

2011  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**

2011  
331.3  
M3660  
TGS/MEM

**UMA CONTRIBUIÇÃO DA ÁREA DA**  
**INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA ANÁLISE DA**  
**QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

**DIRBI/UFU**



1000190167

Tese apresentada à coordenação do Curso de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

**ENG. RONAN MARCELO MARTINS, DR.**

Uberlândia, 12 de Novembro de 1999.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**

**UMA CONTRIBUIÇÃO DA ÁREA DA**  
**INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA ANÁLISE DA**  
**QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

Tese apresentada à coordenação do Curso de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia pelo Eng. **RONAN MARCELO MARTINS DR**, para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica; aprovada em 12/11/1999 pela seguinte banca examinadora:

**Prof. ALOÍSIO DE OLIVEIRA, DR. (UFU) – Orientador**

**Prof. HAROLDO RODRIGUES DE AZEVEDO, DR. (UFU)**

**Prof. ADÉLIO JOSÉ DE MORAES, DR. (UFU)**

**Prof. MARCELO LYNCE RIBEIRO CHAVES, DR. (UFU)**

**Prof. MANOEL EDUARDO MIRANDA NEGRISOLI, DR. (ANEEL)**

**Prof. JOSÉ ANTÔNIO CORTEZ, DR. (EFEI)**

Uberlândia, 12 de Novembro de 1999.

**UMA CONTRIBUIÇÃO DA ÁREA DA  
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA ANÁLISE DA  
QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

**ENG. RONAN MARCELO MARTINS, DR**

Tese apresentada à coordenação do Curso de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

---

**Prof. Aloísio de Oliveira, DR.**  
**Orientador**

---

**Prof. Darizon Alves de Andrade, DR.**  
**Coordenador da Pós-Graduação**

*Dedico este trabalho aos meus pais  
(com saudades!!), Antônio e Helena,  
e a Walzinha, minha noiva, pelo  
muito que lhes devo.*



## AGRADECIMENTOS

A Deus pela força e conforto em todos os momentos difíceis da vida.

Ao professor Aloísio de Oliveira, meu orientador, o **meu mais profundo agradecimento** pela paciência, pelas várias orientações, pela segurança transmitida, pela confiança e pela sensibilidade à compreensão aos problemas da vida.

À minha noiva, Walkyria Krysthie Arruda Gonçalves, pelas sugestões e paciência durante a confecção deste trabalho.

Aos meus irmãos Robinson, Rosana e Ronei pela compreensão às minhas várias ausências.

Ao amigo Sérgio Ferreira de Paula e Silva pelas várias sugestões técnicas.

Aos amigos José Roberto Massano, Marcelo Carvalho Álvares (cebola) e Elmo Faria pela presença de espírito.

Aos amigos do mestrado e doutorado.

A minha amiga “madrinha” Dulce Helena Pena de Andrade.

À secretaria da pós-graduação, Joana e Gonçalo, querendo ajudar sempre.

À Universidade Federal de Uberlândia.

À CAPES.

## RESUMO

O uso de bancos de capacitores para a correção do fator de potência é um método bastante difundido na indústria. Entretanto, o aumento de fontes harmônicas no sistema elétrico tem aumentado o risco da ocorrência de ressonância e, conseqüentemente, uma diminuição drástica da qualidade da energia elétrica. Afim de manter o fator de potência, a tensão fundamental, e as distorções harmônicas totais de tensão e corrente dentro dos limites aceitáveis, um Sistema Especialista usando *Fuzzy Logic* para resolução de conflitos de regras foi desenvolvido. O método apresentado neste trabalho possui a capacidade de decidir sobre a distribuição dos bancos de capacitores, e quando necessário, decidir pelo uso de filtros sintonizados, indicando o melhor filtro e a correspondente frequência de sintonia. As decisões são baseadas no fator de potência, na tensão fundamental e nas distorções harmônicas totais de tensão e corrente.

**Palavras Chave:** Qualidade da Energia Elétrica, Compensação de Reativos, Sistemas Especialistas, Lógica *Fuzzy*.

## ABSTRACT

The use of capacitors for correcting the power factor is a very well known approach in industry. However, the increase of harmonic sources in power systems is heightening the risk of resonance and, consequently, a drastic decrease in electric power quality. In order to keep the rating voltage, the power factor, and the voltage and current harmonic distortions within acceptable limits, a Expert System using Fuzzy Logic for resolving conflicts of rules was developed. This approach is able to decide about the optimal distribution of the capacitor banks, and when necessary, decides on the use of filters for harmonic compensation, indicating the best filter and the corresponding tuning frequency. The decisions are based on the rating voltage, the power factor, and the whole voltage and current harmonic distortions.

**Key-words:** Power Quality, Reactive Compensation, Expert Systems, Fuzzy Logic.

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2 – O TERMO “QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA”	3
1.2.1 – A Qualidade da Energia e o Aumento da Produtividade	5
1.2.2 – As Origens dos Problemas Relacionados à Qualidade da Energia	7
1.2.3 – O Perfil da Tensão	8
1.3 – DISTÚRBIOS RELACIONADOS AOS PROBLEMAS DE QUALIDADE DA ENERGIA	9
1.3.1 – Distorções Harmônicas	9
1.4 – AÇÕES PARA A MELHORIA DOS ÍNDICES DE QUALIDADE DA ENERGIA E REDUÇÃO DOS NÍVEIS DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS	13
1.4.1 – Equipamentos Utilizados para a Melhoria da Qualidade da Energia	14
1.5 – A QUALIDADE DA ENERGIA E A NECESSIDADE DE NOVAS CONTRIBUIÇÕES	16
1.6 – A PROPOSTA DO DESENVOLVIMENTO DA TESE DE DOUTORADO	17
1.6.1 – A Motivação dos Desenvolvimentos Propostos	17
1.6.2 – O Controle da Potência Reativa e do Perfil de Tensão	18
1.6.3 – As Propostas Atuais para o Controle da Potência Reativa e da Tensão na Frequência Fundamental	20
1.6.4 – Proposta dos Desenvolvimentos desta Tese	21
1.6.4.1 – A Proposta de um Sistema Especialista para o Controle de Reativo e da Qualidade da Energia	23
1.6.5 – A Estrutura da Tese	27
<b>CAPÍTULO II – SISTEMAS INTELIGENTES</b>	<b>28</b>
2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	28
2.2 – SISTEMAS ESPECIALISTAS	29
2.2.1 – Elementos Básicos de um Sistema Especialista	30
2.2.3 – Produção das Regras de Inferência	31
2.2.3.1 – Métodos de Inferência	32
2.2.4 – Elementos de um Sistema Especialista	33
2.3 – LÓGICA NEBULOSA	35
2.3.1 – Conjuntos Nebulosos	35

2.3.2 – Variáveis Linguísticas	37
2.3.3 – Implicações Nebulosas e Raciocínio Aproximado	39
2.3.3.1 – Composição de Regras de Inferência	40
2.3.4 – Elaboração de um “Decisor/Controlador” Lógico Nebuloso	40
2.3.5 – Premissas para o Desenvolvimento de um “Decisor/Controlador” Nebuloso	42
2.3.5.1 – Estratégias de Fuzificação	43
2.3.5.2 – Construção da Base de Dados	43
2.3.5.3 – Elaboração da Base de Regras	45
2.3.5.4 – Montagem da Máquina de Inferência	45
2.3.5.5 - Estratégias de Defuzificação	45
2.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
<b>CAPÍTULO III – SISTEMA INTELIGENTE PARA A ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA</b>	48
3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	48
3.2 – OBJETIVOS DO PROGRAMA <b>IPQ</b>	50
3.3 – ESTRUTURA DO PROGRAMA <b>IPQ</b>	51
3.3.1 – Interface com o Usuário	51
3.3.2 – Máquina de Inferência do <b>IPQ</b>	61
Bloco 1 – $FP < FP_{min}$	66
Bloco 2 – Armazenar bancos de capacitores e os filtros pré-definidos pelo usuário	66
Bloco 3 – Excluir os bancos de capacitores e filtros pré-definidos pelo usuário.	67
Bloco 4 – Executar FC e FH	68
Bloco 5 – Preparar e determinar as barras prioritárias à compensação de reativos (resolução de regras conflitantes usando lógica nebulosa)	68
Bloco 5.1 – Determinar a potência reativa capacitiva total	70
Bloco 5.2 – Compensar para a obtenção do fator de potência mínimo	70
Bloco 5.3 – Reconhecer as conexões do sistema elétrico	71
Bloco 5.4 – Refinar a instalação dos bancos de capacitores definidos no bloco 5.2	71
Bloco 5.5 – Armazenar as potências capacitivas determinadas pelo bloco 5.4	75
Bloco 5.6 – Ordenar o banco de dados prioridades	76
Bloco 5.7 – Determinar a potência máxima dos bancos capacitores das barras prioritárias	76

Bloco 5.8 – Definir as barras prioritárias do sistema elétrico quanto à compensação de reativos – Regras SE-ENTÃO	77
Bloco 5.9 – Resolução de regras conflitantes usando lógica nebulosa	89
Bloco 5.10 – Verificar a existência de bancos de capacitores e filtros pré-definidos pelo usuário	91
Bloco 5.11 – Distribuir a potência acumulada ( $Q_{AC}$ ) entre as barras de maior prioridade	93
Bloco 6 – Inserir bancos de capacitores e filtros pré-definidos pelo usuário	100
Bloco 7 – Executar FC e FH	100
Bloco 8 – Potência acumulada ( $Q_{AC}$ ) < 1	100
Bloco 9 – Excluir bancos de capacitores e filtros pré-definidos pelo usuário	101
Bloco 10 – Violação na $I_{ef}$ e $V_p$ dos bancos de capacitores	101
Bloco 11 – Violação de $DHV_T\%$ nos bancos de capacitores	103
Bloco 12 – Eliminar a violação buscando outras configurações de alocação ou de equipamentos (bancos de capacitores/filtros)	103
Bloco 12.1 – alterar a lista de prioridades	105
Bloco 12.2 – Identificar os bancos de capacitores que violam os limites de corrente eficaz total ou a tensão de pico	106
Bloco 12.3 – Todas as barras prioritárias foram pesquisadas ou a violação deixou de existir	106
Bloco 12.5 – Concluir sobre as condições de funcionamento dos bancos de capacitores baseando-se nos resultados das correntes eficazes, tensões de pico e nas distorções harmônicas totais de tensão.	108
Bloco 12.6 – Inserir bancos de capacitores e filtros pré-definidos pelo usuário	111
Bloco 12.7 – Executar FC e FH	111
Bloco 12.8 – Decidir sobre instalação de filtro	112
Bloco 12.10 – Existe filtro na barra especificada pelo usuário?	115
Bloco 12.9 – Projetar filtro	116
Bloco 12.9.1 – Harmônica máxima > 0?	118
Bloco 12.9.2 – Existe barra para acomodar $Q_{AC} \neq 0$ ?	118
Bloco 12.9.3 – Escolher a barra para a instalação do filtro no sistema elétrico	118
Bloco 12.9.3.1 – Definir a barra de referência	119
Bloco 12.9.3.2 – Projetar filtros padrões	120
Bloco 12.9.3.3 – Encontrar a fonte harmônica que mais influencia a barra de referência	120
Bloco 12.9.3.4 – Instalar filtro na única barra com fonte harmônica ou naquela com maior $DHV_T\%$	123

ETAPA I – Determinação da potência reativa global necessária através do sistema <b>IPQ</b>	146
ETAPA II – Distribuição da potência reativa global entre as demais barras do sistema elétrico	146
ETAPA III – Comparação entre as decisões do <b>IPQ</b> e aquelas efetuadas pela empresa de consultoria	149
ETAPA IV – Comportamento do programa <b>IPQ</b> perante uma expansão de carga do sistema elétrico	149
4.2.1.4 – Comentários Sobre o Desempenho do Sistema <b>IPQ</b> para o CONSUMIDOR “A”	155
4.2.2 – CASO 02: CONSUMIDOR “B”	157
4.2.2.1 – Objetivo	157
4.2.2.2 – Descrição do Sistema Industrial	158
4.2.2.3 – Resultados Computacionais	161
ETAPA I – Verificação das distorções harmônicas totais de tensão	161
ETAPA II – Determinação da potência reativa global necessária através do sistema <b>IPQ</b>	161
ETAPA III – Compensação distribuída de reativos efetuada pelo <b>IPQ</b>	162
ETAPA IV – Decisão final do sistema <b>IPQ</b> segundo a escolha do usuário	164
4.2.2.4 – Comentários Sobre o Desempenho do Sistema <b>IPQ</b> para o CONSUMIDOR “B”	166
4.2.3 – CASO 03: CONSUMIDOR “C”	167
4.2.3.1 – Objetivo	167
4.2.3.2 – Descrição do Sistema Industrial	168
4.2.3.3 – Resultados Computacionais	171
ETAPA I – Determinação da potência reativa global necessária através do sistema <b>IPQ</b>	171
ETAPA II – Distribuição da potência reativa global entre as demais barras do sistema elétrico	171
ETAPA III – Detecção de problemas harmônicos na instalação da “ÁREA 1”	173
4.2.2.4 – Comentários Sobre o Desempenho do Sistema <b>IPQ</b> para o CONSUMIDOR “C”	174
4.3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	175
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES GERAIS	176
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

O objetivo deste capítulo é apresentar uma abordagem sobre os problemas da qualidade da energia, caracterizar sua importância, expor os principais fenômenos que prejudicam o suprimento de uma fonte de energia adequada, seus efeitos nos vários componentes das redes elétricas, procurando proporcionar meios para a reflexão sobre as ações utilizadas na melhoria e redução destes problemas. Estas considerações certamente levarão a concluir que esta área de conhecimento encontra-se aberta a investigações no tocante ao desenvolvimento de novos equipamentos e ferramentas computacionais dedicadas.

Em décadas passadas a perda da qualidade da energia elétrica não constituía um assunto preocupante, uma vez que os equipamentos, até então utilizados, eram menos sensíveis a tais variações, os problemas eram praticamente inexistentes e não despertavam interesses por parte dos consumidores e concessionárias. Porém, com o desenvolvimento da eletrônica, encontra-se atualmente nos setores residenciais, comerciais e industriais, uma gama variada de equipamentos exigindo tensões de alimentação praticamente



senoidais. Tais exigências tornaram-se dignas de atenção e delinearam objetivos específicos para os engenheiros de potência, dentre os quais podem ser destacadas as seguintes preocupações:

- Estudos e levantamentos dos níveis das distorções harmônicas presentes nas redes de distribuição de energia;
- Estabelecimento de limites para o controle e confronto das distorções harmônicas face às características de suportabilidade dos equipamentos;
- Determinação das amplitudes e frequências dos transitórios envolvidos com os chaveamentos e energizações de capacitores e transformadores;
- Estudos para a correção do fator de potência e seus efeitos na presença de componentes harmônicas e,
- Atender às normas [1] – [3].

Adicionalmente a estes destaques, procurar-se-á na sequência do CAPÍTULO I, proceder as seguintes abordagens:

- o termo “qualidade da energia elétrica”;
- distúrbios relacionados aos problemas de qualidade da energia elétrica;
- ações para a melhoria dos índices de qualidade da energia elétrica e redução dos níveis de distorções harmônicas;
- a qualidade da energia elétrica e a necessidade de novas contribuições;
- a proposta do desenvolvimento da tese de doutorado.

## 1.2 - O TERMO “QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA”

O termo “Qualidade da Energia” inclui uma gama de fenômenos, abrangendo áreas de interesse de sistemas de energia elétrica até problemas relacionados com a comunicação em redes de transmissão de dados. Dessa forma, devem ser divulgados e reconhecidos por todos os setores envolvidos com o consumo, distribuição, transmissão e geração da energia elétrica. Estes fenômenos, principalmente as distorções de tensões e correntes, localizadas tanto nos PAC's (ponto de acoplamento comum) como também dentro das instalações dos próprios consumidores de energia, estão associados diretamente à correção do fator de potência, racionalização da energia e aumento da produtividade. A ocorrência destes problemas determina a necessidade de uma busca mútua de soluções, entre ambas as partes, para a realização de medidas práticas e econômicas.

Concessionárias e consumidores de energia estão cada vez mais preocupados com as características do suprimento elétrico e, o termo “Qualidade da Energia” tem se tornado a palavra chave no âmbito industrial dos últimos anos. Todavia, estes fenômenos não são necessariamente recentes, ou seja, não mais como causas e efeitos isolados, mas como problemas correlacionados. Devido ao crescente interesse pelo tema, encontram-se definições distintas, em função dos anseios e necessidades envolvidos no problema. Para as concessionárias de energia, a definição leva a uma equivalência com a confiabilidade do suprimento elétrico, e por meios de estudos e análises estatísticas, estes resultados podem atingir níveis de qualidade de até 99%. Por sua vez, fabricantes de máquinas e equipamentos elétricos definem a qualidade do suprimento energético, a partir das características necessárias à fonte de

alimentação, garantindo, sobretudo, a operação adequada dos seus aparelhos. Dentre as diversas definições, é notória a ausência de uma padronização comum, associada a esclarecimentos e soluções para os diversos problemas dos sistemas elétricos. De uma forma geral, a conceituação da perda da qualidade da energia, é adotada pelos especialistas da área como sendo:

**“Qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou frequência que resulte em falha ou operação indevida de equipamentos elétricos dos consumidores.”**

Independente da definição e conceituação, a preocupação tanto por parte das concessionárias quanto pelos consumidores, é considerada um assunto técnico emergencial, encontrando respaldo internacional e justificado pelos motivos a seguir:

- Os equipamentos e maquinários atuais estão mais sensíveis às variações da qualidade da energia em relação aos utilizados no passado. Muitos dos aparelhos modernos contêm controles microprocessados e/ou unidades eletrônicas de potência, tornando-se muito sensíveis a certos tipos de distúrbios que, por décadas, podem ter ocorrido sem causar efeitos adversos e, atualmente, resultam em má operação e, sobretudo, redução da vida útil;
- O crescente interesse na racionalização de energia para o aumento da eficiência dos sistemas elétricos, resultou em uma crescente aplicação de equipamentos de alta eficiência, acionamentos eletrônicos e bancos de capacitores para a correção do fator de potência. Estas atitudes levaram ao incremento das amplitudes das componentes harmônicas

nas redes elétricas, e na preocupação generalizada com o impacto destes níveis em futuro próximo;

- O aumento do interesse dos consumidores pelo assunto “qualidade da energia”. Os consumidores estão se tornando mais bem informados sobre os efeitos de alguns fenômenos como: interrupções, descargas elétricas e transitórios de chaveamentos, e estão pressionando as concessionárias para a melhora da qualidade da energia fornecida;
- É crescente a utilização de linhas de comunicações de dados em todos os setores da sociedade, tornando-se necessárias as operações ininterruptas das transações comerciais e dos processos de controle industriais.

### **1.2.1 - A QUALIDADE DA ENERGIA E O AUMENTO DA PRODUTIVIDADE**

O principal interesse pela qualidade do suprimento de energia elétrica está na procura do aumento da produtividade pelos consumidores. As indústrias buscam maquinários mais eficientes, mais rápidos e mais produtivos. As concessionárias de energia, por sua vez, encorajam estas medidas, de forma a propiciar redução de seus investimentos com as ampliações de linhas, subestações e unidades geradoras. Todavia, os maquinários modernos utilizados na aceleração da produtividade e associados com a redução de perdas e aumento da eficiência, caracterizam-se por equipamentos mais sensíveis às falhas e distúrbios dos sistemas de potência. Por outro lado, podem constituir as próprias fontes de problemas e deteriorar a qualidade do suprimento elétrico.

Atualmente, os problemas de qualidade da energia tornaram-se abundantes no vocabulário dos consumidores, preocupados com as possibilidades de queda

na produção de seus insumos e por falha ou operação indevida de seus equipamentos elétricos. Dessa forma, o risco da diminuição da produtividade e do aumento das ocorrências de interrupções nas linhas de produção e nos setores de serviços em geral, apresentam-se com fortes justificativas para a divulgação de metodologias e soluções adequadas ao tratamento destes fenômenos.

A principal razão pela qual existe um interesse mundial em torno dos problemas de qualidade da energia, é sem dúvida o aspecto financeiro. Grandes impactos econômicos envolverão as concessionárias, seus consumidores e os fabricantes de equipamentos elétricos.

Os fabricantes de equipamentos elétricos, por sua vez, encontram-se dentro de um mercado altamente competitivo, com produtos de custo mínimo. Assim, existe um desinteresse geral em adicionar características mais flexíveis aos equipamentos produzidos, no tocante a distúrbios da rede elétrica, sem que haja um pedido formal de seus clientes. Outros fabricantes praticamente desconhecem fenômenos comumente encontrados nos sistemas elétricos ou mesmo ignoram tais efeitos, deixando a responsabilidade de possíveis falhas, entre a concessionária e seus próprios consumidores. Neste caso, destaca-se um dos problemas mais negligenciados pelos fabricantes de equipamentos elétricos, denominado por “distorções harmônicas”. Tal fenômeno, além de caracterizar uma qualidade de tensão distorcida, pode em primeira instância produzir falhas parciais, redução de vida útil ou mesmo a queima dos equipamentos eletro-eletrônicos.

Deste modo, todas as medidas necessárias à operação e proteção adequadas aos equipamentos elétricos, acabam normalmente sendo tomadas somente pelos consumidores que na maioria se encontram despreparados para atuarem nesta área da engenharia elétrica.

### 1.2.2 - AS ORIGENS DOS PROBLEMAS RELACIONADOS À QUALIDADE DA ENERGIA [4-6]

Muitas controvérsias têm sido geradas em função das origens dos problemas encontrados nas redes elétricas. Isto pode ser observado numa pesquisa realizada nos EUA [7], envolvendo o corpo técnico especializado de uma concessionária de energia e de seus consumidores, no intuito de identificar as causas dos problemas de qualidade da energia. As deduções de ambos os lados pesquisados, permitiram concluir claramente sobre um tema em comum em todas as respostas: as perspectivas da concessionária e de seus consumidores são significativamente distintas.

Segundo esta pesquisa, os consumidores acreditam que os fenômenos naturais são as causas de aproximadamente 67% dos problemas de qualidade da energia, opinião bastante coincidente com a resposta da concessionária (60%). Todavia, o consenso acaba quando os consumidores se responsabilizam por cerca de 12% das ocorrências, contradizendo a concessionária, a qual lhes atribui a culpa por 25% dos problemas ocorridos. Mais uma vez, encontra-se uma divergência nas respostas, quando os consumidores responsabilizam a concessionária por provocar cerca de 18% dos fenômenos. Entretanto, a concessionária reconhece que apenas 2% dos acontecimentos são provenientes de suas operações. O pouco consenso reaparece, quando ambos culpam as instalações adjacentes pela responsabilidade de 18% dos casos. Finalmente, os consumidores admitem a existência de outras causas, as quais contribuem com cerca de 4% dos problemas envolvidos com o fornecimento de uma energia de pouca qualidade.

