVAr e que, portanto, consideradas as premissas do exemplo, o menor degrau capacitivo entre estágios não deverá ser inferior a esse valor.

d) Monitoramentos e Medições

No que se refere a monitoramentos e medições, há controladores que disponibilizam uma extensa gama de informações em seus *displays*. A Figura 5.17 apresenta a relação geral das

informações passíveis de visualização no *display* do controlador com estágios de saída controlados a transistor, modelo RVT-D, de fabricação ABB.

Designation	Unit	Description				
Voltage				Range (1)	Accuracy	Maximum Value Displayed
Vrms V1 Frequency THDV V harm. table V harm. chart	> > 七 %	Rms Voltage Rms voltage at the fundamental frequency Fundamental voltage frequency Total harmonic voltage distortion on voltage Voltage harmonics displayed in a table Voltage harmonics displayed in a bar graph		Up to 690Vac Up to 690Vac 45Hz - 65Hz 0 - 300% 2 nd -49 th 2 nd -49 th	± 1 % ± 1 % ± 0.5% ± 1 % See later i See later i	100 kV 100 kV 40Hz - 70 Hz 300 % n this paragraph n this paragraph
Current						
Irms I1 THDI I harm. table I harm. chart I1-cap	A A %	Rms Current Rms current at the fundamental frequency Total harmonic current distortion on current Current harmonics displayed in a table Current harmonics displayed in a bar graph Rms capacitor current at the fundamental freque	ency	0 - 5 A 0 - 5 A 0 - 300% 2 nd -49 th 2 nd -49 th 0 - 1 A	± 1 % ± 1 % ± 1 % See later See later ± 3 %	100 kA 100 kA 300 % in this paragraph in this paragraph 100 kA
Power						
Cos φ (2) PF (3) P Q S ΔQ ΔN	W var VA var	Displacement power factor (2) Power factor (3) Active power Reactive power Apparent power Missing power to reach the pre-set alarm $\cos \phi$ Missing capacitor steps to reach the pre-set alar	m cos φ	-1 - +1 -1 - +1 0 - 10 kW 0 - 10 kvar 0 - 10 kvar 0 - 10 kvar	$\pm 0.02 \pm 0.02 \pm 2\% \pm 2\% \pm 2\% \pm 2\% \pm 2\% \pm 2\% \pm 2\%$	-1 - +1 -1 - +1 0 - 100 MW 0 - 100 Mvar 0 - 100 MvA 0 - 100 Mvar
Temperature (optio	onal)					
T1 T2	°C or °F °C or °F	Temperature T1 (optional external probe 1) Temperature T2 (optional external probe 2)		-40°C → + 105°C -40°C → + 105°C	± 2°C ± 2°C	-40°C→+150°C -40°C→+150°C
T2 °C or "F" Temperature T2 (optional external probe 2) -40° C $\rightarrow + 105^\circ$ C $\pm 2^\circ$ C -40° C $\rightarrow + 105^\circ$ C - All the measurements are averaged over one second, except $\Delta\Omega$ and ΔN for which the maximum values are given every second. (a) the measurements are averaged over one second, except $\Delta\Omega$ and ΔN for which the maximum values are given every second. (b) the maximum values are given every second. (c) Table is used as the reference value by Electricity Supplies (2) and the PT ratio (t/ms - 11 - 11-cap - P - Q - S - $\Delta\Omega$) and the PT ratio (t/ms - 11 - 11-cap - P - Q - S - $\Delta\Omega$) Explanatory note is always lower than or equal to the displacement power factor or cos φ : calculation based on the fundamental and harmonic value is used as the reference value by Electricity Supplies (3) Power factor : calculation based on the displacement power factor is always lower than or equal to the displacement power factor is always lower than or equal to the displacement power factor is always lower than or equal to the displacement power factor is always lower than or equal to the displacement power factor is always lower than or equal to the displacement power factor is always lower than or equal to the displacement power factor is always lower than or equal to the displacement power factor is always lower than or equal to the displacement power factor is always lower than or equal to the displacement power factor is always lower than or equal to the displacement power factor is always lower than or equal to the displacement power factor is always lower than or equal to the displacement power factor is always lower than or equal to the displacement power factor is always lower than or equal to the displacement power factor is always lower than or equal to the displacement power factor is always lower than or equal to						

Figura 5.17 – Controlador automático - Informações disponibilizadas em display Fonte: (ABB, 2002)

Nem todos os controladores são projetados para contemplarem a gama de funcionalidades, a capacidade de monitoramento / medição e a disponibilização de acesso via *display* a todas as informações apresentadas nesse subitem. Há modelos que permitem a visualização das principais grandezas elétricas envolvidas (A, V, kW, kVAr e fp) e alguns outros disponibilizam no *display* apenas o fator de potência operacional e o número de estágios capacitivos ativados. Obviamente, os parâmetros de ajuste são acessíveis para verificação e alteração em qualquer modelo de mercado. O custo de aquisição do controlador estará associado, obviamente, às funcionalidades e recursos disponibilizados.

Quanto ao sensoriamento das grandezas elétricas, a maioria dos controladores de mercado é projetada para receber sinais de corrente a partir de TC instalado em uma única fase da rede trifásica, bem como para receberem sinais de tensão entre fase e neutro ou entre duas fases (sensoriamento monofásico), pressupondo-se a aplicação em redes razoavelmente equilibradas. Porém, essa situação nem sempre corresponde à realidade das instalações. Nesses casos, uma prática prudente consiste em se avaliar o eventual desequilíbrio entre as correntes das fases existentes no alimentador a ser monitorado, antes que se defina a fase para instalação do TC. Geralmente, tomando-se como base a sistemática adotada em

(EFFICIENTIA, 2007), opta-se pela fase mais carregada, tendo-se em mente a necessidade de reavaliações periódicas da situação. Havendo a necessidade de alteração, tal procedimento pode ser realizado mais facilmente desde que seja prevista, desde o início do processo, a utilização de TC de núcleo dividido ou TC flexível, dispositivos de fácil remoção e reinstalação. Se utilizado um controlador apto para sensoriamento trifásico (exemplo: modelo CM-4020 de fabricação Embrasul), pode-se dispensar tais verificações.

e) Temporizações entre chaveamentos sucessivos

Conforme já mencionado ao longo do subitem 5.1.1.1, os controladores automáticos específicos para utilização em sistemas convencionais (controladores com estágios de controle a relés) possibilitam o ajuste da temporização para a reenergização de um mesmo estágio apenas quando o capacitor a ele associado estiver com uma baixa tensão residual ou, preferencialmente, totalmente descarregado. No caso dos sistemas dinâmicos (controladores com estágios de controle a transistor) teoricamente a previsão de tal temporização não se faz necessária já que o chaveamento dos módulos de potência é controlado nos próprios módulos conforme a técnica "*zero-crossing*" já abordada anteriormente. Mesmo assim, os fabricantes de controladores com saídas a transistor limitam esses tempos a valores mínimos parametrizáveis. Em suma, para qualquer tipo de controlador, é comum a disponibilização de faixas para o ajuste de tempo entre energizações sucessivas de estágio distintos (tempo de conexão) e entre energizações sucessivas de um mesmo estágio (tempo de segurança para reconexão), cabendo ao usuário a escolha de tempos conforme sua conveniência. As faixas para ajuste dos tempos de retardo variam bastante para os diversos modelos de controladores disponíveis no mercado.

O Quadro 5.1, baseado em informações extraídas de documentações técnicas de fabricantes, apresenta, dentre outras informações, as faixas de tempo de conexão e reconexão para diversos controladores.

	Controlado	r	Estágio	os de Controle	Tommodo	Tempos de reconexão (mesmo estágio)	
Fabricante	Modelo(s)	Sensoriamento	Relés	Transistores	conexão (estágios distintos)		
ABB	RVT-D	monofásico		12	Mínimo: meio ciclo Máximo: vários múltiplos de 1/2 ciclo	Mínimo: meio ciclo Máximo: vários múltiplos de 1/2 ciclo	
	RVC	monofásico	3, 6, 8, 10, 12		1 a 999 s	1 a 999 s	

Quadro 5.1 – Faixas de tempos de conexão e reconexão para diversos controladores automáticos do fp

	Controlado	r	Estágio	os de Controle			
Fabricante	Modelo(s)	Sensoriamento	Relés	Transistores	Tempo de conexão (estágios distintos)	Tempos de reconexão (mesmo estágio)	
EPCOS	Série BR-6000	monofásico	6 12 6	6 12 6	40 ms (modelos a transistor) 1 s a 1200 s (modelos a relés)	40 ms (modelos a transistor) 1 s a 1200 s (modelos a relés)	
	BR-604	monofásico	4		1 s a 255 s	1 s a 255 s	
SCHNEIDER	VARILOGIC	monofásico	6 12		1 s a 600 s (1 s a 900 s p/ modelo NRC12)	1 s a 600 s (1 s a 900 s p/ modelo NRC12)	
IMS	SMARTCAP	monofásico ou trifásico		6 12	Ajustável (faixa não informada)	Ajustável (faixa não informada)	
EMBRASUL	CM-4020	trifásico	6 12		10 s a 120 s	10 s a 120 s	
	Computer 4er		4		10 s (fixo)	50 s	
	Computer 6e		3,4,5,6		4, 10, 30 ou 60 s	20, 50, 150 e 300 s	
	Computer 8d		8		4 s a 999 s	20 s a 999 s	
CIRCUTOR	Computer 14d	monofásico	14		4sa 999s	20 s a 999 s	
	Computer 8df			8	100 ms a 9,99 s	100 ms a 9,99 s	
	Computer 14df			14	100 ms a 9,99 s	100 ms a 9,99 s	
ELSPEC	.EQUALIZER .ACTIVAR	trifásico		12 12	Inferior a 1 ciclo	Inferior a 1 ciclo	
LOVATO	DCRK	monofásico	6 8 12		5s a 240s	5 s a 240 s	
	BLR-CC BLR-CX	monofásico	3,4 12		5 s a 1200 s	5 s a 1200 s	
BELUK	BLR-CM		6 12 6	6 12 6	3 s a 9999 s	3 s a 9999 s	
AREVA	NOVAR 315 NOVAR 305	monofásico	6 12		10, 20, 30, 60, 180, 300, 480 e 600 s	10, 20, 30, 60, 180, 300, 480 e 600 s	
JANITZA	PROPHI	monofásico	3 6 12 	3 6 6 12	Inferior a 1 ciclo (modelos a transistor) 0 s a 1200 s (modelos a relés)	Inferior a 1 ciclo (modelos a transistor) 0 s a 1200 s (modelos a relés)	
VISHAY	EstamatPFC	monofásico	6 12		2 s a 500 s	20, 60, 180 ou 300 s	

Fontes: (ABB, 2002), (ABB(1), 2007), (EPCOS, 2009), (SCHNEIDER, 2005), (IMS, 2005), (EMBRASUL, 200-?), (CIRCUTOR(2), 200-?), (ELSPEC(1), 200-?), (ELSPEC(2), 200-?), (LOVATO, 2004), (BELUK(1), 2004), (BELUK, 1999), (BELUK(2), 2004), (AREVA, 2004), (JANITZA, 2003) e (VISHAY, 2005)

Obs.: Os controladores destacados com linhas sombreadas no Quadro 5.1 são os mais comumente encontrados / disponibilizados no mercado nacional.

A Figura 5.18 mostra alguns controladores automáticos disponíveis no Brasil.

Figura 5.18 – Alguns controladores automáticos do fp disponíveis no mercado brasileiro Fonte: (CIRCUTOR(2), 200?), (ELSPEC(2), 200-?), (ABB, 2002), (EPCOS(1), 2007), (SCHNEIDER, 2005), (IMS, 2005) e (EMBRASUL, 200-?)

5.1.4 Condutores, dispositivos de seccionamento, proteção e manobra / acionamento para circuitos de bancos de capacitores

Os principais critérios práticos de dimensionamento de condutores e dispositivos de seccionamento e proteção de capacitores de baixa tensão são apresentados na Quadro 5.2 a seguir.

Dispositivo	Critério básico de dimensionamento (dimensionamento inicial)	Refinamento necessário	Critérios para verificação e dimensionamento final
Condutores para circuitos terminais ou alimentadores gerais de bancos de capacitores	$In_{CABOS} \ge 1,35 \text{ x } In_{CAPACITOR ou BANCO}$ (adota-se o primeiro valor comercial acima, <u>sendo altamente recomendável</u> adotar 1,5 x In _{CAPACITOR ou BANCO} quando em painéis fechados) Obs.: In _{CABOS} → considerado o método de instalação adotado, conforme NBR- 5410 / 2004	.Verificar e considerar (se necessário) fatores de agrupamento de circuitos, conforme NBR-5410 para a determinação de In _{CABOS}	.Verificar e, se necessário, redimensionar os cabos pelos critérios da máxima queda de tensão admissível e da suportabilidade a curto-circuitos, conforme NBR- 5410.

Quadro 5.2 – Principais critérios práticos de dimensionamento elétricos de condutores e dispositivos de seccionamento e proteção para capacitores BT
Dispositivo	Critério básico de dimensionamento (dimensionamento inicial)	Refinamento necessário	Critérios para verificação e dimensionamento final	
Fusíveis	In _{FUSÍVEIS} ≥ 1,65 x In _{CAPACITOR ou BANCO} (adota-se o primeiro valor comercial acima) Obs.: .Fusíveis retardados para sistemas convencionais (a contator) .Fusíveis ultra-rápidos para circuitos terminais em sistemas dinâmicos (a	.Verificar se os fusíveis protegem os cabos contra curto-circuitos nos trechos onde instalados. .Em sistemas dinâmicos (a tiristores), verificar se os fusíveios ultra-rápidos previstos para os circuitos terminais protegem	.Compatibilizar os resultados de todos os critérios de dimensionamento.	
	tiristores) e retardados para alimentadores gerais de bancos capacitivos (considerada a previsão de fusíveis ultra-rápidos nos circuitos terminais); note-se que os fusíveis protegem os tiristores para curtos na carga e/ou curtos nos terminais de conexão de força dos módulos tiristorizados.	adequadamente os tiristores (avaliar o parâmetro I^2t de ambos). .Em sistemas convencionais, verificar se os fusíveis são compatíveis (In \leq) aos fusíveis máximos aplicáveis aos contatores adotados.	Se necessário, elevar a bitola dos cabos.	
Disjuntores termomagnéticos	In _{DISJUNTOR} ≥ 1,5 x In _{CAPACITOR ou BANCO} (adota-se o primeiro valor comercial acima) Obs.: .EM SISTEMAS DINÂMICOS (A TIRISTORES) UTILIZAR FUSÍVEIS ULTRA-RÁPIDOS.	.Verificar se o disjuntor protege os cabos contra curto-circuitos no trecho onde instalado.	.Compatibilizar os resultados de todos os critérios de dimensionamento. Se necessário, elevar a bitola dos cabos.	
Chaves seccionadoras	In _{CHAVE} \geq 1,35 x In _{CAPACITOR ou BANCO} (adota-se o primeiro valor comercial acima) Obs.: .Adotar chaves do tipo "manobra sob carga".			
Contatores	$In_{CONTATOR} \ge 1,5 \text{ x } In_{CAPACITOR ou BANCO}$ (adota-se o primeiro valor comercial acima) (verificar subitem 5.1.1.2)			
Módulos de potência tiristorizados	Conforme subitem 5.1.2.2			

Fontes: (CEMIG, 2005), (COELBA, 2004), (MAMEDE, 1993), (ABNT, 2004), (IEEE, 1992), (IEEE, 2000)

Obs.: Em painéis elétricos destinados à instalação de bancos de capacitores é usual, e sempre recomendável, a previsão de ventilação (ou exaustão) forçada, devido à

elevada dissipação de calor internamente. Para o dimensionamento (ou a verificação) da ventilação adequada, primeiramente torna-se necessário calcular as perdas totais dissipadas internamente ao painel, o que se realiza por consulta aos dados técnicos dos dispositivos a utilizar (no caso de painéis com dispositivos / componentes internos adequadamente dimensionados, uma maneira prática / estimativa para a determinação das perdas consiste em se adotar um pequeno percentual da potência total alimentada pelo painel em demanda máxima, geralmente 1 %, exceto perante a presença de conversores de freqüência, casos em que as perdas por dissipação de calor podem assumir percentuais superiores, da ordem de 3% - (SIEMENS, 2008)).

Segundo (SIEMENS, 2008), a elevação de temperatura (T_{RISE}) em um painel fechado pode ser obtida, de forma aproximada, pela expressão:

 $T_{RISE}(^{\circ}C) = P_{PERDAS}(W) / (5,5 x A)$, onde A é a área total (m²) exposta do painel (superfícies externas frontal, traseira, superior e laterais).

No caso de painéis com ventilação já instalada, a elevação de temperatura pode ser obtida, também de maneira aproximada, pela expressão:

 $T_{RISE}(^{\circ}C) = (P_{PERDAS}(W) \ge 0,053)) / F$, onde F é fluxo nominal de ar dos ventiladores (ou exaustores) em m³/min.

Calculada a elevação de temperatura, esta deve ser somada à temperatura ambiente. Se tal soma ultrapassar a temperatura máxima de operação dos dispositivos internos recomendada em seus catálogos técnicos, deve-se prever ventilação adicional.

5.1.5 Capacitores estáticos para correção do fator de potência (baixa tensão)

Os capacitores estáticos são, em última análise, os elementos centrais de um sistema de correção do fator de potência, constituindo-se como o cerne do método de compensação de reativos mais largamente utilizado na prática. São disponibilizados no mercado em unidades trifásicas (geralmente com potências de 0,5 a 60 kVAr, podendo variar de fabricante para fabricante) ou em células monofásicas (geralmente de potências fracionárias a até uma dezena de kVAr's) que podem ser associadas para a composição de bancos trifásicos. As tensões nominais usuais são: 220, 380, 440, 480, 525, 535, 600, 660 e 690 V, podendo haver pequenas vairiações de fabricante para fabricante.

A Figura 5.19 apresenta fotografias dos tipos de capacitores BT atualmente disponibilizados no mercado. Capacitores trifásicos, fornecidos com células já conectadas entre si e instaladas em invólucros fechados (ou semi-abertos), são mostrados na parte superior da figura. A fotografía localizada na parte inferior da figura apresenta células capacitivas monofásicas,

montados em canecas de alumínio (também existem capacitores trifásicos com esse mesmo aspecto construtivo).



Figura 5.19 – Tipos de capacitores de baixa tensão disponibilizados no mercado brasileiro Fontes: (WEG(2), 2008), (LIFASA, 2007) e (EPCOS(1), 2007)

No Brasil, as referências (NBR IEC(1), 2009), (NBR IEC(2), 2009), (IEEE, 2002) e (IEEE, 1992) são os documentos normativos mais aceitos no Brasil para a definição das características técnicas requeridas para os capacitores BT.

Dentre as principais características e funcionalidades dos capacitores de qualidade atualmente disponibilizados no mercado, algumas delas explicitamente definidas por norma, merecem destaque (com base em (EPCOS(1), 2007), (EPCOS, 2009), (SIEMENS, 2005) (SIEMENS(2), 2002), (WEG(1), 2008) e (WEG(2), 2008)):

-Dielétricos e autoregeneração

Atualmente, pode-se considerar que o estado da arte na fabricação de capacitores de baixa tensão consiste na utilização de dielétricos secos elaborados com a tecnologia dos filmes metalizados (deposição de zinco e alumínio em filmes de plástico / polipropileno) com propriedades autoregenerativas, secagem a vácuo e impregnação com resina biodegradável, resina de poliuretano, gás inerte ou óleo. A espessura do filme metalizado define a tensão de aplicação e o tipo de impregnação (isolação) confere maior ou menor robustez operacional ao capacitor, geralmente influindo na expectativa de vida útil, na suportabilidade a correntes de *inrush* e a sobrecorrentes permanentes (os catálogos e manuais dos fabricantes citam as

principais características e aplicações). De maneira geral os capacitores impregnados em resina de poliuretano e em óleo apresentam robustez elevada, sendo particularmente indicados para aplicações em filtros passivos (associação de capacitores e indutores).

A *autoregeneração* é uma funcionalidade através da qual, perante uma sobrecarga com a geração de pequenos arcos elétricos internos, ou ao fim da vida útil, o capacitor se mantém funcionalmente operante, com uma redução mínima na capacitância (geralmente da ordem de no máximo 100 picofarads). Isso ocorre pela vaporização da metalização do dielétrico exatamente na região da falha interna em tempos da ordem de microsegundos, criando-se uma zona não condutora, isolada do restante do dielétrico. Em outras palavras, os capacitores autoregenerativos apresentam a propriedade de segregar os defeitos internos em regiões restritas, mantendo íntegro e funcional o restante do dielétrico.

A atual tecnologia de fabricação em bobinas concêntricas (parte ativa enVolta em lâminas de filme metalizado) possibilita a obtenção de células capacitivas compactas, apresentando capacitância estável, elevada suportabilidade a correntes de *inrush*, peso reduzido e facilidade para instalação.

-Tolerâncias quanto à capacitância nominal(IEC 60831-1)

Geralmente na faixa de -5 / +10% (há modelos são ofertados com a tolerância de 0 / +10%).

-Suportabilidade à tensão (IEC 60831-1)

.1,0. V_N em regime contínuo (maior valor médio durante qualquer período de energização).

.1,1. V_N por um período de 8 horas (não contínuo) a cada 24 horas de operação.

.1,15. V_N pelo período de 30 minutos (não contínuo) a cada 24 horas de operação.

.1,20. V_N por 5 minutos, 200 vezes durante a vida do capacitor.

.1,30. V_N por 1 min, 200 vezes durante a vida do capacitor.

-Suportabilidade à corrente (IEC 60831-1)

.Máxima corrente permissível (sob tensão e freqüência nominais): 1,30. I_{N-rms} continuamente.

-Proteções incorporadas

De acordo com a norma IEC 60831-1/2, todos os capacitores para correção do fp devem possuir proteção interna, o que geralmente é implementado pelos fabricantes por meio de dispositivos sensíveis à pressão e pela utilização dos filmes autoregenerativos, anteriomente mencionados.

Os capacitores montados em canecas cilíndricas de alumínio geralmente dispõem de um sistema interruptor sensível à pressão, que atua no final da vida útil ou no decorrer do período de operação perante a eventual elevação da pressão interna (em decorrência, por exemplo, de curto-circuito interno). O sistema pode ser visualizado na Figura 5.20.



Figura 5.20 – Capacitores em canecas de alumínio – proteção contra sobrepressão interna Fontes: (WEG(2), 2008) e (TLA, 200-?)

A pressão interna exerce uma força sobre as paredes do invólucro cuja região superior é confeccionada com "sulcos expansíveis", o que permite a expansão vertical, fazendo com que ocorra a atuação de um desconector mecânico e, consequentemente, o corte da alimentação de energia para o elemento capacitivo (ressalta-se que tal recurso responde apenas a sobrepressões, não dispensando os dispositivos de proteção que devem ser previstos no circuito terminal de alimentação do capacitor). Para a garantia de expansão da caneca quando necessário, e também para que sejam evitados esforços nos terminais de ligação, os cabos de alimentação devem ser do tipo flexível e não é permitida a alimentação dos capacitores diretamente por elementos rígidos, tais como barras de cobre. Além disso, deve-se prever um espaço livre acima do capacitor para se garantir o funcionamento seguro do sistema de expansão.

-Descarga

Como já citado ao longo do subitem 5.1.1.1, a descarga é obtida por meio de resistores fornecidos já pré-montados nos terminais dos capacitores ou adquiridos à parte. As informações quanto ao nível de redução da tensão em um determinado intervalo de tempo variam de fabricante para fabricante. Porém, nos capacitores ofertados pelos grandes fabricantes, os resistores de descarga promovem a descarga e a redução da tensão a um valor

situado, em média, entre 50 e 75 Volts em um intervalo de tempo da ordem de 1 minuto. Alguns fabricantes disponibilizam resistores (opcionais, a pedido) capazes de reduzir a tensão residual a um nível inferior a 50 V em até 1 minuto. Tipicamente, os resistores utilizados para a descarga de capacitores de baixa tensão são especificados para a potência de 2 ou 3 watts, com resistências ôhmicas na faixa de várias dezenas a até várias centenas de k Ω , dependendo da potência do(s) capacitor(es) a descarregar (considerada uma mesma tensão de alimentação, potências capacitivas superiores requerem menor resistência ôhmica).

Há, também, a possibilidade de utilização de indutores de descarga em substituição aos resistores. Alguns fabricantes, tais como EPCOS e SIEMENS, disponibilizam módulo com indutores para descarga rápida (da ordem de 5 a 50 segundos, dependendo da potência e da tensão nominal das unidades capacitivas).

O tempo de descarga é particularmente importante nos sistemas de correção automáticos convencionais (acionamento a contatores). Em (TLA, 200-?), cita-se, com base em (NBR IEC(1), 2009), que nas operações repetidas de ligação e desligamento em bancos automáticos, a tensão nos terminais dos capacitores nas reenergizações não deve ser superior a 10% de sua tensão nominal.

Para os sistemas dinâmicos (a tiristores), que se utilizam da técnica "*zero-crossing*" para chaveamento dos capacitores, esse tempo não apresenta criticidade.

-Expectativa de vida útil

A vida útil de um capacitor depende fundamentalmente da temperatura de operação, que é afetada pela temperatura ambiente, pela magnitude e duração de condições de sobrecarga (sobrecorrentes), e pela magnitude e duração de sobretensões. Além disso, é importante destacar as condições de chaveamento (desenergizações e energizações subseqüentes), geralmente limitadas a um número máximo em um dado intervalo de tempo (exemplo: 5.000 chaveamentos por ano). Esse aspecto é particularmente importante quando da utilização de capacitores em bancos automáticos convencionais (acionamentos por contatores) fundamentalmente em instalações com altos níveis de curto-circuito, devido à possibilidade do surgimento de elevadas correntes de *"inrush"* (correntes inversamente proporcionais à indutância do sistema de alimentação a montante (consultar o Apêndice A3)). Se não limitadas, tais correntes podem superar os máximos valores suportáveis pelos capacitores e a situação se agrava ainda mais com o excesso de chaveamentos.

A expectativa de vida útil apresentada nos catálogos dos fabricantes é determinada com base nas condições nominais de operação (incluindo-se o estresse operacional permissível por projeto), podendo ser substancialmente comprometida caso o equipamento seja submetido a condições mais severas de operação. As documentações técnicas dos capacitores fabricados conforme as diretrizes preconizadas pela normalização referencial citam uma expectativa de vida útil da ordem de 100.000 horas (ou superior) sob condições normais de operação. Há modelos (os impregnados a óleo, por exemplo) que podem atingir, segundo os fabricantes, 300.000 horas de operação.

-Classe de temperatura

As classes de temperatura normalizadas são referenciadas à mínima temperatura ambiente esperada (geralmente padronizada em 25 ou 40°C) e relativas às máximas temperaturas esperadas para o ar no entorno do capacitor, conforme a Tabela 5.1 apresentada a seguir.

Classe de	Temperatura do ar no entorno do capacitor		
Temperatura	Máxima	Média em 24 h	Média em 1 ano
В	45°C	35°C	25°C
С	50°C	40°C	30°C
D	55°C	45°C	35°C

Tabela 5.1 – Classes de temperatura de capacitores

Fonte: (*NBR IEC*(1), 2009)

Exemplo: classe -25/D, significando a temperatura ambiente mínima de 25°C e suportabilidade às temperaturas relativas à classe D indicadas no Quadro 5.3.

A instalação dos capacitores deve ser feita em ambiente ventilado e fresco, não submetidos à insolação direta e afastados de fontes de calor, como reatores de filtros, fornos, estufas e equipamentos industriais em geral que dissipem calor. Quando instalados no interior de painéis (situação mais comum na prática), especial atenção deve ser dada à ventilação / exaustão, que deverá ser preferencialmente forçada principalmente em configurações mais compactas. As dimensões e os arranjos internos aos painéis devem permitir a ampla circulação de ar, sem obstruções.

-Perdas e dissipação térmica

Segundo (SIEMENS, 2005), as perdas térmicas (por aquecimento em W) são compostas pela soma das perdas dielétricas (P_D) e das perdas *joulicas* (P_J), sendo:

$$P_D = V^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_I \cdot C_T \cdot tg(\delta)$$
(5.2)

$$P_J = R_S \cdot I_{rms}^{2}$$
(5.3)

onde:

V = tensão rms fase-fase aplicada ao capacitor (V);

 $f_1 = freqüência fundamental (Hz);$

 C_T = capacitância total (farads); para ligação em triângulo, C_T = 3 x C_{FASE} e para ligação em estrela, ou para capacitor monofásico, $C_T = C_{FASE}$;

 $tg(\delta) = tangente de delta ou fator de dissipação dielétrica (equivalente a 2x10⁴ para filme plástico metalizado), correspondente à relação entre as perdas dielétricas (W) e a potência reativa nominal do capacitor;$

 R_S = resistência ôhmica série total (Ω), à máxima temperatura de operação (geralmente da ordem de miliohms, informação obtida apenas em data-sheets);

 I_{rms} = corrente rms (A) absorvida pelo capacitor por fase (sob a tensão V), incluindo harmônicas previstas / estimadas, se existentes.

As perdas totais são utilizadas para a quantificação da carga térmica gerada pelos capacitores a ser retirada do interior de painéis por meio de ventilação / exaustão naturais ou forçadas, de forma que a máxima temperatura ambiente permissível no entorno dos mesmos não seja excedida. Perdas típicas para os capacitores de qualidade comercialmente disponíveis, com parte ativa enVolta em filme metalizado, situam-se na faixa de 0,5 a 0,6 watts/kVAr, incluindo-se a potência dissipada nos resistores de descarga.

-Condições de instalação / fixação

As posições de instalação / fixação de capacitores devem seguir a recomendação dos fabricantes. Há modelos passíveis de instalação nas posições vertical (com aos terminais Voltados para a parte superior) e horizontal. De qualquer modo, é sempre preferível a instalação na posição vertical, por ser mais favorável à dissipação térmica.

No caso específico dos capacitores montados em canecas metálicas cilíndricas, a fixação deve ser feita por meio do parafuso inferior a elas e incorporado de fábrica, não sendo recomendada pelos fabricantes a utilização de abraçadeiras.

-Ligação em redes com distorções harmônicas

Os manuais de fabricantes e algumas literaturas específicas citam indicadores práticos perante os quais torna-se altamente recomendável que os capacitores sejam associados a indutores anti-ressonantes. São eles: a distorção harmônica total na tensão (DHT_V) igual ou superior a 5% e a distorção harmônica total na corrente (DHT_i) igual ou superior a 10 ou 15% (esse percentual varia em documentações técnicas de fabricante para fabricante).

Um exemplo de uma possível especificação técnica (baseada em (EFFICIENTIA, 2007)), tal como se faz na prática em memoriais descritivos de projeto, é apresentada a seguir considerando-se um capacitor trifásico (ou a associação de capacitores monofásicos) com potência nominal efetiva de 50 kVAr considerada a aplicação em rede de 440 V:

-projeto conforme as normas IEC 60831-1+2, EN 60831-1+2 e IS:13340/41;

-dielétrico confeccionado em filme de polipropileno metalizado, com propriedades autoregenerativas ("self-healing");

-invólucro cilíndrico em alumínio extrudado, uso interno, grau de proteção IP-20;

-potência nominal efetiva de 50 kVAr (ou associação de bancos monofásicos que perfaça essa potência) em 60 Hz e sob a tensão de 440V;

-tensão nominal: 525 Vca;

-capacitância global nominal: 576 μ F (3 x 192 μ F);

-tolerâncias máximas relativamente à capacitância nominal: -5%, +10%;

-proteção contra sobrepressão interna,

-terminais com parafusos imperdíveis para conexão dos cabos de alimentação e terminal para aterramento do invólucro;

-suportabilidade a sobretensões: +10% (até 8 hs/dia), +15% (até 30 minutos/dia), +20% (até 5 minutos/dia), +30% (até 1 minuto/dia);

-suportabilidade a sobrecorrentes: até 1,3xI_N-rms continuamente;

-capacidade de chaveamento: até 5.000/ano (sob condições suportáveis de "inrush");

-perdas totais: no máximo 0,5 W por kVAr;

-vida mediana esperada: superior a 100.000 horas de operação efetiva;

-posição de montagem: vertical;

-temperatura ambiente: 25°C (apropriado para classe D, conforme IEC 60831-1);

-o capacitor trifásico (ou as células monofásicas que o componham) deverá(ão) possuir resistor(es) cerâmicos em módulos pré-montados (para descarga a 50 Volts em, no máximo, 60 segundos após a desenergização).