Do exposto, pode-se observar que a ocorrência de um fenômeno num dado local da instalação elétrica, comumente leva os consumidores rapidamente a responsabilizarem a concessionária pela ocorrência de uma sobretensão, e

adicionalmente, na maioria dos casos, os registradores da concessionária não indicam evento anormal no alimentador.

### 1.2.3 - O PERFIL DA TENSÃO

Um destaque no contexto geral da Qualidade da Energia, refere-se ao controle do perfil da magnitude da tensão de suprimento. Dentro deste enfoque encontra-se um grupo de fenômenos que, em conjunto ou isoladamente, provocam a deterioração do suprimento energético. A qualificação destes efeitos tem sido proposta, sem entretanto, estabelecer um consenso a este respeito.

Sob o ponto de vista técnico da operação do sistema, é de extrema importância que o consumidor seja suprido com uma “Tensão”, na qual seus equipamentos possam operar de maneira satisfatória. Tal preocupação, deve ocorrer, principalmente devido ao crescente emprego de cargas eletrônicas no sistema elétrico. Adicionalmente, a própria corrente circulando por uma dada impedância, causará um impacto na tensão, se considerados os seguintes problemas operacionais:

- A corrente resultante de um curto circuito pode provocar uma queda na magnitude da tensão, ou até mesmo sua extinção;
- Elevadas correntes provenientes de descargas atmosféricas, ao circularem pelo sistema de potência, provocam o aparecimento de impulsos de alta tensão, os quais frequentemente rompem a isolação de muitos equipamentos elétricos e levam a outros fenômenos como curtos-circuitos, por exemplo;
- Correntes produzidas por cargas não-lineares, distorcem a tensão de suprimento, que de forma comum passa a alimentar outros consumidores de características lineares.

## **1.3-DISTÚRBIOS RELACIONADOS AOS PROBLEMAS DE QUALIDADE DA ENERGIA**

Desde os primórdios, em que a energia elétrica foi colocada ao bem da humanidade, o suprimento e a manutenção de uma tensão puramente senoidal com amplitude e frequência constantes, tem sido uma premissa a ser observada pelas concessionárias de energia elétrica. Particularmente, ressaltam-se as preocupações com os níveis de distorções harmônicas em regime contínuo e os produzidos pelas energizações de transformadores, como a ferro-ressonância, por exemplo, e outros fenômenos de característica transitória. Relacionados a estes efeitos, tem-se a recente inclusão de um grande número de bancos de capacitores nos sistemas elétricos, onde uma variada gama de ocorrências de ressonâncias tem-se verificado, reforçando o interesse pela qualidade da energia elétrica.

O comprometimento com o fornecimento de uma energia elétrica adequada à operação dos diversos equipamentos elétricos, requer uma avaliação constante e detalhada da ocorrência dos mais variados fenômenos elétricos. Dentre os principais distúrbios sofridos pela tensão de suprimento e atuantes na queda da qualidade do suprimento elétrico, encontra-se as Distorções Harmônicas.

### **1.3.1 - DISTORÇÕES HARMÔNICAS**

Dentre os distúrbios e a qualificação de um padrão de qualidade da energia, a sub-área HARMÔNICOS encontra-se numa posição de destaque. De fato, em se tratando de um sistema elétrico, as tensões de suprimento às instalações consumidoras devem, por contrato, ser perfeitamente senoidais. No entanto, esta condição ideal jamais será encontrada na prática, visto que, as



tensões e as correntes encontram-se distorcidas. Este desvio é usualmente expresso em termos de *distorções harmônicas* de tensão e corrente, e normalmente causadas pela operação de cargas com características não-lineares. A priori, estas correntes se propagam pelo sistema elétrico provocando distorções de tensão em diversos pontos e ocasionando aquecimentos anormais em transformadores, bancos de capacitores, condutores neutros, motores de indução, interferências em equipamentos eletrônicos de controle, comunicação, microcomputadores, etc.

Considerando que atualmente tem surgido cargas sensíveis a tais anomalias, existe uma preocupação, principalmente por parte das concessionárias de energia elétrica, em minimizar e, se possível, eliminar os impactos e os efeitos provocados pelas componentes harmônicas.

Matematicamente, este sinal periódico e distorcido pode ser adequadamente representado em termos de sua frequência fundamental e suas harmônicas. A frequência fundamental é usualmente assumida como sendo igual à frequência de suprimento do sistema e, seus múltiplos inteiros são chamados de harmônicas. Comumente, as componentes harmônicas são medidas na forma de “distorções”, e quantificadas como Distorções Harmônicas Totais, em relação à componente fundamental, segundo as expressões (1.1) e (1.2).

$$DHV_T = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n V_n^2}}{V_1} \times 100[\%] \quad (1.1)$$

$$DHI_T = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n I_n^2}}{I_1} \times 100[\%] \quad (1.2)$$

onde:

$DHV_T$  - Distorção Harmônica Total de Tensão

$DHI_T$  - Distorção Harmônica Total de Corrente

$n$  - ordem harmônica

$V_n$  - tensão harmônica de ordem 'n'

$V_1$  - tensão fundamental

$I_n$  - corrente harmônica de ordem 'n'

$I_1$  - corrente fundamental

Para expressar a distorção individual provocada pelas componentes harmônicas, ou índices de Distorção Harmônica Individual, definidos pela relação do valor da componente harmônica pelo da componente fundamental, utiliza-se as expressões (1.3) e (1.4), respectivamente, para a tensão e corrente:

$$DHV_I = \frac{V_n}{V_1} \times 100[\%] \quad (1.3)$$

$$DHI_I = \frac{I_n}{I_1} \times 100[\%] \quad (1.4)$$

onde:

$DHV_I$  - Distorção Harmônica Individual de Tensão

$DHI_I$  - Distorção Harmônica Individual de Corrente

De uma forma geral, as concessionárias de energia elétrica fornecem uma tensão cuja forma de onda é muito próxima da senoidal. A conexão de uma carga não-linear à rede elétrica, como por exemplo, um forno de indução, ocasionará a circulação de corrente, que se apresentará sob uma forma de onda não senoidal, e, por conseguinte, correntes harmônicas serão produzidas.

Dentre as cargas comumente encontradas e que produzem correntes harmônicas, destacam-se os equipamentos constituídos por semicondutores, tais

como os fornos de indução, acionamentos de velocidade variável, retificadores em geral, tipos de iluminação fluorescente e diversas cargas domésticas. Adicionalmente a estas cargas não lineares, encontram-se outras fontes de harmônicos associados à:

- Substituição de circuitos de iluminação incandescentes pelas modernas lâmpadas de descarga;
- Aplicação de inversores de frequência no acionamento de máquinas rotativas, constituindo os *Adjustable Speed Drivers (ASD)*, no controle de vazão de processo industriais, em substituição aos tradicionais *Dampers* ou válvulas estranguladoras;
- Utilização de fornos a arco voltaico ou de indução.

Esta tendência generalizada, faz com que o conteúdo harmônico injetado no sistema seja cada vez mais elevado, e a circulação dessas correntes pelas redes de distribuição, venha a causar uma série de efeitos indesejáveis em diversos equipamentos e componentes, comprometendo, ainda mais, a qualidade da energia. Nesse aspecto, destacam-se as seguintes influências:

- Aumento do consumo de potência reativa, o que se traduz na redução do fator de potência e no aumento das quedas de tensão nos circuitos;
- Ocorrência de distorções de tensão interferindo nos circuitos de controle e disparo de acionamentos e outros aparelhos eletrônicos;
- Incidência de sobretensões e sobrecorrentes ao longo da rede ou em consumidores, ocasionadas por fenômenos de ressonância.

A combinação destas ocorrências, resultam em uma série de efeitos indesejáveis em diversos tipos de equipamentos e instrumentos.

## **1.4 - AÇÕES PARA A MELHORIA DOS ÍNDICES DE QUALIDADE DA ENERGIA E REDUÇÃO DOS NÍVEIS DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS [7]**

As investigações sobre os níveis de qualidade da energia, frequentemente, necessitam da realização de monitorações para a identificação exata do problema e determinação das soluções a serem implementadas. Entretanto, a alternativa da realização de exaustivas medições em campo, deve ser precedida de investigações sobre o sistema em análise. É necessário conhecer o processo industrial do consumidor, os equipamentos que estão sendo afetados, as instalações elétricas, os tipos de aterramentos e as modificações de operação.

Algumas vezes, as soluções de problemas de qualidade da energia podem ser encontradas sem a realização de extensas monitorações, obtendo-se apenas informações sobre a instalação, conforme sugerido a seguir:

- Identificação da natureza dos problemas, como a perda de dados, os desligamentos indesejáveis, as falhas de equipamentos, a operação indevida de sistemas de controle, etc.;
- Levantamento das características e níveis de suportabilidade dos equipamentos com problemas operacionais;
- Verificação dos períodos de ocorrência dos problemas;
- Existência de problemas simultâneos ou manobras e operações que ocorram ao mesmo tempo, como o chaveamento de capacitores de potência;

- Presença de fontes capazes de variar o índice da qualidade da energia da instalação, como partida de motores, operação de equipamentos eletrônicos de potência, utilização de equipamentos a arco elétrico, etc;
- Utilização de dispositivos para a redução dos problemas de qualidade da energia;
- Levantamento de dados, como os diagramas unifilares, valores das potências e impedâncias dos transformadores, informações dos tipos de cargas, localização dos bancos de capacitores, etc.

Na sequência, é necessário o levantamento em campo das reais condições operacionais da instalação, o respectivo confronto com os dados e informações contidas nos diagramas unifilares e proceder, apropriadamente, as medições e monitorações em locais específicos do sistema elétrico.

#### **1.4.1 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA A MELHORIA DA QUALIDADE DA ENERGIA**

Muitos dispositivos de potência são desenvolvidos objetivando melhorar a qualidade da energia, proporcionando uma fonte de suprimento adequada a diversos tipos de equipamentos eletrônicos. A sua atuação consiste em eliminar ruídos e estabilizar a amplitude e a frequência da forma de onda da tensão.

As características de qualidade do sistema supridor são necessidades variáveis de acordo com cada aplicação exigindo, assim, equipamentos utilizando tecnologias diferenciadas e oferecendo diversos níveis de proteção aos aparelhos elétricos. A escolha e o dimensionamento de um dispositivo para esta finalidade deve inicialmente atender aos seguintes requisitos:

- *Verificar se o problema é realmente de qualidade da energia.* A perda da qualidade do suprimento energético é apenas uma das causas da operação indevida de equipamentos elétricos. Outros problemas de natureza diversificada (problemas de *hardware* e *software*, temperatura e umidade, ambiente poluídos, etc.) podem interferir na operação de muitos equipamentos;
- *Identificar os tipos de distúrbios elétricos.* Para a determinação destes problemas, procede-se a monitoração e verificação das estimativas futuras dos níveis de qualidade do suprimento elétrico;
- *Levantar os gastos para eliminar ou atenuar os problemas.* Algumas estimativas de custos devem ser associadas com os distúrbios do alimentador. Estas incluem a determinação dos prejuízos provenientes dos danos ocasionados ao *hardware*, pela perda de dados, queda de produtividade e erros no processo.

Tendo em vista, a variedade e as características diferenciadas dos equipamentos para o condicionamento da energia, destacam-se na literatura:

- i. Os Transformadores Isoladores;
- ii. Os Filtros ou os Supressores de Ruídos;
- iii. Os Filtros de Correntes Harmônicas
  - Passivos (*Shunt* e Série);
  - Ativos
- iv. Os reguladores de Tensão;
- v. etc.

## **1.5 - A QUALIDADE DA ENERGIA E A NECESSIDADE DE NOVAS CONTRIBUIÇÕES**

De uma forma geral os centros de pesquisa, universidades e fabricantes de equipamentos têm procurado acompanhar a evolução dos problemas e suas soluções, assim como a necessidade de uma estruturação emergencial para atender esta sub-área da engenharia elétrica. Neste contexto, destacam-se as inúmeras publicações técnicas nos últimos quatro anos e o desenvolvimento de novos equipamentos para a avaliação da qualidade da energia elétrica.

Quanto a recursos computacionais dedicados, podem ser destacados alguns programas tais como HARMOD - BRASIL [8], CYMHARM - USA [9], HARP03 – ENGLAND, FILTRO - BRASIL [10], etc.. Estas ferramentas computacionais, isoladamente constituem contribuições importantes para a análise e estudos de qualidade da energia elétrica. Entretanto, não se encontra no mercado nacional, um *software* utilizando a inteligência artificial e que venha a englobar as necessidades básicas e atuais de um engenheiro eletricitista, tais como:

- levantamento de potências reativas, ativas e aparente;
- correção do fator de potência em ambientes distorcidos;
- análise harmônica;
- cálculo de distorções harmônicas equivalentes;
- apresentação de limites harmônicos e suportabilidade dos equipamentos em função das distorções;
- dimensionamento automático de filtros shunt em baixa tensão: sintonizados e dessintonizados;
- dimensionamento de filtros série para baixa tensão;

Neste sentido, encontram-se, ainda, lacunas a serem preenchidas e, sobretudo, a necessidade de desenvolvimentos de novos programas dedicados, propiciando novos desafios à sociedade da engenharia elétrica.

## 1.6 - A PROPOSTA DO DESENVOLVIMENTO DA TESE DE DOUTORADO

### 1.6.1 - A MOTIVAÇÃO DOS DESENVOLVIMENTOS PROPOSTOS

Partindo do princípio de que a função fundamental do controle do sistema de potência é fornecer a todos os consumidores uma frequência e um nível de tensão dentro de patamares aceitáveis a qualquer instante, os usuários esperam um confiável e seguro suprimento de energia elétrica, apesar dos consumidores serem largamente supridos por uma extensa rede de linhas, cabos e transformadores os quais fornecem energia de subestações distantes. Na busca destes objetivos, o suprimento de energia depara-se com difíceis problemas técnicos somado a uma complicada restrição financeira advinda, provavelmente, da crise do petróleo de 1973-74 [11], a qual além de aumentar dramaticamente o preço do petróleo, conduziu o mundo inteiro a uma recessão econômica, diminuindo o crescimento da demanda de energia elétrica. As repercussões financeiras têm, severamente, restringindo as concessionárias em investimentos no sistema de energia. Desde a crise do petróleo, dificuldades têm sido agravadas pelo atraso ou até mesmo estagnação na construção de novas subestações de energia e de linhas de transmissão.

Estes fatores têm contribuído para a mudança na maneira de operação do sistema, por exemplo, a interdependência das concessionárias. Embora tenha havido um avanço no controle operacional do sistema de potência, estes não estão acompanhando o aumento da complexidade operacional do sistema de energia. Um reflexo das dificuldades em controlar o sistema são os *blackouts*, muitos destes devido a instabilidade da tensão. Adicionalmente, a constatação de



problemas com a qualidade da energia elétrica, tem demonstrado uma incessante preocupação por parte dos especialistas desta sub-área da engenharia elétrica.

Neste sentido as referências [11] e [12] têm destacado preocupações quanto a qualidade da energia elétrica e ações emergenciais, tais como:

- **Minimizar investimentos adicionais de capital;**
- **Minimizar os custos de manutenção e operacionais do sistema;**
- **Simplificar o controle da potência reativa e da tensão;**
- **Maximizar a utilização dos equipamentos existentes;**
- **Desenvolver medidas de controle para aumentar a confiabilidade;**
- **Fornecer uma energia com qualidade para os consumidores;**
- **Introduzir novas e renováveis fontes de energia;**
- **Controlar a potência reativa e o perfil da tensão utilizando Inteligência Artificial.**

Especificamente, a fim de minimizar as perdas de potência enquanto são mantidos os níveis de tensão e de fluxo de potência reativa para as várias condições do sistema, os operadores podem utilizar um número de opções como geradores, transformadores com *taps*, capacitores/reatores *shunt*, condensadores síncronos e compensadores estáticos. Todavia, o porte do sistema de potência e as frequentes restrições criaram circunstâncias difíceis para os operadores tomarem decisões e corrigirem problemas de tensão em um dado instante.

### **1.6.2- O CONTROLE DA POTÊNCIA REATIVA E DO PERFIL DE TENSÃO**

Conforme mencionado, a ação de controlar a potência reativa e o perfil de tensão são conhecidos, porém, os impactos ocorridos na qualidade da energia

elétrica tem, sobretudo, exigido técnicas sofisticadas de controle empregando Inteligência Artificial [13]. A aplicação destas técnicas para fornecer diagnósticos e meios de decisão na operação do sistema de potência é, hoje em dia, reconhecida como uma área de grande interesse [12] – [14].

Um progresso significativo tem sido alcançado no desenvolvimento de Sistemas Inteligentes ou baseados no conhecimento. Vários destes sistemas têm sido aplicados em diversas áreas, tendo em vista que o comportamento do moderno sistema de potência interconectado tem se tornado mais e mais complicado, fazendo com que o processo de tomada de decisões seja mais complexo.

Os Sistemas Inteligentes podem ser desenvolvidos para incorporar o conhecimento existente no planejamento e na operação. O desenvolvimento de tais sistemas pode, diante de uma situação crítica detectada, fornecer uma valiosa assistência para as decisões, incluindo suas vantagens [14], dentre as quais se destacam:

- **Um Sistema Inteligente pode ser aplicado para sugerir uma solução rápida aos operadores, fundamentado no conhecimento incorporado;**
- **O conhecimento requerido para desempenhar uma tarefa é expresso em termos de produção de regras (estruturas *IF-THEN*), as quais são bastante próximas da linguagem natural, e portanto, fáceis de serem compreendidas;**
- **Cada regra produzida representa uma parte do conhecimento relevante à tarefa. Assim, é conveniente adicionar ou remover regras e ações de comando, à medida que mais experiência é obtida.**

### 1.6.3 - AS PROPOSTAS ATUAIS PARA O CONTROLE DA POTÊNCIA REATIVA E DA TENSÃO NA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL

Os trabalhos na área de controle de reativos [11], [13] - [25] utilizando a Inteligência Artificial relatam que o problema de gerenciar, por exemplo, potência reativa/tensão é escolhido porque existem regras heurísticas (regras de decisão baseadas na experiência de um especialista) na área. Por exemplo, se uma tensão possui um valor considerado crítico, o operador pode chavear um capacitor *shunt* ou aumentar a posição do *tap* do transformador na barra para restaurar o valor nominal.

De uma forma geral, as propostas no tocante ao controle da potência reativa apresentadas nas referências [11], [13] – [25], apresentam individualmente muitas características particulares e distintas, entre as quais destacam-se:

- Melhoria do perfil da tensão através do controle de reativos;
- Análises dos estudos de controle da potência reativa estabelecidas para o sistema de transmissão;
- Diminuição das perdas através do controle de reativos. Segundo a referência [19], a perda de potência real é uma função não linear da tensão de barra e do ângulo, as quais são implicitamente uma função da variável de controle, potência reativa;
- As análises são realizadas apenas para a frequência fundamental.

Embora as características inerentes aos trabalhos enfocados nestas referências, apresentam-se com objetivos isolados, os mesmos, de forma

unânime, utilizam dos sistemas inteligentes, fundamentados nas teorias de Redes Neurais, *Fuzzy Logic* e Sistemas Especialistas.

A teoria das Redes Neurais, trata-se de um novo paradigma de programação, que é baseado no mecanismo de como o cérebro processa a informação. Relata-se que a sua origem se deu com o modelo matemático dos neurônios por McCulloch e Pitts em 1943. Entretanto, o maior desenvolvimento das Redes Neurais ocorreu em 1980, com o trabalho de Hopfield.

Com relação a *Fuzzy Logic* pode-se dizer que esta é uma teoria baseada nos Conjuntos *Fuzzy* (*Fuzzy Sets Theory*), proposta pelo professor *Lofti A. Zadeh* em 1965, a qual permite o tratamento, manipulação e operação de dados não exatos, isto é, linguísticos. Tal teoria tem sido utilizada em profusão pelos japoneses, atingindo desde sofisticados sistemas de controle até aplicações de pequeno porte, como em eletro-domésticos e máquinas fotográficas.

Embora tais técnicas fundamentadas na inteligência humana sejam atualmente, alvo de polêmicas e soluções futurísticas, a sub-área denominada por Sistemas Especialistas tem sido notoriamente utilizada pela engenharia elétrica nos últimos sete anos. Esta última técnica matemática pode ser fundamentada no conhecimento profissional dos engenheiros eletricitas, haja visto, que a informação para a execução de uma operação está vinculada à sua experiência.

#### 1.6.4 - PROPOSTA DOS DESENVOLVIMENTOS DESTA TESE

Fundamentando-se nos resultados dos trabalhos vinculados às referências [11], [13] – [25] e na capacidade surpreendente da teoria dos Sistemas Especialistas, o CAPÍTULO I, permitiu sobretudo, concluir sobre a existência de lacunas a serem preenchidas e da necessidade de novas contribuições

computacionais. Isto, a priori, pode ser confirmado quando constatou-se que estas referências, apesar das inúmeras contribuições, apresentaram uma estratégia visando controlar apenas, através da análise computacional, o conteúdo de reativo, mantendo o nível da tensão dentro de limites aceitáveis. Entretanto, não foram considerados os seguintes pontos:

- *O controle de reativo visando a correção do fator de potência em média e baixa tensão;*
- *A influência e avaliação das distorções harmônicas, da tensão e corrente.*

De fato, tais aspectos são importantes pois, nos últimos anos, as concessionárias de energia elétrica têm imposto aos seus consumidores, maiores restrições quanto ao fator de potência, visando uma maior eficiência e, sobretudo, têm procurado qualificar e quantificar o impacto das harmônicas na qualidade da energia elétrica. Adicionalmente, encontra-se em vigor a portaria na qual prescreve que os consumidores, especialmente industriais, de uma forma geral deverão manter seu fator de potência num patamar maior ou igual a 0,92. Caso este limite não venha a ser cumprido, as mesmas serão passíveis de um pagamento sobre o excesso de reativo. Diante deste cenário, a necessidade em controlar o fator de potência, mais precisamente a potência reativa, tornou-se vital tanto economicamente como operacionalmente, pois um melhor fator de potência acarretará menores perdas e maior eficiência do sistema de energia evitando, principalmente, o pagamento sobre o excesso de reativos.

#### **1.6.4.1 - DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ESPECIALISTA PARA O CONTROLE DE REATIVO E DA QUALIDADE DA ENERGIA**

Neste contexto, o *software* desenvolvido neste trabalho, utilizando a técnica do domínio da frequência, além de corrigir o fator de potência, também enfoca o controle das distorções da tensão e da corrente devido aos harmônicos, primando por contribuições adicionais àquelas encontradas nas referências [11], [13] – [25], através das regras heurísticas e fazendo uso da linguagem natural.