5.2 Indutores para sistemas desintonizados (aplicáveis a sistemas convencionais ou sistemas a tiristores)

Dando prosseguimento às abordagens apresentadas no subitem 2.2.6.3, busca-se, a partir daqui, avaliar os principais aspectos relacionados aos reatores de desintonia.

A técnica da desintonia ou anti-ressonância consiste em se alterar o circuito LC originalmente composto pelo bancos capacitivos e pelas indutâncias a montante, quando da presença de freqüências perigosas para os capacitores. Conforme já dito anteriormente, isso pode ser conseguido através da inserção de reatores em série com os bancos, cujo dimensionamento é realizado de forma que a freqüência de ressonância seja deslocada para um ponto inferior à menor ordem harmônica verificada no local de instalação (obviamente, as harmônicas deverão ser medidas / monitoradas previamente). Na freqüência de ressonância, o conjunto *reatores e banco de capacitores* torna-se indutivo para as harmônicas de ordem superior. Na freqüência fundamental, o conjunto apresenta-se como capacitivo, assumindo a sua função de corrigir o fator de potência, considerados os parâmetros elétricos em 60 Hz.

Pela Figura 5.21 pode-se visualizar o aspecto geral de reatores comercialmente disponibilizados para a finalidade de desintonia e proteção dos capacitores.







Figura 5.21 – Reatores de desintonia Fontes: (EPCOS(1), 2007) e (CIRCUTOR(4), 200-?)

A Figura 5.22 ilustra a configuração básica de um sistema desintonizado para a correção do fp, passível de aplicação em sistemas convencionais e em sistemas dinâmicos.



Figura 5.22 – Sistema desintonizado para correção do fp Fonte: (EPCOS(1), 2007) – figura traduzida e adaptada

Os reatores comerciais de qualidade em baixa tensão são geralmente confeccionados com enrolamentos em cobre ou alumínio e núcleo magnético com chaparia de grãos orientados, o que lhes confere perdas reduzidas, boa característica anti-saturação e indutância com tolerância não superior a \pm 5% e linearidade para correntes tipicamente da ordem de 1,5 x I_N ou, em alguns casos, até 1,8 ou 2 x I_N (EPCOS(1), 2007) (CIRCUTOR(1), 200-?). São montados sobre uma mesma estrutura de suporte, podendo ser ofertados em construção aberta (grau de proteção IP-00) ou instalados em gabinetes fechados. A isolação dos enrolamentos geralmente é preparada utilizando-se verniz com impregnação a vácuo.

Alguns fabricantes disponibilizam reatores com implementações construtivas mecânica e térmicamente mais robustas para aplicações com bancos capacitivos trifásicos individuais de maior potência (acima de 50 kVAr) e/ou para utilização com aconamentos tiristorizados, tais como um maior afastamento entre as bobinas (CIRCUTOR(1), 200-?), objetivando o melhor arrefecimento natural, e enrolamentos reforçados, confeccionados em lâminas ou barras chatas de cobre ou alumínio. Quando enclausurados em gabinetes fechados ou instalados internamente em painéis, é altamente recomendável a previsão de ventilação / exaustão forçada em seus compartimentos, com fluxo de ar calculado de acordo com as perdas térmicas. É recomendável que o projeto dos reatores considerem perdas térmicas em watts não superiores a 1% do valor numérico relativo à potência em kVAr do banco de capacitores com

os quais os mesmos deverão operar (MTE, 200-?), de forma a se obter um baixo custo operacional e aquecimento moderado. Geralmente os reatores são construídos com isolação classe F (155°C) ou H (180°C), projetados para operação a uma temperatura ambiente de 40°C ou 45°C e fornecidos com sensores térmicos (dotados de microswitches NF – normalmente fechados) convenientemente posicionados e previamente calibrados para atuação sob temperaturas de 90°C ou 100°C.

A corrente fundamental suportável em regime contínuo geralmente indicada nos catálogos dos fabricantes equivale a 1,05 ou 1,06 x I_{N-BANCO CAPACITIVO}. As documentações técnicas de alguns fabricantes indicam que seus reatores suportam uma corrente total eficaz equivalente a 1,2 x I_{N-BANCO CAPACITIVO} permanentemente, e a 2 x I_{N-BANCO CAPACITIVO} por um tempo de até 1 minuto sem que sejam excedidos os limites de temperatura definidos em projeto (considerada a temperatura ambiente de referência). Os reatores de desintonia devem ser projetados para suportar os efeitos (correntes circulantes) provocados por conteúdos harmônicos na tensão correspondentes a 0,5% de 3ª harmônica, 6% de 5ª harmônica, 5% de 7ª harmônica, 3,5% de 11ª harmônica e 3% de 13ª harmônica, visando compatibilizar-se com o que preconizam as referências (IEC(1), 2003) e (IEC(2), 2003).

Na Figura 5.23 vê-se um sistema automático desintonizado de pequeno porte.



Figura 5.23 - Sistema automático desintonizado de pequeno porte Fonte: (NOKIAN(1), 2006) (figura traduzida / adaptada)

6. A Eletrônica de Potência aplicada à Correção do fp

Este capítulo apresenta as principais características técnicas e operacionais dos sistemas dinâmicos para a correção do fator de potência. Também são abordados os princípios e características gerais de um sistema com maior grau de sofisticação, utilizando a tecnologia do "STATCOM" para uma compensação mais fina e precisa. Ao final, são comparados os sistemas convencionais e os sistemas dinâmicos.

6.1 Tiristores e módulos de potência comerciais

6.1.2 O tiristor SCR

A teoria geral e os conceitos associados ao tiristor SCR ("*Silicon-Controlled Rectifier*" ou "*Semiconductor-Controller Rectifier*") constituem a base para o melhor entendimento das especificações técnicas dos módulos de potência para chaveamento de capacitores. A critério do leitor, tal teoria poderá ser revisada com base em (CEFET-SC, 2002), (IIT, 2006), (POMÍLIO, 2000), (ALMEIDA, 1986) e (RIEHL, 200-?). Os pontos mais importantes a serem observados em uma possível revisão teórica relativa ao SCR são : as situações de polarização direta e reversa, os métodos de disparo e de comutação (bloqueio), as características estáticas (curva $V \times I$), as características dinâmicas (disparo, ccondução e bloqueio), as perdas, o dimensionamento térmico, os principais parâmetros relacionados ao dimensionamento / especificação e as proteções.

6.1.3 Síntese geral das principais características técnicas e dimensionamentos / especificações de módulos tiristorizados através de "data-sheets" (abordagens baseadas em (HPE(2), 2008) e (IXYS, 2007))

O conhecimento pelos profissionais de mercado, ainda que básico, das principais informações indicadas pelos fabricantes de SCR's em seus "*data-sheets*" é importante para que se possa avaliar e entender a especificação comercial de um módulo de potência destinado ao chaveamento de capacitores.

Um exemplo de folha de dados técnicos extraído de uma especificação comercial é apresentado na Figura 6.1, contendo elipses que destacam informações passíveis de consulta (ou de cálculo) a partir dos "*data-sheets*".

	6			
Tensão de projeto	1	560 VRMS		
Freqüência		60 Hz		
Potência Reativa N	ominal	50 kVar		
Tensão de isolação		Ui = 3,0 kV		
Tipo de ventilação		Forçada		
Temperatura ambie máxima	ente	50°C		
Tiristores (SCRs) IXYS – MCC-95		Tensão de blo Corrente nomi i ² t =20.000 A ² s Corrente de so 25 °C) = 2.400	qt reio: 1600V nat: 116 A_{RMS}.@ Tc = 85°C 180 A_{RMS}.@ Tc = 25°C <u>180 A_{RMS}.@ Tc = 25°C</u> <u>180 A_{RMS}.@ Tc = 25°C</u> Tto <u>180 A_{RMS}.@ Tvj =</u> (Tvj = 25°C) Into maxima (10 ms @ Tvj = A	
Alimentação auxiliar	Tensão (Conectores A1/A2)		110 a 240∨ca	
	Frequência		60 Hz	
	Corrente		120 mA Máx.	
Sinal de comando	Conector	XC16/5	1024 VDC	
	Comutação suave de banco de capacitores - redução de			
	corrente de inrush.			
	Bloqueio de tiristores em caso de erro externo.			
	Indicação de módulo energizado.			
Funções / Proteções	Indicação do estado dos capacitores – alarme de capacitância fora dos limites de tolerância (LED 2 intermitente).			
	Desligamento automático do banco de capacitores em caso de ressonância (ativação/desativação definida pelo usuário via jumper).			
	Indicação frontal de módulo energizado (eletrônica energizada) – LED 1(verde).			
Sinalizações	Indicação frontal de energização de capacitores - LED 2 (verde).			
	Indicação frontal de erro – LED 3(vermelho).			
Comunicação Serial RS-232C (RS-485 opcional).				
Potência total dissipa Kvar nominal (W)	16	30		

Figura 6.1 - Exemplo de folha de dados técnicos (Módulo ProFactor – Cortesia HPE) Fonte: (HPE(2), 2008) – figura adaptada

No caso desse exemplo, foram utilizados SCR's IXYS em módulo de potência modelo MCC 95-16. A folha inicial do *data-sheet* desse módulo de potência é apresentada na Figura 6.2.



Figura 6.2 – Data-sheet do módulo de tiristores IXYS – modelo MCC / MCD 95 Fonte: (IXYS, 2007) – figura adaptada

Observando-se o *data-sheet* e a folha de dados técnicos (módulo comercial) anteriormente apresentada (Figuras 6.1 e 6.2), pode-se comentar:

.quanto à tensão de bloqueio dos SCR's: o valor de 1.600 Volts refere-se às tensões repetitivas máximas direta e reversa (V_{DRM} e V_{RRM} , respectivamente); note-se que a tensão de projeto escolhida equivale a 560 V_{rms} o que significa, para um sistema senoidal, uma tensão de pico de 792 Volts; em projetos, é usual a escolha de uma tensão de bloqueio equivalente ao dobro da máxima tensão a bloquear e, portanto, a tensão de bloqueio de 1.600 Volts é plenamente adequada;

.quanto à tensão de isolação: o valor de 3 kV_{rms} é diretamente indicado no campo V_{ISOL} para 50 ou 60 Hz e para o tempo de 1 minuto (tempo de teste adotado no ensaio de tensão aplicada);

.quanto às correntes máximas: os valor de 180 e 116 A_{rms} são indicados logo ao início do *data-sheet*, correspondendo às temperaturas de encapsulamento (ou "*case*") T_C de 25 e 85°C, respectivamente; na realidade, a corrente eficaz de 116 A pode ser considerada como o limite suportável pelo dispositivo, por provocar a elevação da temperatura do encapsulamento a 85°C, significando a elevação da temperatura das junções metalúrgicas dos SCR's ao limite máximo de 125°C (indicado no campo T_{VJM} do *data-sheet*).

.quanto à capacidade I^2t *e à corrente de surto máxima (I_{TSM})*: o *data-sheet* indica, respectivamente, a capacidade (suportabilidade térmica) em função da temperatura da junção e a máxima corrente de surto I_{TSM} (valor de pico) suportável pelo módulo em meio ciclo (para onda de corrente senoidal), sendo tais parâmetros correlacionados e compatíveis entre si.

.quanto aos valores críticos das taxas de variação di/dt e dV/dt: o *data-sheet* indica os valores máximos, que são utilizados para o dimensionamento das proteções dos SCR's (indutância em série e circuito *snubber*).

No que se refere à potência total dissipada (W) indicada ao final da folha de dados técnicos (Figura 6.1), seu cálculo é realizado com base em dados também informados nos *data-sheets*. Geralmente a dissipação de potência sob a forma de calor é obtida graficamente a partir da corrente de condução, considerados alguns tipos de forma de onda. O gráfico apresentado à esquerda na Figura 6.3, também extraída do *data-sheet* em análise, mostra a correlação *I x* $P_{DISSIPADA}$ para cada tiristor do módulo em questão.



Figura 6.3 – Correlação I x P_{DISSIPADA} (data-sheet do módulo de tiristores IXYS – modelo MCC / MCD 95) Fonte: (IXYS, 2007)

No gráfico da direita na Figura 6.3 correlacionam-se a temperatura ambiente e a potência dissipada considerando-se vários valores de resistência térmica *junção-ambiente* ($R_{\theta JA}$). Os gráficos associam-se de modo que, para uma determinada corrente de condução (com uma dada forma de onda), determinam-se:

.a potência média dissipada em W (gráfico da esquerda); e

.a resistência térmica máxima equivalente (K/W, no gráfico da direita) a ser considerada entre a junção e o ambiente, tomando-se como referência uma máxima temperatura ambiente a ser considerada.

Em outras palavras, e levando-se em conta que geralmente a resistência térmica *dissipadorambiente* ($R_{\theta HA}$) é significativamente inferior à resistência térmica *invólucro-ambiente* ($R_{\theta CA}$), e que ambas encontram-se em paralelo, pode-se considerar que o gráfico da direita na Figura 6.3 permite que se obtenha a ordem de grandeza da resistência térmica ($R_{\theta HA}$) de um dissipador aplicável ao projeto térmico, fazendo-se $R_{\theta HA}$ aproximadamente igual a ($R_{\theta JA}$ - $R_{\theta JC}$), sendo $R_{\theta JA}$ obtido no próprio gráfico e $R_{\theta JC}$ obtido no *data-sheet*.

6.1.4 Módulos de potência comerciais

A Figura 6.4 apresenta um esquemático simplificado, contendo os blocos funcionais de um dispositivo comercial para acionamento dinâmico de capacitores baseado no SCR.



Figura 6.4 – Diagrama em blocos (Módulo ProFactor – Cortesia HPE) Fonte: (HPE(1), 2008)

Os blocos e suas respectivas funções são:

.Medição de tensões – rede: realiza as funções de tratamento e atenuação dos sinais de medição da tensão de rede elétrica para envio ao módulo de controle.

.Medição de tensões – capacitores: realiza as funções de atenuação e tratamento de sinais de medição da tensão nos capacitores para envio ao módulo de controle.

Medição de correntes: realiza as funções de medição das correntes de fase do banco de capacitores utilizando TCs e o tratamento dos respectivos sinais para transmissão ao módulo de controle.

Disparo: recebe o comando de energização proveniente do módulo de controle e transmite sinais para o módulo de potência, para o acionamento dos tiristores de potência.

Módulo de potência: contém os tiristores de potência, os quais são comandados para energizar os capacitores de acordo com os comandos recebidos pelo módulo de controle.

Módulo de controle: recebe as medições de tensão da rede e dos capacitores e, ao receber um comando para energização do banco proveniente do controlador automático do fator de potência, determina o instante ideal para comutação, enviando sinais para o módulo de disparo; este módulo monitora os sinais das correntes de fase e tensões de linha no banco de capacitores para fins de implementação das funções de proteção incorporadas ao sistema (ressonância, corrente de sequência zero e outras).

Um exemplo de uma possível especificação técnica, extraída de (EFFICIENTIA, 2007), tal como se faz na prática em memoriais descritivos de projeto, é apresentada a seguir considerando-se um módulo de potência para alimentação de um capacitor trifásico (ou a associação de capacitores monofásicos) com potência nominal de 50 kVAr / 440 V.

-tensão de projeto: 560 V_{rms} ; -tensão de bloqueio dos tiristores: 1600 V; -tensão de alimentação auxiliar: 220 Vca; -sinal de ativação / controle: 10 a 24 Vcc; -corrente nominal: 110 A_{rms} ; -corrente de surto máxima (10 ms @ $T_{vj} = 25 \,^{\circ}$) = 1.000 A; - $l^2t = 5.000 A^2s (T_{vj} = 25 \,^{\circ}$); -tiristores com certificação UL; -potência reativa a ser acionada: 50 kVArC (tolerância na capacitância: -5 / +10%); -tensão de isolação: Ui = 3.000 V -módulo em gabinete metálico, dotado de ventilação forçada; -operação em ambiente com temperatura de até 50 $^{\circ}$ (sob carga nominal). -a comutação suave do capacitor (por meio do sensoriamento da tensão no banco e na rede);

-bloqueio dos tiristores em caso de erro externo;

-indicação frontal de módulo energizado (led frontal);

-indicação do estado do capacitor (capacitância conforme as tolerâncias especificadas);

-desligamento automático em caso de ressonância (com possibilidade de ativação / destivação pelo usuário);

-comunicação serial RS-232C (RS-485 opcional);

-temperatura ambiente: de 0 a 50°C;

-umidade relativa do ar: de 5 a 90% sem condensação;

-altitude máxima: 1000 m acima do nível do mar (obs.: de 1000 m a 4000 m acima do nível do mar – redução de 1% na corrente para cada 100m acima de 1000m;

-grau de poluição: 2 (conforme UL508); normalmente, somente poluição não condutiva; a condensação não deve causar condução nas partículas contidas no ar.

6.1.5 Módulos de Potência - Recursos e funcionalidades

Os modernos módulos de potência com eletrônica de controle incorporada são equipamentos de alto desempenho baseados na utilização de tiristores (normalmente são utilizados apenas dois conjuntos em anti-paralelo, formando duas chaves estáticas c.a., sendo a terceira fase é conectada diretamente entre a rede de alimentação e ao banco de capacitores). Tais módulos garantem o acionamento rápido e preciso dos capacitores limitando, no instante da energização, a corrente transitória de surto (*"inrush"*). Além de permitir o controle das energizações, o processamento digital de sinais "embarcado" nos sistemas de correção dinâmica possibilita a realização de funções de proteção que os diferencia dos sistemas convencionais, tais como:

.o melhor desempenho dinâmico;

.o aumento da vida útil dos capacitores em decorrência da eliminação das correntes de surto; .a redução da propagação de transitórios associados ao processo de energização;

.o aumento da vida útil dos capacitores;

a possibilidade de implementação de proteção dos capacitores contra ressonância e de indicação de capacitância fora da faixa de tolerância pré-especificada.

Alguns sistemas ((ABB(3), 2007)) ainda disponibilizam algumas funcionalidades adicionais como, por exemplo, a detecção e sinalização de:

.proteção a montante atuada / queimada;

.erros / ausência das conexões de força;

.tempo de descarga do capacitor muito prolongado (com essa funcionalidade, busca-se detectar eventuais problemas nos resistores de descarga monitorando-se o tempo de decaimento da tensão residual (DC) sobre o capacitor, quando o mesmo é desenergizado e não reenergizado em alguns minutos). No que se refere à energização de um banco de capacitores trifásico sem que ocorram as elevadas correntes de *inrush*, é necessário que os tiristores sejam disparados no instante em que a diferença entre as tensões sobre as chaves estáticas e a tensão residual nos capacitores se torne nula, conforme já abordado anteriormente. Segundo (SILVA, 2009), em se tratando da desenergização, efetivado o comando para abertura, uma das chaves estáticas se abrirá primeiro (chave associada à fase em que a corrente se anular primeiro, no instante do pico da tensão nessa fase, por se tratar de carga considerada puramente capacitiva). Após esse instante, as tensões resultantes nos demais capacitores passam a depender de suas tensões residuais e da tensão entre a fase diretamente conectada ao barramento e a fase cuja chave estática ainda permaneça em condução. Portanto, após o desligamento total, um dos ramos monofásicos (internos ao delta) permanece com tensão equivalente à tensão de pico da rede (positiva ou negativo), o segundo com tensão igual a 0.37 pu (positiva ou negativa) e o terceiro com o negativo da soma dessas duas tensões, ou seja, $\pm 1.37 pu$, conforme se observa pela Figura 6.5. Essa situação também é abordada em (GREENWOOD(2), 1991).



Figura 6.5 – Tensão residual no banco trifásico de capacitores após o desligamento Fonte: (SILVA, 2009)

De acordo com as abordagens apresentadas em (SILVA, 2009), no processo de religamento dos capacitores, além do disparo dos tiristores no instante em que as tensões da rede e dos capacitores se igualem, torna-se necessário respeitar uma sequência pré-definida para o comando, dependente das tensões residuais nos capacitores de cada ramo monofásico.

A Figura 6.6 mostra o resultado de uma simulação computacional considerando-se o disparo da primeira chave c.a. com tensão nula sobre ela, porém, sem que se observe a correta sequência de entrada das chaves.



Figura 6.6 – Simulação computacional – Disparo da primeira chave tiristorizada sem a observância da seqüência correta de entrada das chaves Fonte: (SILVA, 2009)

Percebe-se que, a partir da entrada da primeira chave, todas as tensões passam a variar senoidalmente, mas não se verifica nenhum ponto posterior que seja totalmente adequado para o comando da segunda chave c.a.. Em outras palavras, não se observa instante no qual as tensões dos capacitores se igualam às demais tensões da rede. Portanto, esse é um aspecto adicional importante a ser analisado no projeto do sistema de controle do chaveamento.

A Figura.6.7 mostra o aspecto geral interno de um equipamento, apresentando os módulos de potência, a placa de controle e o conjunto de arrefecimento composto pelos dissipadores de calor e pelo ventilador.



Figura 6.7 – Aspecto geral interno de um dispositivo baseado em módulos tiristorizados (ABB – Dynacomp) Fonte: (ABB(2), 2007)

6.2 Compensação dinâmica utilizando eletrônica de potência para acionamentos em degraus rápidos e implementação adicional para ajuste fino com base na tecnologia *"STATCOM*" (aplicada em baixa tensão)

6.2.1 Considerações preliminares

Uma possibilidade a ser investigada / desenvolvida (ainda inexistente comercialmente) para o refinamento da correção dinâmica do fator de potência em redes de baixa tensão consistiria da utilização de bancos de capacitores acionados por módulos tiristorizados e da complementação por um sistema baseado na tecnologia "*STATCOM*" (ou "*STATCON*") – *Static Synchronous Compensator* (ou *Condenser*).

Os objetivos centrais seriam o maior refinamento e precisão da correção e a otimização / racionalização das operações de chaveamento dos bancos capacitivos. Perante a necessidade de inserção ou retirada de uma potência reativa capacitiva inferior ao valor de um degrau capacitivo (potência unitária de um capacitor do banco), o dispositivo do tipo "*STATCOM*" assumiria a função de fornecer ou retirar dinamicamente tal potência, evitando-se a inserção ou retirada de potência capacitiva em excesso. Uma abordagem nessa linha é apresentada em (PASERBA, 199-?), porém, para aplicação em média tensão.

6.2.2 A tecnologia "STATCOM" – Introdução teórica básica (abordagens baseadas em (HINGORANI, 2000), (ALAMPI, 2005), (WATANABE, 1998), (DIXON, 2006) e (CITENEL(2), 2003))

Funcionalmente, sob o ponto de vista da geração de reativos, a operação básica de um "STATCOM" assemelha-se à operação de um gerador síncrono, cuja potência reativa é alterada pelo controle da excitação de campo da máquina. Além disso, similarmente à máquina elétrica mecanicamente acionada, um "STATCOM" pode intercambiar potência ativa com a rede c.a. quando suprido por uma fonte de armazenamento de energia (usualmente uma fonte c.c.).

A Figura 6.8 apresenta esquemáticos básicos de conexão de uma máquina síncrona e de um sistema baseado na tecnologia "*STATCOM*" a uma rede c.a. de baixa tensão.





BARRAMENTO BT

V

Figura 6.8 – Esquemáticos básicos de conexão à rede c.a.: máquina síncrona e STATCOM-BT

Tomando-se a máquina síncrona como base para análise inicial e um fluxo de potência puramente reativa, as forças eletromotrizes induzidas nas três fases (e_a , e_b , e_c) encontram-se em fase com a tensão do sistema (v_a , $v_b \ e \ v_c$). A corrente *I* circulante é determinada pela tensão do sistema (*V*), pela tensão interna da máquina (*E*) e pela reatância indutiva (*X*) resultante da somatória da reatância da máquina e da reatância a montante desta, segundo a expressão a seguir (em notação fasorial e desprezando-se as resistências ôhmicas envolvidas):

$$\hat{I} = \frac{(\hat{V} - \hat{E})}{X}$$
(6.1)

A potência (puramente) reativa correspondente à corrente circulante, intercambiada entre o sistema e a máquina síncrona, pode ser deduzida conforme abaixo:

$$Q = \vec{V} \cdot \vec{I} \cdot sen \ \delta = \vec{V} \cdot \vec{I}$$
(6.2)

Note-se que, para potência puramente reativa, sen $\delta = 1$. Então :

$$Q = \hat{V} \cdot [\hat{V} - \hat{E}) / X] = [(\hat{V})^2 - (\hat{V} \cdot \hat{E})] / X = [(\hat{V})^2 \cdot (1 - (\hat{E}/\hat{V}))] / X$$
(6.3)

Controlando-se a excitação, ou seja, a amplitude da força eletromotriz induzida, o fluxo de energia reativa pode ser controlado. Se E > V (sobreexcitação), a corrente *I* estará avançada em relação a V e a máquina será "enxergada" pelo sistema como um capacitor. Se E < V (subexcitação), a corrente *I* estará atrasada em relação a V e a máquina será "enxergada" pelo sistema como um indutor.

Em qualquer situação, uma quantidade reduzida de energia ativa fluirá do sistema para a máquina síncrona de forma a suprir suas perdas mecânicas e elétricas.

No que se refere ao esquemático referente ao sistema baseado na topologia elementar do "*STATCOM*", a partir da tensão presente no capacitor C_S o conversor sintetiza tensões controláveis à saída, na freqüência do sistema c.a.. Variando-se a amplitude de tais tensões, a potência reativa intercambiada entre o conversor e a rede pode ser controlada de maneira similar à da máquina síncrona, ou seja:

.Se $V_0 > V$, o conversor gera energia reativa capacitiva (a corrente *I* flui do conversor para a rede);

.Se $V_0 < V$, o conversor absorve energia reativa indutiva (a corrente *I* flui da rede para o conversor);

.Se $V_{\theta} = V$, não há intercâmbio de energia reativa.

A operação do conversor do tipo "fonte de tensão", utilizado como um gerador de reativos controlado, pode ser explicada por leis físicas básicas que governam a relação entre as potências de entrada e de saída, sem que seja necessário recorrer ao processo detalhado de chaveamento dos dispositivos semicondutores. Como em todos os conversores chaveados, a

potência instantânea líquida nos terminais c.a. à saída deve equivaler à potência líquida instantânea nos terminais c.c. (desprezando-se, obviamente, as perdas nas chaves semicondutoras). Considerando-se as tensões $V_0 \in V$ em fase, e desde que o conversor fornece (absorve) apenas potência reativa á saída, a potência ativa suprida pela fonte c.c. (capacitor carregado) deve ser nula (já que a potência instantânea no lado c.a. também é nula). Desde que a potência reativa à freqüência zero (no capacitor c.c.) é, por definição, igual a zero, o capacitor não desempenha nenhum papel na geração de potência reativa. Em outras palavras, o conversor simplesmente interconecta os três terminais c.a. de forma que a potência reativa possa fluir livremente entre eles. Enxergando-se isso a partir dos terminais c.a., pode-se considerar que o conversor estabelece um fluxo de corrente circulante entre as fases com potência líquida instantânea nula. A necessidade da presença do capacitor c.c. para armazenamento deve-se, teoricamente, à igualdade (necessária) entre as potências instantâneas de saída e de entrada.

A forma de onda à saída do conversor não se constitui como uma senóide perfeita. Devido ao padrão de chaveamento das chaves semicondutoras, a potência instantânea de saída (VA) incorpora uma componente flutuante / oscilatória mesmo que as correntes de saída sejam praticamente senoidais. Portanto, para que não seja violada a igualdade entre as potências instantâneas à entrada e à saída do conversor, deve haver um *ripple* (ondulação) na corrente que flui pelo capacitor c.c., já que este promove uma tensão constante nos terminais de entrada do conversor. A presença desse *ripple* na corrente é devida, tão somente, aos componentes de *ripple* na tensão de saída, que são função do método de chaveamento adotado para sintetizar tal tensão. Utilizando-se um padrão apropriado de chaveamento baseado na técnica PWM (e/ou adotando-se estruturas multi-pulsos), a distorção na tensão de saída e o *ripple* de corrente sobre o capacitor podem ser reduzidos / minimizados.

Na prática, em função de desbalanços no sistema e de outras imperfeições (capazes de elevar os níveis de flutuação consideravelmente), as condições ideais de operação não são atingidas. As chaves semicondutoras, por exemplo, apresentam perdas que podem ser supridas pela rede c.a. fazendo-se com que as tensões de saída do conversor se atrasem de um pequeno ângulo relativamente às tensões da rede. Nessa situação, o conversor absorve uma pequena parcela de energia ativa para compensar as perdas internas e para manter o capacitor c.c. em um nível de tensão desejado (recarregá-lo). O mecanismo de ajuste do ângulo de fase pode ser utilizado para controlar a geração ou absorção de reativos pelo incremento ou decréscimo da tensão no capacitor c.c. e, em última análise, pelo aumento ou redução das tensões produzidas à saída do

conversor. O capacitor também tem a importante função de restabelecer o balanço de energia necessário entre a entrada e a saída do conversor durante as variações dinâmicas de reativos à saída.

O controle interno (parte integrante do conversor) tem, por função principal, operar as chaves de potência objetivando a geração de uma tensão de saída fundamental com magnitude e ângulo de fase em sincronismo com a tensão da rede. Sob tal ponto de vista, o conversor pode ser "enxergado" como uma fonte de tensão senoidal síncrona em série com a indutância a montante, e com amplitude e ângulo de fase controlados a partir da interpretação dos sinais de controle externo (tensão e correntes), a partir do que torna-se possível o intercâmbio da potência reativa necessária ao processo de compensação e correção do fp. Tendo, como função primordial, a geração estática de reativos, o sinal de referência (*"input"*) é a corrente reativa requerida. O sistema de controle interno pode ser projetado de forma que a magnitude e o ângulo de fase da tensão de saída do conversor e, consequentemente, a corrente reativa à saída, possam ser determinados de duas formas:

.indiretamente, por meio do estabelecimento / controle da tensão c.c. requerida no capacitor (salienta-se que a magnitude da tensão c.a. à saída é diretamente proporcional à tensão sobre o capacitor); ou

diretamente, por meio de uma sistemática específica para o chaveamento dos semicondutores. (por exemplo, utilizando-se a técnica PWM), mantendo-se (praticamente) constante a tensão c.c. no capacitor.

Quanto aos limites operacionais, um gerador de reativos baseado em conversor estático com topologia baseada no "*STATCOM*" pode ser visto como uma fonte de tensão controlável para intercambiar correntes indutivas ou capacitivas até um valor máximo determinado por sua potência nominal.

Dando maior ênfase à técnica de chaveamento PWM acima citada (tendência atual), em princípio a sistemática de controle estaria baseada nos seguintes aspectos:

-sinais de entrada ("inputs")
.tensão V da rede (c.a.);
.corrente de saída do conversor (i₀);
.corrente reativa de referência (I_{Q-REF});
.tensão V_{DC} de referência (c.c.).

-a tensão V_{DC} de referência seria utilizada para a determinação da potência ativa a ser absorvida da rede c.a. pelo conversor para o suprimento de suas perdas internas (chaveamentos e manutenção da carga no capacitor c.c.);

-as parcelas ativa e reativa (esta última predominante), resultantes da decomposição da corrente i_{0} , seriam comparadas, respectivamente, à corrente ativa de referência (derivada da malha de regulação da tensão V_{DC}) e à referência externa de corrente reativa necessária, definida pelas necessidades de compensação.

-os sinais de erro das correntes ativa e reativa (resultantes das comparações mencionadas no parágrafo anterior) seriam convertidos em magnitude e ângulo de fase da tensão requerida à saída do conversor; a partir disso, pode-se definir o padrão de chaveamento PWM das chaves de potência do conversor.

Essa sistemática de controle pode ser observada no diagrama básico conceitual apresentado na Figura 6.9.