A princípio, a correção do fator de potência possui uma estratégia de controle baseada nas seguintes informações:

- **Determinação da quantidade de reativo mínimo exigido para que o fator de potência permaneça dentro da faixa permitida;**
- **Qualidade da tensão e da corrente, segundo as recomendações atuais;**
- **Alocação de capacitores, em média/baixa tensão;**
- **etc.**

Após a realização destas ações, sob o enfoque de regime permanente, serão verificados os níveis da tensão harmônica e do fator de potência. Na sequência, uma vez obtida a estratégia para a alocação inicial de capacitores, será verificada a existência de violação quanto aos limites dos níveis de tensão e harmônicos. Em essência, serão retratados, sequencialmente, os passos a seguir:

- (i) Obter informações do sistema elétrico sob análise, ou seja, as tensões de todas as barras, o fator de potência, dados referentes às fontes harmônicas, enfim, todas as informações que constituirão as condições iniciais do sistema;
- (ii) Cumprido o primeiro passo, na sequência o programa computacional executa o fluxo de carga e o fluxo harmônico e, portanto, tem-se neste instante um perfil em regime permanente do sistema elétrico;
- (iii) Imediatamente, o Sistema Especialista, em função das informações obtidas nos primeiros itens, efetua a alocação dos capacitores. Havendo necessidade das instalações dos bancos de capacitores, o *software* procura decidir entre bancos chaveados ou fixos. A priori, tal decisão será função do alívio de carga e dos níveis das distorções de tensão e corrente. É importante destacar que as ações são estruturadas a partir da base de regras e que, caso haja conflito nas decisões, o Sistema Especialista executa o “decisor” nebuloso. Adicionalmente, vale ressaltar que, a cada ação do Sistema Especialista, é executado tanto o fluxo de carga como o fluxo harmônico e que, sobretudo, esta análise é procedida para as informações de dados constantes e a resposta válida para o estado em regime permanente. Entretanto, situações particulares que se enquadrariam em anomalias ou mesmo contingências do sistema, também podem ser simuladas;

- (iv) A partir da alocação dos bancos de capacitores é verificada a existência de violações no valor da tensão fundamental e nos níveis harmônicos. Se nenhuma infração é observada, o processo é finalizado. Caso contrário, inicia-se a etapa (v);
- (v) É verificado se os limites são excedidos no valor da tensão fundamental ou nos níveis harmônicos;
- (vi) Identificado o tipo de infração, procede-se a devida compensação. Se o valor da tensão é excedido, a interferência do operador é consultada. Quanto a violação dos níveis harmônicos, implementa-se a técnica de filtragem;
- (vii) Finalizadas as devidas correções, o processo é encerrado.

Para tal propósito e seguindo, portanto, as tendências da ciência da computação e das aplicações encontradas nas referências [31] – [34], a linguagem de programação a ser utilizada é a orientada a objeto (*DELPHI*), a qual permite maior flexibilidade, modulação e baixa manutenção.

O fluxograma na Figura 1.1, apresentado na sequência, tem o objetivo de mostrar a compilação do *software* a ser desenvolvido ao longo deste trabalho; a sua função é de, resumidamente, esclarecer os desenvolvimentos que serão apresentados nos capítulos posteriores e que constituirá a principal estrutura desta tese de doutorado.



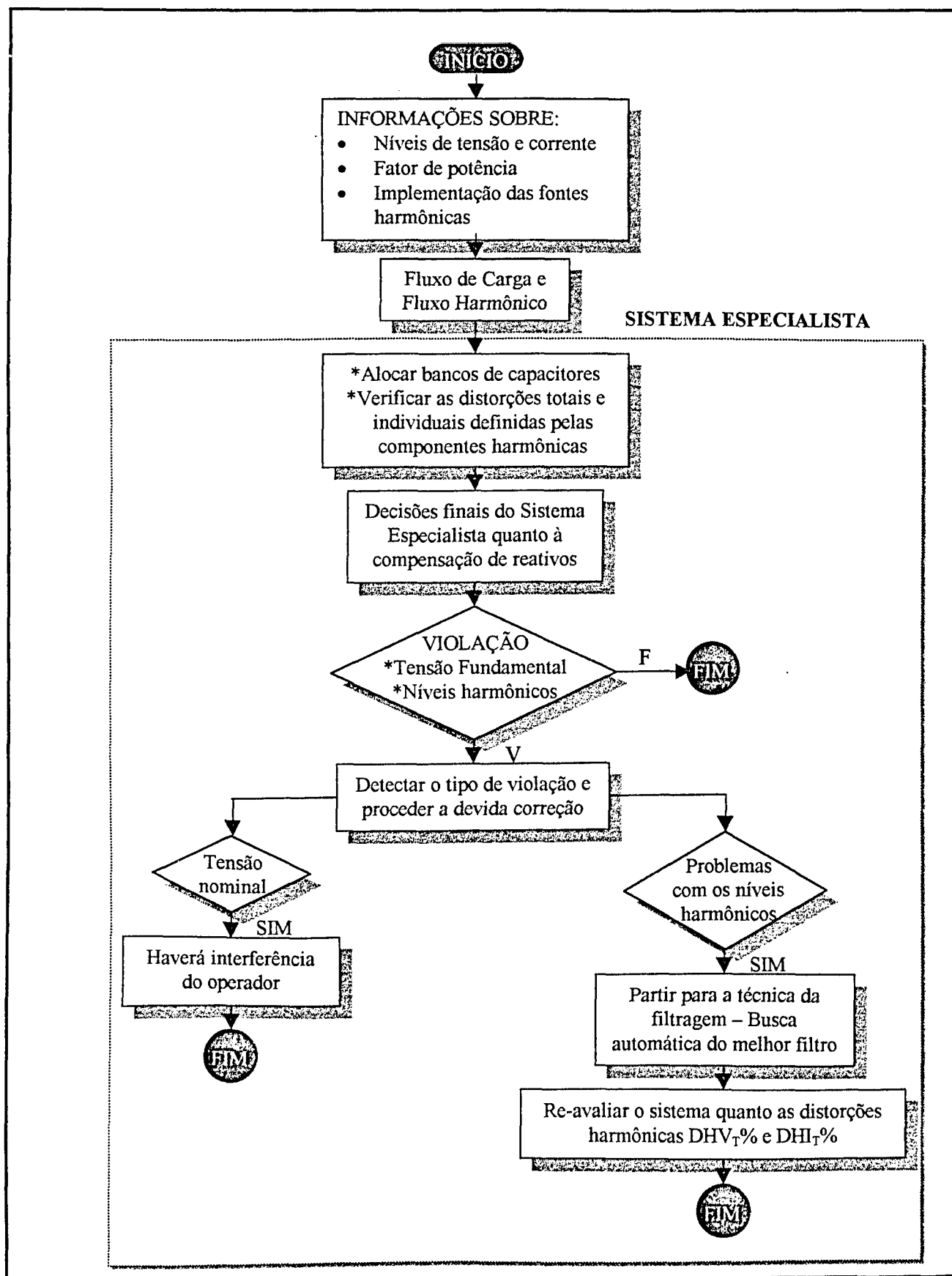


Figura 1.1 – Fluxograma mostrando resumidamente a estratégia adotada neste trabalho para a compensação de reativos.

### 1.6.5 - A ESTRUTURA DA TESE

Uma vez estabelecidas as considerações e expostas as justificativas deste trabalho, é apresentada na Tabela 1.1 uma descrição resumida dos capítulos que compõem esta tese.

*Tabela 1.1 – Descrição dos capítulos II, III, IV e V.*

CAPÍTULO	DESCRIÇÃO
<b>II – SISTEMAS INTELIGENTES</b>	Este capítulo procura retratar os conceitos e características dos Sistemas Especialistas e da Lógica Nebulosa. O sistema inteligente proposto nesta tese, <b>IPQ</b> , estará fundamentado nestas duas teorias. Basicamente são discutidos e ilustrados os elementos e os métodos de inferência de ambas teorias.
<b>III – SISTEMA INTELIGENTE PARA A ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA</b>	O CAPÍTULO III descreve todas as etapas de desenvolvimento do Sistema Especialista, <b>IPQ</b> ( <i>Intelligent Power Quality</i> ), proposto nesta tese. Para tanto, o capítulo é estruturado em duas partes:  (i) interface do usuário – é o meio pelo qual o usuário poderá interferir nas análises do <b>IPQ</b> ;  (ii) máquina de inferência do <b>IPQ</b> – são as estratégias adotadas heurísticamente na busca da qualidade da energia elétrica. Neste contexto, utilizar-se-á o “decisor/controlador” nebuloso desenvolvido em [27] e aplicado em [28] – [31] para a resolução de conflitos das regras de decisão do sistema <b>IPQ</b> .
<b>IV – APLICAÇÃO DO SISTEMA IPQ EM ESTUDOS DE SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS</b>	Neste capítulo, é analisado o desempenho e a confiabilidade do Sistema <b>IPQ</b> , utilizando-se de três sistemas elétricos distintos definidos como CONSUMIDOR “A”, CONSUMIDOR “B” e CONSUMIDOR “C”.
<b>V – CONCLUSÕES GERAIS</b>	Finalmente, são apresentadas as discussões sobre os vários temas que formaram o corpo desta tese. Além disso, são ressaltadas questões associadas as contribuições efetivas, limitações dos desenvolvimentos e propostas as investigações futuras.

# CAPÍTULO II

## SISTEMAS INTELIGENTES

### 2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A compensação de reativos em sistemas industriais contendo harmônicos é uma tarefa que deve ser realizada cuidadosamente. Entre outros motivos, cita-se, o risco da ocorrência da ressonância. Assim sendo, para que a compensação de reativos seja feita da forma mais criteriosa possível, na prática, o consultor desta área de aplicação da engenharia elétrica faz uso de sua experiência. Assim, as decisões finais acerca da compensação são tomadas através de uma composição de decisões heurísticas, associadas às normas operativas e ao conhecimento intuitivo (*feeling*) quanto ao comportamento e operação do sistema elétrico.

Dessa forma, sob o ponto de vista da ciência cognitiva, o consultor processa informações para as tomadas de decisões. Genericamente, todo ser humano é um processador de informação [35]. É neste fato que a Inteligência Artificial se baseia, isto é, transferir para os computadores, o pensamento e a experiência humana na solução dos problemas da engenharia elétrica, de forma tal que os computadores ajam naturalmente conforme a mente humana procederia.

Um grande impulso, neste sentido, foi dado em meados da década de 50, com o aparecimento de um novo ramo da ciência denominado Inteligência Artificial e cuja principal característica é expressar a inteligência humana. Nos dias de hoje, esta ciência se divide em outros ramos, isto é, Sistema Especialista, Linguagem Natural, Robótica, Sistemas Neurais, Lógica Nebulosa, todos estes pertencentes ao domínio da Inteligência Artificial.

No surgimento da ciência Inteligência Artificial, seus principais objetivos estavam voltados para a execução, planejamento e solução de problemas de jogos. Naquela época, não se imaginava que três décadas mais tarde as principais áreas de aplicação de tal ciência seriam a engenharia do conhecimento, isto é, aquisição de conhecimento através de um especialista humano ou qualquer outra fonte.

Neste sentido, tendo em vista que o *software* a ser desenvolvido nesta tese de doutorado retrata as principais características dos Sistemas Especialista e da Lógica Nebulosa (utilização dos conjuntos nebulosos), procurar-se-á na sequência apresentar os conceitos básicos sobre tais teorias.

## **2.2 – SISTEMAS ESPECIALISTAS**

Os Sistemas Especialistas têm suas raízes nos primeiros trabalhos de Feigenbaum, Lederberg, Shortliffe, e Buchanan da Universidade de Stanford, entre o final dos anos 60 e o começo dos anos 70 [35]. Desta época pode-se citar o sistema MYCIN, referente a um sistema especializado em diagnóstico de meningite e infecção bacteriana, e, que nos dias atuais ainda é tomado como padrão no desenvolvimento dos Sistemas Especialistas.

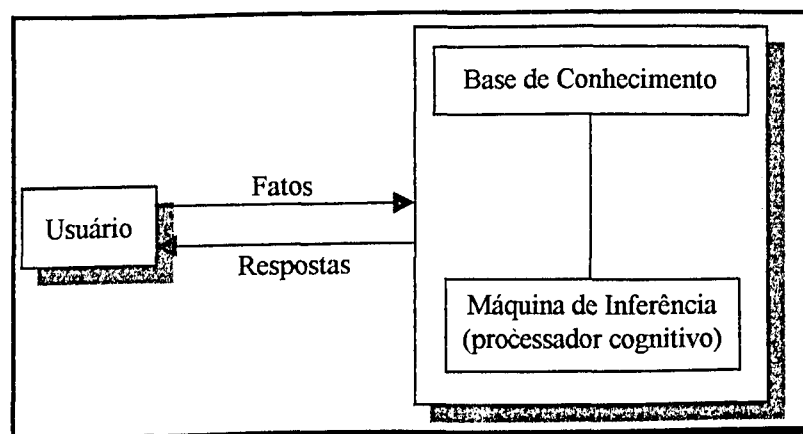
O professor Edward F. Feigenbaum da universidade de Stantford, um pioneiro da tecnologia de sistemas especialistas, tem definido um Sistema Especialista como:

**“Um programa de computador inteligente que usa conhecimento e procedimentos de inferência para resolver problemas. Ou seja, um Sistema Especialista é um sistema computacional que emula a capacidade de tomada de decisões de uma mente humana.”**

Em outras palavras, Sistemas Especialistas é um ramo da Inteligência Artificial que faz uso extensivo de conhecimento especializado para resolver problemas ao nível da mente humana. Um especialista é uma pessoa que tem experiência em certa área. Ou seja, o especialista tem conhecimento ou capacidade especial que não é conhecido ou disponível a muitas pessoas. Um especialista soluciona problemas, com mais eficiência, que muitas pessoas não conseguem resolver.

### 2.2.1 – ELEMENTOS BÁSICOS DE UM SISTEMA ESPECIALISTA

A Figura 2.1 ilustra os elementos básicos de um Sistema Especialista baseado no conhecimento [35] e [36].



*Figura 2.1 – Elementos básicos de um Sistema Especialista.*

A Figura 2.1 mostra que, o usuário insere fatos, ou outras informações, ao Sistema Especialista, e espera receber do mesmo uma resposta. Além disso, observa-se que internamente, o Sistema Especialista consiste de dois principais componentes:

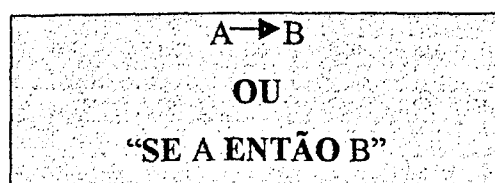
- A base de conhecimento
- A máquina de inferência.

A base de conhecimento contém o conhecimento com o qual a máquina de inferência produzirá as conclusões. Estas conclusões são as respostas do Sistema Especialista ao usuário.

### 2.2.3 – PRODUÇÃO DAS REGRAS DE INFERÊNCIA DE UM SISTEMA ESPECIALISTA

Vários Sistemas Especialistas importantes têm sido construídos expressando a experiência de um especialista sob a forma de regras. Trata-se do conhecimento não escrito, isto é, que deve ser extraído de extensivas entrevistas com o engenheiro de conhecimento sob um longo período de tempo. O seu processo de construção é denominado de engenharia de conhecimento, que, por sua vez, refere-se à aquisição de conhecimento de uma mente humana, ou outra fonte de conhecimento, e é codificado em linguagem de programação computacional.

A partir desta técnica, pode-se representar o conhecimento através de um método comum, isto é, na forma de regras do tipo SE\_ENTÃO (*IF\_THEN*), tais como:



onde:

A - é chamado de Antecedente

B - é chamado de Consequente

**Exemplo de Regra:**

**SE**

o Fator de Potência na barra da concessionária está abaixo do mínimo exigido

**ENTÃO**

a compensação de reativos é necessária

### 2.2.3.1 – MÉTODOS DE INFERÊNCIA DOS SISTEMAS ESPECIALISTAS

Nos sistemas baseados em regras, é a máquina de inferência que determinará qual regra será satisfeita pelos fatos. Neste particular, dois métodos de inferência são comumente usados:

#### (i) Método de Inferência *Forward*

Este método produz a conclusão a partir dos fatos, isto é:

**premissa 1:**  $x$  é  $A'$

**premissa 2:** SE  $x$  é  $A$  ENTÃO  $y$  é  $B$

**consequência:**  $y$  é  $B'$

onde  $A$ ,  $A'$ ,  $B$  e  $B'$  são os fatos e  $x$  e  $y$ , são as variáveis de entrada e saída, respectivamente.

**Exemplo de inferência *forward*:**

**SE**

você observa que está chovendo antes de sair de casa (**Fato**)

**ENTÃO**

você deve pegar um guarda-chuva (**Conclusão!**)

## (ii) Método de Inferência *Backward*

O método *Backward* é uma hipótese a ser comprovada, isto é:

**premissa 1:**  $y$  é  $B'$

**premissa 2:** SE  $x$  é  $A$  ENTÃO  $y$  é  $B$

**consequência:**  $x$  é  $A'$

onde  $A$ ,  $A'$ ,  $B$  e  $B'$  são os fatos e  $x$  e  $y$  são as variáveis de entrada e saída, respectivamente.

### Exemplo de inferência *backward*:

**Hipótese:** Está chovendo?

**SE**

você vê uma pessoa com os sapatos molhados

**E**

com um guarda-chuva

**HIPÓTESE**

será que está chovendo?

A fim de comprovar esta hipótese, pode-se perguntar à pessoa se está de fato “chovendo”. Se a resposta é sim, então, a hipótese é comprovada e torna-se um fato. Portanto, a hipótese pode ser interpretada como um objetivo a ser provado.

## 2.2.4 – ELEMENTOS DE UM SISTEMA ESPECIALISTA

Um sistema especialista consiste dos seguintes componentes:

### (i) Interface do usuário

É o mecanismo pelo qual o usuário e o Sistema Especialista se comunicam.



## (ii) Memória de trabalho (*working memory*)

São bancos de dados globais sobre os fatos usados pelas regras de decisão. A memória de trabalho armazena o conhecimento concreto, o qual tem um caráter transitório e é, também, conhecido por base de fatos. Este tipo de dados não depende de inferência nem do conhecimento abstrato (base de regras). Assim, os fatos a serem considerados neste trabalho serão:

- Resultados de Fluxo de Carga e Fluxo Harmônico
- Entrada de Dados do Usuário
- Normas.

Por outro lado o conhecimento abstrato é composto basicamente por heurísticas. Durante o processo de inferência, a máquina de inferência procura coincidir os fatos com o conhecimento contido nas premissas das regras, tentando deduzir novos fatos ou resultando em ações dentro do processo.

## (iii) Máquina de inferência

Faz inferências decidindo quais regras são satisfeitas pelos fatos, prioriza-as e executa aquelas com mais alta prioridade. Vale ressaltar que a máquina de inferência é estruturada através do conhecimento heurístico que, por sua vez, faz uso dos métodos *forward* e o *backward*.

## (iv) Base de Conhecimento

São as regras de decisão.

A máquina de inferência do Sistema Especialista a qual é abordada no CAPÍTULO III lida, também, com uma outra filosofia de tratamento do conhecimento humano, baseada na Lógica Nebulosa.

## 2.3 - LÓGICA NEBULOSA

No projeto de muitos sistemas decisórios sofisticados, tem-se utilizado de alguns aspectos da inteligência humana para a análise qualitativa do processo. O ser humano é capaz de tomar decisões mesmo quando trabalha com conceitos vagos ou imprecisos. Baseado nisso, Zadeh [16] – [18] por volta de 1960, propôs um método de modelagem de processos de tomada de decisões usando a teoria de raciocínio aproximado, a qual expressa uma decisão por meio de regras lingüísticas. Tal método é baseado na teoria dos conjuntos nebulosos, a qual fornece um meio de representar propriedades vagas, através do elemento (objeto) e de seu grau de pertinência ao referido conjunto.

### 2.3.1 - CONJUNTOS NEBULOSOS

Na teoria clássica dos conjuntos existe uma diferença entre elementos que pertencem a um conjunto e aqueles que não pertencem. Considere um dado sistema onde é necessário especificar a variável lingüística erro(e), no intervalo fechado de 10 a 20. Considere que é necessário definir uma medida de erro, aproximadamente, igual a 15 em termos de conjunto clássico. O conjunto que define esta medida pode ser expresso em termos de uma função de pertinência,  $\mu$ , cujo grau é 1 ou 0.

- Se  $\mu(e) = 0$ , então, o erro não é membro do conjunto.
- Se, porém,  $\mu(e) = 1$ , então, o erro pertence ao conjunto.

Isto é evidenciado na Figura 2.2, sendo usualmente denominado de conjunto conjunto “crisp”.

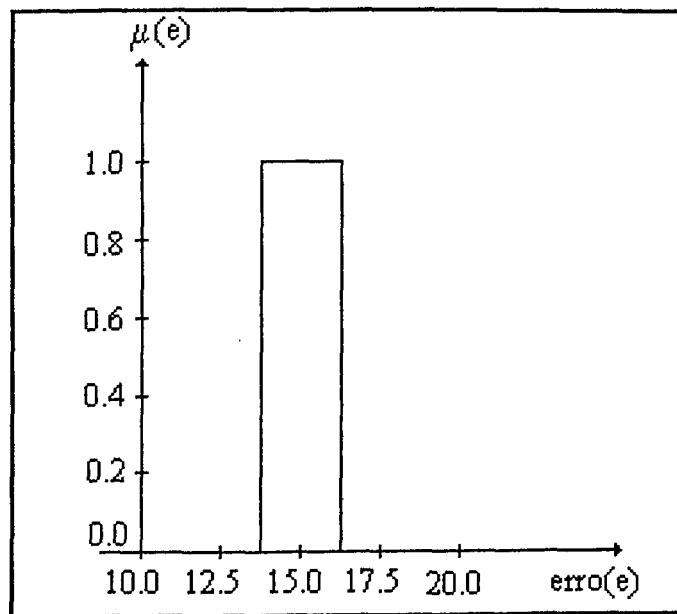


Figura 2.2 - Conjunto “crisp” ou não-nebuloso: erro aproximadamente igual a 15.