Figura 6.9 – Esquemático básico – Sensoriamento de sinais e controle do STATCOM-BT Fonte: (CITENEL(2), 2003) – figura reconceituada / adaptada

No que se refere às chaves semicodutoras do conversor, em projetos para aplicações de baixa tensão em nível industrial, atualmente os IGBT's ("*Insulated Gate Bipolar Transistors*") mostram-se como a opção mais adequada, fundamentalmente em função das faixas comerciais de corrente e tensão disponibilizadas pelos fabricantes, das perdas em condução (atrativas por incorrerem na redução dos custos operacionais se comparadas às perdas geralmente

verificadas em outros dispositivos) e dos reduzidos tempos requeridos nos processos de chaveamento. Para aplicações em potências situadas na faixa de dezenas de kVArs a até 1 MVAr ou um pouco superior (potências tipicamente industriais), as freqüências de chaveamento podem atingir alguns kHz, sem que as perdas sejam excessivamente elevadas. Quanto à topologia da ponte inversora, podem-se utilizar configurações de 6 pulsos (bastante comuns nos conversores de frequência em BT para o acionamento de motores de indução), havendo a tendência de adoção de configurações multiníveis objetivando a redução dos níveis de distorção harmônica na tensão sintetizada à saída do STATCOM, em que pese o encarecimento da solução.

Em um processo real de correção do fp que utilize um sistema dinâmico baseado em capacitores acionados por módulos tiristorizados em associação a um sistema adicional baseado na tecnologia "*STATCOM*" para <u>ajuste fino no processo de compensação de reativos</u> (o que constitui um dos focos deste capítulo), outros aspectos precisam ser observados, conforme as abordagens apresentadas no subitem seguinte.

6.2.3 Possibilidade de investigação, pesquisa e desenvolvimento quanto à utilização de um "STATCOM" (BT) para ajuste fino na correção do fp

Uma possível configuração para um sistema de correção do fp de cargas industriais com dinâmica rápida adotando-se, adicionalmente, um sistema baseado na tecnologia do *"STATCOM - BT"* para ajuste fino, encontra-se apresentada na Figura 6.10.



Figura 6.10 – Esquemático básico – Possível configuração para correção do fp baseada em capacitores acionados por módulos tiristorizados e no STATCOM-BT para ajuste fino

Note-se que, nessa configuração, o controlador automático do fator de potência (CAFP), responsável pela emissão dos sinais de ativação para os módulos tiristorizados, e o controle do *"STATCOM"*, recebem sinais externos de tensão e correntes circulantes e se complementam, atuando conforme as necessidades dinâmicas de compensação de reativos.

O CAFP exerce a função de controle geral, ou seja, permite a inserção dos bancos de capacitores de forma a que a potência reativa capacitiva básica / principal possa ser inserida ou retirada em função da potência que flui no circuito de alimentação do conjunto como um todo ("*STATCOM - BT*" + barramento da carga / bancos tiristorizados). Por sua vez, o "*STATCOM - BT*" realiza a função de compensar os picos da curva de demanda de reativos, atuando para ajuste fino e fornecendo potências reativas capacitivas equivalentes a, no máximo, a potência correspondente a um degrau (estágio) do banco capacitivo. Isso constitui-se como uma vantagem uma vez que, para o refinamento da correção do fp, pode-se utilizar um "*STATCOM - BT*" de baixa potência (por exemplo, 50 ou 100 kVAr) independentemente da potência global do banco de capacitores.

Em linhas gerais, em uma situação de correção já em curso (sistema já operando em regime normal) o CAFP "enxerga", dinamicamente, a corrente resultante das potências ativa e reativa globais que fluem pelo alimentador e determina a corrente (e a potência capacitiva) necessária para a correção do fp (em função do valor alvo ajustado), se necessário. Como, nesse caso, a corrente (potência) capacitiva global a inserir ou retirar só pode ser efetivada em degraus prédefinidos (estágios de controle), o algoritimo interno do CAFP determinará, a cada inserção / retirada, quantos e quais estágios serão ativados / desativados, podendo haver, obviamente, algum excesso (fp um pouco acima do desejado) ou escassez (fp um pouco abaixo do desejado) na compensação de reativos a cada ação de controle. <u>Pressupondo-se que o banco de capacitores esteja adequadamente dimensionado para as necessidades de suprimento de reativos à carga</u>, o excesso ou escassez de potência capacitiva será, a cada ação de controle, equivalente, em média, à potência de um estágio capacitivo.

Por sua vez, e simultaneamente, o controle do "*STATCOM - BT*" "enxerga" dinamicamente a corrente resultante das potências ativa e reativa que fluem para o barramento da carga e, sendo assim, pode definir o valor da corrente reativa a complementar, de forma que a correção do fp possa ser ajustada / refinada, se necessário. Portanto, em última análise, se a corrente capacitiva requerida para tal complementação for inferior à corrente reativa passível de ser injetada por um único estágio do banco capacitivo, o controle do "*STATCOM - BT*" a injeta na rede, evitando a introdução de mais um dos estágios capacitivos disponíveis no banco (o que

levaria à compensação com algum excesso) e exercendo o ajuste fino, na medida do estritamente necessário. Da mesma forma, caso o controle do "*STATCOM - BT*" revele a presença de um excesso de corrente reativa fluindo pela rede (em comparação com a efetivamente necessária), haverá a redução da corrente capacitiva até então fornecida pelo conversor ou mesmo um dreno de corrente reativa indutiva para ele, de modo que tal excesso (limitado, obviamente, à potência máxima admissível pelo conversor) seja absorvido sem fluir para outros pontos da instalação.

Essas funções são exercidas dinamicamente por ambos os subsistemas de correção, estando os mesmos ajustados para o mesmo fator de potência alvo requerido. Uma situação hipotética e simplificada (apenas para melhor entendimento) ilustrando um processo de correção conjunta do fp é apresentada na Figura 6.11. Os reativos que seriam efetivamente supridos pelo *"STATCOM* - BT" são representados pelas áreas hachuradas.



Figura 6.11 – Comparação entre a correção exclusivamente por capacitores e por capacitores + STATCOM-BT

Quanto à estabilidade do processo de controle conjunto (bancos capacitivos com acionamentos tiristoriados + "STATCOM-BT") e às ações de controle efetivo, é bom lembrar que a resposta dinâmica de um "STATCOM" pode ser bem mais satisfatória que a dos bancos tiristorizados, até porque os tempos de atuação dos controladores automáticos comerciais responsáveis pela emissão dos sinais de ativação e desativação dos módulos de potência geralmente são limitados a um mínimo de cerca de dezenas de milisegundos. Isso sugere que, no caso de uma sistemática de controle mais simples, haverá particularidades na partida do sistema global de correção do fp, com a atuação do "STATCOM" primeiramente, até que o sistema atinja a dinâmica de correção conjunta, após o início de chaveamento dos bancos capacitivos. Implementações adicionais de controle podem ser pensadas no sentido de que o controle do "STATCOM-BT" force a inserção de banco(s) capacitivo(s) assim que a demanda de reativos por ele suprida se aproxime de sua capacidade nominal.

6.3 Sistemas convencionais x Sistemas dinâmicos – Comparativo geral

Esse subitem busca sintetizar as principais características dos sistemas de correção do fator de potência abordados nos subitens anteriores, agregando mais alguns parâmetros de avaliação e estabelecendo, através do Quadro 6.1, um paralelo comparativo entre eles.

Parâmetros de avaliação	Sistemas Convencionais (a contatores e controladores automáticos com saídas a relés)	Sistemas Dinâmicos (a tiristores e controladores automáticos com saídas a transistor)	Sistemas Dinâmicos avançados (acionamentos tiristorizados + tecnologia do <i>STATCOM - BT</i>) PROJEÇÕES
Transitórios nos chaveamentos / energização	Presentes, podendo ser moderadamente atenuados com a utilização de contatores apropriados. Na maioria dos sistemas, o instante de chaveamento dos bancos não é controlado, agravando a situação.	Ausentes. Os capacitores são energizados em instantes controlados, eliminando- se a ocorrência de elevadas correntes de <i>inrush</i> e surtos na tensão de alimentação.	Ausentes

Quadro 6.1 - Sistemas Convencionais x Sistemas Dinâmicos – Paralelo comparativo

Parâmetros de avaliação	Sistemas Convencionais (a contatores e controladores automáticos com saídas a relés)	Sistemas Dinâmicos (a tiristores e controladores automáticos com saídas a transistor)	Sistemas Dinâmicos avançados (acionamentos tiristorizados + tecnologia do <i>STATCOM - BT</i>) PROJEÇÕES
Velocidade de compensação / Resposta Dinâmica (levando-se em conta a aplicabilidade a cargas industriais com dinâmica operacional rápida)	Relativamente lenta. A utilização de acionamentos eletromecânicos e a necessidade de se descarregar os capacitores (por meio de resistores) limita a resposta dinâmica.	Rápida. A utilização de dispositivos eletrônicos (transistores nas saídas de comando do controlador e tiristores para acionamento dos bancos) torna possível uma resposta dinâmica da ordem de 1 a 2 ciclos nos sistemas mais rápidos.	Rápida, em frações de 1 ciclo
Inserção / desligamento de capacitores	Dependente do sequenciamento de degraus de correção pré-ajustado e dos tempos permissíveis para reconexão	Embora também dependente do sequenciamento de degraus de correção pré-ajustado, é mais flexível e rápida, já que as reconexões não dependem dos tempos de descarga dos capacitores.	Rápida, flexível e otimizada
Vida útil / Durabilidade dos componentes / Custos com manutenção	O sistema requer inspeções e é, periodicamente, passível da reposição de componentes (principalmente a substituição de contatores perante um elevado número de manobras diário).	A ausência de transitórios, de arcos elétricos e de partes móveis eleva substancialmente a expectativa de vida útil, praticamente sem limitações quanto ao número de chaveamentos	A ausência de transitórios, de arcos elétricos e de partes móveis eleva substancialmente a expectativa de vida útil, praticamente sem limitações quanto ao número de chaveamentos

Parâmetros de avaliação	Sistemas Convencionais (a contatores e controladores automáticos com saídas a relés)	Sistemas Dinâmicos (a tiristores e controladores automáticos com saídas a transistor)	Sistemas Dinâmicos avançados (acionamentos tiristorizados + tecnologia do STATCOM - BT) PROJEÇÕES
Facilidade de operação e ajustes / parametrização por parte do usuário	Geralmente os controladores automáticos possuem documentações técnicas e interfaces amigáveis ao usuário, possibilitando facilidade para parametrizações e ajustes.	Geralmente os controladores automáticos possuem documentações técnicas e interfaces amigáveis ao usuário, possibilitando facilidade para parametrizações e ajustes.	Interface amigável, IHM específica
Disponibilidade de fornecedores Base instalada	Ampla	Mais restrita Restrita	Ainda em pesquisa Inexistente em
Aplicabilidade	Cargas com dinâmica lenta a moderada.	Cargas com dinâmicas lenta e moderada e, fundamentalmente, cargas com dinâmica rápida, podendo-se obter benefícios adicionais relacionados à Qualidade da Energia.	baixa tensão Cargas com dinâmica rápida
Custo da solução	Moderado (em torno de US\$ 100 / kVAr)	Mais elevado (em torno de US\$ 180 / kVAr)	Dependente da composição final. Para bancos capacitivos de até 800 kVAr, com 8 a 16 estágios de 50 kVAr, estima- se US\$ 250 a US\$ 330 /kVAr <u>considerando-se a</u> <u>potência do</u> <u>STATCOM-BT</u> <u>equivalente a 1</u> <u>estágio do banco</u>

7. Estudo baseado em um Caso Real – Equipamentos de Soldagem na Indústria Automobilística

Este capítulo apresenta avaliações baseadas em um caso real e objetiva caracterizar as necessidades a serem atendidas para o suprimento de energia reativa a cargas com dinâmica operacional rápida, bem como analisar a aplicabilidade dos sistemas de correção convencionais e dinâmicos a esse contexto.

7.1 Cargas com dinâmica rápida na indústria automobilística (Solda a ponto / ponteadeiras)

7.1.1 Contextualização (abordagem com base em (AURES, 2006))

7.1.1.1 Solda a ponto por resistência

A soldagem a ponto por resistência elétrica (*"Resistance Spot Welding"*), largamente utilizada na indústria automobilística, utiliza o aquecimento por efeito Joule para realizar a fusão da face comum entre as duas peças sobrepostas e pressionadas uma contra a outra.

A junção das peças é exercida por uma pinça de soldagem (Figura 7.1), terminada em eletrodos não consumíveis em liga de cobre (Figura 7.2), refrigerados a água, cuja área de contato possui perfil adequado para garantir a pressão necessária, o perfeito alinhamento e a condução adequada da corrente elétrica. A pressão que os eletrodos exercem sobre as peças no ponto a ser soldado pode ser obtida por forças mecânica, pneumática, hidráulica, ou algumas delas em conjunto.



Figura 7.1 – Pinça de soldagem a ponto Fonte: (AURES, 2006)



Figura 7.2 – Esquemático geral do eletrodo de uma pinça de soldagem Fonte: (AURES, 2006)

O efeito Joule ocorre devido à geração de calor pela passagem de corrente elétrica através da resistência imposta pelas peças adjacentes. A Figura 7.3 ilustra, de maneira genérica, a composição das resistências elétricas envolvidas e um possível perfil da geração de calor em um ponto de soldagem.



Figura 7.3 – Resistências elétricas envolvidas e possível perfil de temperatura em ponto de soldagem Fonte: (MARIMAX, 2004)

As resistências indicadas são:

- .R1 e R2: resistência elétrica dos próprios eletrodos
- .R3 e R4: resistência elétrica que se forma nos contatos peças-eletrodos
- .R5: resistência elétrica que se forma no contato entre as chapas (peças)
- .R6 e R7: resistência elétrica das próprias chapas (peças).
No caso da soldagem de chapas, a parcela mais elevada da resistência total no percurso de circulação da corrente localiza-se exatamente na superfície interna das chapas. Com aplicação da pressão pelos eletrodos e a circulação de corrente, ocorre a geração de calor nas superfícies de contato proporcionalmente à resistência elétrica, à intensidade de corrente e ao seu tempo de circulação através das peças (tempo de soldagem), parâmetros que deverão ser suficientes para permitir que se atinja o ponto de fusão do material.

A equação básica que rege a geração de calor encontra-se apresentada a seguir.

$$Q_{CALOR} = k \cdot R \cdot I^2 \cdot t \tag{7.1}$$

onde:

Q = energia sob a forma de calor gerada no tempo (kWh, Joule, kcal)

 $R = resistência elétrica (\Omega)$

- I = intensidade de corrente (A)
- $t = tempo \ de \ soldagem \ (h)$

k = constante de proporcionalidade (em função da unidade a ser adotada para Q); $exemplos: se Q é calculado em Joule, <math>k = 3,6 \times 10^6$; se Q é calculado em kcal, k = 860; se Q é calculado em kWh, k = 1.

A região fundida recebe o nome de *lentilha de solda*. Cessada a circulação da corrente, a pressão exercida pelos eletrodos ainda é mantida enquanto o metal de solda rapidamente se resfria e o ponto soldado se solidifica. Os eletrodos são retraídos após cada ponto de solda. A área por onde circula a corrente de soldagem, a forma e o diâmetro das lentilhas de solda geradas, são limitados pelo diâmetro e pelo contorno da face de contato dos eletrodos.

7.1.1.2 Equipamentos

A seleção do equipamento de soldagem por resistência é usualmente determinada pelo projeto da junta de soldagem, pelos materiais envolvidos, por requerimentos de qualidade, por normas de produção e por considerações econômicas. Todas as máquinas de solda a ponto por resistência apresentam, basicamente, três componentes fundamentais, a saber:

.sistema mecânico – compõe-se por subsistemas hidráulicos, pneumáticos e/ou mecânicos; é responsável pela aplicação da força / pressão aos eletrodo para firmar / segurar a peça e pelo controle da velocidade de aproximação dos eletrodos (rápida e controlada) de modo que suas faces não sejam deformadas por impactos indesejáveis;

.circuito elétrico – compõe-se de um circuito primário que abrange a linha de alimentação, o transformador de soldagem e um circuito secundário que envolve os cabos que conduzem a corrente de soldagem pelas pinças e eletrodos, e através do material.

.sistema de controle – é composto pelos dispositivos responsáveis pelo controle do processo de soldagem, exercendo as seguintes funções principais: permissão ou bloqueio da corrente para o transformador, controle da magnitude da corrente e a aplicação ou liberação / alívio do mecanismo de força mecânica dos eletrodos no tempo adequado.

Esses três componentes (mecânico, elétrico e controle) regulam as variáveis mais importantes na soldagem por resistência: a força do eletrodo, a intensidade da corrente e o tempo de passagem da corrente de soldagem.

A Figura 7.4 mostra a vista frontal (à esquerda) e a vista posterior (à direita) de um equipamento típico utilizado em estações de soldagem a ponto na indústria automobilística (a pinça com os eletrodos, parte integrante do equipamento, não é mostrada).



Figura 7.4 – Vistas frontal e posterior de um equipamento de soldagem a ponto por resistência Fonte: (AURES, 2006)



Na Figura 7.5 vê-se uma pinça de soldagem robotizada em operação.

Figura 7.5 – Operação de pínça de soldagem robotizada Fonte: (JEFFERSON, 1999)

7.1.1.3 Ciclo básico de soldagem

Cada ponto de solda é realizado em um ciclo de soldagem, conforme mostrado orientativamente na Figura 7.6.



Figura 7.6 – Ciclo básico de soldagem a ponto Fonte: (AURES, 2006)

Na Figura 7.6, *P* refere-se à pressão exercida pelos eletrodos sobre as peças a serem soldadas, o que ocorre no tempo de aperto (pressão gradualmente crescente), no tempo de solda e tempo de retenção (pressão mantida constante) e no tempo de abertura (pressão gradualmente descrescente). A variável *I* refere-se à corrente elétrica circulante na rede de alimentação (e também no circuito de soldagem da máquina), ocorrendo apenas no tempo de solda.

Para que ocorra a fusão, geralmente são necessários níveis de corrente da ordem de alguns kA (o que depende do material a ser soldado). As tensões empregadas variam geralmente entre 10 a 20 V (podendo superar os 20 V em alguns casos). O tempo de aplicação da corrente pode variar de 10 ms para folhas (chapas extremamente finas) a até alguns segundos para peças mais espessas. A resistência elétrica na interface entre as peças situa-se geralmente no intervalo de 50 a 500 $\mu\Omega$; porém, pode ser tão baixa quanto 20 $\mu\Omega$ para o alumínio.

Tipicamente, a soldagem de chapas na indústria automobilística é realizada em ciclos cujo tempo médio situa-se na faixa compreendida entre algumas centenas de milissegundos e 1 segundo.

7.1.1.4 Vantagens e desvantagens do sistema de solda a ponto por resistência

Como principais vantagens, podem-se destacar:

.maior resistência a vibrações mecânicas;

.processo isento de resíduos / refugos (escória, respingos, etc), não havendo, em princípio, a necessidade de acabamento final se a solda é executada corretamente;

.alta velocidade de processo;

.adaptabilidade para automatização;

.facilidade de operação, não requerendo muita habilidade do soldador;

.possibilidade de soldagem de chapas muito finas;

.relativa facilidade para manutenções;

.custo razoável / moderado do ponto de solda executado.

O processo também apresenta algumas limitações tais como:

.incompatibilidade com formatos de peças muito complexos e/ou peças demasiadamente pesadas;

.custo de aquisição dos equipamentos (geralmente mais elevado que os custos da maioria dos equipamentos de soldagem a arco);

.dificuldades para reparos ou desmontagem das peças soldadas para manutenção;

.possibilidade de soldagem de metais de naturezas diferentes apenas quando susceptíveis à formação de liga ou quando introduzido um material intermediário que possa ligar-se aos metais-base;

limites relativamente baixos de resistência à tração e à fadiga devido à presença de entalhes entre as chapas.

elevada demanda de energia elétrica durante o processo de soldagem, desfavorecimento à manutenção de um fator de potência satisfatório e a necessidade de critérios específicos no projeto e execução da rede elétrica de alimentação, principalmente em se tratando de um grande contingente de estações de soldagem com operação intensiva.

7.2 Estudo de caso – Ponteadeiras na indústria automobilística (abordagem com base em (EFFICIENTIA, 2007))

7.2.1 Introdução

Em meados de 2007, desenvolveu-se um estudo específico em uma indústria do ramo automobilístico situada em Belo Horizonte, com foco na correção do fator de potência em suas instalações. Parte das informações colhidas através de medições realizadas à época, bem como os resultados obtidos em uma nova bateria parcial de medições realizada em setembro de 2008, serviram como base de dados para utilização nessa Dissertação, buscando-se, em última análise:

avaliar comparativamente o comportamento do fator de potência perante a aplicação de sistemas de correção convencionais e sistemas estáticos, teoricamente mais apropriados para a compensação de reativos para cargas com rápida dinâmica operacional; e

analisar os efeitos de cada sistemática de correção sobre os parâmetros efetivamente "enxergados" pela medição da concessionária de energia local (CEMIG), na tentativa de se constatar a maior eficácia e melhor aplicabilidade dos sistemas estáticos nesse caso específico.

7.2.2 Características gerais da instalação elétrica analisada

-Instalação elétrica da planta industrial:

Atendida em tensão de fornecimento de 13,8 kV, a partir de ramal aéreo expresso oriundo na Subestação Maracanã (CEMIG).

.Ponto de entrega de energia elétrica: localizado em poste externo, local de transição do ramal aéreo para o ramal de entrada subterrâneo conduzido ao interior da subestação / cabine de medição do consumidor (subestação CON-1).

A partir da cabine de medição, alimentam-se duas subestações de força (denominadas LAS-1 e STA-1) através de circuitos de média tensão com cablagens isoladas, conduzidos da seguinte forma:

.trecho CON-1 \rightarrow LAS-1: subterrâneo até o galpão de funilaria / soldagem e, posteriormente, aéreo (leitos para cabos) até a S.E. LAS-1, situada no interior desse galpão;

.trecho CON-1 \rightarrow STA-1: subterrâneo até o galpão de funilaria / soldagem e, posteriormente, aéreo (leitos para cabos), com passagem (e sem conexões) pela S.E. LAS-2, situada no interior do galpão;

.trecho LAS-2 \rightarrow STA-1: subterrâneo, a partir da S.E. LAS-2 até o galpão de estampagem (prensas), onde localiza-se a S.E. STA-1.

.barramento de média tensão da S.E. LAS-2: alimentado por circuitos que retornam das S.E.'s LAS-1 (circuito aéreo) e STA-1 (circuito subterrâneo), perfazendo-se um anel interno em 13,8 kV.

.Distribuição dos circuitos de alimentação geral em BT a partir das S.E.s internas:

.<u>S.E. LAS-1</u>

.circuitos de alimentação de barramentos para solda LB-1 a LB-4 (barramento BT de interesse para o estudo): a partir de dois transformadores de 1.250 kVA (operação em paralelo em BT), tensão nominal secundária equivalente a 462 Vca, tensão média operacional nos pontos de utilização situada entre 440 e 450 Vca; os barramentos para solda são interligados à S.E. LAS-2 através de "*bus-ways*" (barramentos blindados) aéreos ventilados, instalados ao longo do galpão de funilaria / soldagem);

.circuitos de alimentação de força / motores: a partir de 2 transformadores de 2.000 kVA (operação em paralelo em BT), tensão nominal secundária equivalente a 440 Vca;

.circuitos de alimentação de força / iluminação: a partir de 1 transformador de 1.250 kVA, tensão nominal secundária equivalente a 220 / 127 Vca;

.<u>S.E. LAS-2</u>

circuitos de alimentação de barramentos para solda LB-1 a LB-4 (barramento BT de interesse para o estudo): a partir de dois transformadores de 1.250 kVA (operação em

paralelo em BT), tensão nominal secundária equivalente a 462 Vca, tensão média operacional nos pontos de utilização situada entre 440 e 450 Vca; os barramentos para solda são interligados à S.E. LAS-1 através de *"bus-ways"* (barramentos blindados) aéreos ventilados, instalados ao longo do galpão de funilaria / soldagem);

.<u>S.E. STA-1</u>

.circuitos de alimentação de força / motores: a partir de 2 transformadores de 2.000 kVA (operação em paralelo em BT), tensão nominal secundária equivalente a 440 Vca;

.circuitos de alimentação de força / iluminação: a partir de 1 transformador de 1.250 kVA, tensão nominal secundária = 220 / 127 Vca;

A configuração de distribuição interna em média e baixa tensão pode ser melhor visualizada pelo diagrama unifilar (diagrama de impedâncias) da Figura 7.7, a seguir (*Obs.*: apenas os barramentos de MT e BT de interesse para o estudo são mostrados).



Figura 7.7 – Estudo de caso – Diagrama unifilar de MT e BT Fonte: (EFFICIENTIA, 2007)



A Figura 7.8 apresenta um modelo da rede elétrica em questão, desenvolvido no módulo *Simulink* do software MATLAB 6.5 à época de realização do estudo original para análises em regime permanente.

Figura 7.8 – Estudo de caso - Modelagem da rede elétrica no MATLAB / Simulink Fonte: (EFFICIENTIA, 2007)

7.2.3 Barramentos BT de interesse efetivo para o estudo

Para o estudo de caso em abordagem, consideram-se como particularmente interessantes apenas os barramentos de baixa tensão a partir dos quais são alimentadas as estações de soldagem a ponto (barramentos de BT das S.Es LAS-1 e LAS-2), por se tratarem de cargas com rápida dinâmica operacional.

Sendo assim, aproveitaram-se do estudo original citado no subitem 7.2.1 apenas os resultados das medições e monitoramentos elétricos realizados nos secundários dos transformadores que alimentavam tais barramentos.

7.2.4 Causas do baixo fp (instalação como um todo) e ônus mensal

-<u>Principal causa</u>: Presença e operação efetiva de grande número de equipamentos de soldagem a ponto monofásicas (número aproximado: 360), grande parte delas operando 24 horas por dia; tais cargas apresentam, em geral, fator de potência médio operacional da ordem de 0,60 a 0,70.

-Presença de motores elétricos de indução de pequeno e médio portes.

-Insuficiência de sistemas de compensação de energia reativa, se consideradas as necessidades globais da unidade industrial.

O ônus médio mensal nas contas de energia de energia elétrica à época de desenvolvimento do estudo original equivalia a R\$ 37.215,00/mês (impostos inclusos) ou R\$ 446.580,00/ano, representando aproximadamente 7% dos custos médios com energia elétrica.

Obs.: Período de análise (estudo original): janeiro a julho/2007.

7.2.5 Principais características técnicas dos equipamentos de soldagem a ponto

A planta industrial possuía à época de realização do estudo de correção do fator de potência cerca de 360 equipamentos de soldagem a ponto por resistência, de fabricação italiana (Fase-Saldatura), monofásicos (fase-fase, 440 V), com potências nominais individuais de 125 e 160 kVA, totalizando-se uma carga global instalada (para soldagem) estimada em cerca de 50 MVA. Todavia, em função da operação extremamente intermitente / aleatória e da utilização não integral de todas as ilhas de produção (situação que, nesse ramo, é geralmente definida pelas programações de produção e pelas necessidades de mercado) a demanda máxima efetiva do sistema de soldagem como um todo não superava o patamar de 2.300 kW (aproximadamente 3500 kVA), revelando-se um fator de demanda / diversidade bastante baixo, inferior a 10%.

Os dados de placa, colhidos diretamente nos equipamentos de soldagem a ponto, encontramse reproduzidos a seguir e, na Figura 7.9, pode-se observar os bornes de entrada para alimentação monofásica (440 V fase-fase).

Fabricante: FASE Saldatura (Torino – Italy)							
ISSO 5826							
<i>Type: TPL 125-440/60-T</i>							
Ul = 440 V 60 Hz Isol. "F"							
$I_{2p} = 4,4 \ kA S_{50} = 125 \ kVA \qquad m \ 137$							
$U_{20} = 16,3$ 17,9 20 - V $Q = 4 L / min$							
Coll. A-D A-E E-B - $\Delta p = 0,15$ bar							
Fabricante: FASE Saldatura do Brasil Ltda.							
<i>Tipo: Export 00 160 – 440V Esquema: 80083500</i>							
Alimentação: 440V 60 Hz 2 fases							
Potência nominal: 160 kVA (50% FDU)							
Potência permanente: 113 kVA							
Vsecundário (vazio): 17,6 Vmin 2+2 Reg							
25,8 Vmax							
Corrente c.c. máx: 30 kA							
Pressão/vazão água: 0,3 Npa							
T(entrada) água: 15°C (min) 30°C (máx)							
Entrada de ar: 0,35 NPa (min) 0,8 NPa (máx)							
Comando Auxiliar: 19 V (AC) 24 V (DC)							



Figura 7.9 – Alimentação elétrica dos equipamentos de soldagem a ponto Fonte: (WOLF, 2005)

7.2.6 Caracterização dos parâmetros elétricos operacionais nos barramentos de alimentação geral de estações de soldagem (medições / monitoramentos)

Conforme já citado no subitem 7.2.1, uma parte dos resultados de monitoramentos elétricos realizados em meados de 2007 e novos resultados obtidos em setembro de 2008 foram aproveitados e analisados buscando-se caracterizar o comportamento dos parâmetros elétricos operacionais nos barramentos de alimentação geral das estações de soldagem presentes na planta industrial em questão. Uma vez que tal comportamento mostrou-se típico considerados ambos os períodos de medição, optou-se por adotar como base de dados no âmbito deste estudo de caso, os resultados obtidos mais recentemente (setembro/2008).

Os monitoramentos de setembro de 2008 foram realizados nos dias 02 e 03, utilizando-se um registrador eletrônico digital de grandezas elétricas, marca Embrasul, modelo RE-6000, parametrizado para a coleta de dados relativos às grandezas V (tensões fase-fase e fase-neutro), A (correntes de linha), kW (potências ativas monofásicas e trifásica), kVAr (potências reativas monofásica e trifásica), kVA (potências aparentes monofásica e trifásica), fp (fatores de potência monofásicos e trifásico), Hz (freqüência fundamental da tensão da rede), DHTi (distorção harmônica total da corrente em cada fase) e DHT_V (distorção harmônica total da tensão em cada fase), além de componentes harmônicas individuais. O modelo RE-6000 opera capturando dados de tensão e corrente a uma taxa de amostragem de 133 amostras por ciclo ($\approx 8 \text{ kHz}$) e apresenta, segundo o fabricante, classe de exatidão de 0,2% para ambas as grandezas. Entretanto, a exatidão global é afetada pelos TCs utilizados (classe de exatidão de 1% nesse caso).

Considerada a rápida dinâmica das cargas sob monitoramento, ajustou-se o intervalo de integralização (intervalo de tempo entre registros sucessivos) para 100 milisegundos, sendo este o menor intervalo disponibilizado pelo equipamento em questão. Os monitoramentos foram realizados em períodos diurnos (manhã e tarde) e noturnos (noite e madrugada), obtendo-se, ao todo, 225.951 grupos de registros diurnos e 264.764 grupos de registros noturnos completos (contendo, cada qual, todas as grandezas elétricas anteriormente citadas para cada instante de captura de dados).

O registrador foi instalado na S.E. LAS-1, mais precisamente no quadro elétrico codificado como L1-QPC1 (440V), para o monitoramento do circuito geral secundário associado ao transformador TR-3 (1.250 kVA). Pelas Figuras 7.10 a 7.13 pode-se visualizar fotografías do

registrador utilizado e seus acessórios, do local de sua instalação e da realização da parametrização em campo através de microcomputador portátil.



Figs. 7.10 e 7.11 – Registrador eletrônico digital de grandezas elétrica



Figura 7.12 – Instalação dos TCs flexíveis



Figura 7.13 - Parametrizações através de microcomputador portátil



Figuras 7.14 e 7.15 – Painel de instalação do registrador (detalhe da instrumentação frontal existente) Fonte (Figuras 7.10 a 7.15): (EFFICIENTIA, 2007)

Realizados os monitoramentos e coletados os dados, os registros foram migrados para planilhas Excel e sistematizados para que se tornasse possível trabalhar mais diretamente com os valores obtidos.