Todavia, um conjunto nebuloso  $A$  de um universo  $U$  é caracterizado por uma função de pertinência  $\mu_A(u)$ , tal que a cada elemento  $u \in U$  corresponde um número  $\mu_A(u)$  no intervalo de 0 a 1, o qual representa o grau de pertinência em  $A$ , isto é,

$$A = ((u, \mu_A(u)) | u \in U) \quad (2.1)$$

Assim o conjunto nebuloso que descreve o erro (variável lingüística) como sendo aproximadamente igual a 15 pode ser representado, como mostra a Figura 2.2, e a função de pertinência pode ser vista para todos os valores entre 0 e 1. Também, na Figura 2.2, o universo vai de 10 a 20 e a variável lingüística é o erro. Adicionalmente à sua representação gráfica, um conjunto nebuloso pode

ser representado matematicamente. Quando A é um conjunto nebuloso finito e discreto o mesmo pode ser representado como

$$A = \mu_A(u_1) / u_1 + \dots + \mu_A(u_N) / u_N \quad (2.2)$$

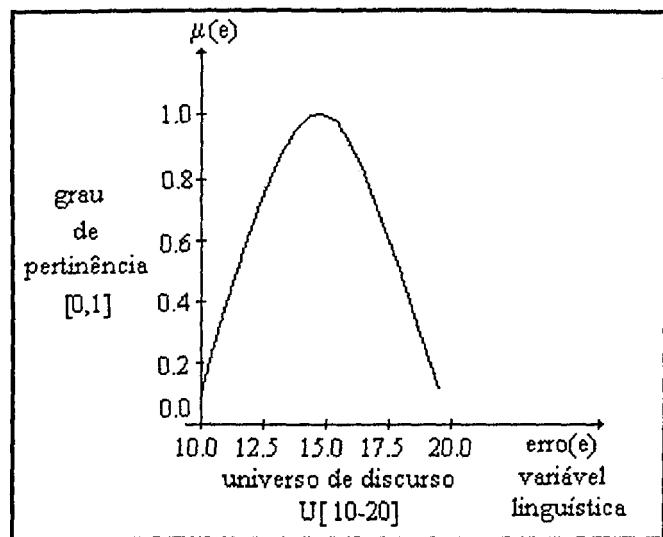


Figura 2.2 - Conjunto nebuloso do erro: erro aproximadamente igual a 15.

### 2.3.2 - VARIÁVEIS LINGÜÍSTICAS

O uso de conjuntos nebulosos [37] possibilita tratar, de forma metódica, um sistema pela manipulação de conceitos vagos e imprecisos. Em particular, empregam-se conjuntos nebulosos na representação de variáveis lingüísticas que, a princípio, são os elementos simbólicos utilizados para descrever o conhecimento, segundo a seguinte estrutura:

- Nome da variável;
- Predicados que identificam lingüisticamente, diferentes regiões do universo;
- Função de pertinência para cada conjunto *fuzzy* designado por um predicado;
- Universo.

Portanto, a variável lingüística pode ser caracterizada, por uma quádrupla:

$$(x, T(x), G_i, U)$$

onde:

$T(x)$  = nome da variável e os predicados lingüísticos de  $x$  (esses termos estão associados a valores em  $U$ )

$G_i$  - função de pertinência associada ao predicado  $i$  e  $U$  é o universo

Considere-se um exemplo: se a velocidade  $x$  é interpretada como uma variável lingüística, então o conjunto de termos  $T(\text{velocidade})$  pode ser:

$$T(x) = T(\text{velocidade}) = (\text{baixa}, \text{média}, \text{alta})$$

onde cada termo de  $T(x)$  é caracterizado por um conjunto *fuzzy* no universo  $U$ . Interprete **baixa** como uma velocidade inferior a cerca de 50 km/h, **média** como uma velocidade próxima à 75 km/h e **alta** como uma velocidade superior a cerca de 100 km/h. Esses termos podem ser caracterizados por conjuntos *fuzzy* cujas funções de pertinência são mostradas na Figura 2.4.

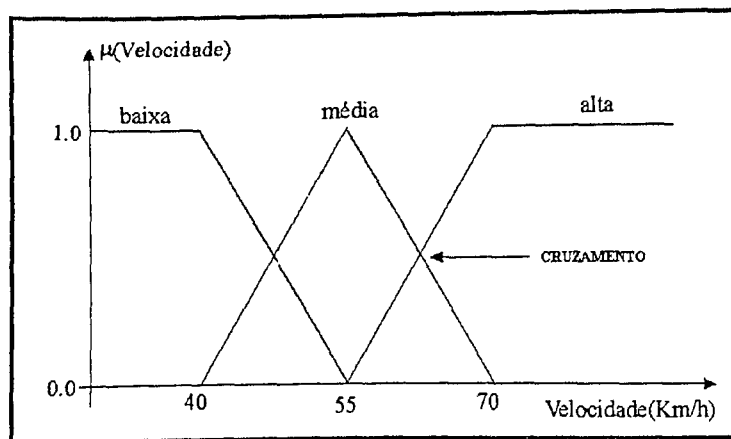


Figura 2.4 - Diagrama para representação nebulosa de velocidades. "Velocidade" é uma variável lingüística com três termos: "baixa", "média", "alta".

No exemplo acima, tem-se três predicados *fuzzy* com a variável lingüística “velocidade”: velocidade é baixa; velocidade é média; velocidade é alta. Esses termos podem ser caracterizados por conjuntos *fuzzy* cujas funções de grau de pertinência  $G_i$  são mostradas na Figura 2.4.

Uma proposição nebulosa é simplesmente a atribuição de um valor, associado a um conjunto nebuloso que descreve uma variável lingüística. O exemplo acima, fornece três proposições nebulosas com a variável lingüística “velocidade”: a velocidade é baixa, a velocidade é média e a velocidade é alta.

### 2.3.3 - IMPLICAÇÕES NEBULOSAS E RACIOCÍNIO APROXIMADO

A engenharia de controle está sempre interessada na relação entre as entradas e saídas do sistema. A fim de obter a relação entre uma variável nebulosa A de entrada e uma variável nebulosa B na saída de um sistema de controle utilizam-se os argumentos condicionais nebulosos, isto é, implicações lingüísticas.

Para relacionar os conjuntos nebulosos A e B de universos U e V, o conceito de implicação lingüística é introduzido:

$$A \rightarrow B, \text{ ou } \\ \text{“Se A então B”}$$

onde:

A - é chamado de Antecedente

B - é chamado de Consequente

Na teoria *Fuzzy Logic*, a condição não precisa estar associada a uma certeza, podendo ser descrita por uma proposição nebulosa, ou por um conjunto destas. Cada proposição significa uma regra. No tipo de regra acima é usado o raciocínio aproximado [18], ou seja, um processo que está relacionado com a representação de proposições da linguagem natural dentro de uma forma compreensível e metódica para que se façam inferências.

### 2.3.3.1 – REGRAS DE INFERÊNCIAS NEBULOSAS

Em geral, várias regras, na forma de implicações lingüísticas são requeridas para fornecer respostas adequadas a um sistema. Portanto, é impraticável ter uma regra para todas as situações possíveis e assim é feita a composição de regras de inferência.

Dada uma relação nebulosa  $R = A \times B$  e dado um valor do conjunto nebuloso  $A'$  de  $A$ , a relação é utilizada para inferir o correspondente valor  $B'$  pelo uso da composição de regras de inferência, a qual é escrita como

$$B' = A' \circ R$$

onde:

“ $\circ$ ” - denota o produto de max-min

### 2.3.4 – ELABORAÇÃO DE UM “DECISOR/CONTROLADOR” LÓGICO NEBULOSO

Para a elaboração de um sistema de decisão lógico nebuloso é utilizado um conjunto de proposições lingüísticas ou regras, as quais definem ações de controle individuais fundamentadas nos sistemas especialistas e nos conjuntos nebulosos.

A configuração de um sistema “decisor” lógico nebuloso (Figura 2.5) enfatiza os principais componentes: um processo de fuzificação, uma base de conhecimentos, uma máquina de inferência, e um processo de defuzificação.

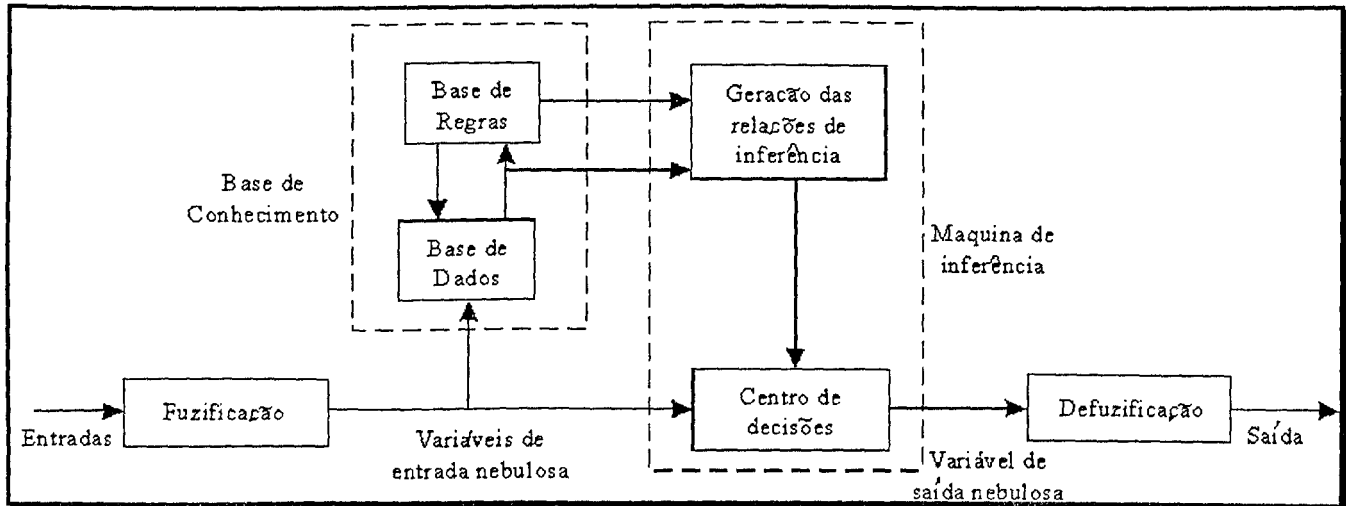


Figura 2.5 - Configuração básica de um “Decisor/Controlador” Lógico Nebuloso.

As funções de cada componente são especificadas resumidamente na sequência:

**(i) O processo de fuzificação envolve as seguintes funções:**

- tomam-se os valores numéricos (não-nebulosos) das variáveis de entrada;
- faz-se um mapeamento para condicionar os valores de entrada aos universos de discurso normalizados e,
- fuzificam-se os valores, convertendo-os em conjuntos nebulosos, de modo que possam se tornar instâncias de variáveis lingüísticas.

**(ii) A base de conhecimentos compreende a base de regras e a base de dados:**

- a base de regras é formada por um conjunto de regras lingüísticas que definem a estratégia de controle do sistema e,



- a base de dados é formada pelas definições necessárias sobre discretizações e normalizações dos universos de discurso, pelas partições nebulosas dos espaços de entrada e saída e pelas definições das funções de pertinência.

**(iii) A máquina de inferência como núcleo do controlador nebuloso tem como funções:**

- inferir ações de controle empregando implicações nebulosas e as regras de inferência da lógica nebulosa e,
- simular tomadas de decisões baseadas nos conceitos nebulosos.

**(iv) O processo de defuzificação desempenha as seguintes funções:**

- efetua um levantamento, no qual compatibiliza os valores normalizados das variáveis de saída com os valores dos universos reais das variáveis e,
- transforma as ações de controle nebuloso inferidas em ações de controle não-nebuloso.

### **2.3.5 – PREMISSAS PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM “DECISOR/CONTROLADOR” NEBULOSO**

O desenvolvimento de sistemas de decisão/controle baseados em lógica nebulosa envolve as seguintes etapas [17]:

- estratégia de fuzificação,
- construção da base de dados,
- elaboração da base de regras,
- montagem da máquina de inferência e
- estratégia de defuzificação.

### **2.3.5.1 - ESTRATÉGIAS DE FUZIFICAÇÃO**

Na fuzificação, os valores numéricos são fuzificados de três formas distintas:

#### **(i) Objetiva**

O operador de fuzificação converte o valor numérico usando um conjunto nebuloso unitário. Basicamente, um conjunto nebuloso unitário é um valor preciso e exato.

#### **(ii) Subjetiva**

O operador de fuzificação converte o valor numérico usando um conjunto nebuloso, que obedece determinadas leis probabilísticas. Por exemplo, uma distribuição triangular.

#### **(iii) Híbrida**

Neste caso, têm-se algumas entradas objetivas (conjunto unitário) e outras subjetivas (distribuição conveniente).

### **2.3.5.2 – CONSTRUÇÃO DA BASE DE DADOS**

Os aspectos da construção da base de dados são constituídos por normalização dos universos de discurso, partição nebulosa dos espaços de entrada e saída, abrangência, escolha da função de pertinência, os quais são definidos a seguir:

**(i) Discretização / normalização dos universos de discurso**

A discretização de um universo de discurso se refere aos níveis de quantização do universo, ou seja, o número de colunas da tabela da base de dados. A normalização de um universo requer a discretização do universo de discurso dentro de um número finito de segmentos, com cada segmento sendo mapeado dentro de um segmento adequado do universo normalizado.

**(ii) Partição nebulosa dos espaços de entrada e saída**

O número de partições nebulosas é igual ao número de linhas da tabela da base de dados.

**(iii) Abrangência**

Intuitivamente, um algoritmo de decisão/controle nebuloso deve ser capaz de inferir ações de decisão/controle para cada entrada do processo. Esta propriedade é denominada abrangência.

**(iv) Escolha da função de pertinência do conjunto nebuloso primário**

Existem dois métodos usados para a definição de conjuntos nebulosos, dependendo se o universo de discurso é um conjunto discreto ou contínuo, e denominados por: numérica e funcional:

**a) *Definição Numérica***

Neste caso, o grau da função de pertinência de um conjunto nebuloso é representado como um vetor de números cuja dimensão depende do passo de discretização.

### **b) *Definição Funcional***

Expressa a função de pertinência de um conjunto nebuloso na forma funcional, ou seja, na forma de funções triangular, trapezoidal, etc.

### **2.3.5.3 – ELABORAÇÃO DA BASE DE REGRAS**

Há, em geral, quatro métodos para se elaborar uma base de regras [17]:

- Baseado nas ações de controle do operador;
- Fundamentado no aprendizado - o sistema se encarrega de criar a sua própria base de regras;
- Baseado no conhecimento e experiência do especialista sobre o processo a ser controlado;
- Alicerçado na modelagem do processo.

### **2.3.5.4 – MONTAGEM DA MÁQUINA DE INFERÊNCIA**

A máquina de inferência se baseia em:

- definição da implicação nebulosa,
- interpretação da regra de controle lingüística,
- definição do operador composicional, e
- tomada de decisões.

### **2.3.5.5 - ESTRATÉGIAS DE DEFUZIFICAÇÃO**

Três métodos têm sido utilizados com sucesso, em diversas aplicações, para se defuzificar a variável, de saída da decisão/controlado nebuloso.

**(i) Critério do máximo**

Significa que a saída do “decisor/controlador” é o valor máximo do conjunto nebuloso

**(ii) Critério da média entre os máximos**

A saída do controlador é a média aritmética entre os máximos do conjunto nebuloso.

**(iii) Critério da média ponderada (ou centro de área)**

Significa que a saída do “decisor/controlador” é dada pela equação (2.3).

$$s' = \frac{\sum S_i \mu(S'_i)}{\sum \mu(S'_i)} \quad (2.3)$$

onde:

$S'$  - ação de decisão/controle do “decisor/controlador” nebuloso

## 2.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram apresentados, neste capítulo, os conceitos e princípios básicos relativos a teoria dos Sistemas Especialistas e dos Conjuntos Nebulosos.

No tocante ao Sistema Especialista a preocupação básica foi frisar que a base desta ciência consiste em representar o conhecimento de um especialista de qualquer área do conhecimento humano, caracterizando os seguintes elementos:

- Interface do usuário;
- Trabalho de memória;
- Máquina de Inferência e,
- Base de Regras.

Ressalvou-se que os métodos usados nas inferências pelo trabalho em questão foram o *forward* e o *backward*.

Após as considerações gerais relativas aos Sistemas Especialistas, o capítulo enfocou a Lógica Nebulosa, pertinente ao domínio da Inteligência Artificial. Foram retratados o caráter linguístico desta filosofia, as implicações nebulosas e as suas respectivas composições de inferência. Na sequência, foi dada uma descrição sobre as bases do desenvolvimento de um “Decisor/Controlador” Nebuloso (DCN), que constituirá, efetivamente, o *software* a ser apresentado no CAPÍTULO III.

## **CAPÍTULO III**

# **SISTEMA INTELIGENTE PARA A ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

### **3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Como mencionado no CAPÍTULO I, o uso de capacitores para corrigir o fator de potência do barramento de entrada de um consumidor industrial é um método bastante difundido. Nesse caso, opta-se pela distribuição de tais bancos dentro da indústria pois, desse modo, é obtida uma redução do fluxo de potência reativa através dos seus cabos e transformadores e, conseqüentemente, uma diminuição das perdas elétricas. Entretanto, a referida distribuição é uma tarefa que requer experiência por parte do engenheiro consultor, não apenas no tocante à compensação em si, mas nos seus efeitos resultantes que venham a ocorrer. Isso porque, com o aumento do número de cargas não lineares presentes nos complexos elétricos industriais atuais, é também crescente o risco da ocorrência de ressonâncias, entre um determinado banco de capacitores e o sistema supridor em alguma frequência harmônica. Esse fenômeno ameaça, não apenas a qualidade da energia elétrica através de altas distorções de tensão mas, também,

a integridade física e operacional de equipamentos, e por conseguinte a exposição de ser humano a tais condições.

Diante disso, pode-se constatar que, as práticas utilizadas no processo de correção do fator de potência devem incluir, além da metodologia clássica do triângulo das potências, a constante verificação das distorções harmônicas de tensão e corrente, a fim de mantê-las dentro de limites estabelecidos por normas e/ou recomendações.

Neste contexto, este capítulo, fundamentando nos **Sistemas Especialistas** e nos **Conjuntos Nebulosos** abordados no CAPÍTULO II, deu origem ao programa computacional **IPQ** (*Intelligent Power Quality*), destinado à automatização dos processos de compensação de reativos, correção do fator de potência, qualidade da tensão e corrente, etc..

Ressalta-se que o “Decisor/Controlador” nebuloso foi aquele desenvolvido em [27] e cujas características são as seguintes:

- A estruturação do “Decisor/Controlador” Nebuloso foi baseada na Figura 2.5 (CAPÍTULO II – seção 2.3.4), isto é, possui um bloco *fuzificador*, uma base de conhecimento, uma máquina de inferência e um bloco *defuzificador*;
- Também, possui uma lógica computacional capaz de manipular eficientemente os parâmetros do DCN (Decisor/Controlador Nebuloso), isto é, construção automática da base de dados. Para tanto, basta informar ao computador o número de quantização, o número de conjuntos nebulosos, o tipo de distribuição (trapezoidal ou triangular) a ser seguida no estabelecimento dos graus de pertinência e a opção de comprimir ou expandir a função de pertinência.



### 3.2 – OBJETIVOS DO PROGRAMA IPQ

O “sistema computacional inteligente” (IPQ) proposto, tem como objetivo decidir, dentre as várias opções, a melhor estratégia para a compensação de reativos de um determinado sistema elétrico. Assim as metas a serem atingidas consistem em:

- *Definir a melhor configuração para a compensação de reativos, a qual varia entre: utilização de apenas bancos de capacitores, composição de bancos e filtros ou, ainda, somente filtros;*
- *Especificar e alocar os bancos de capacitores/filtros a serem usados para a compensação;*
- *Distribuir a potência reativa capacitiva total necessária ao sistema nas barras definidas como prioritárias;*
- *Verificar a suportabilidade dos bancos de capacitores;*
- *Avaliar a qualidade do nível de harmônicos de tensão e corrente;*
- *Especificar automaticamente a ordem de sintonia do filtro e a barra mais apropriada para a instalação do mesmo;*
- *Diagnosticar e informar ao usuário sobre as metas que não foram atendidas.*

Para tanto, a metodologia empregada pelo programa IPQ, utiliza de uma base de conhecimento, a qual é composta pelas informações contidas nas normas regulamentadoras (ABNT, IEEE) e, entrevistas com consultores especialistas na área da qualidade de energia elétrica.

### 3.3 – ESTRUTURA DO PROGRAMA IPQ

Embora o programa IPQ seja provido de vários recursos e interfaces destinados à análise da qualidade da energia, esta seção se restringe à apresentação dos seus principais elementos, referentes ao processo de tomada de decisões, a saber:

- *Interface com o usuário*
- *A máquina de inferência do IPQ*

Em essência, procurar-se-á, na sequência apresentar a estrutura do *software*, os vários blocos e regras que constituirão o programa computacional IPQ que, em outras palavras, também pode ser denominado por um “decisor/controlador” para a análise de contingência e na análise em regime permanente da qualidade da energia elétrica.

#### 3.3.1 – *INTERFACE COM O USUÁRIO*

Para que as decisões sejam as mais abrangentes possíveis, o programa apresenta uma janela, mostrada na Figura 3.1, na qual o usuário pode tomar decisões relativas à compensação de reativos de acordo com a sua conveniência, considerando-se os seguintes aspectos:

- Fator de potência mínimo do sistema elétrico sob o ponto de vista da concessionária;
- Fator de potência desejado na barra da concessionária;
- Fator de potência máximo para cada barra do sistema elétrico sob análise;

- Potência mínima dos bancos de capacitores;
- Definição das barras a serem desconsideradas da lista de prioridades de instalação de bancos/filtros;
- Nível máximo de distorção harmônica total de tensão;
- Identificação das barras possuidoras de fontes harmônicas, nas quais são admitidas distorções harmônicas totais de tensão maior que o permitido?.

**Informações Pertinentes à Correção do Fator de Potência**

FP Mínimo  item A

Corrigir FP Para  item B

FP Máximo  item C

Potência Mínima do Banco de Capacitor(%)  item D

FP: TPanel

Barras do Estudo

Barras que estão fora do estudo

item E

DHV Máx.(%)  item F

Fontes Harmônicas que permitem DHV acima do permitido

Fontes Harmônicas que não permitem DHV acima do permitido

☒ Confirmar  
☒ Cancelar  

item G

Figura 3.1 – Entrada de dados do usuário quanto à compensação de reativos.

A seguir são elucidados os objetivos dos itens citados anteriormente e mostrados na Figura 3.1.

**(A) - Fator de potência mínimo**

O fator de potência mínimo deve estar em conformidade com aquele exigido pela norma regulamentadora. No Brasil, conforme consolidado pela portaria do DNAEE 1569/93 de 23 de dezembro de 1993, valor não deve ser inferior a 0,92.

Após a execução do fluxo de carga e fluxo harmônico, o sistema inteligente comparará o resultado do fator de potência obtido na barra da concessionária com o valor deste item. Dependendo do resultado, proceder-se-á o início do estudo da compensação de reativos.

**(B) – Fator de potência desejável na barra da concessionária**

Neste item, o usuário define o valor desejado do fator de potência na barra da concessionária. Este valor deve ser maior ou igual ao mínimo permitido pela legislação e no máximo igual a 1.

De posse desta informação e do fator de potência atual na referida barra, definido pelos fluxos de carga e harmônico, calcula-se a quantidade de potência reativa capacitiva necessária para a compensação na barra da concessionária, presente no sistema em estudo.

No cálculo da potência do banco de capacitor necessário à compensação é empregado o triângulo das potências conforme a Figura 3.2 e as equações (3.1) a (3.4).

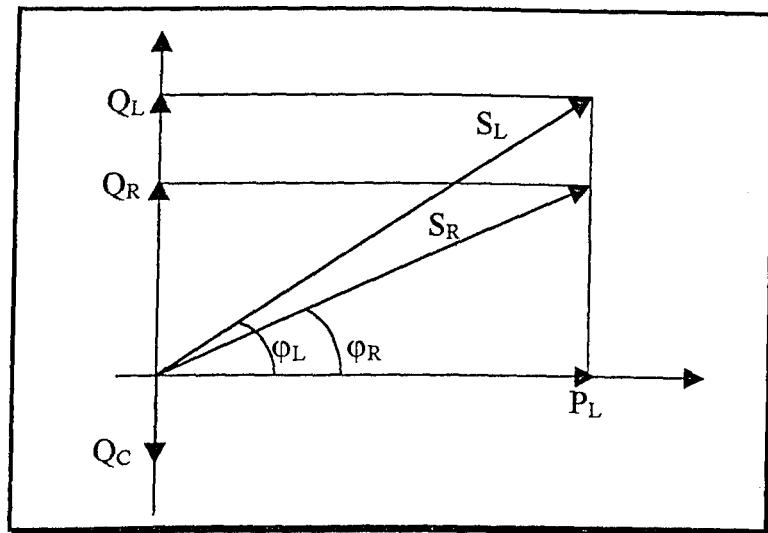


Figura 3.2 – Triângulo das potências ativa, reativa, e aparente.

$$\varphi_R = \arccos(fp_R) \quad (3.1)$$

$$Q_R = \operatorname{tg} \varphi_R * P_L \quad (3.2)$$

Logo,

$$Q_R = Q_L - Q_C \quad (3.3)$$

$$Q_C = -(Q_L - Q_R) \quad (3.4)$$

Onde:

- $Q_L$  - potência reativa total da carga na barra da concessionária
- $P_L$  - potência ativa total da carga na barra da concessionária
- $S_L$  - potência aparente total da carga na barra da concessionária
- $\varphi_L$  - ângulo do fator de potência atual na barra da concessionária
- $\varphi_R$  - ângulo do fator de potência desejado na barra da concessionária
- $fp_R$  - fator de potência desejado na barra da concessionária
- $Q_R$  - potência reativa total resultante após a aplicação de  $\varphi_R$
- $S_R$  - potência aparente total resultante após a aplicação de  $\varphi_R$

$Q_C$  - potência do banco de capacitor para atingir o fator de potência desejado,  $\cos\phi_R$ .

**(C) - Fator de potência máximo nas barras de baixa/média tensão do sistema elétrico sob análise**

Dependendo da conveniência do usuário, a potência reativa capacitiva  $Q_C$ , necessária à compensação do sistema elétrico, pode ser distribuída nas demais barras que compõem o sistema elétrico, ao invés de ser instalada totalmente na barra da concessionária. Com isso, para evitar que tais barras assumam fator de potência capacitivo após a distribuição, este é limitado a um valor máximo.

Portanto, o sistema computacional conhecedor desta informação calcula a quantidade de potência reativa capacitiva necessária à compensação de cada barra, garantindo que o fator de potência da mesma não tornará capacitivo.

Ressalta-se que para cada barra do sistema elétrico é usado o respectivo triângulo de potências. Todavia, a potência máxima do banco de capacitor é calculada para o valor de fator de potência indicado neste item. E, ainda, para as barras que possuem fator de potência acima do valor indicado neste item, o valor da potência máxima do banco de capacitor é igualado a zero.

**(D) - Potência mínima permitida para os bancos de capacitores**

O intuito desta informação é impedir a instalação de bancos de capacitores cujas potências não tenham um valor representativo. O cálculo da potência mínima é feito pela expressão (3.5).

$$Q_{\min} = (D(\%) * Q_C) / 100 \quad (3.5)$$

Onde:

- $Q_{\min}$  - potência mínima permitida para os bancos de capacitores  
 $D(\%)$  - valor percentual da potência mínima, em relação àquela necessária para atingir o fator de potência requerido, inserido neste item.

De posse do valor de  $Q_C$ , calculado no item B, e do valor percentual inserido neste item, determina-se o valor mínimo da potência dos bancos de capacitores a serem instalados.

O valor de  $D(\%)$  pode variar de 0 a 100%. Assim, quando o mesmo for preenchido com zero significa que não existe restrição alguma quanto aos valores das potências dos bancos de capacitores a serem instalados. Por outro lado, quando for igual a 100%, significa que a potência reativa necessária à compensação pode ser instalada somente na barra da concessionária.

Deve-se frisar que o valor indicado neste ponto é determinado pelo usuário de acordo com a sua conveniência. Caso não seja indicado valor algum, o sistema adota um padrão igual a zero.

### **(E) - Barras prioritárias ao estudo**

A princípio, todas as barras de um sistema elétrico industrial possuem o mesmo grau de prioridade em termos de compensação de reativos. Entretanto, durante o levantamento das informações necessárias a esta tarefa em indústrias e

concessionárias tem-se constatado que, muitas vezes, o usuário necessita priorizar de forma incondicional o estudo da compensação de reativos para determinadas barras do sistema elétrico (Um caso real desta natureza ocorreu com um dos casos estudados no CAPÍTULO IV). Além disso, a pertinência de uma determinada barra à referida lista de prioridades pode ser influenciada por, até mesmo, detalhes arquitetônicos, como por exemplo, falta de espaço físico para a instalação de bancos de capacitores ou de filtros.

Diante destas situações, verifica-se a importância de se informar ao sistema **IPQ** tais peculiaridades e conveniências do sistema elétrico, de tal maneira que as decisões a serem tomadas não levem em consideração apenas os aspectos técnicos. Essas informações são fornecidas ao programa através deste item da entrada de dados o qual está representado na Figura 3.3, e consiste de duas colunas.

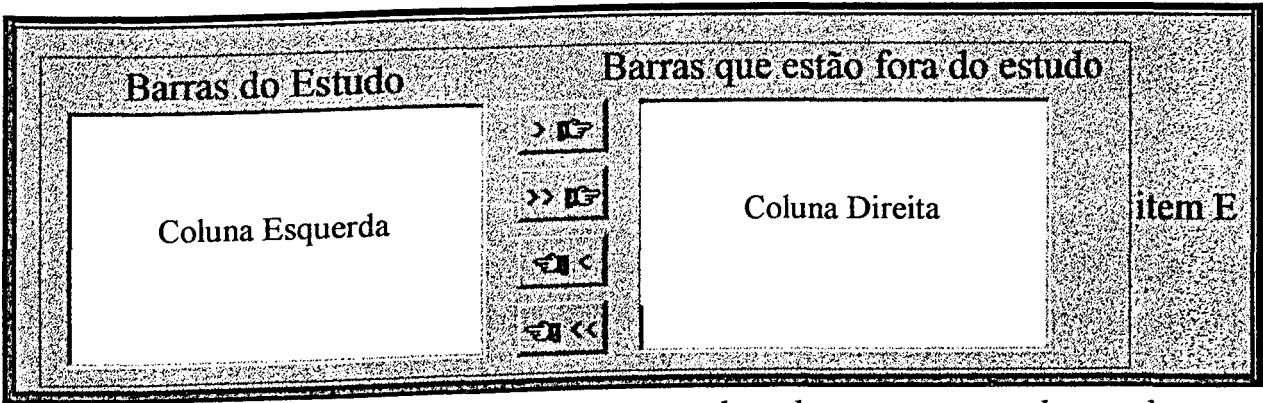


Figura 3.3 – As barras listadas na coluna da esquerda podem ser compensadas e as barras listadas na coluna da direita permanecem inalteradas.

As barras do sistema elétrico inseridas na coluna esquerda é que serão analisadas no momento da distribuição dos bancos de capacitores e dos filtros. Para tanto, o sistema **IPQ** deve determinar dentre as barras inseridas nesta coluna as mais prioritárias, levando-se em consideração fatores exclusivamente técnicos. Vale ressaltar que deve conter no mínimo uma barra esta coluna, para que seja dado início ao estudo de compensação.



Por outro lado, todo início de análise de compensação de reativos, a coluna da direita está em branco, ou seja, nenhuma barra possui restrição quanto à alocação de bancos de capacitores e filtros. Mas à medida que o usuário determina a necessidade de excluir alguma barra do estudo de compensação de reativos, a mesma é deslocada para a coluna da direita. Assim pode-se estudar várias configurações diferentes de distribuição de bancos de capacitores e filtros, dentre as quais, destacam-se:

- Permitir a instalação de bancos de capacitores ou filtros apenas na barra da concessionária;
- Fazer o estudo de compensação de reativos mantendo as potências dos bancos de capacitores e filtros, já fisicamente instalados no sistema elétrico, inalteradas;
- Considerar, na compensação de reativos, todas as barras do sistema elétrico com exceção da barra da concessionária.

Assim, as barras listadas na coluna da esquerda tem sua compensação passíveis de mudanças, enquanto que, os capacitores e filtros das barras listadas na coluna da direita permanecerão inalteradas.

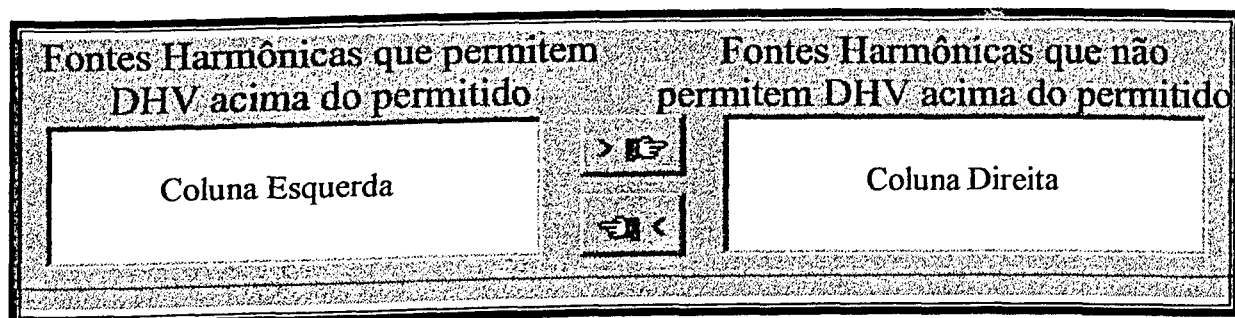
### **(F) - Máxima distorção harmônica total de tensão (%)**

Neste item o usuário indica o valor máximo de distorção harmônica total de tensão permitido em todas as barras do sistema elétrico. Este dado será usado como parâmetro de controle das harmônicas.

**(G) - As barras onde se encontram as fontes harmônicas podem admitir distorção harmônica total de tensão maior que o máximo permitido?**

Durante as entrevistas com os especialistas da área de compensação de reativos, constatou-se que as barras possuidoras de fonte harmônica e, somente nestas, podem operar com valores de distorção harmônica total de tensão acima do permitido. Tal procedimento é permitido, desde que o fabricante dos equipamentos conectados a estas barras garanta que os mesmos toleram determinados níveis harmônicos, ou simplesmente obedecer uma determinação do usuário.

A fim de que o sistema **IPQ** possa relacionar esta informação nas suas decisões, foi elaborado este item o qual consiste de duas colunas, conforme mostra a Figura 3.4.



**Figura 3.4 – Restrição as barras que possuem fonte harmônica.**

Na coluna da esquerda, são listadas as barras que contêm fontes harmônicas e onde, portanto, são permitidas distorções harmônicas totais de tensão acima do limite. Caso o usuário queira o máximo de rigor no controle da distorção harmônica total de tensão nestas barras, basta transferir as barras da coluna esquerda para a coluna direita.

Para o melhor entendimento deste item, suponha a seguinte situação. O sistema **IPQ** distribui toda a potência reativa capacitiva necessária à

compensação do sistema elétrico, sob a forma de bancos de capacitores, mantendo as seguintes grandezas dentro dos limites recomendados: o fator de potência, a corrente eficaz e a tensão de pico sobre os bancos de capacitores, distorção harmônica de tensão nas barras que não possuem fonte harmônica e tensão fundamental de todas as barras. Entretanto, quanto aos níveis harmônicos de tensão nas barras que possuem fontes harmônicas, estes se apresentam acima do limite máximo aceitável de distorção harmônica total de tensão.

Embora estes níveis estejam acima do permitido, os mesmos não estão influenciando as demais partes do sistema elétrico pois, a compensação do sistema elétrico ocorreu naturalmente sem detectar problemas oriundos de harmônicos.

Com este panorama, o sistema **IPQ** consulta a opinião do usuário através deste item. Isto significa dizer que, se as barras estiverem na coluna esquerda, o sistema **IPQ** encerra o processo de compensação de reativos. Por outro lado, se as barras que possuem fonte harmônica estiverem na coluna direita, o sistema **IPQ** reavaliará o sistema elétrico considerando, agora, a instalação de filtros.

A situação colocada anteriormente é apenas para ilustrar a importância deste item e este somente será consultado na situação apresentada. Assim, na impossibilidade de compensar o sistema elétrico apenas com bancos de capacitores, o sistema **IPQ** decide pela instalação de filtros, independentemente da consulta deste item, pois, trata-se de uma condição natural do sistema elétrico.

Ressalta-se que, para as barras que não possuem fonte harmônica, a permanência da distorção harmônica total de tensão dentro dos limites aceitáveis, é garantida pela filosofia de controle adotada neste trabalho.

Diante do exposto, pode-se dizer que as informações contidas nos itens A até H levam à união das condições naturais do sistema elétrico de potência com as conveniências do usuário.

### 3.3.2 – MÁQUINA DE INFERÊNCIA DO IPQ

O segundo elemento do sistema **IPQ** a ser descrito é a máquina de inferência.

De posse da base de conhecimento, estruturar-se-á a Máquina de Inferência, a qual responderá às perguntas que o usuário (engenheiro consultor), normalmente, faz durante a análise de compensação de reativos, destacando-se:

- a) Qual a potência do banco de capacitor necessária para cada barra?
- b) Em que barras devem ser instalados os bancos de capacitores ou filtros?
- c) Que medida deve ser tomada para que nenhuma barra do sistema elétrico tenha fator de potência capacitivo?
- d) A instalação de bancos de capacitores é suficiente para atender aos requisitos de qualidade da energia elétrica em termos de harmônicos?
- e) As fontes harmônicas do sistema elétrico estão influenciando outras partes do mesmo?
- f) Havendo necessidade de filtro, qual a potência do banco de capacitores para o projeto do mesmo? Para que ordem de sintonia e qual fator de qualidade deve ser projetada o filtro? Quantos filtros são necessários?
- g) A compensação de reativos do sistema elétrico é feita em que nível da tensão (alta, média ou baixa)?
- h) A instalação de transformadores com *tap* variável é necessária?
- i) Qual a melhor distribuição de bancos de capacitores e filtros a ser utilizada?

A Figura 3.5 procura ilustrar simplificadaamente os elementos do sistema **IPQ** e de uma forma resumida a estratégia adotada na obtenção das respostas às perguntas supra-citadas. Além disso, pode-se visualizar o bloco referente ao fluxo de carga e fluxo harmônico cuja função é a geração de fatos a serem analisados pela máquina de inferência.

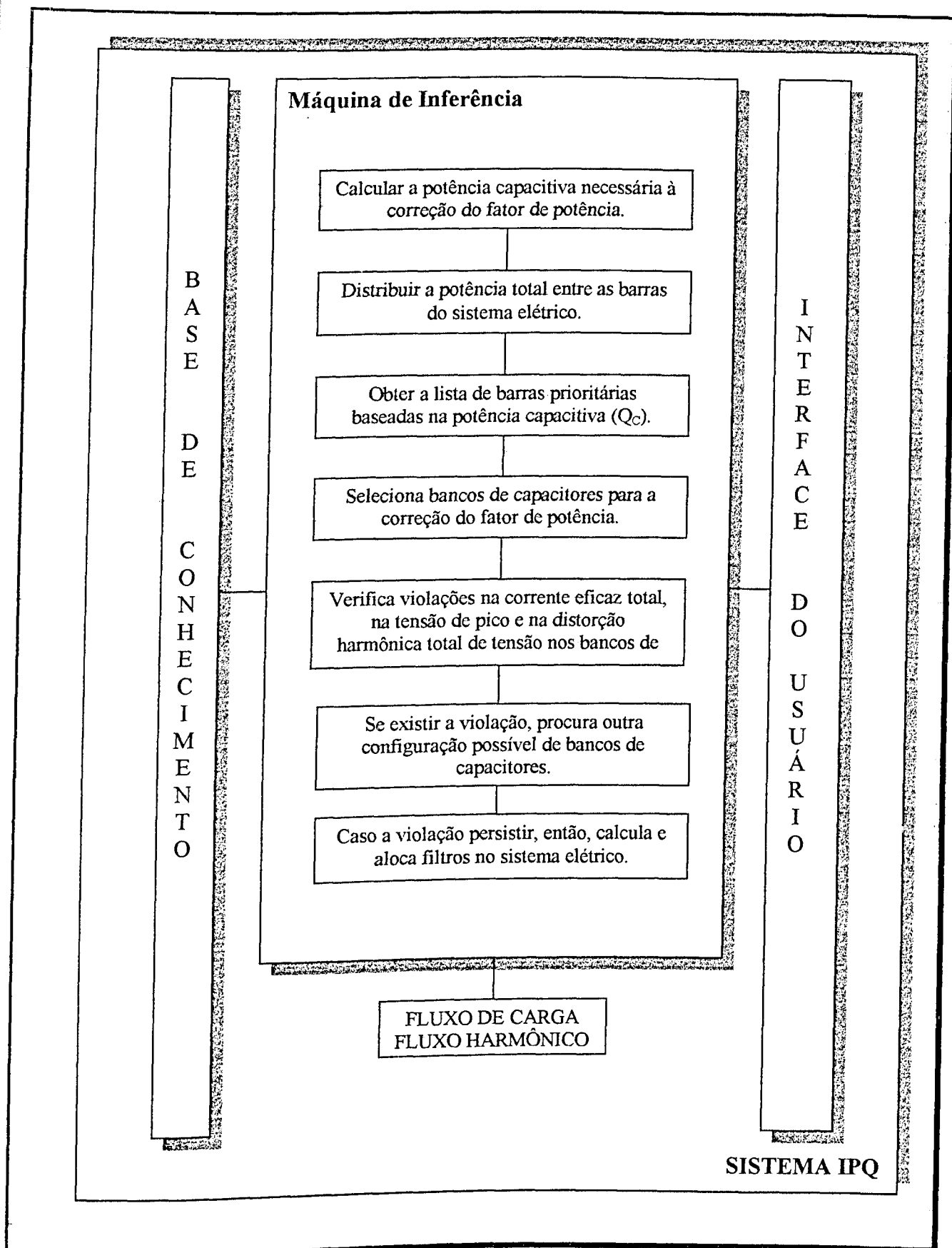


Figura 3.5 – Estratégia adotada pelo sistema IPQ.

Esta seção procura implementar a máquina de inferência, a qual tem como objetivo imediato compensar o sistema elétrico sem ocasionar violações na tensão fundamental e nos níveis harmônicos de tensão e corrente.

Assim sendo, a máquina de inferência relaciona todas as informações pertinentes ao sistema elétrico, ou seja, dados de entrada do usuário juntamente com aquelas informações resultantes do fluxo de carga e do fluxo harmônico, como por exemplo, tensão fundamental, fator de potência de todas as barras, distorções harmônicas de tensão e de corrente, etc..

Neste ponto, a estratégia de compensação de reativos adotada é reflexo da experiência dos especialistas desta área da engenharia elétrica.

A Figura 3.6 mostra a máquina de inferência para à compensação de reativos através da utilização de bancos de capacitores ou de filtros. Para um melhor entendimento do funcionamento da estrutura, cada bloco é discutido minuciosamente nos parágrafos que se seguem.

Cabe destacar que os métodos de inferências utilizados foram o *forward* e o *backward* e que as regras de decisão estão fundamentadas no conhecimento de um especialista da área da Qualidade da Energia Elétrica. Além disso, as estratégias estão representadas por fluxogramas em níveis, isto é, os detalhes vão sendo adquiridos à medida que o usuário for se aprofundando dentro dos blocos.