A Figura 7.16 apresenta parte de uma das extensas planilhas geradas, contendo os registros primários obtidos pelo equipamento de monitoramento, a intervalos de 100 milisegundos.



Figura 7.16 – Parte das planilhas de dados primários elaboradas a partir dos registros de medições Fonte: (EFFICIENTIA, 2007)

Considerando-se o foco de análise deste estudo, foram elaboradas, a partir das planilhas principais, planilhas secundárias para trabalho e avaliação, concentrando apenas as informações relativas às potências ativa, reativa e aparente, e ao fator de potência. A partir delas, e como forma de facilitar o manuseio dos dados (originalmente contidos em planilhas muito extensas), estabeleceu-se a seguinte metodologia:

.separação de toda a massa de dados em 4 intervalos de monitoramentos diurnos e 4 intervalos de monitoramentos noturnos;

.filtragem dos dados para obtenção do máximo valor de potência reativa (kVAr) registrado em cada intervalo de monitoramento, localizando-se os instantes de ocorrência;

.elaboração de gráficos kW x tempo, kVAr x tempo e fp x tempo correspondentes a subintervalos de monitoramento de 10 segundos (10.000 ms), fixando-se, em um ponto praticamente central (5300 ms), os instantes de ocorrência das máximas potências reativas (kVAr) em cada intervalo.

Dessa forma, tornou-se possível caracterizar de maneira mais clara, em subintervalos de 10 segundos e com resolução de 100 milissegundos (intervalo de integralização do registrador), os parâmetros elétricos operacionais da carga monitorada, sob a situação mais desfavorável.

Como poderá ser observado pela análise dos gráficos resultantes dessa sistematização, elaborados com base nos dados obtidos em (EFFICIENTIA, 2007) e apresentados nas páginas seguintes, considera-se que cada subintervalo de 10 segundos constitua-se como um período de tempo suficientemente representativo para subsidiar confiavelmente as análises desenvolvidas a partir disso. Note-se que cada ciclo operativo do grupo de cargas em questão (elevações e decréscimos das potências ativa e reativa demandas da rede), em que pesem as variações de amplitude, desenvolve-se praticamente de maneira repetitiva. As elevações e decréscimos nas potências associadas aos picos mais significativos ocorrem em tempos totais de duração geralmente da ordem de 10 a 15% da duração do subintervalo considerado.

Obs.: Ressalta-se que, no estudo originalmente desenvolvido, outras análises que não apenas as relativas à correção do fp foram realizadas (fundamentalmente as avaliações relacionadas às harmônicas presentes e às harmônicas críticas potencialmente geradoras de ressonância elétrica). Todavia, para o foco de abordagem dessa Dissertação, serão apresentados apenas os aspectos estritamente associados às grandezas primárias necessárias para as análises relativas à correção do fp em sí.

MONITORAMENTOS ELÉTRICOS DIURNOS

INTERVALO DE MEDIÇÃO: 10:05:44 hs a 11:54:57 hs (02/09/2008)

SUB-INTERVALO DE MEDIÇÃO 1 (10s) – Figura 7.17: 10:55:30 hs a 10:55:40 hs (02/09/2008)

Registros no instante de ocorrência da máxima demanda de potência reativa:

.945,36 kW

.890,19 kVAr







Figura 7.17 – Estudo de caso - Monitoramentos elétricos diurnos – 1º subintervalo

INTERVALO DE MEDIÇÃO: 11:54:57 hs a 13:42:30 hs (02/09/2008) SUB-INTERVALO DE MEDIÇÃO 2 (10s) – Figura 7.18: 13:34:59 hs a 13:35:09 hs (02/09/2008)

Registros no instante de ocorrência da máxima demanda de potência reativa :

.1.025,22 kW

.811,93 kVAr







Figura 7.18 – Estudo de caso - Monitoramentos elétricos diurnos – 2º subintervalo

INTERVALO DE MEDIÇÃO : 13:42:30 hs a 15:30:53 hs (02/09/2008) SUB-INTERVALO DE MEDIÇÃO 3 (10s) – Figura 7.19: 13:51:03 hs a 13:51:13 hs (02/09/2008)

Registros no instante de ocorrência da máxima demanda de potência reativa:

.836,56 kW

.897,90 kVAr







Figura 7.19 – Estudo de caso - Monitoramentos elétricos diurnos – 3º subintervalo

INTERVALO DE MEDIÇÃO: 15:30:54 hs a 16:19:41 hs (02/09/2008) SUB-INTERVALO DE MEDIÇÃO 4 (10s) – Figura 7.20: 15:53:11 hs a 15:53:21 hs (02/09/2008)

Registros no instante de ocorrência da máxima demanda de potência reativa:

.774,56 kW

.987,39 kVAr







Figura 7.20 – Estudo de caso - Monitoramentos elétricos diurnos – 4º subintervalo

MONITORAMENTOS ELÉTRICOS NOTURNOS

INTERVALO DE MEDIÇÃO: 21:00:00 hs a 22:42:23 hs (02/09/2008)

SUB-INTERVALO DE MEDIÇÃO 1 (10s) – Figura 7.21: 21:59:20 hs a 21:59:30 hs (02/09/2008)

Registros no instante de ocorrência da máxima demanda de potência reativa:

.843,84 kW

.1.078,19 kVAr







Figura 7.21 – Estudo de caso - Monitoramentos elétricos noturnos – 1º subintervalo

INTERVALO DE MEDIÇÃO: 22:48:23 hs (02/09/2008) a 00:36:46 hs (03/09/2008) SUB-INTERVALO DE MEDIÇÃO 2 (10s) – Figura 7.22: 22:48:42 hs a 22:48:52 hs (02/09/2008)

Registros no instante de ocorrência da máxima demanda de potência reativa:

.708,33 kW

.974,70 kVAr







Figura 7.22 – Estudo de caso - Monitoramentos elétricos noturnos – 2º subintervalo

INTERVALO DE MEDIÇÃO: 00:36:46 hs a 02:25:09 hs (03/09/2008) SUB-INTERVALO DE MEDIÇÃO 3 (10s) – Figura 7.23: 01:22:55 hs a 01:23:05 hs (03/09/2008)

Registros no instante de ocorrência da máxima demanda de potência reativa:

.720,73 kW

.724,26 kVAr







Figura 7.23 – Estudo de caso - Monitoramentos elétricos noturnos – 3º subintervalo

INTERVALO DE MEDIÇÃO: 02:25:10 hs a 03:14:16 hs (03/09/2008) SUB-INTERVALO DE MEDIÇÃO 4 (10s) – Figura 7.24: 02:28:30 hs a 02:28:40 hs (03/09/2008)

Registros no instante de ocorrência da máxima demanda de potência reativa:

.552,56 kW

.666,38 kVAr







Figura 7.24 – Estudo de caso - Monitoramentos elétricos noturnos – 4º subintervalo

7.2.7 Tabela-Resumo dos monitoramentos

A Tabela 7.1 apresenta o resumo dos monitoramentos elétricos realizados.

Monitoramentos	Período	Intervalo total de monitoramento (início e fim)	51 (1 nº	ubintervalo de análise 0 segundos) início e fim	kVAr máximo	kW no mesmo instante	kVA	fp
Diurnos	Manhã	10:05:44 a 11:54:57	1	10:55:30 a	890,19	945,36	1.298,52	0,73
	Fim da manhã / Início da tarde	11:54:57 a 13:42:30	2	13:34:59 a 13:35:09	811,93	1.025,22	1.307,79	0,78
	Tarde	13:42:30 a 15:30:53	3	13:51:03 a 13:51:13	897,90	836,56	1.227,22	0,68
	Tarde	15:30:54 a 16:19:41	4	15:53:11 a 15:53:21	987,39	774,56	1.254,94	0,62
Noturnos	Noite	21:00:00 a 22:48:23	1	21:59:20 a 21:59:30	1.078,19	843,84	1.369,14	0,62
	Noite	22:48:23 a 00:36:46	2	22:48:42 a 22:48:52	974,70	708,33	1.204,89	0,59
	Início da madrugada	00:36:46 a 02:25:09	3	01:22:55 a 01:23:05	724,26	720,73	1.021,77	0,71
	Madrugada	02:25:10 a 03:14:16	4	02:28:30 a 02:28:40	666,38	552,56	865,67	0,64

Tabela 7.1 – Resumo dos resultados dos monitoramentos elétricos

.Tempo total de monitoramento diurno: 04:13:57 (hh:mm:ss).

.Tempo total de monitoramento noturno: 06:14:16 (hh:mm:ss).

.Tempo global de monitoramento: 10:00:19 (hh:mm:ss).

.Grupos de registros diurnos: 225.951 grupos de registros noturnos completos.

.Grupos de registros noturnos: 264.764 grupos de registros noturnos completos.

.Grupos de registros (totalização): 490.715.

.Número total de registros de grandezas elétricas armazenados: 16.684.310.

.Número total de registros armazenados: 17.665.740 (incluindo-se os registros de data e hora).

Pela Tabela 7.1, pode-se observar que o registro de potência reativa de maior valor (1.078,19 kVAr) ocorreu no subintervalo 1 do período noturno, correspondendo ao instante de maior demanda em kVA em todo o período de monitoramento e a um fator de potência instantâneo equivalente a $0,62_{\text{INDUTIVO}}$. Portanto, optou-se por adotar esse subintervalo como base para as análises desenvolvidas nos próximos subitens, no que se refere à correção dinâmica do fator de potência.

7.2.8 Análise das solicitações de reativos e o processo básico de compensação (sistemas dinâmicos e sistemas convencionais)

7.2.8.1 Ordenamento / sistematização dos dados primários

Os gráficos relativos ao subintervalo 1 do período noturno, que caracterizam a operação da carga em 10 segundos consecutivos (10.000 milisegundos), são reapresentados na Figura 7.25.



Figura 7.25 – Período noturno – 1º subintervalo (10 segundos)

Percebe-se, nitidamente, que o momento de ocorrência da máxima demanda de potência reativa indutiva (1.078,19 kVAr) corresponde ao instante de tempo relativo ao bloco de 100 milisegundos de número 5200 no subintervalo de análise. A seta vertical inserida no gráfico da *Potência Reativa* localiza esse valor.

Dada a repetitividade dos ciclos operativos da carga analisada, pôde-se, como base para o prosseguimento das análises, considerar o ciclo de ocorrência da máxima demanda reativa como representativo de sua operação, e extrair do subintervalo em questão um período de tempo mais curto, equivalente a, por exemplo, 2 segundos (2.000 milisegundos). Essa situação é apresentada na Figura 7.26, destacando-se, da mesma forma que para a figura anterior, o instante de ocorrência da máxima demanda de potência reativa indutiva.



Figura 7.26 - Período noturno – Subintervalo de 2 segundos compreendendo o instante de registro da máxima demanda de potência reativa

Tomando-se como base os registros coletados nesse instante (843,84 kW e 1.078,19 kVAr, correspondentes ao fp = $0,62_{INDUTIVO}$), calculou-se a potência reativa capacitiva necessária à

correção do fp nesta pior condição para, por exemplo, fp = $0.95_{INDUTIVO}$ (patamar usualmente adotado na prática, acima do valor mínimo estabelecido pela legislação), utilizando-se as expressões apresentadas ao longo do subitem 2.2.1.4, da seguinte forma:

 $P_{C} = Q - (P \cdot tg(\varphi_{l})) = 1.078, 19 - [843, 84 \cdot tg(\arccos(0,95)] = 800, 84 \, kVAr$

ou, analogamente:

 $P_{C} = P \cdot (tg(\varphi) - tg(\varphi_{l})) = 1.078, 19 \cdot [tg(arccos(0, 62) - tg(arccos(0, 95))] = 800, 84 \, kVAr$

7.2.8.2 Avaliações iniciais

Admitindo-se, inicialmente, a utilização de 800 kVAr_{CAPACITIVOS} como potência máxima efetivamente necessária para a correção, avaliou-se <u>conceitualmente</u> em um primeiro momento (e, por enquanto, sem qualquer compromisso com as limitações impostas por um sistema comercial) o processo de <u>correção dinâmica do fp</u> à luz unicamente das condições impostas pela carga.

Para essa primeira avaliação (de natureza puramente teórica), os seguintes aspectos foram considerados:

.as potências reativas necessárias para a correção dinâmica não estariam limitadas a degraus fixos, pressupondo-se, portanto, um grau de liberdade ilimitado no que se refere à inserção ou retirada de kVArs capacitivos a cada procedimento de correção consecutivo;

a dinâmica foi limitada pela capacidade de detecção de grandezas elétricas por parte do instrumento de medição / monitoramento utilizado, ou seja, pela possibilidade de registros a intervalos consecutivos de 100 milisegundos;

.a velocidade de operação do sistema de correção (a essa altura, apenas hipotético), ou seja, os tempos de captura de grandezas elétricas (V e I), processamento de informações por um suposto controlador, emissão de sinais de controle, chaveamento dos tiristores e energização efetiva da potência capacitiva necessária, foi compatibilizada com a dinâmica detectável pelo instrumento de medição; portanto, considerou-se que as ações de correção estariam sendo efetivamente realizadas a cada 100 milisegundos.

Além desses aspectos, vale ressaltar que as ações de correção efetivadas em um determinado instante tomaram como base os valores das potências ativa e reativa verificados no instante de tempo de análise imediatamente anterior, ou seja, 100 milisegundos antes.

Com base em todas essas premissas, tornou-se possível planilhar, para o subintervalo de 2 segundos considerado na Figura 7.26 (milisegundo 4.000 a milisegundo 6.000), as grandezas de interesse e o processo básico de correção do fp. A planilha reproduzida na Tabela 7.2 considera que o início do monitoramento se deu no milisegundo de nº 4.300 e que as ações efetivas de correção iniciaram-se no milisegundo de nº 4.400 (100 milisegundos depois).

ABORDAGEM ANALÍTICA / TEÓRICA FP desejado 0,95 Tempo de reconexão : 100 ms **KVA**r **KVA**r **KVA**r **KVAr** indutivo indutivo capacitivo capacitivo enxergado KW Novo FP Instante solicitado introduzido em pelo pela ou retirado operação controlador carga 4000 895,94 895,94 0,6818 835,12 0 0 750,74 750,74 0,6400 4100 625,25 0 0 552,19 475,45 552,19 0,6525 0 0 4300 412,79 512,00 0 0 512,00 0,6277 4400 312,85 434,12 376,32 376,32 0,9834 57,80 4500 147,40 0,9365 393,68 478,69 -45,03 331,29 4600 403,01 514,76 18,01 349,30 165,46 0,9251 4700 515,27 698,33 33.00 382,30 316,04 0.8524 4800 641.48 873.75 146,68 528.97 344.78 0.8808 4900 806,15 914,25 133,93 662,90 251,34 0,9547 5000 862,82 649,28 875,12 -13,62 225,84 0,9674 5100 996,07 -57,76 404,55 910,74 591,53 0,9139 5200 843,84 1078,19 105,20 696,73 381,47 0,9112 5300 887,82 956,12 104,11 800,84 155,29 0,9850 5400 682,20 -136,53 148,33 0,9772 812,64 664,31 0,9953 5500 548,31 641,57 -75,90 588,41 53,16 0,9349 5600 567,46 676,73 -127,06 461,35 215,38 5700 531,42 679,63 28,86 490,21 189,42 0,9420 5800 563,41 737,98 14,75 504,96 233,02 0,9241 5900 652,34 841,68 552,79 288,88 0,9144 47,83 6000 697,61 862,00 74,47 627,26 234,74 0,9478

Tabela 7.2 - Período noturno – Subintervalo de 2 segundos compreendendo o instante de registro da máxima demanda de potência reativa – Abordagem analítica / teórica preliminar para correção do fp

O "*Novo fp*" indicado na última coluna à direita, refere-se, obviamente, ao fp no circuito alimentador a montante do barramento de alimentação das cargas, barramento ao qual estaria também conectada a potência capacitiva responsável pela correção.

Para o melhor entendimento da rotina de cálculos pré-programada na planilha, pode-se tomar como base a Tabela 7.3, que apresenta suas linhas iniciais. As explicações sobre a rotina de cálculos pré-programada são apresentadas nos parágrafos a ela subseqüentes.

Instante	ĸw	KVAr indutivo solicitado pela carga	KVAr capacitivo introduzido ou retirado	KVAr capacitivo em operação	KVAr indutivo enxergado pelo controlador	Novo FP
4000	835,12	895,94	0	0	895,94	0,6818
4100	625,25	750,74	0	0	750,74	0,6400
4200	475,45	552,19	0	0	552,19	0,6525
4300 <	412,79	512,00	0	0	512,00	0,6277
4400	312,85	434,12	376,32	376,32	57,80	0,9834
4500	393,68	478,69	-45,03	331,29	147,40	0,9365

Tabela 7.3 – Detalhamento da abordagem analítica / teórica preliminar para correção do fp

O início do processo, como já mencionado anteriormente, se dá no instante 4.300, no qual, com base nas potências ativa e reativa solicitadas pela carga, o controlador calcula a necessidade de kVArs capacitivos a serem introduzidos (visando um fp = $0.95_{INDUTIVO}$) no instante 100 milisegundos posterior. O valor calculado (376,32 kVAr) é introduzido no instante 4.400 e, nesse instante, o controlador "enxerga" a potência reativa indutiva resultante da compensação de parte dos 434,12 kVAr agora solicitados pela carga (434,12 - 376,32), o que equivale a 57,8 kVAr, atingindo-se o fator de potência operacional igual a 0,9834_{INDUTIVO}. Nessa situação, tem-se instantaneamente no alimentador geral: 312,85 kW e 57,8 kVAr. A partir desse instante, o controlador calcula novamente a necessidade de kVAr's capacitivos a serem introduzidos no instante 100 milisegundos posterior para o atingimento do fp = 0,95_{INDUTIVO} pré-programado. O valor calculado (-45,03 kVAr) é retirado no instante 4.500, permanecendo em operação a potência capacitiva equivalente a 376,32 kVAr - 45,03 kVAr =331,29 kVAr. Nesse instante, o controlador "enxerga" a potência reativa indutiva resultante da compensação de parte dos 478,69 kVAr agora solicitados pela carga (478,69 - 331,29), o que equivale a 147,40 kVAr, atingindo-se o fator de potência operacional igual a 0,9365_{INDUTIVO}. Seguindo essa mesma sistemática, a programação da planilha determina, sequencialmente, os parâmetros operacionais apresentados na Tabela 7.2 para todo o subintervalo considerado.

A partir dessa planilha, tornou-se possível caracterizar graficamente o comportamento das potências ativa (teoricamente invariável) e reativa, e do fator de potência resultante, conforme pode-se observar na Figura 7.27, a seguir.



Figura 7.27 – Abordagem analítica / teórica preliminar para correção – Comportamento das potências ativa, reativa e do fp

Embora de cunho eminentemente conceitual como já mencionado anteriormente (por desconsiderar as características de operação real e as limitações impostas por um sistema comercial), essa análise produziu gráficos que permitem observar e concluir preliminarmente que:

.em que pesem as defasagens de tempo inerentes ao processo de correção (kVArs capacitivos calculados para um instante de tempo e aplicados apenas em um instante posterior), para o tipo de carga em questão o fator de potência (corrigido no alimentador geral) apresentou um comportamento bastante razoável, aproximando-se do valor estabelecido como alvo (fp = $0,95_{INDUTIVO}$).

Vale ressaltar que, a partir do início das ações de controle efetivo, o valor médio no subintervalo analisado situou-se em patamar equivalente a $0,938_{INDUTIVO}$. Os valores máximo e mínimo atingiram, respectivamente, $0,9953_{INDUTIVO}$ e $0,8524_{INDUTIVO}$. No instante da máxima potência reativa demandada pela carga verificou-se um fp = $0,9112_{INDUTIVO}$. Não houve a ocorrência de fatores de potência capacitivos.

7.2.8.3 Avaliações para um sistema de correção dinâmica (tempo de resposta = 25 ms)

Em uma segunda etapa de investigações, e buscando-se o maior aprofundamento e precisão do estudo, toda a base de dados original foi adaptada para atendimento aos seguintes requisitos:

.caracterização da dinâmica da carga (Figura 7.28) de modo a compatibilizá-la com a dinâmica operacional dos sistemas de controle do fp em "tempo real" atualmente disponíveis no mercado (note-se que alguns sistemas comerciais são capazes de exercer ações efetivas de controle em tempos geralmente não superiores a 1,5 ciclo da tensão da rede); para isso, os registros obtidos a partir do instrumento de medição / monitoramento (sucessivos a cada 100 ms) foram interpolados linearmente, de modo a se obterem valores intermediários calculados para cada 25 milisegundos ao longo do subintervalo de análise;



Figura 7.28 – Interpolação da dinâmica da carga para a projeção de registros a cada 25 milisegundos

.adoção de uma sistemática de correção um pouco mais realista,, que contemplasse algumas das limitações impostas por um sistema dinâmico comercial; uma delas seria a presença de estágios individuais de correção compostos por potências capacitivas previamente definidas;

.adoção de uma sistemática de correção que contemplasse as funcionalidades disponibilizadas por um sistema dinâmico comercial (curto tempo de resposta global, aqui estabelecido em 25 ms, valor médio; como já mencionado anteriormente, os curtos tempos são possíveis devido à ausência de transientes na energização dos capacitores, considerado o chaveamento baseado na sistemática "zero-crossing");

.por enquanto, a consideração de que praticamente não haveria tempo de retardo imposto pelo controlador automático do fator de potência (CAFP) e que o único retardo na atuação do sistema estaria associado ao que foi citado no parágrafo anterior.

Tomando-se como base os registros coletados no instante de ocorrência da máxima demanda reativa indutiva no subintervalo considerado (843,84 kW e 1.078,19 kVAr, correspondentes ao fp = $0,62_{INDUTIVO}$), calculou-se, do mesmo modo que para a primeira análise, a potência reativa capacitiva necessária à correção do fp para $0,95_{INDUTIVO}$ (800,84 kVAr). Para fins de avaliação, adotou-se a potência comercial de 800 kVAr, composta por 16 estágios de correção equivalentes a 50 kVAr (trifásicos). Com base em todas essas premissas, tornou-se possível planilhar, para o subintervalo de 2 segundos considerado (milisegundo 4.000 a milisegundo 6.000), as grandezas de interesse e o processo básico de correção do fp. A nova planilha, apresentada na Tabela 7.4, também considera que o início do monitoramento se deu no milisegundo de nº 4.300. Porém, na situação agora abordada, as ações efetivas de correção iniciaram-se no milisegundo de nº 4.325 (25 milisegundos depois). A sistemática de cálculo adotada quando da programação da planilha segue a mesma lógica da análise anterior. Todavia, ela contempla uma coluna adicional que apresenta o número de estágios capacitivos em operação.

Além disso, é importante ressaltar que a programação das células da planilha relativas às potências capacitivas introduzidas ou retiradas (múltiplos de 50 kVAr) levou em conta a melhor opção do ponto de vista do atingimento do fator de potência pretendido. Estabeleceuse, para isso, uma instrução lógico-matemática capaz de decidir pela introdução ou retirada do múltiplo de 50, superior ou inferior à potência capacitiva calculada não múltipla de 50, como sendo o mais adequado perante as necessidades (note-se que os controladores automáticos do fator de potência desenvolvem algoritmos internos pré-programados bastante refinados, capazes de tomar decisões de maneira otimizada).

Instante	кw	KVAr indutivos solicitados pela carga	KVAr capacitivos calculados para introdução ou retirada	KVAr capacitivos efetivos introduzidos ou retirados	KVAr capacitivos em operação	Nº de estágios ativados	KVAr enxergados pelo controlador	Novo FP
4000	835,12	895,94	0	0	0	0	895,94	0,6818
4025	782,65	859,64	0	0	0	0	859,64	0,6732
4050	730,18	823,34	0	0	0	0	823,34	0,6635
4100	625.25	750.74	0	0	0	0	750.74	0.6400
4125	587,80	701,10	0	0	0	0	701,10	0,6425
4150	550,35	651,46	0	0	0	0	651,46	0,6453
4175	512,90	601,83	0	0	0	0	601,83	0,6486
4200	475,45	552,19	0	0	0	0	552,19	0,6525
4225	459,79	532.09	0	0	0	0	532.09	0,6408
4275	428.46	522.05	0	0	0	0	522.05	0.6344
4300	412,79	512,00	0,00	0	0	0	512,00	0,6277
4325	387,81	492,53	376,32	400	400	8	92,53	0,9727
4350	362,82	473,06	-34,94	-50	350	7	123,06	0,9470
4375	337,84	453,59	3,81	0	350	7	103,59	0,9561
4425	333,06	445,26	-18,71	0	350	7	95,26	0,9614
4450	353,27	456,41	-14,21	0	350	7	106,41	0,9575
4475	373,47	467,55	-9,71	0	350	7	117,55	0,9539
4500	393,68	478,69	-5,20	0	350	7	128,69	0,9505
4525	396,01	487,71	-0,70	0	350	7	137,71	0,9445
4575	400.68	505 74	15.80	0	350	7	155.74	0,9321
4600	403,01	514,76	24,05	0	350	7	164,76	0,9256
4625	431,08	560,65	32,30	50	400	8	160,65	0,9370
4650	459,14	606,55	18,96	0	400	8	206,55	0,9120
4675	487,21	652,44 698 33	55,63	50	450	9	202,44	0,9235
4725	546.82	742.19	28.97	50	550	11	198,33	0,9333
4750	578,37	786,04	12,45	0	550	11	236,04	0,9259
4775	609,92	829,89	45,94	50	600	12	229,89	0,9357
4800	641,48	873,75	29,42	50	650	13	223,75	0,9442
4850	707.34	889.95	12,90	0	650	13	239.95	0,9457
4875	740,28	898,05	7,46	0	650	13	248,05	0,9482
4900	806,15	914,25	4,73	0	650	13	264,25	0,9503
4925	820,31	904,47	-0,72	0	650	13	254,47	0,9551
4950	834,48	894,68	-15,16	0	650 600	13	244,68	0,9596
5000	862.82	875.12	-29,60	-50	600	12	264,90	0,9480
5025	874,80	905,36	-8,47	0	600	12	305,36	0,9441
5050	886,78	935,60	17,83	0	600	12	335,60	0,9353
5075	898,76	965,83	44,13	50	650	13	315,83	0,9434
5100	910,74 894.02	996,07	20,43	50	650 700	13	346,07	0,9348
5150	877,29	1037,13	22,75	0	700	14	337,13	0,9334
5175	860,57	1057,66	48,78	50	750	15	307,66	0,9416
5200	843,84	1078,19	24,81	0	750	15	328,19	0,9320
5225	854,83	1047,68	50,84	50	800	16	247,68	0,9605
5275	876.83	986.64	-17,43	-30	750	15	236.64	0,9555
5300	887,82	956,12	-51,56	-50	700	14	256,12	0,9608
5325	836,42	920,25	-35,69	-50	650	13	270,25	0,9516
5350	785,01	884,38	-4,66	0	650	13	234,38	0,9582
5375	733,60	848,51 812.64	-23,64	-50	650	13	198,51	0,9653
5425	648.73	769.88	-11.59	0	600	12	169.88	0.9674
5450	615,25	727,11	-43,35	-50	550	11	177,11	0,9610
5455	581,78	684,34	-25,12	-50	500	10	184,34	0,9533
5500	548,31	641,57	-6,88	0	500	10	141,57	0,9682
5550	557 89	659 15	-38,65	-30	450	9	200,38	0,9402
5575	562,68	667,94	25,78	50	500	10	167,94	0,9582
5600	567,46	676,73	-17,00	0	500	10	176,73	0,9548
5625	558,45	677,45	-9,79	0	500	10	177,45	0,9530
5675	549,44	678,18	-6,10	0	500	10	178,18	0,9512
5700	531.42	679.63	1,27	0	500	10	179.63	0,9473
5725	539,42	694,22	4,96	0	500	10	194,22	0,9409
5750	547,42	708,80	16,92	0	500	10	208,80	0,9343
5775	555,42	/23,39	28,88	50	550	11	173,39	0,9546
5825	585.65	763.90	2.79	0	550	11	213.90	0,9466
5850	607,88	789,83	21,41	Ō	550	11	239,83	0,9302
5875	630,11	815,75	40,03	50	600	12	215,75	0,9461
5900	652,34	841,68	8,65	0	600	12	241,68	0,9377
5950	674 97	851 84	-21.38	50 0	650 650	13	201 84	0.9588
5975	686,29	856,92	-20,01	õ	650	13	206,92	0,9574
6000	697,61	862,00	-18,65	0	650	13	212,00	0,9568

Tabela 7.4 – Cálculos das potências capacitivas para correção do fp a intervalos de 25 millisegundos

A partir dessa planilha, tornou-se possível caracterizar graficamente o comportamento das potências ativa (teoricamente invariável) e reativa, do fator de potência resultante e da inserção / retirada de estágios capacitivos, conforme pode-se observar na Figura 7.29.

Note-se que, nessa abordagem, o processo de correção é explicitado de uma maneira um pouco mais compatível com o comportamento esperado para um sistema de correção dinâmica do fator de potência, baseado em módulos de potência a tiristores.

Os dados que originaram os gráficos obtidos nessa análise, apresentados na Tabela 7.4, permitem observar e concluir que:

.em que pesem as defasagens de tempo inerentes ao processo de correção (kVArs capacitivos calculados para um instante de tempo e aplicados 25 milisegundos após), para o tipo de carga em questão o fator de potência (corrigido no alimentador geral) manteve-se praticamente equivalente ao valor pretendido ($fp = 0.95_{INDUTIVO}$).

Vale ressaltar que, a partir do início das ações de controle efetivo, o valor médio no subintervalo analisado situou-se em patamar equivalente a $0,9478_{INDUTIVO}$ (considerando-se o início dos procedimentos de correção cerca de 0,9 segundo antes do pico de potência reativa indutiva da carga). Os valores máximo e mínimo atingiram, respectivamente, $0,9727_{INDUTIVO}$ e $0,9120_{INDUTIVO}$. No instante da máxima potência reativa demandada (destacado em amarelo na Figura 7.29) verificou-se um fp = $0,9320_{INDUTIVO}$. Não houve a ocorrência de fatores de potência capacitivos.



Figura 7.29 - Caracterização gráfica do processo de correção do fp a intervalos de 25 milisegundos

O gráfico relativo ao número de estágios capacitivos ativados, apresentado na Figura 7.30, é, obviamente, similar ao gráfico de *Inserção / retirada de capacitores* (integrante da Figura 7.29).



Figura 7.30 – Dinâmica de inserção e retirada de estágios capacitivos (intervalos de 25 milisegundos)

7.2.8.4 Avaliações para um sistema de correção com banco automático convencional

Dando continuidade às avaliações, as condições e a perfomance de um sistema de correção convencional genérico (acionamentos por contatores) também foram avaliadas. Para isso, a base de dados original foi novamente adaptada para atendimento aos seguintes requisitos:

.caracterização do comportamento da carga de modo a compatibilizá-lo temporalmente aos tempos de operação dos sistemas convencionais de controle do fp atualmente disponíveis no mercado;

.adoção de uma sistemática de correção realística, contemplando, além das limitações impostas por qualquer sistema de correção comercial (estágios individuais de correção compostos por potências capacitivas previamente definidas), as limitações impostas pelos sistemas convencionais, ou seja, uma dinâmica de operação da ordem de dezenas de segundos ou mesmo de minutos (dada a necessidade de se aguardar a descarga, pelo menos parcial, dos capacitores envolvidos); nesse caso específico, adotou-se o intervalo de 1 minuto (usual em sistemas convencionais) entre energizações / desenergizações sucessivas dos bancos de capacitores.

O comportamento da carga (demandas de potência ativa, reativa e fator de potência antes da correção), da forma como o mesmo foi adotado para a análise, encontra-se apresentado na Figura 7.31, em cujos gráficos pode-se verificar um período de tempo composto por 18.000 intervalos de 100 milisegundos, o que corresponde a 30 minutos de monitoramento (note-se que : ((18.000 intervalos x 100 milisegundos) / 1000 milisegundos) / 60 segundos) =
30 minutos). Buscando-se manter as mesmas premissas até agora adotadas, o período de análise contemplou o instante de ocorrência da máxima demanda de potência reativa (1.078,19 kVAr, valor registrado entre os blocos de 100 milisegundos de nº 8.000 e 9.000).



Figura 7.31 – Dinâmica operacional da carga (30 minutos de operação)

Tomando-se como base os registros coletados no instante de ocorrência da máxima demanda reativa indutiva no subintervalo considerado (843,84 kW e 1.078,19 kVAr, correspondentes ao fp = $0,62_{INDUTIVO}$), calculou-se, do mesmo modo que para as análises anteriores, a potência reativa capacitiva necessária à correção do fp para $0,95_{INDUTIVO}$ (800,84 kVAr), adotando-se, também, uma potência comercial de 800 kVAr, composta por 16 estágios de correção equivalentes a 50 kVAr (trifásicos). A partir disso, tornou-se possível planilhar, para o período de 30 minutos considerado, as grandezas de interesse e o processo básico de correção do fp.

Apenas parte dessa planilha é apresentada na Tabela 7.5, mais especificamente o início do processo de correção (devido à grande extensão da planilha completa). Considerou-se um período inicial sem correção equivalente a 1 minuto e o início do processo de correção a partir do 2º minuto e a cada minuto subseqüente até o final do intervalo considerado.

A sistemática de cálculo adotada quando da programação da planilha é basicamente a mesma utilizada nas análises anteriores. O que difere é o tempo transcorrido para a determinação das grandezas médias (kW e kVAr) a utilizar no cálculo da potência capacitiva a ser inserida ou retirada após o seu término (tempo de 1 minuto). Esse tempo refere-se, em última análise, ao tempo entre cada ação de controle sucessiva. Conforme também mencionado para a análise anterior, é importante ressaltar que a programação das células relativas às potências capacitivas introduzidas ou retiradas (múltiplos de 50 kVAr) levou em conta a melhor opção do ponto de vista do atingimento do fator de potência pretendido.

DATA	HORA	nº interv.	P3f	Q3f	\$3f	FP3f	ĸw	KVAr ind solicitado pela carga	KVAr cap calculado para introdução ou retirada	in ou	(VAr cap efetivos troduzidos i retirados	KVAr cap em operação	Nº de estágios ativados	KVAr ind enxergado pelo controlador	FP
2/9/2008	21:45:58	580	294,07	363,57	467,61	0,63	294,07	363,57			0	0	0	363,57	0,63
2/9/2008	21:45:58	581	277,60	434,29	515,43	0,54	277,60	434,29			0	0	0	434,29	0,54
2/9/2008	21:45:58	582	340,45	444,56	559,95	0,61	340,45	444,56			0	0	0	444,56	0,61
2/9/2008	21:45:58	583	363,80	463,74	589,42	0,62	363,80	463,74			0	0	0	463,74	0,62
2/9/2008	21:45:58	584	365,01	490,52	611,43	0,60	365,01	490,52			0	0	0	490,52	0,60
2/9/2008	21:45:58	585	349,60	438,96	561,16	0,62	349,60	438,96			0	0	0	438,96	0,62
2/9/2008	21:45:58	586	418,93	445,88	611,81	0,68	418,93	445,88			0	0	0	445,88	0,68
2/9/2008	21:45:58	587	309,29	459,01	553,49	0,56	309,29	459,01			0	0	0	459,01	0,56
2/9/2008	21:45:58	588	392,78	467,53	610,62	0,64	392,78	467,53			0	0	0	467,53	0,64
2/9/2008	21:45:58	589	310,42	424,28	525,72	0,59	310,42	424,28			0	0	0	424,28	0,59
2/9/2008	21:45:59	590	305,87	358,54	471,28	0,65	305,87	358,54			0	0	0	358,54	0,65
2/9/2008	21:45:59	591	251,27	318,37	405,58	0,62	251,27	318,37			POTÊNCU		/Δ	318,37	0,62
2/9/2008	21:45:59	592	346,50	364,91	503,22	0,69	346,50	364,91			CALCULADA COM BASE NO			364,91	0,69
2/9/2008	21:45:59	593	196,55	282,23	343,92	0,57	196,55	282,23			COMPOR	TAMENTO	DA CARGA I	vo 282,23	0,57
2/9/2008	21:45:59	594	254,91	400,24	474,53	0,54	254,91	400,24		1				400,24	0,54
2/9/2008	21:45:59	595	375,00	440,14	578,23	0,65	375,00	440,14		/ 1				440,14	0,65
2/9/2008	21:45:59	596	383,97	435,34	580,48	0,66	383,97	435,34	/		0	0	0	435,34	0,66
2/9/2008	21:45:59	597	416,79	507,70	656,87	0,63	416,79	507,70			0	0	0	507,70	0,63
2/9/2008	21:45:59	598	350,50	462,70	580,47	0,60	350,50	462,70			0	0	0	462,70	0,60
2/9/2008	21:45:59	599	376,35	416,25	561,16	0,67	376,35	416,25	307,53		0	0	0	416,25	0,67
2/9/2008	21:46:00	600	310,67	436,59	535,84	0,58	310,67	436,59	307,53		300	300	6	136,59	0,9154
2/9/2008	21:46:00	601	260,22	404,44	480,92	0,54	260,22	404,44				300	6	104,44	0,9280
2/9/2008	21:46:00	602	303,48	366,59	475,91	0,64	303,48	366,59	\sim			300	6	66,59	0,9768
2/9/2008	21:46:00	603	300,65	417,86	514,78	0,58	300,65	417,86				300	6	117,86	0,9310
2/9/2008	21:46:00	604	347,56	426,58	550,24	0,63	347,56	426,58				300	6	126,58	0,9396
2/9/2008	21:46:00	605	419,39	517,90	666,42	0,63	419,39	517,90				300	6	217,90	0,8874
2/9/2008	21:46:00	606	462,62	479,20	666,07	0,69	462,62	479,20				300	6	179,20	0,9325
2/9/2008	21:46:00	607	313,30	373,93	487,83	0,64	313,30	373,93				300	6	73,93	0,9733
2/9/2008	21:46:00	608	367,46	478,74	603,51	0,61	367,46	478,74				300	6	178,74	0,8993
2/9/2008	21:46:00	609	254,18	373,01	451,38	0,56	254,18	373,01				300	6	73,01	0,9611

Tabela 7.5 – Planilha de cálculos das potências capacitivas para correção do fp a intervalos de 25 ms

Os gráficos resultantes da simulação da correção são apresentados nas Figuras 7.32 e 7.33.



Figura 7.32 – Caracterização gráfica do processo de correção do fp a intervalos de 1 minuto

O gráfico relativo ao número de estágios capacitivos ativados apresentado na Figura 7.33 é, obviamente, similar ao gráfico de *Inserção / retirada de capacitores* (integrante da Figura 7.32).



Figura 7.33 – Dinâmica de inserção e retirada de estágios capacitivos (intervalos de 1 minuto)

Os fatores de potência médios a cada minuto são apresentados no gráfico da Figura 7.34. Nesse gráfico, os valores que não atingiram o valor desejado (0,95_{INDUTIVO}) após o início do processo de correção encontram-se destacados em amarelo.



Figura 7.34 – Fatores de potência resultantes (intervalos de 1 minuto)

Os resultados obtidos na planilha e os gráficos gerados nessa análise permitem observar e concluir que:

.consideradas a dinâmica do sistema convencional de correção (kVArs capacitivos calculados com base nos parâmetros elétricos em um dado intervalo de 1 minuto e aplicados ao início do

minuto seguinte) e a rápida dinâmica operacional da carga, o fator de potência (corrigido no alimentador geral) manteve-se oscilante, não atingindo o valor pretendido (fp igual a 0,95_{INDUTIVO}) em todos os 29 intervalos de tempo.

Pressupondo-se que o controlador automático desse sistema convencional genérico tenha sido capaz de processar informações em tempos da ordem de 100 milisegundos (embora os cálculos para as correções tenham se realizado com base em intervalos de 1 minuto), hipótese bastante realística considerados os controladores de mercado, vários fps capacitivos foram calculados / "enxergados" ao longo do processo (cerca de 15% do total).

Ressalta-se que, a partir do início das ações de controle efetivo, o valor médio em todo o período analisado situou-se em patamar equivalente a 0,937_{INDUTIVO} (considerando-se o início dos procedimentos de correção cerca de 15 minutos antes do pico de potência reativa indutiva da carga). Todavia, é importante salientar que os fps médios lançados no penúltimo gráfico da Figura 7.32, bem como o fp médio geral aqui citado, foram determinados levando-se em conta o período de análise, compreendido entre 21:45:00 hs e 22:15:00 hs (período de faturamento dos fatores de potência indutivos); nesse período, a medição da concessionária de energia não "enxergaria" os fatores de potência capacitivos (contabilizando, nos instantes de sua ocorrência, "0" pulsos de energia reativa). Portanto, os valores médios foram calculados levando-se em conta apenas os fps indutivos situados entre 0,92 e 1.

7.2.8.5 Avaliações para um sistema comercial de correção dinâmica (tempo de resposta = 125 ms)

Na sequência das análises, a base de dados original foi adaptada para atendimento aos mesmos requisitos citados no subitem 7.2.8.3 (tempo de resposta para os módulos de potência equivalente a 25 ms), porém, considerando-se adicionalmente o tempo de retardo imposto por um controlador automático comercial (consultar subitem 5.1.3.2 *e) Temporizações entre chaveamentos sucessivos*), aqui definido como 100 milisegundos.

Tomando-se como base os registros coletados no instante de ocorrência da máxima demanda reativa indutiva no subintervalo considerado (843,84 kW e 1.078,19 kVAr, correspondentes ao fp = $0,62_{INDUTIVO}$), calculou-se, do mesmo modo que para as análises anteriores, a potência reativa capacitiva necessária à correção do fp para $0,95_{INDUTIVO}$ (800,84 kVAr), adotando-se, também, uma potência comercial de 800 kVAr, composta por 16 estágios de correção equivalentes a 50 kVAr (trifásicos).

Adotou-se nessa análise o mesmo subintervalo de 2 segundos considerado na análise abordada no subitem 8.2.8.3 (milisegundo 4.000 a milisegundo 6.000), para o qual foram planilhadas as grandezas de interesse e o processo básico de correção do fp. A nova planilha, apresentada na Tabela 7.6, também considera que o início do monitoramento se deu no milisegundo de nº 4.300. Porém, nessa situação, as ações efetivas de correção iniciaram-se no milisegundo de nº 4.425 (125 milisegundos depois). A sistemática de cálculo prevista na programação da planilha é a mesma adotada nas análises anteriores.

A programação das células relativas às potências capacitivas introduzidas ou retiradas (múltiplos de 50 kVAr) levou em conta a melhor opção do ponto de vista do atingimento do fator de potência pretendido. Estabeleceu-se uma instrução lógico-matemática capaz de decidir pela introdução ou retirada do múltiplo de 50, superior ou inferior à potência capacitiva calculada não múltipla de 50, como sendo o mais adequado perante as necessidades.

		-	-	-				-
Instante	ĸw	KVAr indutivos solicitados pela	KVAr capacitivos calculados para introdução	KVAr capacitivos efetivos introduzidos	KVAr capacitivos em operação	№ de estágios ativados	KVAr enxergados pelo controlador	Novo FP
		carga	ou retirada	ou retirados				
4000	835,12	895,94	0	0	0	0	895,94	0,6818
4025	782,65	859,64	0	0	0	0	859,64	0,6732
4050	730,18	823,34	0	0	0	0	823,34	0,6635
4075	677,71	787,04	0	0	0	0	787,04	0,6525
4100	625,25	750,74	0	0	0	0	750,74	0,6400
4125	560.35	651.46	0	0	0	0	651.46	0,6425
4175	512.90	601.83	0	0	0	0	601.83	0,6486
4200	475.45	552.19	ŏ	ŏ	0	0	552.19	0.6525
4225	459,79	542,14	0	0	0	0	542,14	0,6468
4250	444,12	532,09	0	0	0	0	532,09	0,6408
4275	428,46	522,05	0	0	0	0	522,05	0,6344
4300	412,79	512,00	0,00	0	0	0	512,00	0,6277
4325	387,81	492,53					492,53	0,6186
4350	362,82	473,06					473,06	0,6086
4375	312.85	455,59					433,39	0,5973
4400	333.06	445 26	376.32	400	400	8	45 26	0,0047
4450	353.27	456.41	570,52	400	400	8	56.41	0.9875
4475	373,47	467,55			400	8	67,55	0,9840
4500	393,68	478,69			400	8	78,69	0,9806
4525	396,01	487,71			400	8	87,71	0,9763
4550	398,35	496,73	-64,21	-50	350	7	146,73	0,9384
4575	400,68	505,74			350	7	155,74	0,9321
4600	403,01	514,76			350	7	164,76	0,9256
4625	431,08	560,65			350	7	210,65	0,8985
4675	487.21	652.44	15.80	0	350	7	302.44	0,8730
4700	515.27	698.33	10,00	U	350	7	348.33	0.8285
4725	546.82	742.19			350	7	392.19	0.8126
4750	578,37	786,04			350	7	436,04	0,7985
4775	609,92	829,89			350	7	479,89	0,7859
4800	641,48	873,75	142,30	150	500	10	373,75	0,8640
4825	674,41	881,85			500	10	381,85	0,8702
4850	707,34	889,95			500	10	389,95	0,8757
4875	740,28	898,05			500	10	398,05	0,8808
4900	820.31	914,25	162.00	150	650	10	254 47	0,8894
4950	834 48	894.68	102,90	150	650	13	244.68	0,9596
4975	848,65	884,90			650	13	234,90	0,9638
5000	862,82	875,12			650	13	225,12	0,9676
5025	874,80	905,36			650	13	255,36	0,9599
5050	886,78	935,60	-15,16	0	650	13	285,60	0,9519
5075	898,76	965,83			650	13	315,83	0,9434
5100	910,74	996,07			650	13	346,07	0,9348
5125	894,02	1016,60			650	13	366,60	0,9252
5150	860.57	1057,15	-5.97	0	650	13	387,13	0,9149
5200	843.84	1078 19	-3,87	0	650	13	407,00	0,9037
5225	854.83	1047.68			650	13	397.68	0.9067
5250	865,83	1017,16			650	13	367,16	0,9206
5275	876,83	986,64			650	13	336,64	0,9336
5300	887,82	956,12	124,81	100	750	15	206,12	0,9741
5325	836,42	920,25			750	15	170,25	0,9799
5350	785,01	884,38			750	15	134,38	0,9857
5375	733,60	848,51			750	15	98,51	0,9911
5400	648 72	760.00	-95.60	-100	750	15	02,04	0,9958
5450	615.25	727 11	-00,09	-100	650	13	77 11	0,9834
5475	581.78	684 34			650	13	34.34	0.9983
5500	548,31	641,57			650	13	-8,43	-0,9999
5525	553,10	650,36			650	13	0,36	1,0000
5550	557,89	659,15	-93,35	-100	550	11	109,15	0,9814
5575	562,68	667,94			550	11	117,94	0,9787
5600	567,46	676,73			550	11	126,73	0,9760
5625	558,45	677,45			550	11	127,45	0,9749
5650	549,44	678,18	74.00	EO	550	11	128,18	0,9739
5700	531.42	679.63	-14,22	-50	500	10	170.63	0,9493
5725	539.42	694 22			500	10	194 22	0.9473
5750	547.42	708.80			500	10	208.80	0.9343
5775	555,42	723,39			500	10	223,39	0,9278
5800	563,41	737,98	1,27	0	500	10	237,98	0,9212
5825	585,65	763,90			500	10	263,90	0,9117
5850	607,88	789,83			500	10	289,83	0,9027
5875	630,11	815,75			500	10	315,75	0,8940
5900	652,34	841,68	E0.70	50	500	10	341,68	0,8858
5925	663,66	846,76	52,79	50	550	11	296,76	0,9129
5950	686.20	051,84			550	11	306.02	0,9129
59/5	697.61	862.00			550	11	312.00	0,9129
3000	007,01	002,00	1				512,00	0,9129

Tabela 7.6 – Cálculos das potências capacitivas para correção do fp a intervalos de 125 milisegundos

Com a planilha, tornou-se possível caracterizar graficamente o comportamento das potências ativa (teoricamente invariável) e reativa, do fator de potência resultante e da inserção / retirada de estágios capacitivos no intervalo de tempo pré-estabelecido em 125 ms, conforme pode-se observar na Figura 7.35.



Figura 7.35 - Caracterização gráfica do processo de correção do fp a intervalos de 125 milisegundos

Note-se que, nessa abordagem, o processo de correção é explicitado de modo compatível com o comportamento esperado para um sistema de correção o fator de potência baseado em módulos de potência a tiristores, contemplando-se também a dinâmica de um controlador automático comercial que imponha um retardo de 100 ms.

Os dados que originaram os gráficos obtidos nessa análise, apresentados na Tabela 7.6, permitem observar e concluir que:

.a partir do início das ações de controle efetivo, o valor médio do fp no subintervalo analisado situou-se em patamar equivalente a $0,937_{INDUTIVO}$ (considerando-se o início dos procedimentos de correção cerca de 0,8 segundo antes do pico de potência reativa indutiva da carga); os valores máximo e mínimo indutivos atingiram, respectivamente, $0,9983_{INDUTIVO}$ e $0,7859_{INDUTIVO}$; no instante da máxima potência reativa demandada pela carga (destacado em amarelo na Tabela 7.6) verificou-se um fp igual a $0,8918_{INDUTIVO}$; no subintervalo considerado, houve a ocorrência de 1 registro associado a fator de potência capacitivo $(0,9999_{CAPACITIVO}, o que praticamente equivale ao fator de potência unitário);$

.considerada a dinâmica da carga em questão, a introdução do tempo adicional de 100 ms (imposto pelo controlador como tempo mínimo permissível para conexões / reconexões sucessivas) provoca maiores oscilações no fator de potência comparativamente às análises apresentadas no subitem 7.2.8.3 (tempo de resposta para os módulos de potência equivalente a 25 ms, sem se considerar o tempo de retardo do controlador); essa situação é esperada, haja vista que o tempo entre ações de controle efetivo elevou-se cinco vezes, tendo sido mantida a dinâmica operacional da carga.

Obs.: Para o mesmo subintervalo de análise equivalente a 2 segundos (milisegundo 4000 a milisegundo 6000) o valor médio do fp obtido com o sistema de correção convencional (a contatores) atingiria o patamar de $0,905_{INDUTIVO}$; no instante da máxima potência reativa demandada pela carga, tal sistema permitiria o atingimento de um fp = $0,779_{INDUTIVO}$; nota-se, portanto, a maior eficácia do sistema comercial a tiristores comparativamente ao sistema comercial convencional, mesmo com a introdução do tempo adicional de 100 ms imposto pelo controlador automático do fp.

O gráfico relativo ao número de estágios capacitivos ativados, apresentado na Figura 7.36, é, obviamente, similar ao gráfico de *Inserção / retirada de capacitores* (integrante da Figura 7.35). Nesse caso, nota-se um aproveitamento praticamente pleno dos bancos capacitivos previstos no sistema de correção (apenas um estágio de 50 kVAr não foi acionado).



Figura 7.36 – Dinâmica de inserção e retirada de estágios capacitivos (intervalos de 25 milisegundos)

7.2.8.6 Avaliações preliminares para um sistema conceitual baseado em módulos tiristorizados e em um *STATCOM-BT* conceitual

Objetivando-se uma última análise, a base de dados original foi novamente adaptada para compatibilização com a dinâmica da carga, porém, considerando-se a superposição das ações de controle de um sistema comercial com módulos tiristorizados (acionados por um controlador automático do fp) e um sistema adicional, baseado na concepção teórica de um *"STATCOM-BT"*. O diagrama unifilar básico desse sistema genérico está apresentado no Capítulo 6, mais especificamente na Figura 6.10.

No que se refere aos capacitores acionados por módulos tiristorizados adotou-se, da mesma forma que para as análises anteriores, uma potência comercial global de 800 kVAr, composta por 16 estágios de correção equivalentes a 50 kVAr (trifásicos). Quanto ao *"STATCOM-BT"*, previu-se, conforme a abordagem apresentada no Capítulo 6, subitem 6.2.3, um equipamento com potência máxima correspondente a um degrau (estágio) do banco capacitivo (50 kVAr nesse caso).

Na análise aqui apresentada, desenvolveu-se uma planilha de simulação considerando-se que o CAFP exerce a função de controle geral e o "*STATCOM - BT*", por sua vez, realiza a função de compensar os picos da curva de demanda de reativos, atuando para ajuste fino. Note-se que nesse caso, optou-se, conceitualmente, pela possibilidade de utilização do "*STATCOM-BT*" tanto para o fornecimento de até 50 kVAr_{CAPACITIVOS}, quanto para a absorção de até 50 kVAr_{INDUTIVOS}, em função, respectivamente, da escassez (fp abaixo do desejado) ou excesso (fp acima do desejado) na compensação de reativos a cada ação de controle conjunto.

Adotou-se o mesmo subintervalo de 2 segundos considerado na análise apresentada no subitem 8.2.8.5 (milisegundo 4.000 a milisegundo 6.000), para o qual também foram planilhadas as grandezas de interesse e inseridas as formulações para o processo básico de correção do fp. A nova planilha, apresentada parcialmente na Tabela 7.7 (período de 1 segundo), também considera que o início do monitoramento se deu no milisegundo 4.300.

As dinâmicas operacionais de ambos os sistemas de controle do fp (envolvendo os tempos para sensoriamento, processamento de informações, cálculos e as ações de controle efetivo) foram definidas das seguinte forma:

.Controlador automático (comercial) + Módulos tiristorizados (comerciais): tempo global de 125 ms, similarmente ao que foi considerado na análise apresentada no subtitem 7.2.8.5;

."STATCOM-BT" (conceitual): tempo global de resposta equivalente a 5 ms; julga-se que esse tempo entre ações de controle consecutivas seja compatível com a operação normal / adequada de um equipamento com potência nominal de 50 kVAr (note-se que, para a síntese de grandezas a 60 Hz à saída do "STATCOM-BT" a cada 5 ms, e levando-se em conta que os chaveamentos da ponte inversora fossem realizados em tempos 20 vezes menores, ter-se-ia uma frequência de chaveamento de aproximadamente 4 kHz, patamar que se vê na prática para conversores de frequência em BT e que, em tese, não sobreelevaria significativamente as perdas no equipamento).

Nas simulações para essa análise, as ações efetivas de correção iniciaram-se no milisegundo 4.305 pelo "*STATCOM-BT*" (5 milisegundos depois do instante de início do monitoramento), prosseguindo a cada 5 ms subseqüentes. Paralelamente, a cada 125 ms a partir do início do monitoramento, foram consideradas as ações de controle do fp por parte dos capacitores acionados por módulos tiristorizados. Portanto, há instantes em que as atuações se superpõem.

A sistemática de cálculo prevista na programação da planilha é a mesma adotada nas análises anteriores. A programação das células relativas às potências capacitivas introduzidas ou retiradas pelos módulos tiristorizados (múltiplos de 50 kVAr) levou em conta a melhor opção do ponto de vista do atingimento do fator de potência pretendido. Estabeleceu-se uma instrução lógico-matemática capaz de decidir pela introdução ou retirada do múltiplo de 50, superior ou inferior à potência capacitiva calculada não múltipla de 50, como sendo o mais adequado perante as necessidades. No caso do "*STATCOM-BT*", as potências reativas capacitivas (positivas na planilha) ou indutivas (negativas na planilha) necessárias para o ajuste fino na correção puderam assumir qualquer valor, até um limite de 50 kVAr.

	Instante	KW	KVAr indutivos solicitados pela carga	KVAr capacitivos calculados para introdução ou retirada	KVAr capacitivos efetivos introduzidos ou retirados	KVAr capacitivos em operação	Nº de estágios ativados	KVAr enxergados pelo controlador	Novo FP	
	4300	412,79	512,00	0,00	0	0	0	512,00	0,6277	
	4325 4350	387,81 362,82	492,53 473,06					492,53 473,06	0,6186 0,6086	
	4375	337,84	453,59					453,59	0,5973	
	4425	333,06	445,26	376,32	400	400	8	45,26	0,9909	
	4450 4475	353,27 373,47	456,41 467,55			400	8	56,41 67,55	0,9875	
	4500	393,68	478,69			400	8	78,69	0,9806	
	4525 4550	398,35	407,71	-64,21	-50	350	7	146,73	0,9783	
	4575	400,68	505,74 514,76			350	7	155,74	0,9321	
	4625	431,08	560,65			350	7	210,65	0,8985	
	4630	487,21	652,44	15,80	0	350	7	302,44	0,8496	
	4700 4725	515,27 546,82	698,33 742,19			350 350	7	348,33 392,19	0,8285	
	4750	578,37	786,04			350	7	436,04	0,7985	
	4 775 4800	641,48	873,75	142,30	150	500	10	373,75	0,8640	
	4825 4850	674,41 707.34	881,85 889,95			500 500	10 10	381,85 389,95	0,8702	
	4875	740,28	898,05			500	10	398,05	0,8808	
	4900 4925	806,15 820,31	9 14,25 904,47	162,90	150	650	13	254,47	0,8894	
	4930 4935	823,15 825.98	902,51 900,55	-15,16		650 650	13 13	267,67 253,44	0,9510	
	4940	828,81	898,60	-18,05		650	13	266,64	0,9519	
	4945	831,65 834,48	896,64	-5,78	Κ.	650	13	252,42	0,9569	
	4955 4960	837,31 840.15	892,73 890,77	-8,66		<u>650</u>	13 13	251,39 264,59	0,9578	
	4965	842,98	888,81	-11,55	ΑΤυΑÇΑΟ	650	13	250,37	0,9586	
	4970	848,65	884,90	-26,71	DO	650	13	263,57 249,34	0,9547	
	4980 4985	851,48 854 32	882,95 880,99	-29,60	STATCOM	650 650	13 13	262,54	0,9556	
	4990	857,15	879,03	-32,48		650	13	261,52	0,9565	
	4995 5000	862,82	877,08	-20,21 -35,37		650	13	260,49	0,9573	
	5005 5010	865,21 867.61	881,17 887,21	-23,10 -30,11		650 650	13 13	254,27 267,33	0,9594	
	5015	870,01	893,26	-17,84		650	13	261,10	0,9578	
	5020	872,40	905,36	-24,85		650	13	267,94	0,9562	
	5030 5035	877,19 879,59	911,41 917,45	-19,59		650 650	13 13	281,00 274,78	0,9523	
	5040	881,99	923,50	-14,33		650	13	287,83	0,9507	
	5050	886,78	935,60	-24,23	0	650	13	309,83	0,9329	
	5055 5060	889,18 891,57	941,64 947,69	18,36 -18,97	Ē/	650 650	13 13	273,29 316,66	0,9559	
SUPERPOSIO	$\tilde{A}_{0,70}^{5065}$	893,97	953,74 959 79	23,62	►	650	13 13	280,12	0,9542	
DAS ATU	ACOTS	898,76	965,83	28,88 A	UAÇÃO DOS	650	13	286,96	0,9526	
FFETIVAS	5080	901,16 903,56	971,88 977,93	-8,45	<u> </u>	650	13 13	293,79	0,9389	
EFEIIVAS	5090	905,95	983,98 990.03	-3,19 M	DDULOS +	<u>650</u>	13 13	<u>337,17</u> 300.63	0,9372	
STATCOM	E POS	910,74	996,07	2.07 CA	PACITORES	650	13	344,00	0,9355	
MÓDULOS	5105 51 1 0	907,40 904,05	1000,18	44,66 7,28		650	13 13	305,52 347,01	0,9477	
	5115 5120	900,71 897.36	1008,39 1012,50	49,86 12,48		650 650	13 13	308,53 350.02	0,9460	
CAPACITOR	ES5125	894,02	1016,60	50,00		650	13	316,60	0,9426	
	5135	887,33	1020,71	50,00		650	13	324,82	0,9314	
	5140 5145	883,98 880,64	1028,92 1033,03	33,16 50,00		650 650	13 13	345,76 333,03	0,9313 0,9354	
	5150 5155	877,29 873,95	1037,13 1041 24	43,58		650 650	13 13	343,56 341,24	0,9311	
	5160	870,60	1045,35	50,00		650	13	345,35	0,9295	
	5165 5170	867,26 863,91	1049,45	50,00 50,00		650 650	13 13	349,45 353,56	0,9275	
	5175 5180	860,57	1057,66	68,36 6.45	50	700	14	289,31	0,9479	
	5185	853,88	1065,88	50,00		700	14	315,88	0,9379	
	5190	850,53 847,18	1069,98	35,22 50,00		700	14 14	334,76 324,09	0,9305	
	5200 5205	843,84 846,04	1078,19 1072.09	45,63 50,00		700 700	14 14	332.56 322.09	0.9304 0.9346	
	5210	848,24	1065,99	44,01		700	14	321,98	0,9349	
	5215 5220	850,44 852,64	1059,88	43,17 37,18		700	14 14	316,71 316,60	0,9371	
	5225 5230	854,83 857.03	1047,68 1041.57	36,35 30,36		700 700	14 14	311,33	0,9396	
	5235	859,23	1035,47	29,52		700	14	305,95	0,9421	
	5240 5245	863,63	1029,37	≥3,53 22,69		700	14	305,83	0,9424	
	5250 5255	865,83 868.03	1017,16	16,71 15,87		700 700	14 14	300,45 295,19	0,9447	
	5260	870,23	1004,95	9,88		700	14	295,07	0,9470	
	5265 5270	672,43 874,63	998,85 992,75	9,04 3,05		700	14 14	289,81 289,69	0,9490	
	5275 5280	876,83 879.02	986,64 980,54	2,22		700 700	14 14	284,43 284,31	0,9512	
	5285	881,22	974,43	-4,61		700	14	279,05	0,9533	
	5290 5295	883,42 885,62	968,33 962,23	-10,60		700	14 14	278,93	0,9536	
	5300	887.82	956.12	-10.97	0	700	14	267.10	0.9576	

Tabela 7.7 – Potências capacitivas para correção do fp (Módulos+Capacitores e STATCOM-BT)

Com a planilha, tornou-se possível caracterizar graficamente a inserção / retirada de potência reativa capacitiva pelos módulos tiristorizados, a injeção de potência capactiva / absorção de potência indutiva pelo "*STATCOM-BT*" e o fator de potência resultante ("enxergado" pelo sistema a montante do conjunto), conforme pode-se observar na Figura 7.37.



Figura 7.37 – Caracterização gráfica da compensação de reativos (Módulos+Capacitores e STATCOM-BT)

As Figuras 7.38, 7.39 e 7.40 apresentam, respectivamente, e para o período de 0,625 segundo, a dinâmica de atuação do "*STATCOM-BT*", a superposição (e valor resultante) das ações de compensação de reativos dos bancos acionados por módulos tiristorizados e do "*STATCOM-BT*", e a potência reativa no alimentador eletricamente a montante do conjunto antes e depois das ações de correção do fp.



Figura 7.38 – Dinâmica de atuação do STATCOM-BT (tempo de resposta = 5 ms)



Figura 7.39 – Compensação de reativos (Módulos+Capacitores, STATCOM-BT e compensação resultante)



Figura 7.40 – Potências reativas no alimentador antes e depois da correção

Os dados que originaram os gráficos obtidos nessa análise, parcialmente apresentados na Tabela 7.7, permitem observar e concluir que:

.a partir do início das ações de refinamento no controle efetivo por parte do "STATCOM-BT", o valor médio do fp no subintervalo analisado situou-se em patamar equivalente a 0,953_{INDUTIVO} (considerando-se o início de sua operação menos de 0,3 segundo antes do pico de potência reativa indutiva da carga); os valores máximo e mínimo indutivos proporcionados pela ação conjunta dos módulos + capacitores e "STATCOM-BT" atingiram, respectivamente, 0,9971_{INDUTIVO} e 0,9238_{INDUTIVO}; no instante da máxima potência reativa demandada pela carga (destacado em amarelo na Tabela 7.7) verificou-se um fp igual a 0,9304_{INDUTIVO}; no subintervalo considerado, não houve a ocorrência de registros associados a fator de potência capacitivo.