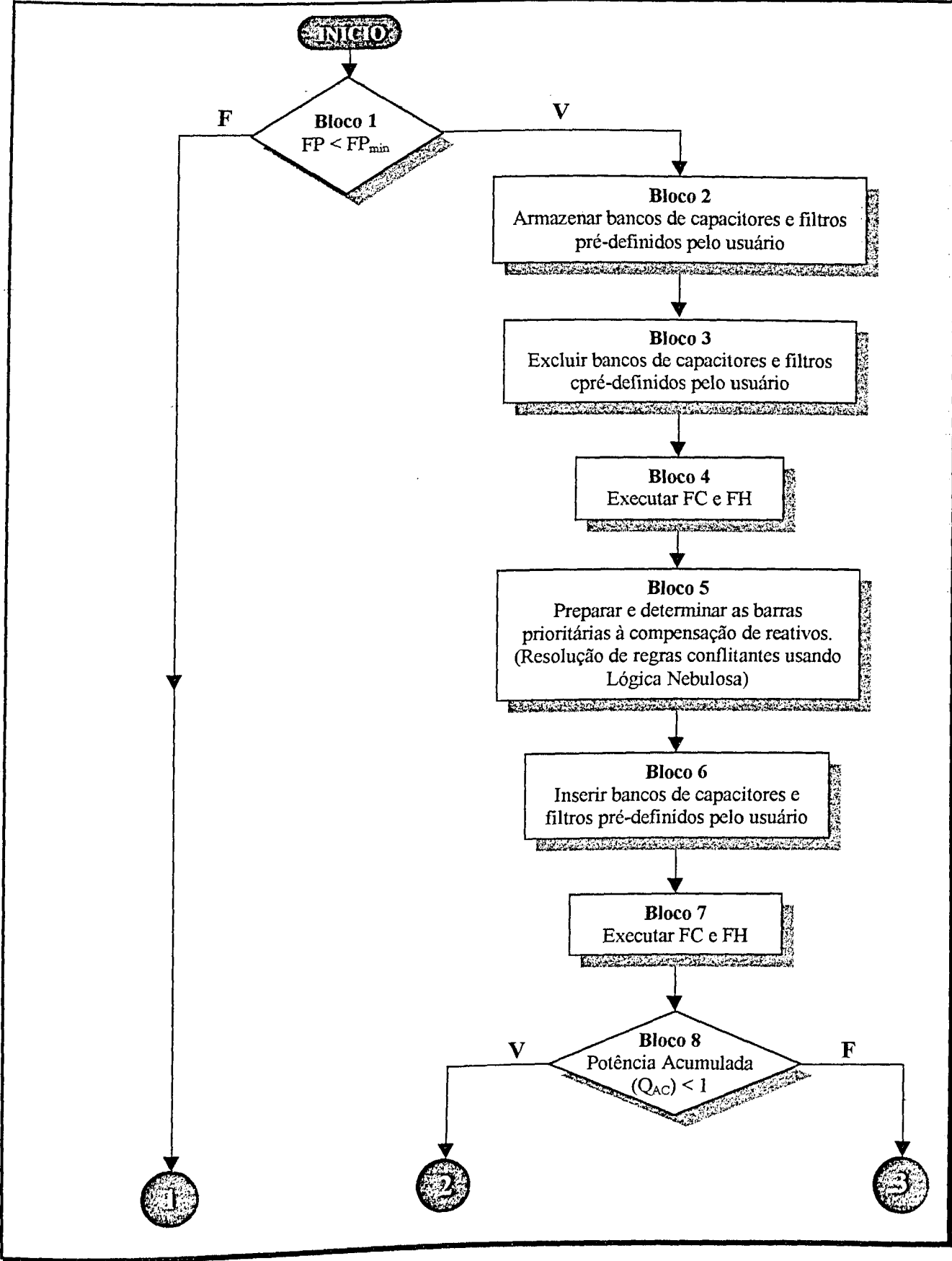


Figura 3.6 – Máquina de inferência (Parte I)

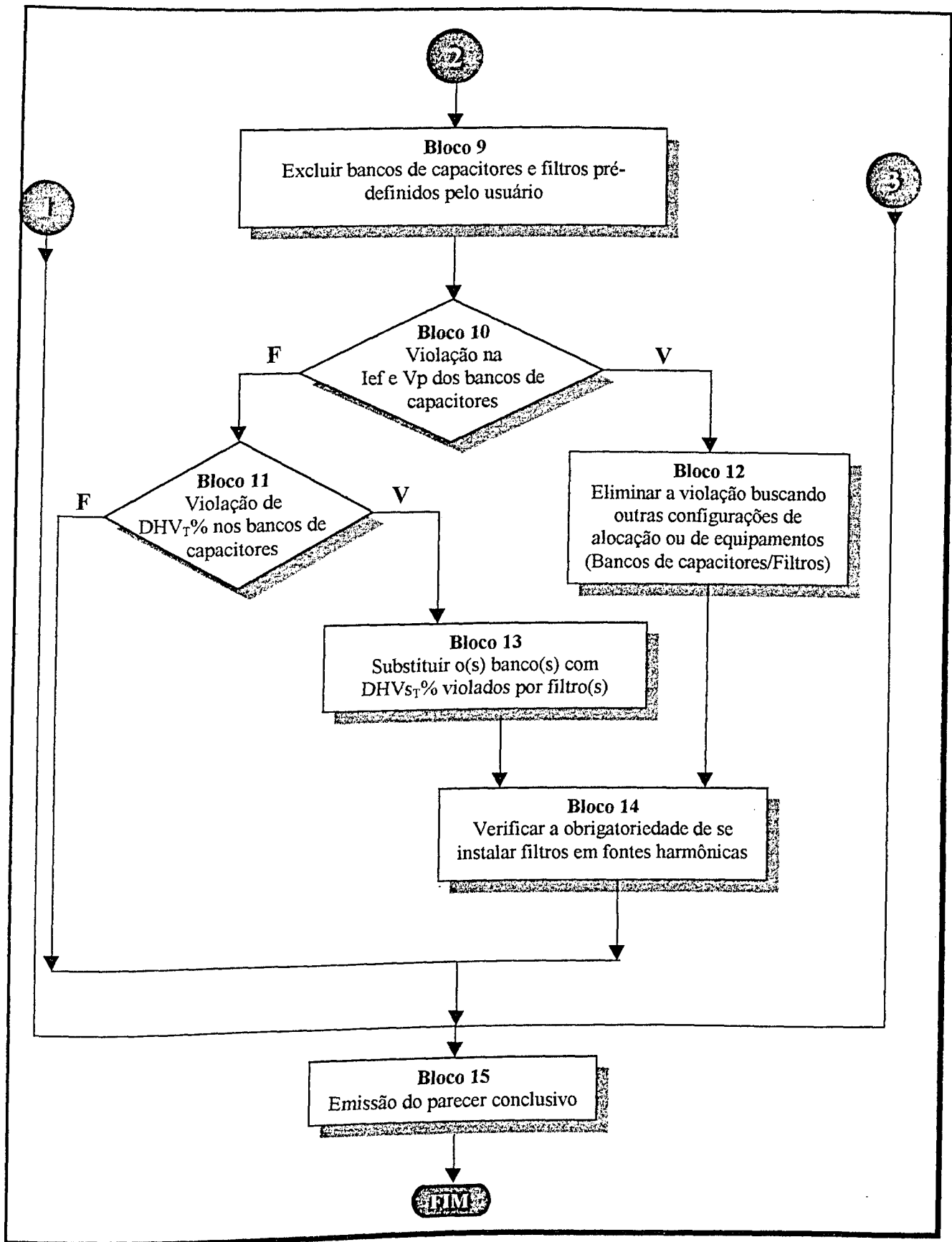


Figura 3.6 – Máquina de inferência (Continuação).



**BLOCO 1:  $FP < FP_{min}$** 

Trata-se de um bloco “decisor” no qual é verificado se o fator de potência (FP) do sistema elétrico (SE) é menor que o fator de potência mínimo indicado no item (A) da seção 3.3.1.

**REGRA 1****SE**

o fator de potência do sistema elétrico na barra da concessionária for menor que o mínimo indicado no item A da seção 3.3.1.

**ENTÃO**

inicia-se o processo de compensação de reativos (segue a partir do Bloco 2)

**CASO CONTRÁRIO**

SEGUE A PARTIR DO BLOCO 15

Primeiramente, serão discutidos os blocos que compõe a sentença verdadeira.

**BLOCO 2: *Armazenar bancos de capacitores e filtros pré-definidos pelo usuário***

De acordo com o item E (seção 3.3.1), determinadas barras do sistema elétrico poderão ficar de fora do estudo da compensação de reativos pelos motivos já explicados.

Desta maneira as informações pertinentes a estes dispositivos, ou seja, tensão nominal, potência do banco de capacitor, o nome da barra, o nome do componente, ordem harmônica de sintonia, fator de qualidade, potência do filtro serão armazenadas.

Por outro lado, se o usuário optar por alterar os bancos de capacitores e filtros existentes, deixando suas barras na coluna da esquerda.

#### **REGRA 2**

##### **SE**

o usuário optar por conservar inalterados os bancos de capacitores e filtros já existentes, inserindo suas respectivas barras na coluna direita da entrada de dados (seção 3.3.1)

##### **ENTÃO**

todos os dados relativos a estes dispositivos elétricos serão armazenados em um banco de dados chamado ArmCapFil.DB.

##### **CASO CONTRÁRIO**

todos os dados relativos a estes dispositivos elétricos não serão conservados

### **BLOCO 3 – Excluir bancos de capacitores e filtros pré-definidos pelo usuário.**

Uma vez constatada a presença de bancos de capacitores e filtros pré-definidos pelo usuário estes são retirados do sistema elétrico. É como se não houvessem bancos de capacitores ou filtros instalados no sistema elétrico.

Neste instante, a finalidade desta operação é preparar o campo de ação do sistema IPQ na definição da lista das barras prioritárias à compensação de reativos do sistema elétrico.

Obviamente, quando o controle do sistema elétrico for ativado, estes dispositivos elétricos serão reinstalados. Vale lembrar que os dados destes equipamentos foram armazenados no Bloco 2.

#### **REGRA 3**

##### **SE**

o sistema IPQ reconhecer a presença de bancos de capacitores ou filtros pré-definidos pelo usuário

##### **ENTÃO**

estes dispositivos elétricos serão retirados do sistema elétrico

## **BLOCO 4 – Executar FC e FH**

Execução do fluxo de carga (FC) e fluxo harmônico (FH) e, conseqüentemente, determinação do estado do sistema elétrico.

## **BLOCO 5 – Preparar e Determinar as barras prioritárias à compensação de reativos (Resolução de regras conflitantes usando Lógica Nebulosa)**

Este bloco é subdividido em outros onze blocos conforme mostrado na Figura 3.7. Sua finalidade é prover a distribuição dos bancos de capacitores nas barras prioritárias do sistema elétrico, a qual será levada em consideração no monitoramento da tensão fundamental, do fator de potência e das distorções harmônicas de tensão e corrente.

Deve-se ressaltar que, a distribuição dos bancos de capacitores no sistema elétrico é realizada obedecendo-se às decisões do especialista da área de compensação de reativos que são provenientes da experiência do mesmo. Tais decisões incluem a especificação das barras prioritárias do sistema elétrico e, posteriormente, a distribuição da potência necessária à compensação de reativos entre estas barras. Para isso, os Blocos 5.5, 5.6, 5.7 preparam o campo de ação das regras empregadas.

A estratégia adotada neste trabalho para determinar as barras prioritárias do sistema elétrico quanto à compensação de reativos pode acarretar que mais de uma barra tenha a mesma prioridade. Isto ocorrendo, o sistema busca a solução executando o Bloco 5.11 denominado “Resolução de regras conflitantes usando Lógica Nebulosa”. O resultado disso, são barras cujas posições na lista de prioridades estarão bem definidas.

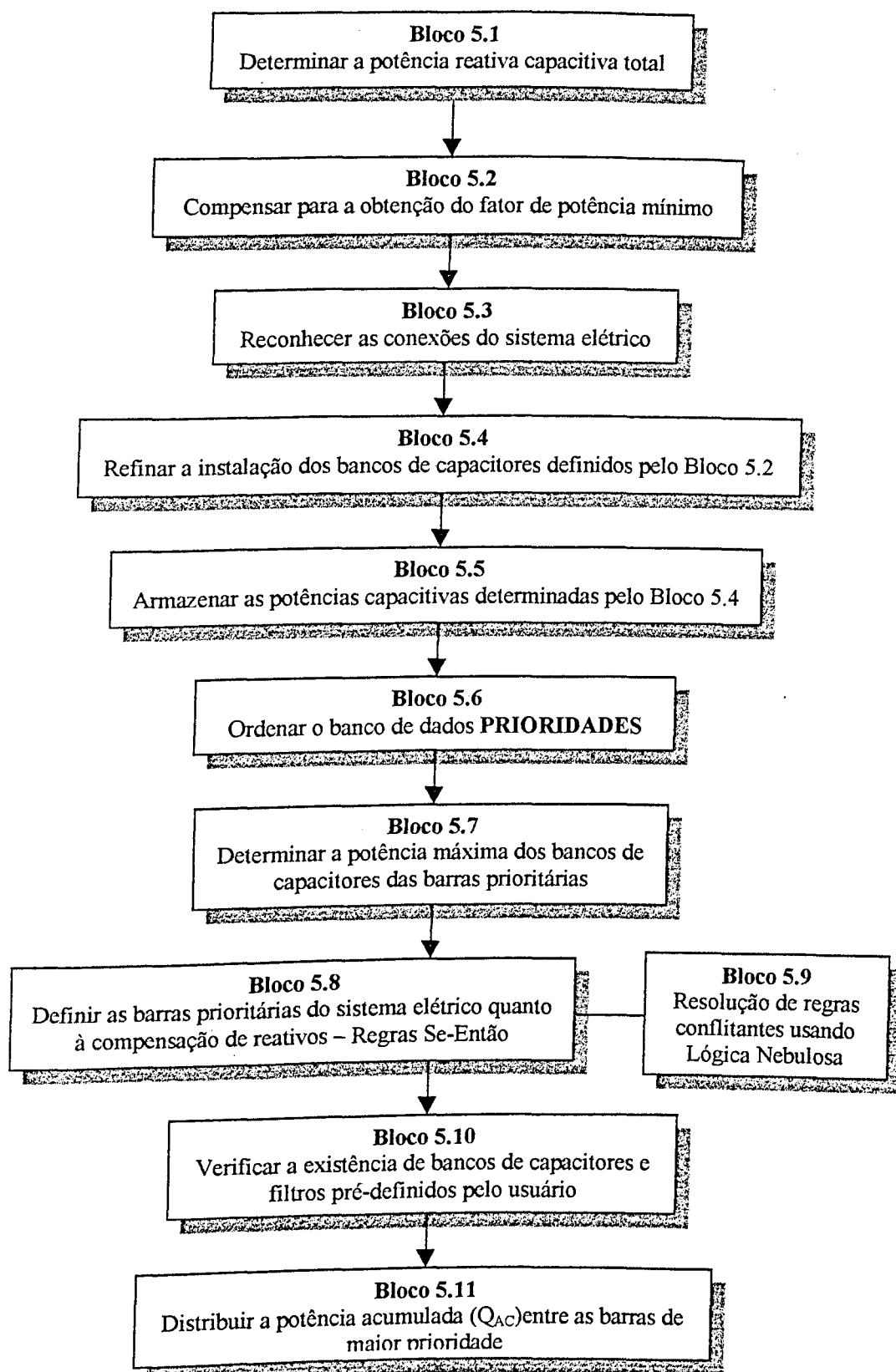


Figura 3.7 – Operações realizadas pelo Bloco 5.

## **BLOCO 5.1 – Determinar a potência reativa capacitiva total**

Com a execução dos fluxos de carga e harmônico, o sistema **IPQ** toma conhecimento das potências ativa e reativa indutiva totais na barra da concessionária, e, conseqüentemente, do fator de potência na mesma comparando esta informação com a do item B (seção 3.3.1) e aplicando-se as equações (3.1) a (3.4), determina-se a potência reativa capacitiva necessária à compensação no barramento da concessionária.

A questão neste ponto é: como se dará a distribuição da referida potência ao longo do sistema elétrico? Diante disso, o objetivo dos quatro próximos blocos é definir esta distribuição.

## **BLOCO 5.2 – Compensar para a obtenção do fator de potência mínimo**

Neste bloco é determinado o valor da potência reativa capacitiva necessária à compensação individual ( $Q_{Ci}$ ) das barras do sistema elétrico cujo fator de potência seja menor que o valor mínimo indicado no item A (seção 3.3.1).

### **REGRA 4**

**SE**

a barra  $i$  do sistema elétrico possui fator de potência abaixo do mínimo requerido pelo item A (seção 3.3.1)

**ENTÃO**

determina-se  $Q_{Ci}$  para esta barra através das equações 3.1-3.4

**BLOCO 5.3 – Reconhecer as conexões do sistema elétrico**

O objetivo de se reconhecer as conexões do sistema elétrico é permitir o refinamento da compensação de reativos realizada pelo bloco anterior.

**BLOCO 5.4 – Refinar a instalação dos bancos de capacitores definidos no Bloco 5.2**

Considerando os valores das potências  $Q_{CT}$  (Bloco 5.1) e  $Q_{Ci}$  (Bloco 5.2), em termos de potência dos bancos de capacitores, pode-se concluir que: exceto quando o sistema elétrico possui apenas uma barra ou quando somente a barra da concessionária tiver fator de potência menor que o mínimo, a somatória das  $Q_{Ci}$  sempre será maior que a  $Q_{CT}$  o que é mostrado pela equação (3.6).

$$\sum_i^n Q_{Ci} > Q_{CT} \quad (3.6)$$

onde:

- $n$  - número de barras do sistema elétrico com fator de potência menor que o mínimo
- $Q_{Ci}$  - potência reativa capacitiva para compensação individual em cada barra
- $Q_{CT}$  - potência reativa capacitiva necessária à compensação na barra da concessionária

Entretanto, esta relação (eq. (3.6)) não pode ocorrer pois, caso contrário, o fator de potência desejável ao sistema elétrico não será atendido.

Deste modo, é necessário que se faça um refinamento das potências dos bancos de capacitores  $Q_{Ci}$ , para que a relação (3.7) seja atendida.

$$\sum_{i=1}^n Q_{Ci} = Q_{CT} \quad (3.7)$$

Isto será conseguido através do conhecimento das conexões do sistema elétrico, o que possibilita percorrê-lo no sentido indicado pela Figura 3.8.

Para o melhor entendimento do objetivo deste bloco, considere o sistema elétrico fictício da Figura 3.8 e a distribuição das potências dos bancos de capacitores (Bloco 5.2).

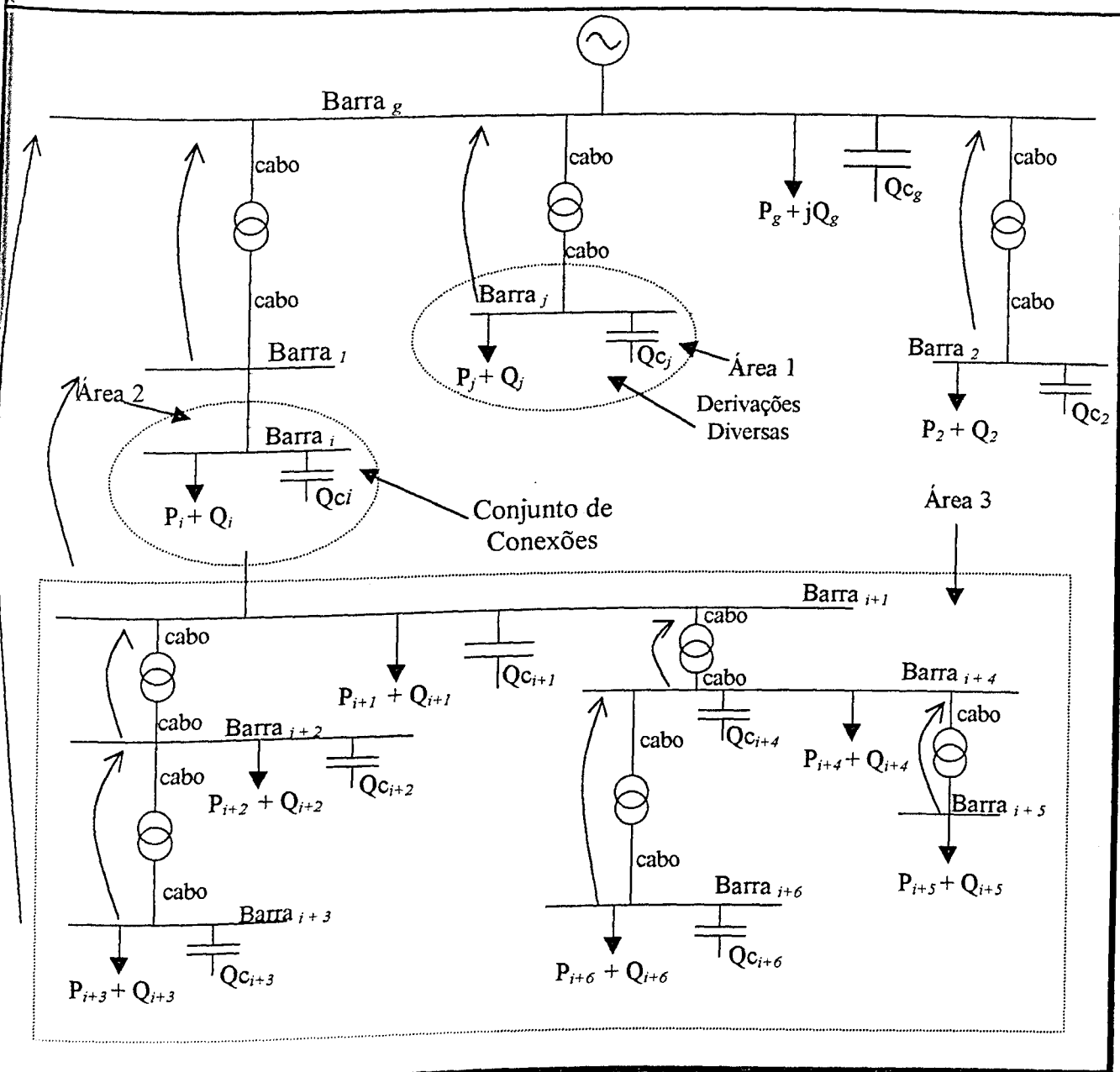


Figura 3.8 - Sistema elétrico fictício compensado pelo Bloco 5.2.

Da Figura 3.8, as seguintes considerações são ponderadas:

- Representação dos transformadores e cabos;
- $B_{i+3}$ ,  $B_{i+5}$ ,  $B_{i+6}$ ,  $B_j$  e  $B_2$ , são denominadas barras fim de ramo;
- Os sentidos das setas mostram que o refinamento das potências dos bancos de capacitores definidos pelo Bloco 5.2 se dará a partir das barras de fim de ramo e em direção à barra da concessionária ( $B_{conc}$ );
- indicação das diversas cargas “P + jQ”.

Feitas as considerações referentes à Figura 3.8, o próximo passo é justificar a relação 3.6 e, conseqüentemente, o ajuste das potências dos bancos de capacitores calculados pelo Bloco 5.3.

O valor da potência do banco de capacitor determinado pelo Bloco 5.2 na barra da concessionária é igual ao valor calculado pelo Bloco 5.1. Entretanto, o Bloco 5.2 calcula bancos de capacitores em todas as barras com fator de potência menor que o mínimo permitido. A consequência disto é que somando estas potências, o fator de potência estipulado na barra da concessionária estará acima do desejado.

De acordo com o Bloco 5.1, a potência reativa capacitiva na barra da concessionária é dada levando em consideração todas as potências das cargas conforme as equações (3.8) a (3.11), isto é:

$$P_{conc} = P_1 + P_2 + \dots P_j + \dots + P_i + P_{i+1} + P_{i+2} + P_{i+3} + P_{i+4} + P_{i+5} + P_{i+6} \quad (3.8)$$

$$Q_{conc} = Q_1 + Q_2 + \dots Q_j + \dots + Q_i + Q_{i+1} + Q_{i+2} + Q_{i+3} + Q_{i+4} + Q_{i+5} + Q_{i+6} \quad (3.9)$$

$$Q_{Cconc} = Q_{conc} - \text{tg}(\arccos(\text{FP}_{\text{desejado}})) * P_{conc} \quad (3.10)$$

logo,

$$Q_{Cconc} = Q_{CT} \quad (3.11)$$



Por outro lado, o Bloco 5.2 tem para cada barra do sistema elétrico cujo fator de potência é menor que o mínimo permitido, um banco de capacitor. Assim sendo, quando estas potências são somadas, o valor final será maior que o necessário conforme a equação (3.12).

$$(Q_{Cconc} + Q_{Ci1} + Q_{Ci2} + \dots + Q_{Ci} + Q_{Ci+1} + Q_{Ci+2} + \dots + Q_{Ci+6}) > Q_{CT} \quad (3.12)$$

Esta incompatibilidade é solucionada através do refinamento das potências instaladas pelo Bloco 5.2. Isto é obtido da seguinte forma: de acordo com a Figura 3.8, a potência capacitiva necessária de uma barra fim de ramo será debitada imediatamente anterior à mesma. Esse processo é repetido ao longo de uma derivação, obedecendo-se o sentido indicado, até que se atinja a barra da concessionária. A mesma estratégia é adotada para as demais derivações do sistema radial em estudo.