.considerada a dinâmica da carga em questão, a introdução do "STATCOM-BT" conferiu ao conjunto de compensação uma melhor efetividade no controle, propiciando um fp resultante pouco oscilatório comparativamente ao obtido nas análises apresentadas nos subitens 7.2.8.3 a 7.2.8.5; essa situação é esperada, haja vista que o tempo entre açõs de controle efetivo dos picos oscilatórios de potência reativa reduziu-se a 5 milisegundos, tendo sido mantida a dinâmica operacional da carga; além disso, com a inserção do "STATCOM-BT", permitiu-se a absorção de potência reativa indutiva nos subintervalos em que houve um ligeiro excesso de potência capacitiva fornecida pelos bancos de capacitores.

7.2.9 A performance dos sistemas sob a ótica da medição da concessionária de energia

Até aqui foram apresentados valores de fatores de potência resultantes passíveis de detecção pelos sistemas de medição das concessionárias de energia elétrica, porém, sob o ponto de vista puramente elétrico (esses índices podem, inclusive, ser recuperados a partir da memória de massa dos medidores para períodos da ordem de um mês ou até mesmo para períodos um pouco superiores a isso). Todavia, <u>no que se refere aos parâmetros elétricos para a composição do faturamento por baixo fp</u>, os fatores de potência horários superiores a 0,92 (indutivos ou capacitivos, dependendo do horário do dia) são "descartados" pela medição.

Os aspectos relativos à legislação para faturamento associado ao fator de potência foram abordados no Capítulo 3 desta Dissertação, mais especificamente no subitem 3.2.2. No Capítulo 4, subitens 4.2 e 4.4.3, apresentaram-se as bases da sistemática a partir da qual os medidores eletrônicos das concessionárias processam e avaliam o fator de potência a cada intervalo horário ao longo de um ciclo completo de faturamento. Relembrando resumidamente os aspectos importantes estritamente associados ao fator de potência, tem-se:

-o sistema de medição amostra e captura sinais analógicos de tensão e corrente, convertendoos para sinais digitais e processa os cálculos das grandezas elétricas de interesse (60 Hz) para o intervalo de 1 segundo cheio (potências ativa P_1 , aparente S_1 e reativa Q_1);

-as grandezas são processadas a cada segundo durante 1 hora, estabelecendo-se os valores médios horários;

-para cada período horário, calculam-e o ângulo entre a potência ativa P_1 média e aparente S_1 média, o fator de potência fp_t , a potência ativa P_2 associada ao fator de potência de 0,92 mantendo-se constante a potência aparente S_1 média já determinada, a diferença entre as potências ativas $P_2 e P_1$ média, a UFER e a UFDR;

-no período passível de faturamento dos fatores de potência indutivos inferiores a 0,92 descartam-se os fatores de potência horários superiores a esse valor (e os fatores de potência capacitivos), não havendo, nesses períodos horários, parcelas de contribuição de UFER e UFDR para o faturamento mensal por baixo fp;

-no período passível de faturamento dos fatores de potência capacitivos inferiores a 0,92 descartam-se os fatores de potência horários superiores a esse valor (e os fatores de potência indutivos), não havendo, nesses períodos horários, parcelas de contribuição de UFER e UFDR para o faturamento mensal por baixo fp.

Para os sistemas aqui investigados, o comportamento do fator de potência foi avaliado para períodos amostrais bem inferiores a 1 hora, haja vista o mínimo intervalo de integralização disponível no registrador eletrônico quando da medição em campo para a caracterização da dinâmica operacional da carga (100 ms) e a dificuldade em se sistematizar e manipular planilhamentos de dados interpolados para 5, 25 e 125 ms ao longo de todo um período horário (o que se faria para ajustar a base primária de dados aos sistemas de correção dinâmica do fp). De qualquer forma, e abordando a questão de maneira conceitual, se, para cada sistema, os resultados obtidos nos intervalos de análise fossem mantidos, nenhum deles teria provocado a ocorrência de baixo fp horário sob a ótica da medição da concessionária de energia para fins de faturamento. Entretanto vale ressaltar que a garantia de manutenção do fp em patamares mais elevados e próximos do valor pretendido (0,95) ficou efetivamente evidenciada apenas para os sistemas de correção dinâmica. Diferentemente do sistema automático convencional, tais sistemas foram capazes de manter o fp em níveis satisfatórios mesmo no intervalo de maior solicitação de reativos. Essa performance positiva mostrou-se mais acentuada para os sistemas com módulos tiristorizados / capacitores e dinâmica de 25 ms e para o sistema composto por módulos tiristorizados com dinâmica de 125 ms + STATCOM-BT.

Para o sistema com *módulos tiristorizados / capacitores* e dinâmica de 125 ms (sem a presença do *STATCOM*), é importante salientar que os resultados, como para os demais sistemas dinâmicos, foram obtidos para a condição mais adversa observada quando da formação da base geral de dados, ou seja, para o intervalo de maior solicitação de reativos. Isso leva a crer que, nos demais períodos, seu desempenho tenderia a ser melhor, podendo proporcionar, a cada período horário, fatores de potência mais próximos do valor ajustado no controlador.

7.2.10 Avaliações adicionais e conclusões técnicas sobre os sistemas investigados

Com base nos resultados das análises apresentadas nos subitens 7.2.8.3 a 7.2.8.6, algumas avaliações, comentários adicionais, projeções e conclusões merecem reafirmação e destaque. São eles:

-Exatidão na correção do fp (fp parametrizado / ajustado x fp obtido)

Nota-se que a proximidade entre o fp pretendido (ajustado nos sistemas de controle) e o fp efetivamente obtido está associada ao tempo de resposta do sistema de correção, ou seja, à velocidade com que o sistema esteja apto a monitorar as grandezas elétricas, processar

cálculos e atuar efetivamente para a compensação de reativos. Sob esse aspecto, e se avaliada a mesma base temporal de dados primários (mesmo intervalo de tempo de correção), os sistemas de compensação dinâmica do fp, obviamente, respondem mais satisfatoriamente aos requisitos de correção para cargas com dinâmica rápida, conduzindo a fatores de potência operacionais mais próximos do valor ajustado. A Tabela 7.8 apresenta os resultados para o intervalo no qual registrou-se a maior potência reativa demandada pela carga.

Sistema de compensação de reativos	Fator de Potência ajustado (premissa)	Intervalo analisado (correção efetivamente em curso)	Fator de Potência obtido
Automático convencional (capacitores acionados por contatores)	0,95	1,7 s	0,905 _{indutivo}
Automático dinâmico (capacitores acionados por módulos tiristorizados) com tempo médio global de resposta de 25 ms	0,95	1,7 s	0,948 _{indutivo}
Automático dinâmico (capacitores acionados por módulos tiristorizados) com tempo médio global de resposta de 125 ms	0,95	1,7 s	0,937 _{indutivo}
Conceitual – Automático dinâmico (módulos + capacitores) e <i>STATCOM-BT</i>	0,95	0,625 s (compreendido no intervalo de análise para os demais sistemas)	0,953 _{indutivo}

Tabela 7.8 – Exatidão na correção do fp – Paralelo comparativo

No caso do sistema automático convencional, o fator de potência médio obtido para um maior intervalo de análise (29 minutos aproximadamente) atingiu um patamar superior, equivalente a 0,937_{INDUTIVO} (mesmo valor obtido para o sistema dinâmico em apenas 1,7 s de atuação, considerado o tempo de resposta de 125 ms). Todavia, há que ressaltar que, em função da dinâmica operacional tomada como premissa (1 minuto entre ações efetivas de correção), e

considerada a dinâmica bem mais rápida da carga, esse resultado foi favorecido por várias ocorrências de fatores de potência indutivos bem acima do valor ajustado (próximos da unidade) ou mesmo pelos fps unitários e capacitivos. Infere-se, portanto, que a correção por esse sistema poderia causar, a reboque, excessos temporários de energia reativa capacitiva na rede sem a pronta atuação do controlador para reduzi-los, incorrendo em outras conseqüências em princípio não desejadas (elevações significativas na tensão, por exemplo). Além disso, levando-se em conta que o tipo de carga em questão apresenta um padrão de comportamento eletroenergético ciclicamente repetitivo ao longo das jornadas de produção, provavelmente o fp obtido pela ação do sistema convencional ao longo dos 29 minutos analisados seria aproximadamente mantido em 1 hora (e, possivelmente, a cada hora) de operação normal da planta. Isto quer dizer que, parametrizando-se o controlador automático para o atingimento de um fp equivalente a 0,95, o sistema convencional não seria capaz de atender aos objetivos nesse caso específico (embora, em média, o fator de potência mínimo de referência, equivalente a 0,92, não tenha sido transgredido no período de análise).

Por outro lado, os sistemas dinâmicos mostraram-se capazes de, em pouco menos de 2 segundos de ação efetiva (e em menos de 1 segundo no caso do sistema implementado com a utilização de um "*STATCOM-BT*" conceitual) atingir patamares médios de correção que superaram o patamar obtido pelo sistema convencional considerados os 29 minutos de sua atuação. Ressalta-se ainda, que os valores apresentados na Tabela 7.8 referem-se ao intervalo em que ocorreu a máxima demanda de potência reativa da carga (pior condição sob o ponto de vista das necessidades de correção). Portanto, para os demais períodos da jornada de operação, é de se esperar um comportamento ainda mais satisfatório para os sistemas dinâmicos, uma vez que os ciclos operativos da carga se repetem temporalmente, porém, com menores picos de demanda.

Em outras palavras, pode-se considerar que os fatores de potência obtidos a partir da atuação dos sistemas automáticos dinâmicos resultaram de uma busca mais focada pelo "*fator de potência alvo*" enquanto que o sistema automático convencional apresentou, para o caso analisado, uma performance bem menos refinada, exercendo um controle apenas relativo.

Ainda no que tange aos desvios entre os fatores de potência ajustado e operacional, nota-se que o fp ajustado no controlador automático constitui-se como um parâmetro importante. Quanto mais lenta for a dinâmica de atuação do sistema de correção (face à dinâmica da carga), mais elevado deverá ser esse ajuste, buscando-se evitar que a medição "enxergue" um fp horário inferior ao valor de referência (0,92). Na Tabela 7.9 podem-se observar resultados

de simulações realizados nas planilhas de análise para vários fatores de potência ajustados no controlador automático de cada sistema de correção aqui avaliado.

		Fator de Potência ajustado no CAFP						
	Intervalo	0,95 _{indutivo}	0,94 _{indutivo}	0,93 _{indutivo}	0,92 _{INDUTIVO}			
Sistema de Correção do fp		Fato potenci se	or de Potência ialmente "enxe mantido pelo	operacional m ergado" pela n período de 1 h	iédio nedição ora			
Automático convencional	2 s (*)	0,905 _{INDUTIVO}	0,879 _{INDUTIVO}	0,879 _{INDUTIVO}	0,85 _{indutivo}			
(capacitores acionados por contatores)	29 min	0,937 _{INDUTIVO}	0,926 _{INDUTIVO}	0,915 _{INDUTIVO}	0,907 _{INDUTIVO}			
Automático dinâmico (capacitores acionados por módulos tiristorizados) com tempo médio global de resposta de 25 ms	1,7 s (*)	0,948 _{INDUTIVO}	0,938 _{INDUTIVO}	0,928 _{INDUTIVO}	0,918 _{INDUTIVO}			
Automático dinâmico (capacitores acionados por módulos tiristorizados) com tempo médio global de resposta de 125 ms	1,7 s (*)	0,937 _{INDUTIVO}	0,928 _{INDUTIVO}	0,915 _{INDUTIVO}	0,908 _{INDUTIVO}			
Conceitual – Automático dinâmico (módulos + capacitores) e <i>STATCOM-</i> <i>BT</i>	0,625 s (*) (**)	0,953 _{INDUTIVO}	0,945 _{INDUTIVO}	0,933 _{INDUTIVO}	0,927 _{INDUTIVO}			

Tabela 7.9 – Fatores de potência ajustados e operacionais – Paralelo comparativo

(*) contempla o intervalo de ocorrência da máxima demanda de reativos

(**) os resultados consideram que os mesmos fatores de potência sejam ajustados no CAFP e no sistema de controle do *STATCOM-BT*

-Dinâmica de atuação e estabilidade no processo de correção do fp

Considerada a rápida dinâmica operacional da carga, outro aspecto a ser destacado refere-se à estabilidade no processo de correção do fator de potência, o que decorre da velocidade de atuação de cada sistema ou, em outras palavras, de seus respectivos tempos de resposta. Notou-se que, quanto menores são os intervalos entre ações consecutivas de controle efetivo, mais estável ou menos oscilatória é a curva do fator de potência obtido em um mesmo intervalo de tempo analisado. Em se tratando dos sistemas automáticos dinâmicos, essa situação fica patente se observados os gráficos inseridos nas Figuras 7.29, 7.35 e 7.37

anteriormente apresentadas (observar as curvas relativas ao comportamento do fator de potência).

No que se refere ao sistema automático convencional, a Figura. 7.41 revela, para o intervalo de 1,7 s extraído da base geral de dados (no qual houve o registro da máxima demanda de potência reativa pela carga), o comportamento bastante oscilatório do fator de potência (bem mais pronunciado que para os sistemas com acionamento por eletrônica de potência), haja vista a diferença entre a dinâmica operacional da carga e a dinâmica do sistema de compensação.



Figura 7.41 – Sistema convencional – comportamento oscilatório do fp

-Utilização efetiva e manobra de bancos capacitivos

No que se refere ao número de manobras efetivas (ligações e desligamentos) dos bancos capacitivos, observou-se haver uma correlação com o tempo de resposta do sistema de correção. Em princípio, quanto mais curtos forem os tempos entre as ações consecutivas de controle, maior será o número de manobras de unidades capacitivas para um mesmo intervalo de tempo. No caso do sistema composto por *módulos tiristorizados / capacitores + STATCOM-BT*, em que pese a dinâmica mais rápida do *STATCOM* (tempo de resposta de 5 ms), o número de manobras para o intervalo de tempo analisado equivaleu-se ao número obtido para o sistema apenas com *módulos tiristorizados / capacitores* e dinâmica de 125 ms.

Em princípio, isso pode ser explicado pela dinâmica de atuação do conjunto *controlador automático* + *módulos*, responsável pelo acionamento da potência capacitiva básica (principal) para correção, e cujo tempo de resposta conjunto equivale a 125 ms.

No que se refere ao sistema automático convencional (a contatores), verificou-se que nenhum capacitor foi ligado ou desligado no intervalo de análise (nove permaneceram operantes). É importante lembrar que, nesse caso, os capacitores que permaneceram em operação foram acionados segundos antes, como resultado do processamento de informações por parte do controlador automático no minuto anterior (e não no intervalo em questão), e que uma nova intervenção para correção seria efetivada apenas posteriormente.

Pelos gráficos apresentados na Figura 7.42, pode-se comparar os sistemas sob esse aspecto. Outro aspecto que também pode ser observado nessa figura e que merece destaque refere-se à utilização efetiva dos capacitores disponíveis. Verificou-se, em princípio, que quanto mais rápidas forem as ações consecutivas de controle pelo sistema de correção do fp (fundamentalmente por parte do controlador automático), maior será a possibilidade de utilização plena do banco capacitivo disponibilizado.

No caso do sistema com *módulos tiristorizados / capacitores* com dinâmica de 25 ms a utilização do banco foi plena no instante de máxima demanda de potência reativa pela carga. Para o sistema com *módulos tiristorizados / capacitores* com dinâmica de 125 ms a utilização do banco foi quase plena e apenas um dos estágios capacitivos não foi acionado nos instantes próximos ao de ocorrência da máxima demanda de reativos. No caso do sistema composto por *módulos tiristorizados / capacitores* com dinâmica de 125 ms + *STATCOM-BT*, percebeu-se um elevado nível de utilização dos bancos (quatorze dos dezesseis estágios foram acionados), porém, inferior ao do mesmo sistema sem a presença do *STATCOM*. Tal situação pode ser explicada pelo fato de que o *STATCOM* efetivou correções dos picos oscilatórios de reativos de tempo entre ações consecutivas do controlador automático do fp. Sendo assim, e como o controlador atua realizando correções em um dado instante com base nos parâmetros elétricos por ele "enxergados" ao longo do período anterior, era de se esperar que uma menor potência capacitiva a inserir fôsse calculada por ele e acionada a cada intervenção efetiva.



Figura 7.42 – Manobra e utilização efetiva dos bancos capacitivos disponíveis

Quanto ao sistema automático convencional, verificou-se uma baixa utilização do banco capacitivo, ainda que o intervalo de análise tenha contemplado o instante de ocorrência da máxima demanda de reativos. Obviamente, isso se explica pela própria dinâmica imposta pelo controlador (bem mais lenta que a dinâmica operacional da carga), necessária para esse tipo de sistema. Com base nisso, pode-se também reafirmar alguns aspectos associados a esse sistema (já citados anteriormente) relativamente à instabilidade na correção do fp revelada pela alternância entre períodos com excesso ou com escassez de capacitores pois, em geral, os controladores automáticos atuam em um determinado instante com base na média dos parâmetros elétricos por ele "enxergados" em um período anterior (período de 1 minuto aqui adotado como premissa para o sistema convencional). Portanto, para o sistema automático convencional pode-se considerar que, quanto mais defasado for o tempo entre suas atuações consecutivas comparativamente à dinâmica operacional da carga, e quanto mais pronunciados forem os picos de solicitação de reativos em comparação com a média demandada, maiores serão as chances de que os bancos capacitivos disponíveis sejam subutilizados. Admite-se portanto que, em se tratando de cargas com dinâmica rápida, a potência capacitiva necessária calculada e implantada para a compensação da máxima solicitação de reativos (detectada por medição prévia ao início de um estudo de correção do fp) pode não vir a ser integralmente utilizada por um sistema de correção automático convencional, simplesmente porque tal sistema poderá não "enxergar" essa solicitação na prática. Em outras palavras, perante a presença de picos de reativos de curta duração, ainda que freqüentes, o controlador automático processará informações que possivelmente não refletirão de maneira aproximada tais solicitações. O fp será controlado pela média da potência reativa solicitada no período anterior, podendo, dependendo do caso, desviar-se consideravelmente do valor alvo pretendido. Essa projeção é particularmente relevante uma vez que o investimento em bancos capacitivos e dispositivos de acionamento (dimensionados e pretensamente utilizáveis para a

adequada compensação das cargas com dinâmica rápida) poderá traduzir-se em um sistema convencional com utilização apenas moderada e significativo grau de osciosidade

Finalmente é importante enfatizar que, se adequadamente aplicados, os sistemas dinâmicos, podem proporcionar benefícios adicionais que vão além da correção mais focada e estável do fator de potência. A melhor performance das instalações elétricas e equipamentos, proporcionada pela compensação de reativos em "tempo real" fundamentalmente no que se refere à preservação dos níveis de tensão tanto quanto possível, traduz-se em uma série de benefícios correlatos que devem ser considerados quando da definição da solução a ser

adotada em ambientes industriais nos quais predominem as cargas com rápida dinâmica operacional. Portanto, conclui-se que, nesses casos, a aplicação dos sistemas dinâmicos para a correção do fp deve ser avaliada levando-se em conta os benefícios adicionais a serem obtidos sob a ótica da *Qualidade da Energia* (consultar o Apêndice 2).

8. Conclusões Finais

Neste capítulo são apresentados os principais comentários e conclusões acerca dos resultados obtidos no trabalho realizado.

Sob a ótica específica da *engenharia de aplicação*, esta Dissertação procurou caracterizar os sistemas para correção do fator de potência em baixa tensão comercialmente disponíveis no mercado (convencionais e dinâmicos), bem como avaliar os principais aspectos de seu emprego objetivando a compensação de reativos / correção do fator de potência de cargas industriais com rápida dinâmica operacional. Adicionalmente, buscou-se investigar, em caráter preliminar, um sistema ainda não disponível comercialmente e a ser pesquisado com maior profundidade, configurado por um conjunto composto por *módulos tiristorizados / capacitores estáticos* e por um *STATCOM-BT* conceitual, com o intuito de se possibilitar um maior refinamento nas compensações dos picos de demanda de potência reativa.

Espera-se que a compilação e sistematização das informações apresentadas ao longo de todo o texto, bem como os resultados do caso real apresentado no Capítulo 8, possam ser úteis aos profissionais da área elétrica atuantes nos segmentos de consultoria, projetos e manutenção, fundamentalmente quando da necessidade de se abordar um problema relacionado ao fator de potência e às alternativas de mercado existentes para sua correção em baixa tensão.

Em se tratando da correção do fp de cargas com dinâmica rápida, as principais conclusões a serem destacadas sob o aspecto técnico são:

-de acordo com a legislação em vigor, o fator de potência é monitorado pela medição da concessionária de energia elétrica hora a hora, devendo estar corrigido a cada período horário ao longo de um ciclo completo de faturamento (aproximadamente um mês) para que se evitem ônus adicionais nas contas de energia; todavia, para o cálculo de cada valor horário, utilizam-se valores médios horários das grandezas elétricas calculadas a cada segundo cheio; sendo assim, embora no perído de 1 hora possam haver intervalos de tempo em que o fp esteja insatisfatório e, ainda assim, ser registrado um fp horário satisfatório, a garantia plena e absoluta de correção estará assegundo (acima de 0,92 indutivo ou capacitivo, dependendo do período do dia);

-a dinâmica de atuação global de um sistema de correção (envolvendo o sensoriamento das grandezas elétricas tensão e corrente, processamento digital, cálculos e comandos efetivos) influenciará diretamente na performance do processo de compensação de reativos, afetando a exatidão da correção (maior ou menor proximidade entre o fator de potência operacional obtido e o fator de potência "alvo" parametrizado no controlador), o nível de oscilação dos fatores de potência resultantes ao longo do tempo e o grau de utilização efetiva dos bancos capacitivos previamente dimensionados e disponibilizados para a correção; os resultados serão tão mais satisfatórios quanto menor for o tempo de resposta do sistema de correção comparativamente ao ciclo operativo da carga (note-se que, nessa Dissertação, as cargas com dinâmica rápida foram caracterizadas como equipamentos que solicitam da rede de alimentação, repetitivamente e em frações de segundo ou, no máximo, em alguns segundos, elevados níveis de potência ativa e reativa, apresentando sucessivos intervalos de alternância entre carga baixa / média e picos de carga);

Obs.: considera-se que a correlação entre a dinâmica do sistema de correção, a dinâmica operacional da carga e a efetividade global do processo de compensação de reativos seja, dentre outros, um bom tema para aprofundamento nessa área (ver Capítulo 9).

-em princípio, fundamentalmente devido ao seu curto tempo de resposta, os sistemas dinâmicos baseados na eletrônica de potência respondem de maneira mais adequada às necessidades de correção do fp de cargas com dinâmica rápída se comparados com o sistema convencional (capacitores acionados por contatores); além disso, outras funcionalidades são obtidas, tais como a eliminação das correntes de "inrush" na energização dos capacitores (propiciando melhorias na regulação de tensão e nos índices de Qualidade da Energia), menores oscilações no fator de potência ao longo do tempo e a melhor utilização dos bancos capacitivos instalados;

-existe uma considerável possibilidade de que um sistema de correção convencional não utilize plenamente os bancos de capacitores quando de sua operação para a compensação de reativos solicitados por cargas de dinâmica rápida; tal possibilidade se deve ao fato de que, em geral, as decisões do controlador automático com vistas à correção baseiam-se na média das grandezas elétricas monitoradas no período anterior e, provavelmente, os maiores picos ocorridos não serão plenamente "enxergados" (picos para os quais a potência capacitiva necessária deve ser dimensionada com base em medições prévias para a correção do fp desse tipo de carga); considera-se que este seja um aspecto contundente, uma vez que a subutilização dos bancos capacitivos significa um investimento parcialmente desperdiçado.

9. Propostas para Aprofundamento e Extensão

Neste capítulo são apresentadas propostas para extensão e aprofundamento de pesquisas sobre o tema investigado.

Como proposições para a continuidade do trabalho desenvolvido nesta Dissertação, algumas possibilidades para extensão e aprofundamento no tema são citadas e comentadas a seguir.

• O estudo da correlação entre a dinâmica do sistema de correção e a dinâmica operacional da carga no que se refere à efetividade global do processo de compensação de reativos

-principais objetivos:

.pesquisar correlações entre o tempo de resposta necessário para sistemas de correção do fp e o tempo de médio dos ciclos operativos de um (ou vários) tipo(s) de carga industriais com dinâmica rápida, buscando-se definir dinâmicas de atuação que possibilitem a efetividade e a garantia da correção desejada em casos típicos.

• a realização de um cadastramento mais abrangente envolvendo os módulos de potência tiristorizados disponíveis comercialmente nos mercados nacional e internacional

-principais objetivos:

.pesquisar e conhecer as principais características dos módulos de potência disponibilizados pelos fabricantes no Brasil e no exterior, de modo que se possa, com base em todas as funcionalidades ofertadas, especificar um módulo considerado tecnologicamente "ideal" para a aplicação no chaveamento de capacitores em sistemas industriais de correção do fp de cargas com dinâmica operacional rápida.

 o aprofundamento de avaliações relativas à configuração e operação de sistemas de compensação de reativos para cargas com dinâmica rápida envolvendo a aplicação dos módulos tiristorizados associados ao "STATCOM-BT"

-principais objetivos:

.pesquisar e avaliar possíveis configurações de um sistema conjunto (fundamentalmente no que se refere às possibilidades de comunicação e ação coordenada entre os controladores de ambos os subsistemas), de forma que se possa obter a racionalização de chaveamentos, a racionalização operacional dos bancos de capacitores e a maximização dos benefícios proporcionados por um "*STATCOM-BT*" no refinamento da correção do fp.

.pesquisar e avaliar a possibilidade de controle único centralizado para comando coordenado do "*STATCOM-BT*" e dos módulos tiristorizados.

- o aprodundamento de estudos envolvendo configurações e sistemáticas aplicáveis para a correção do fp e, simultaneamente, para a filtragem de correntes harmônicas por meio da utilização de filtros passivos sintonizados
 - -principais objetivos:

.pesquisar e avaliar possíveis configurações e sistemáticas de correção do fp em instalações industriais e comerciais nas quais se requeira, adicionalmente, a filtragem de harmônicas nas instalações industriais; podem ser avaliadas configurações mistas, abrangendo a utilização de módulos tiristorizados associados a capacitores / filtros passivos sintonizados e do "*STATCOM-BT*", de forma a se obter a correção dinâmica do fator de potência (fp de deslocamento e fp real ou de distorção) por meio da redução das distorções harmônicas nos barramentos de alimentação das cargas.

• a pesquisa e o aprofundamento de avaliações relativas à aplicação de filtros ativos com as funções de filtragem de harmônicas e de melhoria do fp real

-principais objetivos:

.pesquisar e avaliar possíveis configurações e sistemáticas para a filtragem de harmônicas e a conseqüente melhoria do fp real (de distorção) das instalações elétricas através da utilização de filtros ativos baseados em conversores eletrônicos para a injeção de corrente nos barramentos a serem compensados; podem ser avaliadas as configurações *paralela*, *série* ou *híbrida* (esta última mesclando filtros ativos e filtros passivos), porém, de maneira a se otimizar / racionalizar seu emprego através de soluções que contemplem sua associação a outras técnicas / dispositivos aplicados eletricamente a jusante de seu ponto de conexão, e que propiciem a redução / cancelamento das harmônicas geradas pelas cargas; o objetivo final seria a utilização de filtros ativos com menor potência e, consequentemente, com custos inicial e operacional mais reduzidos; algumas possibilidades de investigação e aprofundamento dizem respeito a soluções integradas / conjuntas, utilizando-se, por exemplo, transformadores eletricamente a jusante (localizados entre os filtros e as cargas) com relação de transformação 1:1 e conexões / deslocamentos angulares que possibilitem

cancelamentos de algumas ordens harmônicas presentes nas correntes resultantes a serem compensadas pelos filtros.

• a abordagem de sistemas de correção do fp em redes industriais de média tensão

-principais objetivos:

.complementar as abordagens relativas às técnicas de correção do fp em instalações industriais abordando, adicionalmente, as possibilidades e critérios a serem adotados em estudos que prevejam a utilização de capacitores em barramentos de média tensão (note-se que o trabalho apresentado nesta Dissertação foi desenvolvido com foco exclusivamente na correção do fp em baixa tensão).

Referências bibliográficas e demais fontes de consulta

(ABB, 2008) ABB n.v.. <u>Power Factor Controller RVT-D</u>: Installation and Operating Instructions. Jumet, Belgium: ABB, 2008. 62 p.

(ABB, 2002) ABB Ltda. <u>Qualidade em Sistemas de Baixa Tensão</u>: Capacitores, Controladores de Fator de Potência, Bancos Automáticos de Capacitores, Filtro Ativo de Harmônicas, Compensador de Reativos Dinâmicos. Osasco-SP: ABB, 2002. 26 p.

(ABB(1), 2007) ABB n.v.. <u>Controlador de Fator de Potência RVC</u>: Instalação e instruções de operação. Jumet, Belgium: ABB, 2007. 148 p.

(ABB(2), 2007) ABB n.v.. <u>DYNACOMP[®]</u>: The top-class reactive power compensator. Jumet, Belgium: ABB, 2007. 12 p.

(ABB(3), 2007) ABB n.v.. <u>Power^{IT} DYNACOMP dynamic response compensator</u>: Installation, operation and maintenance instructions. Jumet, Belgium: ABB, 2007. 112 p.

(ABB(4), 2007) ABB. <u>DYNACOMP</u>: The top-class dynamic response compensator. Jumet, Belgium: ABB, 2007. 12 p.

(ABB, 2008) ABB n.v.. <u>Power Factor Controller RVT-D</u>: Installation and Operating Instructions. Jumet, Belgium: ABB, 2008. 62 p.

(ABB, 200-?) ABB ENTRELEC. <u>Application Guide Contactors for Capacitor Switching</u>. France: ABB, (200-?). 39 p. Disponível em http://library.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/ff2f11151223e7dec12570850041a 49a/\$File/1SBC101140C0202.pdf

(ABNT(1), 2000) ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. <u>NBR</u> <u>14519</u>: Medidores eletrônicos de energia elétrica (estáticos) – Especificação:. Rio de Janeiro: ABNT, 2000. 23 p.

(ABNT(2), 2000) ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. <u>NBR</u> <u>14520</u>: Medidores eletrônicos de energia elétrica (estáticos) – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2000. 21 p.

(ABNT(3), 2000) ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. <u>NBR</u> <u>14522</u>: Intercâmbio de informações para sistemas de medição de energia elétrica -Padronização. Rio de Janeiro: ABNT, 2000. 91 p.

(ABNT, 2004) ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. <u>NBR</u> 5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 209 p.

(ABNT, 2005) ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. <u>NBR</u> <u>14519</u>: Medidores eletrônicos de energia elétrica (estáticos) – Especificação : Errata 1. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 1 p. (ACTARIS, 2003) ACTARIS S.A.S. <u>ACE SL 7000</u>: Technical Brochure. Chasseneuil, France: ACTARIS, 2003. 18 p.

(ALAMPI, 2005) ALAMPI FILHO, Sergio. <u>Análise de Controladores Eletrônicos em</u> <u>Sistemas de Distribuição de Energia</u>. 2005. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica – Sistema de Energia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2005.

(ALMEIDA, 1986) ALMEIDA, José Luiz Antunes de. <u>Eletrônica Industrial</u>. 2^a edição. São Paulo: Livros Érica Editora Ltda, 1986. 222 p.

(AMORIM, 2008) AMORIM, Edson. Efeitos da correção do FP na BT sob o ponto de vista da eficiência energética. In: Eficiência energética com a correção do fator de potência. São Paulo: ABINEE, 2008. 18 p. Disponível em http://www.tec.abinee.org.br/2008/arquivos/20a2_1.pdf.

(ANEEL, 2000) ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. <u>Resolução</u> <u>ANEEL nº 456</u>. Brasília: ANEEL, 2000. 62 p.

(ANEEL, 2001) ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. <u>Resolução</u> <u>ANEEL nº 505</u>. Brasília: ANEEL, 2000. 12 p.

(ANEEL, 2003) ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. <u>Resolução</u> <u>ANEEL nº 676</u>. Brasília: ANEEL, 2000. 11 p.

(ANEEL, 2005) ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. <u>Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Prodist</u>: Módulo 5 – Sistemas de medição. Brasília: ANEEL, 2005. 106 p.

(AREVA, 2004) AREVA. <u>NoVAR</u>: Automatic power factor control. Paris: AREVA, 2004. 8 p.

(ARRILAGA, 1985) ARRILAGA, J; BRADLEY, D. A; BODGER, P. S. Harmonic Elimination. In: <u>Power System Harmonics</u>. USA: John Wiley & Sons, Inc., 1985. cap. 10, pp. 296-324.

(AURES, 2006) AURES, José Enrique Vargas. <u>Estudo da Formação, Geometria e Resistência</u> <u>do Ponto na Soldagem por Resistência: Uma Abordagem Estatística</u>. 2006. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Sistemas Mecatrônicos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

(ACEVEDO(1), 200-?) ACEVEDO, Salvador; LLAMAS, Armando R.; BAEZ, Jesús A.; REYES, Jorge A. de los. <u>Corrección de Factor de Potencia Usando Filtros Desintonizados</u>. Monterrey, Mexico: Instituto Tecnológico y de Estúdios Superiores de Monterrey, (200-?). 5 p. Disponível em

http://www.mty.itesm.mx/dcic/deptos/ie/profesores/sacevedo/articulos/rvp99_1.pdf.

(ACEVEDO(2), 200-?) ACEVEDO, Salvador; LLAMAS, Armando R.; BAEZ, Jesús A.; REYES, Jorge A. de los. Comparación de filtros sintonizados e desintonizados. Monterrey, Mexico: Instituto Tecnológico y de Estúdios Superiores de Monterrey, (200?). 4 p. Disponível em http://www.mty.itesm.mx/dcic/deptos/ie/profesores/sacevedo/articulos/rvp99_3.pdf.

(BACK, 200-?) Back-to-Back Capacitor Switching Formulas From IEEE C37.99. Disponível em http://www.gilbertelectrical.com/library/technical.discussions/basicb-b.htm.

(BALIGA, 199-?) BALIGA, B. Jayant. Power Thyristors. In: <u>Power Semiconductor Devices</u>. USA: PWS Publishing Company, (199-?). cap. 6, sections 6.1-6.4, pp. 258-295 p.

(BARBIERI, 2008) BARBIERI, Roberto. Medidores Eletrônicos. In: <u>Seminário ABINEE –</u> <u>Medidores Eletrônicos</u>. São Paulo: ABINEE, 2008. 16 p. Disponível em http://www.aneel.gov.br/Arquivos/PDF/ABINEE-Roberto_Barbieri.pdf.

(BELUK(1), 2004) BELUK Gmbh. <u>Power Factor Control Relay</u>: BLR-CX. Germany: BELUK, 2004. 4 p.

(BELUK(2), 2004) BELUK Gmbh. <u>Power Factor Control Relays</u>: BLR-CM. Germany: BELUK, 2004. 4 p.

(BELUK, 1999) BELUK Gmbh. Power Factor Control Relay: BLR-CC. Germany: BELUK, 1999. 4 p.

(BELUK, 2001) BELUK Gmbh. <u>Power Factor Control Relays</u>: Comparision of CA, CB, CC & CM models. Germany: BELUK, 2001.4 p.

(BITTENCOURT, 200-?) BITTENCOURT, Nelson Rossi Goulart. <u>Relatório de Estágio – Apêndice A</u>: UFER e DMCR. Campinas: Elektro (200-?). Disponível em http://www1.webng.com/nbittencourt/articles/art_medicao/port_art_medicao.htm - link: Anexos.

(CAPACITOR, 200-?) Capacitor Inrush Current Calculations. Disponível em http://www.gilbertelectrical.com/library/technical.discussions/inrush.calcs.htm.

(CEFET-SC, 2002) CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE SANTA CATARINA; MUSSOI, Fernando Luiz Rosa (autoria). <u>Tiristor SCR - Retificador Controlado</u> <u>de Silício</u>. Florianópolis: CEFET-SC, 2002. 43 p.

(CELPE, 2006) CELPE - COMPANHIA ENERGÉTICA DE PERNAMBUCO. <u>Especificação</u> <u>de medidores eletrônicos</u>. 4ª Ed. Recife: CELPE, 2006. 17 p. Disponível em http://www.celpe.com.br/ARQUIVOS_EXTERNOS/DA50.05_4ed;110209;20060223.pdf.

(CEMIG, 1997) CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. <u>Estudo de</u> <u>Distribuição ED-5.28</u>: Melhoria do Fator de Potência em Instalações Consumidoras. Belo Horizonte: CEMIG, 1997. 91 p.

(CEMIG, 2003) CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. Nota Fiscal / Conta de Energia Elétrica. In: <u>PROGEN</u> : Como estruturar um programa para gestão energética. 2003, Berlo Horizonte-MG. Belo Horizonte: PROGEN, 2003. cap. 4.4. pp 12-16.

(CEMIG, 2005) CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. <u>Manual de</u> <u>Distribuição ND-5.3</u>: Fornecimento de energia elétrica em média tensão: rede de distribuição aérea ou subterrânea. Belo Horizonte: CEMIG, 2005. 108 p. (CHAVES, 2007) CHAVES, Cesar; HOUDEK, John A. Dynamic harmonic mitigation and power factor correction. <u>9TH International Conference, Electrical Power Quality and Utilisation</u>. Barcelona, October 2007. Disponível em http://www.leonardo-energy.org/webfm_send/1067.

(CIRCUTOR(1), 200-?) CIRCUTOR, SA. <u>Reactors for filtering</u>. Barcelona: CIRCUTOR, (200-?). 12 p. (CIRCUTOR(2), 200-?) CIRCUTOR, SA. Reguladores automáticos de energía reactiva.

Barcelona: CIRCUTOR, (200-?). 15 p.

(CIRCUTOR(3), 200-?) CIRCUTOR, SA. <u>Baterias automáticas, BT</u>. Barcelona: CIRCUTOR, (200-?). 28 p.

(CIRCUTOR(4), 200-?) CIRCUTOR, SA. <u>Automatic capacitor banks with detuned filters –</u> <u>FR series</u>. Barcelona: CIRCUTOR, (200-?). 9 p.

(CITENEL(1), 2003) CITENEL - CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, II., 2003, Salvador, BA. <u>Correção Ótima do Fator de Potência de</u> <u>Sistemas Elétricos Industriais com Harmônicos</u>. Salvador: UFRN e COSERN, 2003. Vol. 2. pp. 862-864. Disponível em http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=579. link: II Citenel.

(CITENEL(2), 2003) CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, II., 2003, Salvador, BA. <u>Aplicação do STATCOM na Distribuição: Regulação de</u> <u>Tensão e Controle de Fator de Potência</u>. Salvador: COPPE/UFRJ, UFJF e CERJ, 2003. Vol. 2. pp 857-861. Disponível em http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=579. link: II Citenel.

(CODI, 2004) CODI - COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. <u>Manual de</u> <u>Orientação aos Consumidores</u>: Energia Reativa Excedente. CODI, 2004. 13 p.

(COELBA, 2004) COELBA. <u>Norma para Instalação de Banco de Capacitores em Baixa</u> <u>Tensão</u>. Salvador: COELBA, 2004. 1ª edição. 8 p. Disponível em http://www.coelba.com.br/ARQUIVOS_EXTERNOS/PCI.00.06.B_Instalacao_de_Banco_de_ Capacitores_em_BT;33011301;20050128.pdf.

(COPEL, 2008) COPEL - COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. <u>ETC 4.06</u>: Especificação técnica para medidor eletrônico multifunção. Curitiba: COPEL, 2008. 9 p. Disponível em

http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/etc406/\$FILE/etc406.pdf.

(COTRIM(1), 2008) COTRIM, Ademaro A. M. B.; MORENO, Hilton (revisão e atualização técnica); GRIMONI, José Aquiles Baesso (revisão e atualização técnica). Compensação da energia reativa; STAROSTA, José (autoria). In: <u>Instalações Elétricas</u>. 5^a edição. São Paulo: Prentice Hall, 2008. cap. 14, pp. 419-434.

(COTRIM(2), 2008) COTRIM, Ademaro A. M. B.; KINDERMANN, Geraldo (revisão e adaptação técnica).Compensação da energia reativa. In: <u>Instalações Elétricas</u>. 4^a edição. São Paulo: Prentice Hall, 2003. cap. 14. pp. 597-610.

(DIAS, 2005) DIAS, G. A. D.; SONALIO, F. V.; TELLÓ, M.; BEHLE, F. K.; SANTANA, B.; CASA, Darcy. Interação entre forno de indução e banco de capacitores – Estudo de caso.

In: <u>SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, VI</u>. 2005, Belém-PA. Belém: SBQEE, 2005. pp 127-130.

(DÍAZ, 2004) DÍAZ, Vitor M. H. <u>CFP</u>. México: SIEMENS, 2004. 72 p. Disponível em http://www.rodisa.com.mx/ArchivosPagWEB/Capacitores.pdf.

(DIXON, 2006) DIXON, Juan; MORÁN, Luis; RODRIGUES, José; DOMKE, Ricardo. <u>Reactive Power Compensation Technologies, State of-the-Art Review</u>. Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile / Universidad de Concepción / Universidad Federico Sta. Maria, 2006. 21 p.

(DUGAN(1), 2002) DUGAN, Roger C.; McGRANAGHAN, Mark F.; SANTOSO, Surya; BEATY, H. Wayne. Fundamentals of harmonics. In: <u>Electrical Power Systems Quality</u>. Second Edition. Columbus, Ohio: McGraw-Hill, 2002. cap. 5, pp. 167-224.

(DUGAN(2), 2002) DUGAN, Roger C.; McGRANAGHAN, Mark F.; SANTOSO, Surya; BEATY, H. Wayne. Applied Harmonics. In: <u>Electrical Power Systems Quality</u>. Second Edition. Columbus, Ohio: McGraw-Hill, 2002. cap. 6, pp. 225-294.

(EATON, 2004) EATON ELECTRICAL Inc. <u>Power Factor Correction</u>: A Guide for the Plant Engineer – Capacitor Banks & Passive Harmonic Filters. USA: EATON, 2004. 28 p. Disponível em

http://www.cypresspowerservices.com/pdfs/eaton/Powerfactor/PowerFactorCorrection-AGuideForthePlantEngineer-SA02607001E.pdf.

(EFFICIENTIA, 2007) EFFICIENTIA S.A.. <u>Stola do Brasil Ltda – Estudo / Projeto para</u> <u>Correção do Fator de Potência</u>. Belo Horizonte-MG: EFFICIENTIA, 2007. 44 p. (documentação geral do estudo, envolvendo memorial descritivo, planilhas de medições e desenhos de projeto).

(ELECTROMECHANICA, 2002) ELECTROMECHANICA <u>Components and Systems.</u> <u>Power Factor Correction</u>. Cape Town, South Africa: ELECTROMECHANICA, 2002. 15 p. Disponível em http://www.csee.wvu.edu/~kanchanv/power%20factor%20correction.pdf.

(ELO, 2008). ELO SISTEMAS ELETRÔNICOS. <u>Medidor ELO 2180</u>. Disponível em http://www.elonet.com.br/downloads.php.

(ELSPEC(1), 200-?) ELSPEC LTD. <u>Power Quality Solutions</u>: Activar. Israel: ELSPEC, (200-?). 8 p.

(ELSPEC(2), 200-?) ELSPEC LTD. <u>Power Quality Solutions</u>: The Equallizer. Israel: ELSPEC, (200-?). 4 p.

(ELSPEC, 2005) ELSPEC LTD. <u>Spot Welding</u>: Application with dynamic compensation of reactive energy. Israel: ELSPEC, 2005. 4 p.

(EMBRASUL, 200-?) EMBRASUL INDÚSTRIA ELETRÔNICA LTDA. CM-4020 – <u>Controlador de Fator de Potência</u>. EMBRASUL, (200-?). 4 p.

(EPCOS, 2003) EPCOS AG. <u>Dynamic power factor correction</u>. Germany: EPCOS, 2003. 25 p.

(EPCOS, 2006) EPCOS AG. <u>Thyristor module TSM-HV50</u>. Germany: EPCOS, 2006. 6 p.

(EPCOS, 2009) EPCOS AG. <u>General Catalogue – Product Profile 2009</u>: Power Factor Correction. Germany: EPCOS, 2009. 88 p.

(EPCOS(1), 2007) EPCOS AG. <u>General Catalogue – Product Profile 2007</u>: Power Factor Correction. Germany: EPCOS, 2007. 80 p.

(EPCOS(1), 2008) EPCOS AG. <u>PQS Application Note</u>: Dynamic PFC – Thyristor Modules TSM Series. Germany: EPCOS, 2008. 8 p.

(EPCOS(2), 2007) EPCOS AG. <u>Thyristor module for dynamic PFC</u>. Germany: EPCOS, 2007. 6 p.

(EPCOS(2), 2008) EPCOS AG. <u>PQS Application Note</u>: Damping of Inrush Currents. Germany: EPCOS, 2008. 11 p.

(EPCOS(3), 2007) EPCOS AG. <u>Power Quality Solutions – Overview 2008</u>: Power Factor Correction. Germany: EPCOS, 2007. 12 p.

(EPCOS(4), 2007) EPCOS AG. <u>PQS Application Note</u>: Dynamic PFC - Power Quality at the Docks. Germany: EPCOS, 2007. 8 p.

(EPCOS(5), 2007) EPCOS AG. <u>Armonicas y Correction Del Factor de Potência</u>. Buenos Aires, Argentina: ELECOND, 2007. 13 p. Disponível em http://www.elecond.com.ar/pdf/armonicas.pdf.

(FARROW, 2004) FARROW, Jack. <u>Sizing the Primary Power System for Resistance</u> <u>Welders</u>. USA: WTC, 2004. 11 p. Disponível em http://www.weldtechcorp.com.

(FASBINDER, 2003) FASBINDER, Stefan. Harmonics: Passive Filters. In: <u>Power Quality</u> <u>Application Guide</u>. European Community: Copper Development Association (CDA), Deutsches Kupferinstitut and European Copper Institute (ECI), 2003. cap. 3.3.1, 12 p.

(FASBINDER, 2004) FASBINDER, Stefan. Harmonics: Capacitors in Harmonic-Rich Environments. In: <u>Power Quality Application Guide</u>. European Community: Copper Development Association (CDA), Deutsches Kupferinstitut and European Copper Institute (ECI), 2004. cap. 3.1.2, 16 p.

(FRAKO, 2005) FRAKO KONDENSATOREN UND ANLAGENBAU Gmbh. <u>SBS dynamic</u> power factor correction – Fast-acting power factor control units. Germany: FRAKO, 2005. 6 p.

(FUCHS, 2006) FUCHS, Peter; HRIBIK, Jan; LOJKO, Branislav. Digital Power and Energy Meter with DSP TMS320C6711. In: <u>TI - Developer Conference</u>. Dallas, USA: TEXAS INSTRUMENTS, 2006. 24 p. Disponível em http://focus.ti.com/lit/ml/sprp504/sprp504.pdf.
(GASPAR, 2003) GASPAR, I. S.; SÁ, J. S. de; VOLPATO, R. M. Volpato; GUIMARÃES, D. A. <u>Real Time power factor correction in industrial plants with non-linear loads</u>. Santa Rita do Sapucaí-MG: INATEL, 2003. 5 p.

(GLANZMANN, 2005) GLANZMANN, Gabriela. <u>FACTS - Flexible Alternating Current</u> <u>Transmission Systems</u>. Zurich: EEH – Power Systems Laboratory, 2005. 31 p.

(GREENWOOD(1), 1991) GREENWOOD, Allan. Simple switching transients. In: <u>Electrical</u> <u>Tansients in Power Systems</u>. Second Edition. USA: John Wiley & Sons, Inc., 1991. cap.3, pp. 37-61.

(GREENWOOD(2), 1991) GREENWOOD, Allan. Simple switching transients. In: <u>Electrical</u> <u>Tansients in Power Systems</u>. Second Edition. USA: John Wiley & Sons, Inc., 1991. cap.6, pp. 132-139.

(HINGORANI, 2000) HINGORANI, Narain G.; GYUGYI, Laszio. Static Shunt Compensators: SVC and STATCOM. In: <u>Understanding Facts</u>: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE Press, 2000. cap. 5, pp. 135-207.

(HPE(1), 2008) HPE - HIGH POWER ENGINEERING. <u>Folheto técnico PROFACTOR[®]</u>. Belo Horizonte: HPE, 2008.12 p.

(HPE(2), 2008) HPE - HIGH POWER ENGINEERING. <u>PROFACTOR[®]</u>: Informações técnicas e instruções de instalação. Belo Horizonte: HPE, 2008.12 p.

(IEC(1), 2003) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. <u>IEC 61000 2-2</u> - 2002: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems. Genebra, Suiça: IEC, 2002. 57 p.

(IEC(2), 2003) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. <u>IEC 61000 2-4</u> - 2002: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-4: Environment - Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances. Genebra, Suiça: IEC, 2002. 75 p.

(IEC, 2007) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. <u>IEC 60076-6</u>: Power transformers – Part 6: Reactors. Genebra, Suissa: IEC, 2007. 111 p.

(IEEE, 1992) IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. <u>IEEE Std 1036-1992</u>: Guide for Application of Shunt Power Capacitors. New York: IEEE, 1992. 51 p.

(IEEE, 2000) IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. <u>IEEE Std C37.99-2000</u>: Guide for the Protection of Shunt Capacitor Banks. New York: IEEE, 2000. 107 p.

(IEEE, 2002) IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. <u>IEEE Std 18-2002</u>: Shunt Power Capacitors. New York: IEEE, 2002. 24 p.

(IEEE, 2003) IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. <u>IEEE Std 1531-2003</u>: Guide for Application and Specification of Harmonic Filters. New York: IEEE, 2003. 68 p.

(IIT, 2006) INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY KHARAGPUR. <u>Power</u> <u>Semiconductor Devices Lesson</u>: Lesson 4 - Thyristors and Triacs. Kharagpur: IIT Kharagpur, 2006. 39 p.

(IMS, 2005) IMS IND. MICRO SISTEMAS ELETRONICOS LTDA. Smart Cap 485 – Controlador de Fator de Potência: Especificação técnica SCA4 – versão 1. IMS, 2005. 2 p.

(INMETRO, 2007) INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. <u>Vocabulário internacional de termos</u> <u>fundamentais e gerais de metrologia</u>: Portaria INMETRO nº 029 de 1995 / INMETRO, SENAI - Departamento Nacional. 5ª ed. Rio de Janeiro: Ed. SENAI, 2007. 72 p.

(ISONI, 2004) ISONI, Marcos. A eficientização energética e seus possíveis efeitos sobre equipamentos e instalações (Parte 2). <u>Eletricidade Moderna</u>. nº 364. pp. 92-118. Junho, 2004.

(IXYS, 2007) IXYS CORPORATION. <u>Thyristor Modules / Thyristor/Diode Modules - MCC95 / MCD 95 Data-sheets</u>. USA: IXYS, 2007.4 p.

(JANITZA, 2003) JANITZA ELECTRONICS Gmbh. <u>Reactive Power Controler</u>: PROPHI – Operating Instructions. Germany: JANITZA, 2003. 56 p.

(JEFFERSON, 1999) JEFFERSON, A. Adaptative VAR compensation: A real solution to reactive power problems. <u>IEEE Canadian Review</u>. pp. 16-19. Autumn, 1999.

(KMB, 2007) KMB SYSTEMS, s.r.o. <u>Fast Power Factor Control Components</u>: NOVAR 1312 controller + KATKA Thyristor Switching Modules. Czech Republic: KMB, 2007. 6 p.

(KOLLAR, 1989) KOLLAR, I; KORANYI, Gy; OSVATH, P. Measurement of Power and Energy. In: <u>Technology of Electrical Measurements</u>. New York: John Wiley & Sons Ltd., 1993. cap. 3, pp. 123-145.

(LANDIS, 2008) LANDIS+GYR EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO Ltda. Saga 1000 – <u>Medidor Eletrônico de Energia</u>. Curitiba-PR: LANDIS+GYR, 2006. 6 p. Disponível em http://eficel.com.br/Med%20Energia/Saga1000.pdf.

(LANGNER, 2004) LANGNER, Cristiane Garbin; PEREIRA, João Adalberto. <u>Programador</u> <u>horário digital</u>. LACTEC e PUC-PR: Curitiba, 2004. 9 p.

(LIFASA, 2007) LIFASA INTERNATIONAL CAPACITORS S.A. <u>Compensación de</u> <u>Energía Reactiva y Filtros Armónicos en Baja Tensión</u>. Barcelona: LIFASA, 2007. 80 p.

(LOVATO, 2004) LOVATO ELECTRIC DO BRASIL LTDA. <u>DCRK – Controlador</u> <u>Automático do Fator de Potência</u>: Manual de instalação. Rio de Janeiro:LOVATO, 2004.18 p.

(MAMEDE, 1993) MAMEDE FILHO, João. Capacitores de Potência. In: <u>Manual de</u> <u>Equipamentos Elétricos</u>. 1ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 1993. vol. 2. cap. 13, pp. 151-267.

(MAMEDE, 2007) MAMEDE FILHO, João. Fator de potência. In: <u>Instalações Elétricas</u> <u>Industriais</u>. 7ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2007. cap. 4, pp. 176-227. (MARIMAX, 2004) MARIMAX Ltda. <u>Apostila - Solda por Resistência</u>. São Paulo: MARIMAX, 2004. 51 p.

(MATHEUS, 2003) MATHEUS, Henrique. <u>Controladores de Demanda</u>. 2003. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2003.

(MELO, 2009) MELO, Vinicius; GIACOMIN, Vitor; SOUZA, Aloma; VENTURINI, Afonso; SIMONETTI, Domingos; SOUZA, Gilberto; MACEDO Jr, J. R. <u>Análise para</u> <u>Implantação de Statcom na Correção de Tensão Secundária</u>. Vitória-ES: Universidade Federal do Espírito Santo, Escelsa, 2009. 8 p. Disponível em http://www.labplan.ufsc.br/congressos/CBQEE_VIII_2009/web/docs/102.pdf.

(MIGUEL, 2000) MIGUEL, Jaime M; HENRIQUES, Luís O. A.; AREDES, Maurício; WATANABE, Edson H. <u>Simulação de um Compensador Síncrono Estático de Potência</u>. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE – Programa de Engenharia Elétrica, 2000. 6 p.

(MILLER, 2003) MILLER WELDING & MACHINE Co. Electrical fundfamentals in arc welding. Appleton, USA: MILLER, 2003. 34 p. Disponível em http://www.millerwelds.com/interests/instructors/pdf/Electrical_Fundamentals.pdf.

(MOHAN(1), 1989) MOHAN, Ned; UNDELAND, Tore M.; ROBBINS, William, P. Thyristors. In: <u>Power Electronics</u>: Converters, Applications and Design. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1989. cap. 23, pp. 596-612.

(MOHAN(2), 1989) MOHAN, Ned; UNDELAND, Tore M.; ROBBINS, William, P. Review of basic electrical and magnetic circuit concepts. In: <u>Power Electronics</u>: Converters, Applications and Design. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1989. cap. 3, section 3.2.4.3, pp. 42-43.

(MOULIN, 2003) MOULIN, Etienne. <u>AN-578 APPLICATION NOTE</u>: RMS Calculation for energy meter applications using the ADE7756. USA: ANALOG DEVICES, 2003. 8 p.

(MTE, 200-?) TEM CORPORATION. Line reactors. USA: MTE, (200?). 15 p. Disponível em http://www.aisimem.com/downloads/LINE%20REACTOR%20TUTORIALa_1.pdf.

(NANSEN, 2008) NANSEN S/A – INSTRUMENTOS DE PRECISÃO. <u>Manual Spectrum[®]</u> <u>Série S</u>: Versão D. Contagem-MG: NANSEN, 2008. 78 p.

(NBR IEC(1), 2009) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. <u>NBR IEC</u> <u>60831-1</u>: Capacitores de potência auto-regenerativos para sistemas CA, com tensão maxima de 1.000 V - Parte 1: Generalidades – Desempenho, ensaios e classificação – Requisitos de segurança – Guia para instalação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 35 p.

(NBR IEC(2), 2009) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. <u>NBR IEC</u> <u>60831-1</u>: Capacitores de potência auto-regenerativos para sistemas CA, com tensão maxima de 1.000 V - Parte 2: Ensaio de envelhecimento, auto-regeneração e destruiçao. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 12 p. (NOKIAN(1), 2002) NOKIAN CAPACITORS Ltd. <u>Power Factor Correction</u>. Tampere, Finland: NOKIAN, 2002. 12 p. Disponível em ttp://www.nokiancapacitors.com/documents/04%20-%20theory/EN-TH01-11_2004 Power_Factor_Correction.pdf.

(NOKIAN(1), 2006) NOKIAN CAPACITORS Ltd. <u>Wall mounted detuined filter capacitor</u> <u>bank.Detuned filters</u>. Tampere, Finland: NOKIAN, 2006. 2 p. (NOKIAN(2), 2002) NOKIAN CAPACITORS Ltd. <u>Thyristor switched capacitors banks</u>. Tampere, Finland: NOKIAN, 2002. 2 p.

(NOKIAN(2), 2006) NOKIAN CAPACITORS Ltd. <u>Detuned filters</u>. Tampere, Finland: NOKIAN, 2006. 4 p.

(ONOFRE, 2007) ONOFRE, Virna Costa. <u>Modelagem e Caracterização de SVC's para</u> <u>Aplicações de Alto Desempenho</u>. 2007. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

(ONS(1), 2008) ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. <u>Submódulo</u> <u>12.1</u>: Medição para faturamento: visão geral. Rio de Janeiro: ONS, 2008. 6 p.

(ONS(2), 2008) ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. <u>Submódulo</u> <u>12.2</u>: Instalação do sistema de medição para faturamento. Rio de Janeiro: ONS, 2008. 31 p.

(ONS(3), 2008) ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. <u>Submódulo</u> <u>12.3</u>: Manutenção do sistema de medição para faturamento. Rio de Janeiro: ONS, 2008. 22 p.

(ONS(4), 2008) ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. <u>Submódulo</u> <u>12.4</u>: Leitura de medição para faturamento. Rio de Janeiro: ONS, 2008. 7 p.

(ONS(5), 2008) ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. <u>Submódulo</u> <u>12.5</u>: Certificação de padrões de trabalho. Rio de Janeiro: ONS, 2008. 8 p.

(ONS(6), 2008) ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. <u>Submódulo</u> <u>12.6</u>: Configurações de medição para faturamento. Rio de Janeiro: ONS, 2008. 12 p.

(PASERBA, 199-?) PASERBA, J; LARSEN, E.; LAUBY, M.; LEONARD, D.; NAUMANN, S.; MILLER, N.; SENER, F. Feasibility Study for a Distribution-Level STATCON. In: <u>FACTS Application Document</u>, section 8.6. pp. 44-51. (199-?).

(PIERRET, 1996) PIERRET, Robert F. PNPN devices. In: <u>Semiconductor Device</u> <u>Fundamentals</u>. USA: Addison-Wesley Publishing Company, 1996. cap. 13, pp. 463-475.

(POMÍLIO, 2000) POMÍLIO, J. A. Pomilio. Componentes Semicondutores de Potência. In: <u>Eletrônica de Potência</u>. Campinas: DSCE-FEEC-UNICAMP, 2000. cap. 1. p.1-48

(PROCOBRE, 1999) PROCOBRE - CENTRO DE PROMOCIÓN DE USOS DEL COBRE; RAMOS, Alfredo Munoz (autoria). <u>Calidad de La Energia</u>. Santiago, Chile: PROCOBRE, 1999. 37 p. (PROCOBRE, 2001) PROCOBRE - INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE; MORENO, Hilton (autoria). <u>Harmônicas nas Instalações Elétricas</u>: Causas, Efeitos e Soluções. São Paulo: PROCOBRE, 2001. 65 p.

(RAMIREZ, 200-?) RAMIREZ, Eugenio Téllez. <u>Distorsion Armonica</u>. Puebla: AP & C (200-?).

(RÉCHE, 2003) RÉCHE, Mauricio M; VALLE, Samuel C. P. Controle metrológico de medidores de energia elétrica. In: <u>Seminário INMETRO – Metering Brasil</u>. São Paulo: INMETRO, 2003.

(RIEHL, 200-?) RIEHL, Rudolf Ribeiro. <u>Tiristores</u>. Bauru-SP: UNESP, (200-?). cap. 3, pp. 22-56. Disponível em http://www.dee.feb.unesp.br/~rudolf/dp/LAB_EI_CAP03.pdf.

(RISI(1), 2006) RISI, Gustavo Alejandro; VASQUES, Ricardo (tradução). Por dentro da energia reativa – Parte 1. <u>O Setor Elétrico</u>. pp. 68-73. Julho, 2006.

(RISI(2), 2006) RISI, Gustavo Alejandro; VASQUES, Ricardo (tradução). Por dentro da energia reativa – Parte 2. <u>O Setor Elétrico</u>. pp. 64-69. Agosto, 2006.

(SCHLOBOHM, 2005) SCHLOBOHM, Rick. Electronic Power Meters: Guide for their selection and specification. In: <u>GE ESL Magazine</u>. USA: GE, 2005. 7 p.

(SCHNEIDER, 200-?) SCHNEIDER ELECTRIC. Reactive energy compensation. In: Industrial electrical network design guide. SCHNEIDER (200-?). cap. 7, pp. 593-630.

(SCHNEIDER, 2005) SCHNEIDER ELECTRIC. <u>Varlogic N power factor controller</u>. SCHNEIDER, 2005. 2 p.

(SCHNEIDER, 2007) SCHNEIDER ELECTRIC. Power factor correction and harmonic filtering. In: <u>Electrical installation guide</u>. SCHNEIDER, 2007. chapter L, 26 p.

(SENE, 2006) SENE, Viviane L. de; VELOSO, Aluísio. Perspectivas de viabilização técnicoeconômica da medição de energia reativa e fator de potência em clientes de baixa tensão. In: <u>SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, XVII</u>. 2006, Belo Horizonte-MG. Belo Horizonte: SENDI, 2006. 6 p.

(SIEMENS(1), 1975) SIEMENS S.A.. Comando de capacitores trifásicos. In: <u>Dispositivos de</u> <u>Comando e Proteção em Baixa Tensão</u>. 2ª edição. São Paulo: SIEMENS, 1975. cap. 7. pp. 7/4 -7/10.

(SIEMENS(1), 2002) SIEMENS Ltda. <u>Conceitos e definições para correção do fator de</u> potência através de carga capacitiva. São Paulo: SIEMENS, 2002. 19 p.

(SIEMENS(2), 1975) SIEMENS S.A.. Diagramas para instalações de regulação capacitiva. In: <u>Dispositivos de Comando e Proteção em Baixa Tensão</u>. 2ª edição. São Paulo: SIEMENS, 1975. cap. 4. pp. 4/57-4/58.

(SIEMENS(2), 2002) SIEMENS Ltda. <u>Capacitores PHICAP para correção do fator de</u> <u>potência</u>. São Paulo: SIEMENS, 2002. 14 p.

(SIEMENS, 2004) SIEMENS NSK. <u>Contatores 3RT1 para manobra de capacitores – Linha</u> <u>Sirius</u>. SIEMENS, 2004. 2 p.

(SIEMENS, 2005) SIEMENS MATSUSHITA COMPONENTS. <u>Capacitors for Power Factor</u> <u>Correction and Filtering (MKK)</u>. Germany: SIEMENS, 2005. 15 p.

(SIEMENS, 2008) SIEMENS Ltda. <u>Conversores de Freqüência - Instruções para Instalação de</u> <u>Conversores de Freqüência</u>. São Paulo: SIEMENS, 2008. 20 p.

(SILVA, 2007) SILVA, Rafael. <u>Medidor de energia elétrica de baixo custo com interface</u> serial compatível com a NBR14522. 2007. 112 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Sistemas Digitais) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

(SILVA, 2009) SILVA, M. Sidelmo; SILVA, M. Isoni; CORRÊA, Tomás P.; FRANÇA, J. Gleisson. Operação Dinâmica de Bancos de Capacitores com Eliminação de Correntes de Inrush. In: <u>CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA</u> <u>ELÉTRICA, VII</u>. 2009, Blumenau-SC: CBQEE, 2009. 5 p.