Assim, o resultado das potências dos bancos de capacitores após a execução deste bloco será definida sequencialmente segundo os passos matemáticos listados a seguir:

- $Q_{j(Final)} = Q_{j(antes)}$
- $Q_{Ci+3(Final)} = Q_{Ci+3(antes)}$
- $Q_{Ci+5(Final)} = Q_{Ci+5(antes)}$
- $Q_{Ci+6(Final)} = Q_{Ci+6(antes)}$
- $Q_{Ci+2(Final)} = Q_{Ci+2(antes)} - Q_{Ci+3(Final)}$
- $Q_{Ci+4(Final)} = Q_{Ci+4(antes)} - Q_{Ci+6(Final)}$
- $Q_{Ci+1(Final)} = Q_{Ci+1(antes)} - (Q_{Ci+3(Final)} + Q_{Ci+5(Final)} + Q_{Ci+6(Final)} + Q_{Ci+2(Final)} + Q_{Ci+4(Final)})$
- $Q_{Ci(Final)} = Q_{Ci(antes)} - (Q_{Ci+3(Final)} + Q_{Ci+5(Final)} + Q_{Ci+6(Final)} + Q_{Ci+2(Final)} + Q_{Ci+4(Final)} + Q_{Ci+1(Final)})$

Finalmente,

•  $Q_{conc(Final)} = Q_{conc(antes)} - (Q_{Ci+3(Final)} + Q_{Ci+5(Final)} + Q_{Ci+6(Final)} + Q_{Ci+2(Final)} + Q_{Ci+4(Final)} + Q_{Ci+1(Final)} + Q_{Ci(Final)} + Q_{j(Final)} + Q_{2(Final)})$

Feitas estas operações, conclui-se que:

$$Q_{conc(Final)} < Q_{CT} \tag{3.13}$$

$$\sum Q_{Ci}(final) = Q_{CT} \tag{3.14}$$

O resultado dos bancos de capacitores calculados por este bloco é uma primeira indicação das barras prioritárias à alocação de bancos de capacitores no sistema elétrico.

**BLOCO 5.5 – Armazenar as potências capacitivas determinadas pelo Bloco 5.4**

Este bloco armazena todas as barras do sistema elétrico com as respectivas potências dos bancos de capacitores definidos no Bloco 5.4, em um banco de dados denominado PRIORIDADES. Ressalta-se que, mesmo aquelas barras que não possuem bancos de capacitores instalados são armazenadas neste banco de dados. A Tabela 3.1, mostra a estrutura inicial do banco de dados PRIORIDADES.

*Tabela 3.1 – Estrutura (campos) inicial do banco de dados PRIORIDADES.*

Prioridade das barras para a compensação de reativos	Potência do banco de capacitor previsto (kVAr)
--	--

**BLOCO 5.6 – Ordenar o banco de dados PRIORIDADES**

A finalidade deste bloco é fazer a organização do banco de dados PRIORIDADES por em ordem decrescente as potências dos bancos de capacitores armazenados. Este é o primeiro passo na determinação das barras mais prioritárias do sistema elétrico quanto à compensação de reativos, ou seja: quanto maior a potência dos bancos de capacitores, maior é a prioridade da barra.

**BLOCO 5.7 – Determinar a potência máxima dos bancos de capacitores das barras prioritárias**

Para impedir que as barras adquiram fator de potência capacitivo, calcula-se, para cada barra do sistema elétrico, a potência máxima permitida do banco de capacitor.

Este cálculo é feito considerando-se a potência aparente e o fator de potência de cada barra e, ainda, o valor do fator de potência máximo admissível, fornecido através da entrada de dados do programa (item C- seção 3.3.1).

Aplicando-se as equações (3.1) a (3.4), porém com o fator de potência máximo, determina-se o  $Q_{r_{\max}}$  que é a potência máxima do banco de capacitor a ser inserido em uma determinada barra. Subtraindo-se a potência do banco de capacitor  $Q_{Ci}$ , obtida do valor de  $Q_{r_{\max}}$ , obtém-se o quanto de reativo capacitivo ( $Q_A$ ) ainda pode ser acrescido à mesma, ou seja:

$$Q_A = Q_{r_{\max}} - Q_{Ci} \quad (3.15)$$

onde:

$Q_A$  - margem de acréscimo de potência do banco de capacitores.

$Q_{r_{\max}}$  - valor máximo da potência do banco de capacitores

$Q_{Ci}$  - potência do banco de capacitores determinado pelo Bloco 5.4.

Assim, ao banco de dados PRIORIDADES é adicionado um campo denominado MARGEM DE ACRÉSCIMO (kVAr), o qual armazena os valores de  $Q_A$  para cada barra. Essa nova estrutura é mostrada na Tabela 3.2.

*Tabela 3.2 – Nova estrutura do banco de dados PRIORIDADES.*

Prioridade das barras para a compensação de reativos	Potência do banco de capacitor previsto (kVAr)	Margem de acréscimo (kVAr)
$B_i$	0 ou $Q_i$	$Q_A$
onde $B_i$ – barras do sistema elétrico		

### **BLOCO 5.8 – Definir as barras prioritárias do sistema elétrico quanto à compensação de reativos – Regras Se-Então**

Como dito anteriormente, para a definição das barras prioritárias, são desenvolvidas várias regras baseadas no conhecimento do especialista denominadas regras heurísticas as quais são mostradas e comentadas neste bloco. Na formulação destas regras, vários fatores são levados em consideração, como:

- Potência capacitiva necessária à compensação de cada barra, definida no Bloco 5.4;
- Potência capacitiva máxima que pode ser instalada em cada barra;
- Barras que possuem fonte harmônica;
- Se é ou não a barra da concessionária;
- As exigências do usuário;
- A potência da fonte harmônica;
- A distorção harmônica total de tensão nas barras que possuem fonte harmônica;

- h) Os valores da corrente eficaz total e da tensão de pico nos bancos de capacitores;
- i) A potência mínima exigida para o banco de capacitores;
- j) A tensão fundamental de cada barra.

Em linhas gerais, estas informações culminam nos seguintes objetivos:

- Garantir que o valor do fator de potência nas barras do sistema elétrico não seja capacitivo;
- Restringir a instalação de bancos de capacitores junto às fontes harmônicas;
- Distribuir bancos de capacitores em baixa tensão;
- Evitar a instalação de bancos de capacitores que possuem potências abaixo do valor especificado pelo usuário;
- Considerar a existência, ou, não do espaço físico para a acomodação dos bancos de capacitores;
- Preservar a vida útil dos bancos de capacitores;
- Especificar filtros ou não nas barras que possuem fonte harmônica;
- Indicar problemas de queda de tensão.

Como mencionado no Bloco 5.6, o critério para se determinar, em uma primeira instância, a prioridade das barras para a instalação de bancos de capacitores, é a potência dos mesmos. Desse modo, obedecendo-se a Regra 5, a classificação das barras quanto às suas prioridades é visualizada na Tabela 3.3.

**REGRA 5**

**SE**

não houver restrição alguma para as barras do sistema

**ENTÃO**

quanto maior a potência reativa necessária a compensação de uma determinada barra, maior a sua prioridade

**E**

a potência acumulada ( $Q_{AC}$ ) é igualada a zero

*Tabela 3.3 – Prioridade das barras determinada pela potência dos bancos de capacitores previstos.*

Prioridade das barras para a compensação de reativos	Potência do banco de capacitor previsto (kVAr)
$b_1$	$Q_1$
$b_2$	$Q_2$
$b_3$	$Q_3$
$b_4$	$Q_4$
$b_5$	$Q_5$
.	.
.	.
.	.
$b_{n-2}$	$Q_{n-2}$
$b_{n-1}$	$Q_{n-1}$
$b_n$	$Q_n$

\* n – refere-se ao número de barras do sistema elétrico.

\*\*  $Q_1 > Q_2 > \dots > Q_{n-2} > Q_{n-1} > Q_n$ .

Entretanto, mais de uma barra poderá ter o mesmo valor de potência capacitiva prevista. Isto é caracterizado, neste trabalho, como um conflito. Sempre quando isto ocorre, o Bloco 5.9 é executado. Neste bloco são estabelecidos critérios de diferenciação entre as barras com potências

capacitivas conflitantes. Ressalta-se que os critérios adotados estão baseados na Lógica Nebulosa. Assim, fundamenta-se a Regra 6.

**REGRA 6****SE**

existe conflito de potências capacitivas

**ENTÃO**

o Bloco 5.9 é executado

O termo potência acumulada ( $Q_{AC}$ ) usado na sentença da Regra 5, trata-se de uma variável na qual são armazenados os valores das potências dos bancos de capacitores de barras: excluídas do estudo de compensação e onde são impostas certas restrições levando-as a um nível de menor prioridade de compensação. O objetivo desta operação é permitir que o valor de potência capacitiva armazenado nesta variável (após verificar as restrições) seja transferida para as barras prioritárias do sistema elétrico.

A seguir são listadas as regras que lidam com as restrições.

De acordo com o item E (seção 3.3.1), o usuário pode interferir na lista de prioridade das barras para a compensação de reativos, inserindo ou não o nome de um determinado barramento na coluna direita da entrada de dados.

Diante disso, a Regra 7 prevê tal situação, uma vez que não altera a lista de prioridades para a compensação se nenhuma barra é inserida na referida coluna. Neste caso, a ordem das barras da Tabela 3.3 é mantida.

Por outro lado, se o usuário opta por excluir alguma(s) barra(s) do estudo de compensação, a mesma Regra a(s) retira da lista de prioridades, garantindo que não serão instalados bancos ou filtros nessa barras. Além disso, o valor da potência do(s) banco(s) previsto(s) para tais barra(s) é somado à variável  $Q_{AC}$ .

**REGRA 7**

SE

todas as barras do sistema elétrico pertencem ao estudo de compensação de reativo

ENTÃO

Nenhuma barra é retirada da lista de prioridades

CASO CONTRÁRIO

a potência do banco de capacitor previsto, para a barra  $B_i$  que for excluída do estudo de compensação de reativos é armazenada na variável  $Q_{AC}$

E

a barra  $B_i$  é retirada da lista de prioridades

As Tabelas 3.4 e 3.5 ilustram estas operações, ou seja, a restrição imposta pelo usuário e, posteriormente, a retirada da barra da lista de prioridades.

Tabela 3.4 – Prioridade das barras com a restrição do usuário.

Prioridade das barras para a compensação de reativos	Tipo de Restrição	Potência do banco de capacitor previsto (kVAr)	Regra
$b_1$	-	$Q_1$	-
$b_2$	Usuário	$Q_2$	7
$b_3$	-	$Q_3$	-
$b_4$	-	$Q_4$	-
$b_5$	-	$Q_5$	-
.	.	.	-
.	.	.	-
.	.	.	-
$b_{n-2}$	-	$Q_{n-2}$	-
$b_{n-1}$	-	$Q_{n-1}$	-
$b_n$	-	$Q_n$	-



Tabela 3.5 – Prioridade das barras após a aplicação da Regra 7.

Prioridade das barras para a compensação de reativos	Potência do banco de capacitor previsto (kVAr)
$b_1$	$Q_1$
$b_3$	$Q_3$
$b_4$	$Q_4$
$b_5$	$Q_5$
.	.
.	.
.	.
$b_{n-2}$	$Q_{n-2}$
$b_{n-1}$	$Q_{n-1}$
$b_n$	$Q_n$
$Q_{AC} = Q_2 +$ potência do banco de capacitor de outras barras que venham a ser excluídas pelo usuário.	

Assim, os outros tipos de restrições, chamadas técnicas, passíveis de ocorrer, não excluem barra alguma da lista de prioridades, mas sim, alteram suas posições. Isso é tratado pela Regra 8 apresentada na sequência.

**REGRA 8****SE**

existe qualquer tipo de restrição técnica a uma determinada barra  $b_i$  do sistema elétrico

**ENTÃO**

a potência  $Q_i$  do banco de capacitor previsto para a barra  $b_i$  é adicionada à variável  $Q_{AC}$

**E**

a sua margem de acréscimo  $Q_{AV}$  permitida é somada a potência  $Q_i$  do banco de capacitor previsto para barra  $b_i$

**E**

a potência  $Q_i$  do banco de capacitor previsto para a barra  $b_i$  é igualada a zero

Quando houver uma restrição a uma determinada barra, as três operações são efetuadas pelos seguintes motivos.

- a) A potência do banco de capacitor da barra que possui algum tipo de restrição é somado à variável potência acumulada para que a mesma seja deslocada para as barras prioritárias do sistema elétrico (Tabela 3.6);

Tabela 3.6 – Prioridade das barras com algum tipo de restrição técnica: aplicação do primeiro passo da Regra 3.

Prioridade das barras para a compensação de reativos	Tipo de Restrição	Potência do banco de capacitor previsto (kVAr)	Margem de acréscimo (kVAr)
$b_1$	Técnica	$Q_1$	$Q_{A1}$
$b_3$	-	$Q_3$	$Q_{A3}$
$b_4$	Técnica	$Q_4$	$Q_{A4}$
$b_5$	Técnica	$Q_5$	$Q_{A5}$
.	-	.	.
.	-	.	.
.	-	.	.
$b_{n-2}$	Técnica	$Q_{n-2}$	$Q_{An-2}$
$b_{n-1}$	Técnica	$Q_{n-1}$	$Q_{An-1}$
$b_n$	Técnica	$Q_n$	$Q_{An}$
$Q_{AC} = Q_2 \text{ (Regra7)} + (Q_1 + Q_4) \text{ (Regra 8)}$			

- b) A potência do banco de capacitor  $Q_i$  previsto para a barra  $b_i$  com restrição, é somada ao campo margem de acréscimo  $Q_{Ai}$ . Isso para que, ao final do processo de definição de prioridades, a capacidade total de compensação da barra permaneça o mesmo (Tabela 3.7);

Tabela 3.7 – Prioridade das barras com algum tipo de restrição técnica: aplicação do segundo passo da Regra 8.

Prioridade das barras para a compensação de reativos	Tipo de Restrição	Potência do banco de capacitor previsto (kVAr)	Margem de acréscimo (kVAr)	Regra
$b_1$	Concessionária	$Q_1$	$Q_{A1} + Q_1$	8
$b_3$	-	$Q_3$	$Q_{A3}$	-
$b_4$	Fonte Harmônica	$Q_4$	$Q_{A4} + Q_4$	8
$b_5$	Fonte Harmônica	$Q_5$	$Q_{A5} + Q_5$	8
.	-	.	.	-
.	-	.	.	-
.	-	.	.	-
$b_{n-2}$	$Q_{n-2} < Q_{\min}$	$Q_{n-2}$	$Q_{An-2} + Q_{n-2}$	8
$b_{n-1}$	fator de potência acima do mínimo	0	$Q_{An-1}$	-
$b_n$		0	$Q_n$	-
$Q_{AC} = Q_2 \text{ (Regra7)} + (Q_1 + Q_4 + Q_5 + Q_{n-2})$				

c) Finalmente, a potência do banco de capacitores  $Q_i$  previsto para a barra que possui restrição é igualada a zero, pelo motivo mostrado no item (a) e conforme a Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Prioridade das barras com algum tipo de restrição técnica: aplicação do terceiro passo da Regra 8.

Prioridade das barras para a compensação de reativos	Tipo de Restrição	Potência do banco de capacitor previsto (kVAr)	Margem de acréscimo (kVAr)	Regra
$b_1$	Concessionária	0	$Q_{A1} + Q_1$	8
$b_3$	-	$Q_3$	$Q_{A3}$	-
$b_4$	Fonte Harmônica	0	$Q_{A4} + Q_4$	8
$b_5$	Fonte Harmônica	0	$Q_{A5} + Q_5$	8
.	-	.	.	-
.	-	.	.	-
.	-	.	.	-
$b_{n-2}$	$Q_{n-2} < Q_{min}$	0	$Q_{An-2} + Q_{n-2}$	8
$b_{n-1}$	fator de potência acima do mínimo	0	$Q_{An-1}$	-
$b_n$		0	$Q_n$	-
$Q_{AC} = Q_2 \text{ (Regra7)} + (Q_1 + Q_4 + Q_5 + Q_{n-2})$				

Pela Regra 5, as posições das barras na lista de prioridades são determinadas pela potência do banco de capacitor previsto para cada uma, isto é, quanto maior a potência do banco de capacitor, maior a prioridade da barra.

Entretanto, quando o fator de potência de algumas barras é maior que o mínimo permitido, nenhum banco é previsto para as mesmas e, conseqüentemente, estas já estão localizadas nas últimas posições da lista de prioridades. Além disso, o valor da variável  $Q_{AC}$  não é alterado, pois, não existe potência de banco de capacitor prevista para tais barras. A Tabela 3.9, mostra a aplicação desta regra.

REGRA 9

SE

o fator de potência da barra está acima do mínimo exigido

E

menor que o máximo permitido (fator de potência máximo = 1)

ENTÃO

a posição da barra com tal característica não é alterada.

Tabela 3.9 – Prioridade das barras com a aplicação da Regra 9.

Prioridade das barras para a compensação de reativos	Tipo de Restrição	Potência do banco de capacitor previsto (kVAr)	Margem de acréscimo (kVAr)	Regra
b <sub>1</sub>	Concessionária	0	$Q_{A1} + Q_1$	-
b <sub>3</sub>	-	$Q_3$	$Q_{A3}$	-
b <sub>4</sub>	Fonte Harmônica	0	$Q_{A4} + Q_4$	-
b <sub>5</sub>	Fonte Harmônica	0	$Q_{A5} + Q_5$	-
.	-	.	.	.
.	-	.	.	.
.	-	.	.	.
bn-2	$Q_{n-2} < Q_{min}$	$Q_{n-2}$	$Q_{n-2}$	-
bn-1	fator de potência acima do mínimo	0	$Q_{An-1}$	9
bn		0	$Q_{n1}$	9

$Q_{AC} = Q_2 \text{ (Regra7)} + (Q_1 + Q_4)$

Obs: Apesar das barras b<sub>n</sub> e b<sub>n-1</sub> possuírem o mesmo valor previsto de potência para o banco de capacitores (ou seja Q=0), a barra b<sub>n-1</sub> é mais prioritária. Lembrando que esta decisão é tomada pelo Bloco9.

O fato de uma barra ser da concessionária, constitui uma restrição técnica, identificada e submetida à Regra 8 deste bloco. Assim, a Regra 10 desloca a posição desta barra afastando a possibilidade da instalação de bancos de capacitores em média/alta tensão e, com isso, prioriza as barras de baixa tensão.

REGRA 10

SE

a barra da concessionária constar na lista de prioridades

ENTÃO

aplica-se a Regra 8

E

tal barra é deslocada para a última posição

A Tabela 3.10 mostra o efeito da aplicação da Regra 10.

Tabela 3.10 – Prioridade das barras com a aplicação da Regra 10.

Prioridade das barras para a compensação de reativos	Tipo de Restrição	Potência do banco de capacitor previsto (kVAr)	Margem de acréscimo (kVAr)	Regra
$b_3$	-	0	$Q_{A3}$	-
$b_4$	Fonte Harmônica	$Q_3$	$Q_{A4} + Q_4$	-
$b_5$	Fonte Harmônica	0	$Q_{A5} + Q_5$	-
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
$b_{n-2}$	$Q_{n-2} < Q_{min}$	$Q_{n-2}$	$Q_{An-2}$	-
$b_{n-1}$	Fator de potência acima do mínimo	0	$Q_{An-1}$	-
$b_n$		0	$Q_{An}$	-
$b_1$	Concessionária	0	$Q_{A1} + Q_1$	8 e 10
$Q_{AC} = Q_2$ (Regra7) + ( $Q_1 + Q_4$ +as potências dos bancos de capacitores daquelas barras que possuem algum tipo de restrição - Regra 9)				

O fato de certas barras possuírem fonte harmônica, caracteriza uma restrição técnica, a qual foi identificada e tratada pela Regra 8 deste bloco. Com isso, a Regra 11 evita a colocação de bancos de capacitores em tais barras, deslocando-as para as últimas posições da lista de prioridades.

**REGRA 11****SE**

na lista de prioridades houver barras constituídas por fontes harmônicas

**ENTÃO**

tais barras são deslocadas para as últimas posições da lista de prioridades

Para determinar dentre estas barras a de menor prioridade, toma-se por base a maior distorção harmônica total de tensão. Segundo os especialistas, este fato diminui as chances dos bancos de capacitores sofrerem uma influência mais intensa das fontes harmônicas (Tabela 3.11).

Tabela 3.11 – Prioridade das barras com a aplicação da Regra 11.

Prioridade das barras para a compensação de reativos	Tipo de Restrição	Potência do banco de capacitor previsto (kVAr)	Margem de acréscimo (kVAr)	Regra
$b_3$	-	$Q_3$	$Q_{A3}$	-
.	.	.	.	-
.	-	.	.	-
.	-	.	.	-
$b_{n-2}$	$Q_{n-2} < Q_{\min}$	0	$Q_{An-2} + Q_{n-2}$	-
$b_{n-1}$	Fator de potência acima do mínimo	0	$Q_{An-1}$	-
$b_n$	Concessionária	0	$Q_n$	-
$b_1$	Fonte Harmônica	0	$Q_{A1} + Q_1$	-
$b_4$	Fonte Harmônica	0	$Q_{A5} + Q_5$	8 e 11
$b_5$	Fonte Harmônica	0	$Q_{A4} + Q_4$	8 e 11
$Q_{AC} = Q_2$ (Regra7) + ( $Q_1 + Q_4 + Q_5 + Q_{n-2}$ )				
Obs: Embora a barra $b_4$ e $b_5$ possuem a mesma restrição, a barra $b_4$ é mais prioritária, devido a potência capacitiva prevista ou pela decisão do Bloco 9.				

De acordo com o item D (seção 3.3.1), o usuário pode determinar a potência mínima que deve possuir os bancos de capacitores. Desta maneira, naquelas barras cujas potências dos bancos de capacitores estiverem abaixo do mínimo desejado, aplica-se a Regra 8.

Quanto à posição das barras, esta permanece inalterada. A razão disto é que não existe restrição alguma quanto a característica da carga que está instalada nestas barras. A Tabela 3.12 ilustra a aplicação da Regra 12.

REGRA 12

SE

a potência do banco de capacitor instalado em uma determinada barra estiver abaixo do mínimo requerido pelo item D (seção 3.3.1)

ENTÃO

a posição da barra na lista de prioridades permanece inalterada



Tabela 3.12 – Lista de barras prioritárias e as respectivas potências dos bancos de capacitores com a aplicação da Regra 12.