(STAROSTA, 2002) STAROSTA, José. Compensação de energia reativa em instalações de grande porte. <u>Eletricidade Moderna</u>. pp. 100-127. Julho, 2002.

(STAROSTA, 2006) STAROSTA, José. Compensação estática de energia reativa tempo real e os aspectos de qualidade de energia, produtividade, redução de perdas elétricas, redução de investimentos em infra-estrutura e isenção de cobranças de excedentes de energia reativa em cargas de ciclo variável. In: <u>CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, VII</u>. 2006, Santos-SP. Santos: CBQEE, 2007. 6 p.

(TABATABAEI, 2008) TABATABAEI, N.M.; SHAYANFAR, H.A.; MOKHTARPOUR, A.; SHOARINEJAD, S.; SHOARINEJAD, A. Statcom Intelligent Control Strategy for Reactive Power Compensation. In: <u>INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNICAL AND</u> <u>PHYSICAL PROBLEMS OF POWER ENGINEERING</u>, 4th. 2008.Pitesti, Romania: TPE, 2008. Vol. III. pp 57-60.

(TLA, 200-?) EMPRESAS TLA. Manual TLA: Capacitores de Potência. Gaspar-SC: TLA (200-?). 50 p. Disponível em http://www.tla.com.br/download-tla-capacitores.php - link : Manual Capacitores de Potência.

(VASCONCELOS, 2004) VASCONCELOS, Flávio H. <u>Tecnologia de Medições – Curso de</u> <u>Especialização em Qualidade da Energia Elétrica</u>: Módulo 3 – Condicionadores de Sinais. Belo Horizonte: UFMG, 2004. 36 p.

(VISHAY, 2005) VISHAY ELECTRONIC COMPONENTS. <u>ESTAmat PFC</u>: Power Factor Controller.USA: VISHAY, 2005. 11 p.

(WATANABE, 1998) WATANABE, Edson H., BARBOSA, Pedro G., ALMEIDA, Kátia C.; TARANTO, Glauco N. Tecnologia FACTS – Tutorial. In: <u>SBA Controle & Automação</u>, Vol. 9, nº. 1. pp 39-55. Jan., Fev., Mar. e Abril de 1998.

(WEG, 2001) WEG ACIONAMENTOS. <u>Manual para correção do fator de potência</u>. Jaraguá do Sul-SC: WEG, 2001. 34 p.

(WEG(1), 2008) WEG AUTOMAÇÃO S.A.. <u>Manual de Segurança e Aplicação de</u> <u>Capacitores em Corrente Alternada</u>. Jaraguá do Sul-SC: WEG, 2008. 20 p.

(WEG(2), 2008) WEG AUTOMAÇÃO S.A.. <u>Capacitores - Correção do Fator de Potência</u>. Jaraguá do Sul-SC: WEG, 2008. 12 p.

(WOLF, 2005) WOLF, Marco Antônio; SCOTTI, Américo. <u>Desenvolvimento e Instalação do</u> <u>Controle da Máquina de Soldagem por Resistência a Ponto do LAPROSOLDA/UFU</u>. Uberlândia-MG: UFU, 2006. 30 p.

(WOOD, 1988) WOOD, Peter. Interpretation of manufacturers' data for GTOs. In: <u>Fundamentals and Applications of Gate-Turn-Off-Thyristors</u>. Palo Alto, Califórnia: EPRI, 1988. cap.3, pp. 87-138.

Apêndices

Apêndice 1 – Atual Legislação do Fator de Potência (consumidores cativos)

A referência (ANEEL, 2000), parcialmente reproduzida abaixo, ampliou a Portaria nº 1.569 de 23 de dezembro de 1993 do DNAEE e consolidou a legislação atualmente em vigor, estabelecendo, como pontos principais (*"Do Faturamento de Energia e Demanda Reativas"*):

Art. 64. O fator de potência de referência " fp_r ", indutivo ou capacitivo, terá como limite mínimo permitido, para as instalações elétricas das unidades consumidoras, o valor de $fp_r = 0,92$.

Art. 65. Para unidade consumidora faturada na estrutura tarifária horo-sazonal ou na estrutura tarifária convencional com medição apropriada, o faturamento correspondente ao consumo de energia elétrica e à demanda de potência reativa excedentes, será calculado de acordo com as seguintes fórmulas:

$$I - FER_{(P)} = \left\{ \sum_{t=1}^{n} \left[CA_t \cdot \left(\frac{0.92}{fp_t} - 1 \right) \right] \right\} \cdot TCA_{(p)}$$
(A1.1)

$$\boldsymbol{H} - \boldsymbol{F} DR_{(p)} = \left[\max_{t=1}^{n} \cdot \left(DA_t \cdot \frac{0.92}{fp_t} \right) - DF_{(p)} \right] \cdot TDA_{(p)}$$
(A1.2)

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 "fp_r", no período de faturamento;

CAt = consumo de energia ativa medida em cada intervalo de 1 (uma) hora "t", durante o período de faturamento;

 $fp_r = fator de potência de referência igual a 0,92;$

 $fp_t = fator de potência da unidade consumidora, calculado em cada intervalo "t" de 1 (uma)$ hora, durante o período de faturamento, observadas as definições dispostas nas alíneas "a" e"b", § 1°, deste artigo; TCA(p) = tarifa de energia ativa, aplicável ao fornecimento em cada posto horário "p";

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 "fp_r" no período de faturamento;

DAt = 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;

n = *número de intervalos de integralização "t", por posto horário "p", no período de faturamento.*

§ 1° Nas fórmulas FER (p) e FDR (p) serão considerados:

a) durante o período de 6 horas consecutivas, compreendido, a critério da concessionária, entre 23 h e 30 min e 06h e 30 min, apenas os fatores de potência " fp_t " inferiores a 0,92 capacitivo, verificados em cada intervalo de 1 (uma) hora "t";

b) durante o período diário complementar ao definido na alínea anterior, apenas os fatores de potência " fp_t " inferiores a 0,92 indutivo, verificados em cada intervalo de 1 (uma) hora "t".

§ 2° O período de 6 (seis) horas definido na alínea "a" do parágrafo anterior deverá ser informado pela concessionária aos respectivos consumidores com antecedência mínima de 1 (um) ciclo completo de faturamento.

§ 3° Havendo montantes de energia elétrica estabelecida em contrato, o faturamento correspondente ao consumo de energia reativa, verificada por medição apropriada, que exceder às quantidades permitidas pelo fator de potência de referência "fp_r", será calculado de acordo com a seguinte fórmula:

$$FER_{(p)} = \left[\left(\sum_{t=1}^{n} \frac{CA_t \cdot fp_r}{fp_t} \right) - CF_{(p)} \right] \cdot TCA_{(p)}$$
(A1.3)

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 "fp_r", no período de faturamento;

CAt = consumo de energia ativa medida em cada intervalo de 1 (uma) hora "t", durante o período de faturamento;

 $fp_r = fator de potência de referência igual a 0,92;$

 $fp_t = fator de potência da unidade consumidora, calculado em cada intervalo "t" de 1 (uma)$ hora, durante o período de faturamento, observadas as definições dispostas nas alíneas "a" e"b", § 1°, deste artigo;

CF(p) = consumo de energia elétrica ativa faturável em cada posto horário "p" no período de faturamento;

TCA(p) = tarifa de energia ativa, aplicável ao fornecimento em cada posto horário "p".

Art. 66. Para unidade consumidora faturada na estrutura tarifária convencional, enquanto não forem instalados equipamentos de medição que permitam a aplicação das fórmulas fixadas no art. 65, a concessionária poderá realizar o faturamento de energia e demanda de potência reativa excedente utilizando as seguintes fórmulas:

$$I - FER = CA \cdot \left(\frac{fp_r}{fp_m} - 1\right) \cdot TCA$$
(A1.4)

$$H - FDR = \left(DM \cdot \frac{fp_r}{fp_m} - DF\right) \cdot TDA$$
(A1.5)

onde:

.FER = valor do faturamento total correspondente ao consumo de energia reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência, no período de faturamento;

.*CA* = consumo de energia ativa medida durante o período de faturamento;

 $fp_r = fator de potência de referência igual a 0,92;$

 $fp_m = fator de potência indutivo médio das instalações elétricas da unidade consumidora, calculado para o período de faturamento;$

.*TCA* = tarifa de energia ativa, aplicável ao fornecimento;

.FDR = valor do faturamento total correspondente à demanda de potência reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência, no período de faturamento;

.DM = demanda medida durante o período de faturamento;

.DF = demanda faturável no período de faturamento;

.*TDA* = tarifa de demanda de potência ativa aplicável ao fornecimento.

Parágrafo único. Havendo montantes de energia elétrica estabelecida em contrato, o faturamento correspondente ao consumo de energia reativa, verificada por medição apropriada, que exceder às quantidades permitidas pelo fator de potência de referência "fp_r", será calculado de acordo com a seguinte fórmula:

$$FER = \left(CA \cdot \frac{fp_{r}}{fp_{m}} - CF\right) \cdot TCA$$
(A1.6)

onde:

.*FER* = valor do faturamento total correspondente ao consumo de energia reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência, no período de faturamento;

.*CA* = consumo de energia ativa medida durante o período de faturamento;

 $fp_r = fator de potência de referência igual a 0,92;$

 $fp_m = fator de potência indutivo médio das instalações elétricas da unidade consumidora, calculado para o período de faturamento;$

.*CF* = consumo de energia elétrica ativa faturável no período de faturamento;

.TCA = *tarifa de energia ativa, aplicável ao fornecimento.*

Art. 67. Para fins de faturamento de energia e demanda de potência reativa excedente serão considerados somente os valores ou parcelas positivas das mesmas.

Parágrafo único. Nos faturamentos relativos as demandas de potência reativas excedentes não serão aplicadas as tarifas de ultrapassagem.

Art. 68. Para unidade consumidora do Grupo "B", cujo fator de potência tenha sido verificado por meio de medição transitória nos termos do inciso II, art. 34, o faturamento correspondente ao consumo de energia elétrica reativa indutiva excedente só poderá ser realizado de acordo com os seguintes procedimentos:

I - a concessionária deverá informar ao consumidor, via correspondência específica, o valor do fator de potência encontrado, o prazo para a respectiva correção, a possibilidade de faturamento relativo ao consumo excedente, bem como outras orientações julgadas convenientes; II - a partir do recebimento da correspondência, o consumidor disporá do prazo mínimo de
 90 (noventa) dias para providenciar a correção do fator de potência e comunicar à concessionária;

III - findo o prazo e não adotadas as providências, o fator de potência verificado poderá ser utilizado nos faturamentos posteriores até que o consumidor comunique a correção do mesmo;

IV - a partir do recebimento da comunicação do consumidor, a concessionária terá o prazo de 15 (quinze) dias para constatar a correção e suspender o faturamento relativo ao consumo excedente.

Art. 69. A concessionária deverá conceder um período de ajustes, com duração mínima de 3 (três) ciclos consecutivos e completos de faturamento, objetivando permitir a adequação das instalações elétricas da unidade consumidora, durante o qual o faturamento será realizado com base no valor médio do fator de potência, conforme disposto no art. 66, quando ocorrer:

I - pedido de fornecimento novo passível de inclusão na estrutura tarifária horo-sazonal;

II - inclusão compulsória na estrutura tarifária horo-sazonal, conforme disposto no inciso III, art. 53;

III - solicitação de inclusão na estrutura tarifária horo-sazonal decorrente de opção de faturamento ou mudança de Grupo tarifário

§ 1° A concessionária poderá dilatar o período de ajustes mediante solicitação fundamentada do consumidor.

§ 2º Durante o período de ajustes referido neste artigo, a concessionária informará ao consumidor os valores dos faturamentos que seriam efetivados e correspondentes ao consumo de energia elétrica e a demanda de potência reativa excedentes calculada nos termos do art.
65.

Apêndice 2 - Considerações sobre a Aplicação de Sistemas de Correção do fp a Cargas Industriais com Dinâmica Rápida

A2.1 Considerações preliminares

Os métodos e sistemas de compensação estática de energia reativa em "tempo real" ou seja, os sistemas de correção para cargas com dinâmica rápida, vêm se difundindo enormemente nos últimos anos em decorrência das necessidades específicas de algumas aplicações nas instalações elétricas industriais e em grandes edificações comerciais, por possibilitarem a realização de compensações em intervalos de tempo extremamente curtos (tempos globais que podem atingir patamares da ordem de apenas 1 a 2 ciclos da tensão da rede, dependendo da resposta dinâmica dos controladores automáticos adotados).

Como já citado anteriormente, há tipos de cargas presentes fundamentalmente na indústria, para as quais, em função da velocidade de ocorrência de seus ciclos operativos, a adoção de sistemas convencionais para correção do fator de potência é, em princípio, inadequada, uma vez que os sistemas de medição das concessionárias de energia podem detectar e registrar a energia reativa consumida antes que tais sistemas realizem as compensações necessárias.

Exemplos clássicos de cargas dessa natureza são ((ABB(4), 2007) (STAROSTA, 2006)): os sistemas de solda a ponto (ponteadeiras), prensas, guindastes, injetoras, centrifugas (produção de açúcar), pontes rolantes, guindastes, elevadores, sistemas de mistura com carga subitamente variável (borracha, papel, plásticos, cimento, etc) e outras. Nesses casos, e desde que previamente constatada uma dinâmica operacional rápida a eles associada, geralmente apenas os sistemas com maior velocidade de decisão e atuação são capazes de assegurar resultados satisfatórios.

O esquemático apresentado na Figura A2.1 mostra, orientativamente, uma comparação entre as dinâmicas de operação dos sistemas convencionais e sistemas estáticos para correção do fator de potência em tempo praticamente real.



Figura A2.1 – Comparação entre as dinâmicas de correção convencional e "em tempo real" Fonte: (RISI(2), 2006) – figura traduzida e adaptada

A2.2 Principais aplicações industriais

A2.2.1 Sistemas de soldagem a ponto (ponteadeiras)

São largamente empregados nas indústrias automobilísticas / de autopeças e de bens duráveis, segmentos em que são frequentemente encontradas dezenas ou centenas de "ilhas" de soldagem contendo, cada qual, uma ou mais estações / equipamentos.

Via de regra, a utilização dos diversos grupos de equipamentos é aleatória e intermitente. Devido à presença de grande número de estações em operação, a simultaneidade nos instantes de realização dos pontos de solda é um fator que gera elevados picos intermitentes de corrente e, consequentemente, oscilações na tensão de alimentação. Tais oscilações podem, no instante exato das soldagens, submeter as ponteadeiras a tensões não adequadas ao processo de soldagem, o que pode causar, em algumas instalações não adequadamente projetadas, a rejeição (refugo) das peças pelos setores de controle da qualidade. A Figura 7.2 ilustra uma configuração usual na indústria (exemplo: indústria automobilística) para alimentação de grande número de "ilhas de soldagem", objetivando preservar

A Figura A2.2 mostra um arranjo básico de distribuição de energia indicado para utilização em instalações com várias estações de soldagem, objetivando-se obter uma regulação de tensão satisfatória / aceitável e facilidades para alterações de *"lay-out"* nas linhas de produção, com um mínimo de adaptações na infra-estrutura elétrica.



Figura A2.2 – Arranjo de sistema de distribuição elétrica industrial para alimentação de grande número de estações de soldagem Fonte: (FARROW, 2004) – figura traduzida e adaptada

Segundo (FARROW, 2004) e (STAROSTA, 2002), os afundamentos momentâneos de tensão são grandes responsáveis pela perda da qualidade da solda; note-se que, nas estações mais comumente encontradas na prática, quedas de tensão de, por exemplo, 10%, incorrem em reduções de 19% na potência demandada pelos equipamentos, impactando, consequentemente, o calor desenvolvido nos pontos a serem soldados ao longo do tempo previamente regulado para a operação das ponteadeiras (pinças de soldagem).

Os sistemas convencionais para correção do fator de potência não são suficientemente velozes para responder dinamicamente no período em que as soldas são executadas (tempos tipicamente da ordem de 20 a 50 ciclos da tensão da rede). Além do tempo extremamente rápido de operação desse tipo de carga, é comum a existência de sistemas de soldagem monofásicos, ligados entre duas fases ou entre fase e neutro, o que causa desbalanceamentos significativos na rede, sendo necessária a rápida compensação de reativos.

O gráfico da Figura A2.3 ilustra o comportamento dos parâmetros elétricos operacionais típicos de uma instalação com grande número de equipamentos de soldagem a ponto, sem e com as compensações adequadas.



Figura A2.3 – Estações de soldagem a ponto – Comportamento elétrico típico sem e com a compensação de reativos Fonte: (STAROSTA, 2006) – figura traduzida e adaptada

A2.2.2 Transporte vertical de cargas / Pontes rolantes

Na indústria, equipamentos utilizados para içamento e transporte interno de peças e materiais em geral executam diversos movimentos intermitentes e seqüenciais, podendo demandar da rede, em curtos intervalos de tempo, níveis consideráveis de potência reativa. O gráfico da Figura A2.4 apresenta resultados de medições de parâmetros elétricos de uma instalação típica sem (primeira parte do gráfico) e com (segunda parte do gráfico) compensação reativa adequada.



Figura A2.4 – Equipamentos de içamento e transporte vertical – Comportamento elétrico típico sem e com compensação de reativos Fonte: (STAROSTA, 2006) – figura traduzida e adaptada

As pontes rolantes, largamente empregadas em diversos segmentos industriais, operam de maneira similar aos guindastes, possuindo, geralmente, vários motores elétricos com operação combinada em função do trabalho a ser executado. Portanto, podem ocorrer partidas simultâneas e a operação geralmente é intermitente. Nessa situação, elevados níveis de potência reativa podem ser demandados da rede de alimentação em curtos intervalos de tempo.

A2.2.3 Prensas

As prensas são equipamentos muito utilizados em determinados segmentos industriais (fundamentalmente na indústrias automotiva / de auto-peças e indústria metalúrgica) sendo, geralmente, hidráulicas ou mecânicas.

Em vazio, as prensas hidráulicas consomem energia reativa de magnitude praticamente constante, para suprimento da bomba hidráulica. Em carga, observa-se o incremento momentâneo na demanda de potência reativa, perdurando por pequenos intervalos de tempo, quando abrem-se as válvulas para bombeamento do fluido (geralmente óleo) que será introduzido nos cilindros de pressão para a realização do trabalho mecânico necessário.

Nas prensas mecânicas observa-se o consumo de energia reativa intermitente e súbito, ocorrendo apenas quando o trabalho mecânico é efetivamente executado.

A2.2.4 Centrifugas (indústrias de açúcar e álcool)

O processo de centrifugação para a obtenção do açúcar nas indústrias do segmento sucroalcooleiro apresenta consumo variável de energia ativa e reativa. Como a variação da carga é rápida, os sistemas de compensação estática tornam-se aplicáveis para a adequada compensação de reativos, possibilitando o conveniente acompanhamento dinâmico dos ciclos operativos usuais.

A2.2.5 Injetoras

Injetoras são equipamentos muito utilizados nos segmentos industriais de produção de artefatos e peças confeccionadas a partir de compostos plásticos e similares. Sua função consiste em conformar o produto final a partir da matéria prima aquecida, injetando-a sob pressão (por ar comprimido) em moldes.

O consumo de energia reativa desse tipo de máquina varia de acordo com a etapa do processo a ser cumprida. Como, em geral, várias injetoras podem estar presentes em uma mesma instalação, o comportamento global, no que se refere ao consumo de energia reativa, pode ser bastante variável dependendo da diversidade dos ciclos das diversas máquinas em operação, podendo ocorrer oscilações relativamente rápidas.

A2.2.6 Compensação de reativos na partida de motores

Outro exemplo de aplicação dos sistemas de compensação de reativos em "tempo real" relaciona-se à partida de motores. Durante as partidas, considerando-se que boa parte da elevação das correntes e das quedas de tensão a elas associadas são decorrentes da absorção de elavadas parcelas de correntes (e energia) reativas, verifica-se que a compensação em "tempo real" pode exercer uma importante função, evitando a possibilidade de ocorrência de desligamentos intempestivos de cargas ligadas aos mesmos barramentos ou mesmo da própria carga que se encontra em processo de partida (minimiza-se ou elimina-se a possibilidade de desatracamento de contatores em decorrência de afundamentos momentâneos da tensão de alimentação).

Os gráficos da Figura A2.5 apresentam o comportamento da corrente absorvida da linha e da tensão de alimentação de um motor de indução BT durante um período da partida de



aproximadamente 6 segundos, sem (gráfico da esquerda) e com (gráfico da direita) a compensação dinâmica de reativos.

Figura A2.5 – Partida de motores – Comportamento elétrico típico sem e com compensação de reativos Fonte: (ABB(2), 2007) – figura traduzida e adaptada

A2.2.7 Compensação de flicker

O fenômeno denominado "*flicker*", também conhecido por *cintilação* nos sistemas de iluminação, ocorre quando a tensão de um sistema varia sucessivamente em tempos considerados curtos. O fenômeno considera a magnitude das oscilações de tensão (em % da tensão de alimentação) e o numero de vezes que as mesmas ocorrem em um determinado intervalo de tempo. Tais ocorrências são comparadas a valores aceitáveis.

Em uma instalação que contenha lâmpadas incandescentes comuns ou lâmpadas incandescentes halógenas, os fluxos luminosos variam devido às oscilações periódicas na tensão de alimentação e tal fenômeno pode ser constatado visualmente percebendo-se variação da intensidade do "brilho" (fluxo luminoso) das lâmpadas.

A injeção de energia reativa no instante em que ocorrem as causas desse fenômeno (geralmente originado a partir da operação de equipamento(s) com ciclo operativo oscilante, drenando da rede elevados níveis de corrente intermitentemente) evita os afundamentos mais significativos, atenuando esse efeito.

A2.2.8 Injeção de energia reativa para a melhoria da regulação de tensão

A utilização de sistemas de controle automático do fator de potência em "tempo real" possibilita, indiretamente e como função adicional, o controle de tensão de distribuição para

os equipamentos, mantendo-a em patamares mais estáveis e contribuindo para a preservação da qualidade da energia nas instalações elétricas.

Alguns controladores automáticos já tornam possível, inclusive, a operação comandada por algoritmos que, diferentemente dos algoritmos clássicos de injeção de reativos que solicitam a conexão de capacitores, comandam a manobra dos mesmos independentemente do fator de potencia da carga, e tendo como principal premissa o atendimento a parâmetros mínimos aceitáveis para a qualidade da energia.

A2.3 Comentários

Os sistemas de correção do fator de potência em "tempo real" são aplicáveis com eficácia a sistemas elétricos industriais que alimentam cargas cujo perfil de operação apresente dinâmica rápida, ou seja, cargas cujo funcionamento contemple a súbita e repetitiva alteração dos níveis de potência ativa e reativa demandados da rede.

Além da compensação de reativos em si, objetivando a manutenção do fator de potência em patamares desejáveis, um sistema bem conceituado e dimensionado visando a compensação de reativos com rápida resposta dinâmica representa um recurso poderoso e uma importante ferramenta auxiliar no processo de redução de perdas elétricas e na elevação dos patamares de desempenho global das instalações, fundamentalmente no que se refere à qualidade da energia.

Apêndice 3 – Energização de Capacitores "Back-to-Back"

O processo de energização de um banco de capacitores ligado a um barramento que alimente outro(s) banco(s) já energizado(s) e em serviço é usualmente denominado "*chaveamento back-to-back*" (alguns autores utilizam a terminologia "*bank-to-bank*" ao invés de "*back-to-back*"). A Figura A3.1 ilustra essa situação.



Figura A3.1 – Chaveamento de capacitores "back-to-back"

Tal processo, no qual o(s) banco(s) já em operação contribuem para com a carga inicial do banco em processo de energização, deve ser objeto de análise criteriosa por produzir correntes de *inrush* de elevada magnitude em alta freqüência. O surgimento dessas correntes pode ocasionar uma série de problemas, dentre os quais merecem destaque:

.o estresse mecânico / térmico nos dispositivos de chaveamento dos bancos; e

.a introdução de transitórios indesejáveis que afetam os circuitos vizinhos, sendo particularmente vulneráveis os sistemas dotados de dispositivos eletro-eletrônicos sensíveis, tais como relés e dispositivos de controle.

Para a análise básica do processo energização de bancos de capacitores pode-se tomar como referência o esquemático unifilar apresentado na Figura A3.2 (note-se que as resistências ôhmicas presentes em um sistema industrial real, geralmente da ordem de até centenas de miliohms, são negligenciadas na figura).



Figura A3.2 – Chaveamento "back-to-back" – Esquemático unifilar para análise Fonte: (GREENWOOD, 1991), figura traduzida.

Considerando-se, primeiramente, o fechamento da chave S_1 (e mantendo-se aberta a chave S_2) tem-se que a corrente (A) que flui pelo circuito LC_1 equivale a:

$$I_{(t)} = \frac{V(0)}{Z_{(0)}} sen \,\omega_0 t \tag{A3.1}$$

onde:

V(0) = tensão fase-neutro instantânea à entrada da chave S₁, em V; e

 Z_0 (impedância de surto entre a fonte e o capacitor C_1) = $(L/C)^{1/2}$, sendo L corespondente à indutância (em henrys) do sistema a montante do capacitor C_1 (incluindo o sistema de suprimento da concessionária de energia, transformador(es) e cablagens), e C, correspondente à capacitância do capacitor C_1 em farads.

Se o capacitor C_1 encontrar-se completamente descarregado, a tensão V(0) será a tensão instantânea de alimentação / energização. Caso o capacitor C_1 apresente uma carga residual (decorrente de uma energização e desenergização anteriores) e esteja sob uma tensão Vc(0), a tensão de alimentação / energização inicial equivalerá, instantaneamente, à soma algébrica de V(0) e Vc(0). Para o cálculo da provável corrente de *inrush* é usual considerar-se constante a tensão aplicada ao capacitor, uma vez que a frequência de tal corrente é geralmente muito superior à freqüência da rede de alimentação e, sendo assim, a tensão de alimentação / energização e, sendo assim, a tensão de alimentação / energização varia minimamente durante o período de interesse para a análise. Portanto, a corrente de *inrush* ao longo do período de energização pode ser reescrita da seguinte forma:

$$I_{(t)} = V(0) \left(\frac{C_1}{L}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot sen \frac{1}{(L \cdot C_1)^{\frac{1}{2}}}$$
(A3.2)

Obs.: note-se que o termo $1 / (L.C_1)^{1/2}$ da expressão (A3.2) resulta da substituição da variável *f* (freqüência) no termo ω_0 (=2. π .*f*) da expressão (A3.1) pela freqüência do fenômeno transitório aqui abordado [$f = 1 / (2.\pi.(L.C_1)^{1/2})$].

Buscando-se avaliar a corrente de *inrush* em seu valor máximo instantâneo, o que ocorre no instante de pico da tensão de alimentação, tem-se que:

$$I_{MAX} = \sqrt{2} \cdot V_{L-N} \sqrt{\frac{C_1}{L_S}}$$
(A3.3)

onde:

 V_{L-N} = tensão fase-neutro instantânea à entrada da chave S_l , em V;

 $.C_1 = capacitância do capacitor em farads; e$

 L_S = indutância do sistema a montante do capacitor C_1 em henrys (incluindo o sistema de suprimento da concessionária de energia, transformador(es) e cablagens).

A frequência (Hz) da corrente de *inrush* é dada por: $1 / [2. \pi (L_s.C_l)^{1/2}]$.

Quando o banco de capacitores C_2 (totalmente descarregado) é chaveado estando o banco C_1 já energizado no mesmo barramento, tem-se:

$$C_{EQUIVALENTE} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$
(A3.4)

Substituindo (A3.4) em (A3.3), vem que:

$$I_{MAX} = \sqrt{2} \cdot V_{L-N} \sqrt{\frac{C_1 \cdot C_2}{L_s (C_1 + C_2)}}$$
(A3.5)

Obs.: Nesse caso, e considerando-se a energização de C_2 em um instante em que a tensão instantânea de C_1 equivalha à tensão de pico da fonte, pode-se, em princípio, negligenciar a corrente drenada da fonte, aproximação que simplifica o circuito, obtendo-se uma associação série entre C_1, C_2 e a impedância entre ambos (X_L e R, caso esta última venha a ser considerada). É oportuno lembrar que a frequência da corrente de *inrush back-to-back* é geralmente muito superior à freqüência da rede e que, portanto, a tensão da fonte e, consequentemente, sua parcela de contribuição para tal corrente, variam minimamente durante o período de interesse para a análise.

Para que se possa trabalhar a expressão (A3.5) em função das potências reativas nominais dos bancos capacitivos em questão, pode-se desenvolver, com base em (BACK, 200-?) e (CAPACITOR, 200-?), a análise conforme a sequência explicitada a seguir.

Como X_C = 1 / (2.
$$\pi$$
.f.C) e Xc = V_{L-L}² / (Q_(kVAr).1000) \Rightarrow
C = 1 / (2. π .f. X_C) = 1 / [2. π .f. (V_{L-L}² / Q_(kVAr).1000)]
Então:

$$C = Q_{(kVAr)} \cdot 1000 / (2.\pi f. V_{L-L}^{2}) = Q_{(kVAr)} \cdot 1000 / (\omega V_{L-L}^{2})$$
(A3.6)

Substituindo (A3.6) em (A3.5), vem que:

$$\begin{split} I_{MAX} &= \sqrt{2} \cdot V_{L-N} \cdot \sqrt{\left[\frac{\left(\frac{kVAr \cdot 10^{3}}{V^{2} \cdot \omega}\right)_{1} \cdot \left(\frac{kVAr \cdot 10^{3}}{V^{2} \cdot \omega}\right)_{2}}{L_{s} \left(\left(\frac{kVAr \cdot 10^{3}}{V^{2} \cdot \omega}\right)_{1} + \left(\frac{kVAr \cdot 10^{3}}{V^{2} \cdot \omega}\right)_{2} \right) \right)} \\ I_{MAX} &= \sqrt{2} \cdot V_{L-N} \cdot \sqrt{\left[\frac{\left(\frac{10^{3}}{V^{2} \cdot \omega}\right)^{2} \cdot \left(kVAr_{1} \cdot kVAr_{2} \right)}{L_{s} \left(\left(\frac{10^{3}}{V^{2} \cdot \omega}\right) \cdot \left(kVAr_{1} + kVAr_{2} \right) \right) \right)} \right]} \\ V &= V_{L-L} = \sqrt{3} \cdot V_{L-N} \end{split}$$

Extraindo da raiz o termo $[10^3 / (V^2.\omega)]$, e fazendo algumas simplificações e arranjos, vem que:

$$I_{MAX} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{L-N} \cdot \sqrt{10^3}}{\sqrt{3} \cdot V_{L-N} \cdot \sqrt{\omega}} \cdot \sqrt{\left(\frac{(kVAr_1 \cdot kVAr_2)}{L_s((kVAr_1 + kVAr_2))}\right)}$$
(A3.7)

Para a freqüência de rede igual a 60 Hz, a equação (A7) reduz-se a:

$$I_{MAX}(A) \approx 1,33 \cdot \sqrt{\left(\frac{\left(kVAr_1 \cdot kVAr_2\right)}{L_s\left(\left(kVAr_1 + kVAr_2\right)\right)}\right)}$$
(A3.8)

Na expressão (A8), as potências em kVAr deverão ser introduzidas em valores trifásicos. O valor de L (em henrys) deverá corresponder à indutância por fase entre os bancos (associada aos cabos, barramentos e indutores presentes no circuito série entre ambos).

Uma outra expressão passível de utilização para determinação da corrente de *inrush back-to-back* é apresentada a seguir:

$$I_{MAX}(A) \approx 1,75 \cdot \sqrt{\frac{kV_{L-L} \cdot (I_1 \cdot I_2)}{L_S(I_1 + I_2)}}$$
(A3.9)

onde:

 $.kV_{L-L}$ = tensão fase-fase do sistema de alimentação, em quilovolts;

 $I_1 e I_2 =$ correntes nominais dos bancos já energizado e a energizar, respectivamente, em ampéres; e

L = indutância por fase entre os bancos (associada aos cabos, barramentos e indutores presentes no circuito série entre ambos), em henrys.