Prioridade das barras para a compensação de reativos	Tipo de Restrição	Potência do banco de capacitor previsto (kVAr)	Margem de acréscimo (kVAr)	Regra
$b_3$	-	$Q_3$	$Q_{A3}$	-
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
$b_{n-2}$	$Q_{n-2} < Q_{\min}$	0	$Q_{An-2} + Q_{n-2}$	12
$b_{n-1}$	Fator de potência acima do mínimo	0	$Q_{An-1}$	-
$b_n$	Concessionária	0	$Q_n$	-
$b_1$	Fonte Harmônica	0	$Q_{A1} + Q_1$	-
$b_5$	Fonte Harmônica	0	$Q_{A5} + Q_5$	-
$b_4$	Fonte Harmônica	0	$Q_{A4} + Q_4$	-
$Q_{AC} = Q_2 \text{ (Regra7)} + (Q_1 + Q_4 + Q_5 + Q_{n-2})$				

BLOCO 5.9 - Resolução de regras conflitantes usando Lógica Nebulosa

Na determinação das barras prioritárias pode acontecer que grupos de barras tenham características idênticas e, neste caso, poderá ocorrer uma indefinição das barras prioritárias. Assim sendo, este bloco estabelece critérios nebulosos para a diferenciação entre tais barras baseando-se nos seguintes parâmetros: fator de potência, distorção harmônica total de tensão, potência aparente e tensão fundamental.

Para tanto é usado o “DCN” desenvolvido em [27] e com as seguintes especificações:

- a) Os extremos do universo são iguais a 1. A razão disto é que os parâmetros envolvidos estão normalizados;
- b) A função de pertinência usada é a triangular sem compressão ou expansão;
- c) O úmero de quantização é igual a 21;



e) O número de predicados é igual a sete.

Quanto às bases de regras, estas estão indicadas na sequência:

(1)  $DHV_T (\%) \times S (KVA)$

	Distorção Harmônica Total de Tensão(DHV)			
S(KVA)	Z	PP	PM	PG
Z	Z	NP	NM	NP
PP	PP	Z	NP	NM
PM	PM	PP	Z	NG
PG	PG	PM	NG	NG

(2) Erro (Fator de Potência) x S(KVA)

	Erro (Fator de Potência)						
S(KVA)	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
Z	NG	NG	NM	NP	Z	PP	PM
PP	NG	NG	NM	NP	Z	PP	PM
PM	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
PG	NM	NM	NP	Z	PP	PM	PG

(3) Erro (Tensão Fundamental (V1)) x S(KVA)

	Erro (Tensão Fundamental (V1))						
S(KVA)	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
Z	NG	NG	NM	NP	Z	PP	PM
PP	NG	NG	NM	NP	Z	PP	PM
PM	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
PG	NM	NM	NP	Z	PP	PM	PG

Onde:

NG - Negativo Grande

NM - Negativo Médio

NP - Negativo Pequeno

Z - Zero

PP - Positivo Pequeno

PM - Positivo Médio

PG - Positivo Grande

Determinado o mapeamento das barras prioritárias do sistema elétrico, no tocante à compensação de reativos usando bancos de capacitores, o próximo passo é distribuir a potência reativa capacitiva armazenada na variável  $Q_{AC}$  em tais barras. Para tanto, são criadas novas regras que governam esta distribuição. Deve-se frisar que, estas regras são reflexo da experiência do especialista na área de compensação de reativos.

#### **BLOCO 5.10 – *Verificar a existência de bancos de capacitores e filtros pré-definidos pelo usuário***

O Bloco 5.8, além de determinar a prioridade das barras do sistema elétrico no tocante à compensação de reativos, também define através da variável  $Q_{AC}$  o quanto de potência reativa deve ser distribuída entre as barras mais prioritárias do sistema elétrico. Contudo, antes de efetuar tal distribuição, o sistema **IPQ** verifica a existência de bancos de capacitores e filtros que foram pré-definidos pelo usuário. O motivo desta operação é compensar o procedimento executado pelo Bloco 3, onde os bancos de capacitores e filtros pré-definidos pelo usuário são retirados do sistema e armazenados em um banco de dados chamado ArmCapFil.

Diante disto, o Bloco 5.10 é governado pelas Regras 13 e 14 a seguir:

**REGRA 13****SE**

existir potência de banco de capacitor pré-definido pelo usuário

**ENTÃO**subtrai-se somatório das potências dos bancos de capacitores pré-definidos pelo usuário da variável  $Q_{AC}$  (Equação 3.14)

Da relação 3.16 verifica-se que o valor de potência reativa a ser distribuído no sistema elétrico pode ser reduzido, caso existam potências de bancos de capacitores pré-definidos pelo usuário.

$$Q_{AC} = Q_{AC} - \sum_{i=1}^n Q_{CONS} \quad (3.16)$$

Onde:

 $Q_{AC}$  - potência acumulada $Q_{CONS}$  - potência reativa pré-definida pelo usuário

A Regra 14 lida com o resultado da Regra 13.

**REGRA 14****SE**o valor de  $Q_{AC}$  for menor que zero após a aplicação da Regra 13**ENTÃO**o sistema IPQ debita tal valor da Potência do Banco Previsto ( $Q_P$ ) para as barras começando por aquelas menos prioritárias, resultando em um novo valor de potência acumulada ( $Q_{ACnova}$ )**E**

ao mesmo tempo e na mesma proporção aumenta a Margem de Acréscimo das respectivas barras

O fato de  $Q_{AC}$  tornar-se menor que zero, é sinal de que ainda existe potência reativa capacitiva pré-definidas pelo usuário a ser considerada. Nesta

situação, o sistema IPQ percorre a lista no sentido crescente de prioridades, subtraindo o valor de  $Q_{AC}$  da potência do banco de capacitor previsto ( $Q_i$ ) (equação 3.17) até que o valor de  $Q_{AC}$  se iguale a zero.

$$Q_{AC\_nova} = Q_i - Q_{AC} \quad (3.17)$$

Tal procedimento é melhor explicado pelas Regras 8 e 9. A Tabela 3.14, considera-se a distribuição de bancos de capacitores segundo o Bloco 5.8.

*Tabela 3.14 – Prioridade das barras com a aplicação da regra 14.*

Prioridade das barras para a compensação de reativos	Potência do banco de capacitor previsto (kVAr)	Margem de acréscimo (kVAr)
$b_3$	$Q_3 - Q_{AC}$ (Regra 14)	$Q_{A3} + Q_{AC}$ (Regra 14)
.	.	.
.	.	.
$b_{n-2}$	0	$Q_{A n-2} + Q_{n-2}$
$b_{n-1}$	0	$Q_{A n-1}$
$b_n$	0	$Q_n$
$b_1$	0	$Q_{A1} + Q_1$
$b_5$	0	$Q_{A5} + Q_5$
$b_4$	0	$Q_{A4} + Q_4$
$Q_{AC}$ menor que zero.		

### **BLOCO 5.11 – Distribuir a potência acumulada ( $Q_{AC}$ ) entre as barras de maior prioridade**

Como já mencionado, o valor armazenado pela variável  $Q_{AC}$  é a potência capacitiva que o sistema elétrico necessita para atingir a compensação de reativos desejada, ou seja, o fator de potência requerido. Portanto, se o valor dessa variável é igual a zero, significa que o sistema elétrico está compensado.

Assim, a distribuição do valor de  $Q_{AC}$  só será executada se tal variável (resultado da Regra 13 (Bloco 5.10)) for maior que zero. Nesse caso, dá-se início a esse processo de distribuição começando pelas barras de maior prioridade, até que  $Q_{AC}$  seja igual a zero.

Se a variável  $Q_{AC}$  é igual a zero, significa que as regras do Bloco 5.8 não detectaram restrição alguma para a distribuição de bancos de capacitores. Assim sendo, procede-se a execução dos fluxos de carga e harmônico para posterior controle das variáveis envolvidas (Regra 15). Por outro lado, se a variável  $Q_{AC}$  é diferente de zero, inicia-se a distribuição da potência capacitiva acumulada (Regra 16).

**REGRA 15****SE**a variável  $Q_{AC}$  é igual a zero**ENTÃO**

considera-se a distribuição e alocação dos bancos de capacitores indicados pelo Bloco 5.8

**E**

executa-se o fluxo de carga e fluxo harmônico.

**REGRA 16****SE**A variável  $Q_{AC}$  é maior que zero**ENTÃO**

procede-se a distribuição do valor armazenado nesta variável entre as barras de maior prioridade.

O que determina o quanto cada barra pode absorver de reativo capacitivo é o valor mostrado na coluna Margem de acréscimo. Assim, na distribuição de  $Q_{AC}$ , o primeiro objetivo é zerar o valor dessa coluna, ou seja, atribuir à barra o máximo de potência capacitiva. Este procedimento é adotado, pois, quanto maior a potência do banco de capacitor, mais justificável a instalação do mesmo.

As Regras 16.1 a 16.4 controlam a distribuição do valor de  $Q_{AC}$  nas barras da lista de prioridades.

Aplicando-se a Regra 16.1, a lista de prioridades é percorrida até que o valor da variável  $Q_{AC}$  se torne menor que a Margem de Acréscimo e, portanto, possa ser aplicada a Regra 16.2, apresentada a seguir. As Tabelas 3.15 e 3.16 mostram a lista de prioridades antes e depois da aplicação da Regra 16.1, respectivamente.

**REGRA 16.1**

- SE a variável  $Q_{AC}$  é maior que a Margem de Acréscimo ( $Q_{Ai}$ ) de uma determinada barra  $B_i$ ,
- ENTÃO a potência ( $Q_i$ ) do banco de capacitor previsto para a barra  $B_i$  é acrescentado o valor da Margem de Acréscimo ( $Q_{Ai}$ )
- E da variável  $Q_{AC}$  é decrescido o valor da Margem de Acréscimo ( $Q_{Ai}$ )
- E o valor da Margem de Acréscimo ( $Q_{Ai}$ ) da barra  $B_i$  é igualado a zero

Tabela 3.15 – Prioridade das barras sem a aplicação da Regra 16.1.

Prioridade das barras para a compensação de reativos	Potência do banco de capacitor previsto (kVAr)	Margem de acréscimo (kVAr)
$b_3$	$Q_3$	$Q_{A3}$
.	.	.
.	.	.
.	.	.
$b_{n-2}$	0	$Q_{An-2} + Q_{n-2}$
$b_{n-1}$	0	$Q_{An-1}$
$b_n$	0	$Q_n$
$b_1$	0	$Q_{A1} + Q_1$
$b_5$	0	$Q_{A5} + Q_5$
$b_4$	0	$Q_{A4} + Q_4$
$Q_{AC}$ diferente de zero		

Tabela 3.16 – Prioridade das barras com a aplicação da Regra 16.1.

Prioridade das barras para a compensação de reativos	Potência do banco de capacitor previsto (kVAr)	Margem de acréscimo (kVAr)
$b_3$	$Q_3 + Q_{A3}$	0
.	.	.
.	.	.
.	.	.
$b_{n-2}$	$Q_{An-2}$	0
$b_{n-1}$	0	$Q_{An-1} > \text{Resto de } Q_{AC}$
$b_n$	0	$Q_n$
$b_1$	0	$Q_{A1} + Q_1$
$b_5$	0	$Q_{A5} + Q_5$
$b_4$	0	$Q_{A4} + Q_4$
$Q_{AC} = Q_{AC} - Q_{A3} - \dots - Q_{An-2}$ (até que $Q_{AC}$ seja menor que $Q_{An-1}$ ).		

## REGRA 16.2

SE

a variável  $Q_{AC}$  é menor que a Margem de Acréscimo ( $Q_{Ai}$ ) de uma determinada barra ( $B_i$ )

ENTÃO

a potência do banco de capacitor previsto para esta barra ( $Q_i$ ) é acrescido o valor de  $Q_{AC}$

E

da Margem de Acréscimo ( $Q_{Ai}$ ) dessa barra é decrescido o valor da variável  $Q_{AC}$

E

$Q_{AC} = 0$

Para um melhor entendimento, a Tabela 3.17 mostra a lista de prioridades com a aplicação desta regra.



Tabela 3.17 – Prioridade das barras com a aplicação da Regra 16.2.

Prioridade das barras para a compensação de reativos	Potência do banco de capacitor previsto (kVAr)	Margem de acréscimo (kVAr)
$b_3$	$Q_3 + Q_{A3}$	0
.	.	.
.	.	.
.	.	.
$b_{n-2}$	$0 + Q_{An-2} + Q_{n-2}$	0
$b_{n-1}$	$0 + Q_{AC}$	$Q_{An-1} - \text{resto } Q_{AC}$
$b_n$	0	$Q_n$
$b_1$	0	$Q_{A1} + Q_1$
$b_5$	0	$Q_{A5} + Q_5$
$b_4$	0	$Q_{A4} + Q_4$
$Q_{AC} < \text{Margem de Acréscimo}$		

As Regras 16.1 e 16.2 fazem com que todas as barras da lista de prioridades sejam consultadas, a fim de que todo o reativo necessário ao sistema elétrico seja distribuído. Todavia, é possível que tais barras não tenham capacidade de alocar todo o reativo necessário, ou seja, elas estão com potência máxima e a variável  $Q_{AC}$  permanece diferente de zero.

Diante deste cenário, a estratégia adotada na Regra 16.3 é que se altere o fator de potência máximo permitido (item C – seção 3.3.1) de cada barra com um incremento de 0,01.

REGRA 16.3

SE as barras pertencentes à lista de prioridades não alocarem todo  $Q_{AC}$

ENTÃO Haverá o aumento do fator de potência máximo das barras prioritárias de 0,01

E o processo de distribuição é repetido, a partir da Regra 16.1, até que a  $Q_{AC}$  seja zero.

Vale ressaltar que, este aumento se dará até o ponto que o fator de potência unitário não seja ultrapassado.



O objetivo desta regra é aumentar a capacidade das barras de alocarem mais potência reativa capacitiva. Na Tabela 3.18 é ilustrado o problema e a Tabela 3.19 mostra o efeito da aplicação da Regra 16.3.

Tabela 3.18 – A justificativa da Regra 16.3.

Prioridade das barras para a compensação de reativos	Potência do banco de capacitor previsto (kVAr)	Margem de acréscimo (kVAr)
$b_3$	$Q_3 + Q_{A3}$	0
.	.	.
.	.	.
.	.	.
$b_{n-2}$	$Q_{An-2} + Q_{n-2}$	0
$b_{n-1}$	$Q_{An-1}$	0
$b_n$	$Q_r$	0
$b_1$	$Q_{A1} + Q_1$	0
$b_5$	$Q_{A5} + Q_5$	0
$b_4$	$Q_{A4} + Q_4$	0
Todas as barras estão com potência máxima e $Q_{AC}$ continua diferente de zero		

Tabela 3.19 – Prioridade das barras com a aplicação da Regra 16.3.

Prioridade das barras para a compensação de reativos	Potência do banco de capacitor previsto (kVAr)	Margem de acréscimo Elevada (N - Novo) (kVAr)
$b_3$	$Q_3 + Q_{A3}$	$Q_{AN3}$
.	.	.
.	.	.
.	.	.
$b_{n-2}$	$Q_{An-2} + Q_{n-2}$	$Q_{ANn-2}$
$b_{n-1}$	$Q_{An-1}$	$Q_{ANn-1}$
$b_n$	$Q_n$	$Q_{ANn}$
$b_1$	$Q_{A1} + Q_1$	$Q_{AN1}$
$b_5$	$Q_{A5} + Q_5$	$Q_{AN5}$
$b_4$	$Q_{A4} + Q_4$	$Q_{AN4}$
As barras possuem maiores condições de absorver $Q_{AC}$ .		

Após aumentar ao máximo a capacidade de alocação de reativos das barras da lista de prioridades, isto é, tornar o fator de potência máximo das mesmas igual a um, é possível que a variável  $Q_{AC}$  continue com um valor diferente de zero conforme a Tabela 3.20.

Diante dessa situação, é aplicada a Regra 16.4, a seguir:

**REGRA 16.4**

**SE** as barras da lista de prioridades não forem capazes de comportar todo  $Q_{AC}$   
**E** o fator de potência máximo já se encontra igual a 1  
**ENTÃO** o sistema envia uma mensagem ao usuário indicando que não foi capaz de alocar o reativo necessário à compensação  
**E** sugere a liberação de mais barras para o estudo da compensação de reativos ou que o sistema inclua, pelo menos, a barra da concessionária no mesmo.

Tabela 3.20 – Justificativa da Regra 16.4.

Prioridade das barras para a compensação de reativos	Potência do banco de capacitor previsto (kVAr)	Margem de acréscimo (kVAr)
$b_3$	$Q_3 + Q_{A3} + Q_{N3}$	0
.	.	.
.	.	.
.	.	.
$b_{n-2}$	$Q_{An-2} + Q_{n-2} + Q_{ANn-2}$	0
$b_{n-1}$	$Q_{An-1} + Q_{ANn-1}$	0
$b_n$	$Q_n + Q_{ANn}$	0
$b_1$	$Q_{A1} + Q_1 + Q_{N1}$	0
$b_5$	$Q_{A5} + Q_5 + Q_{N5}$	0
$b_4$	$Q_{A4} + Q_4 + Q_{N4}$	0

$Q_{AC}$  diferente de zero e o fator de potência máximo das barras igual a 1.

## **BLOCO 6 – *Inserir bancos de capacitores e filtros pré-definidos pelo usuário***

Para que as decisões finais acerca da compensação de reativos realizada pelo sistema IPQ sejam devidamente analisadas, os bancos de capacitores e filtros pré-definidos pelo usuário são, novamente, instalados no sistema elétrico.

## **BLOCO 7 – *Executar FC e FH***

Executa-se o fluxo de carga e o fluxo harmônico atualizando, desta maneira, as variáveis do sistema elétrico.

## **BLOCO 8 – *Potência Acumulada ( $Q_{AC}$ ) < 1***

A variável  $Q_{AC}$  armazena o valor das potências dos bancos de capacitores previstos para barras com algum tipo de restrição e, posteriormente, este montante é distribuído entre as barras de maior prioridade do sistema elétrico. Assim, se neste ponto de processamento, a referida variável tiver valor igual a zero, é por que toda potência acumulada foi distribuída e, conseqüentemente, o fator de potência está de acordo como requerido no item B (seção 3.3.1).

Com isso, a configuração do sistema elétrico será, a priori, aquela designada pelo Bloco 5.8, pois, se forem detectadas correntes eficazes totais, tensões de pico, distorções harmônicas totais acima do limite, a distribuição dos bancos de capacitores sofrerá alterações. Além disso, o sistema IPQ poderá em última análise, optar pela instalação de filtro.

De forma a medir as conseqüências da configuração adotada pelo sistema IPQ, é aplicada uma estratégia de controle, onde, as variáveis a serem

controladas são a corrente eficaz total, a tensão de pico e a distorção harmônica total de tensão encontrada nos bancos de capacitores. De acordo com o estado destas grandezas é determinada a configuração final do sistema elétrico em termos de compensação de reativos e através da Regra 17 se verificará o controle das perturbações.

#### REGRA 17

SE

$Q_{AC}$  for menor que 1.

ENTÃO

inicia-se o processo de controle das perturbações.

Observação: O valor 1 designado na expressão de teste deste bloco é uma folga à variável  $Q_{AC}$ .

Os blocos subsequentes detalham a relação entre a distribuição de bancos de capacitores e filtros com o sistema elétrico.

#### BLOCO 9 – *Excluir bancos de capacitores e filtros pré-definidos pelo usuário*

A retirada dos bancos de capacitores e filtros pré-definidos pelo usuário, neste ponto, objetiva permitir que o controle incida somente naquelas barras pertencentes a lista de prioridades.

#### BLOCO 10 – *Violação na $I_{ef}$ e $V_p$ dos bancos de capacitores*

A utilização de capacitores em sistemas elétricos que possuem cargas geradoras de harmônicos, aumenta a possibilidade da violação dos limites da corrente eficaz e da tensão de pico nos capacitores. A razão para estas violações pode ou está vinculada ao ângulo de fase das componentes harmônicas de tensão e à magnitude das correntes harmônicas. Isto, além de afetar a vida útil dos capacitores, constitui um indicativo de ressonância no sistema elétrico, e a perda significativa da qualidade da energia elétrica.

Neste contexto, pode ser destacada a referência [17] que apresenta um método simplificado para detectar ressonâncias e níveis de suportabilidade das unidades capacitivas, considerando as componentes fundamentais e harmônicas, evitando sobretensões nas mesmas. Neste particular, os valores de referência da corrente eficaz máxima e da tensão de pico máximo nos capacitores, foram fundamentados nas normas *IEEE Standard for Shunt Power Capacitors-ANSI/IEEE Std 18-1980* e a ABNT:NBR-5282/1988 (Brasil), cujos limites são indicados nas Tabelas 3.21 e 3.22.

*Tabela 3.21 – Norma IEEE Std 18.*

	LIMITE
<b>Corrente Eficaz no Capacitor</b>	$\leq 1,8$ da corrente nominal do capacitor

*Tabela 3.22 – ABNT-NBR-5282(Brasil).*

	LIMITE
<b>Corrente Eficaz no Capacitor</b>	$\leq 1,31$ da corrente nominal do capacitor
<b>Tensão de Pico no Capacitor</b>	$\leq 1,20$ da tensão de pico

Baseado na estratégia supra citada, o sistema IPQ calcula a corrente eficaz total e a tensão de pico nos capacitores, levando em consideração o ângulo de fase das tensões harmônicas.

Caso os valores das correntes e tensões de pico encontrados nos bancos de capacitores **não** excederem os limites recomendados, o Bloco 11 é executado.

Por outro lado, se a tensão ou a corrente infringir os limites determinados pelas normas ou pelo fabricante, ações de controle serão impostas de tal maneira que as infrações nos capacitores sejam eliminadas ou atenuadas. Se tais violações não forem totalmente suprimidas, a estratégia de controle propõe a compensação dos harmônicos através de filtros. Juntamente a esse controle, a tensão fundamental e o fator de potência são mantidos dentro dos limites

recomendados, o rendimento dos transformadores é elevado, proporcionando, em última análise, menores perdas no sistema elétrico e, conseqüentemente, o aumento da vida útil dos equipamentos e dispositivos elétricos.

Assim, nos próximos blocos (Bloco 12) são apresentados os procedimentos do sistema IPQ decorrentes da presença de infração na corrente eficaz ou na tensão de pico nos bancos de capacitores.

### ***BLOCO 11 – Violação de $DHV_T\%$ nos bancos de capacitores***

De acordo com a Figura 3.7, caso não existam violações na corrente eficaz total e na tensão de pico dos bancos de capacitores (chechado no Bloco 12), o próximo passo é verificar a distorção harmônica total de tensão sobre os mesmos. Isso é executado por este bloco através da Regra 28.

#### **REGRA 28**

**SE**

o  $DHV_T\%$  na barra de algum banco de capacitor estiver acima do limite especificado no item F da entrada de dados (seção 3.3.1)

**ENTÃO**

substituir tal banco pelo seu respectivo filtro processando o Bloco 13

**CASO CONTRÁRIO**

emitir o parecer conclusivo (Bloco 15)

### ***BLOCO 12 – Eliminar a violação buscando outras configurações de alocação ou de equipamentos (Bancos de Capacitores/Filtros)***

Este bloco é processado, somente se existe infração na corrente eficaz total ou na tensão de pico de um ou mais bancos de capacitores, seguindo o esquema mostrado na Figura 3.9.

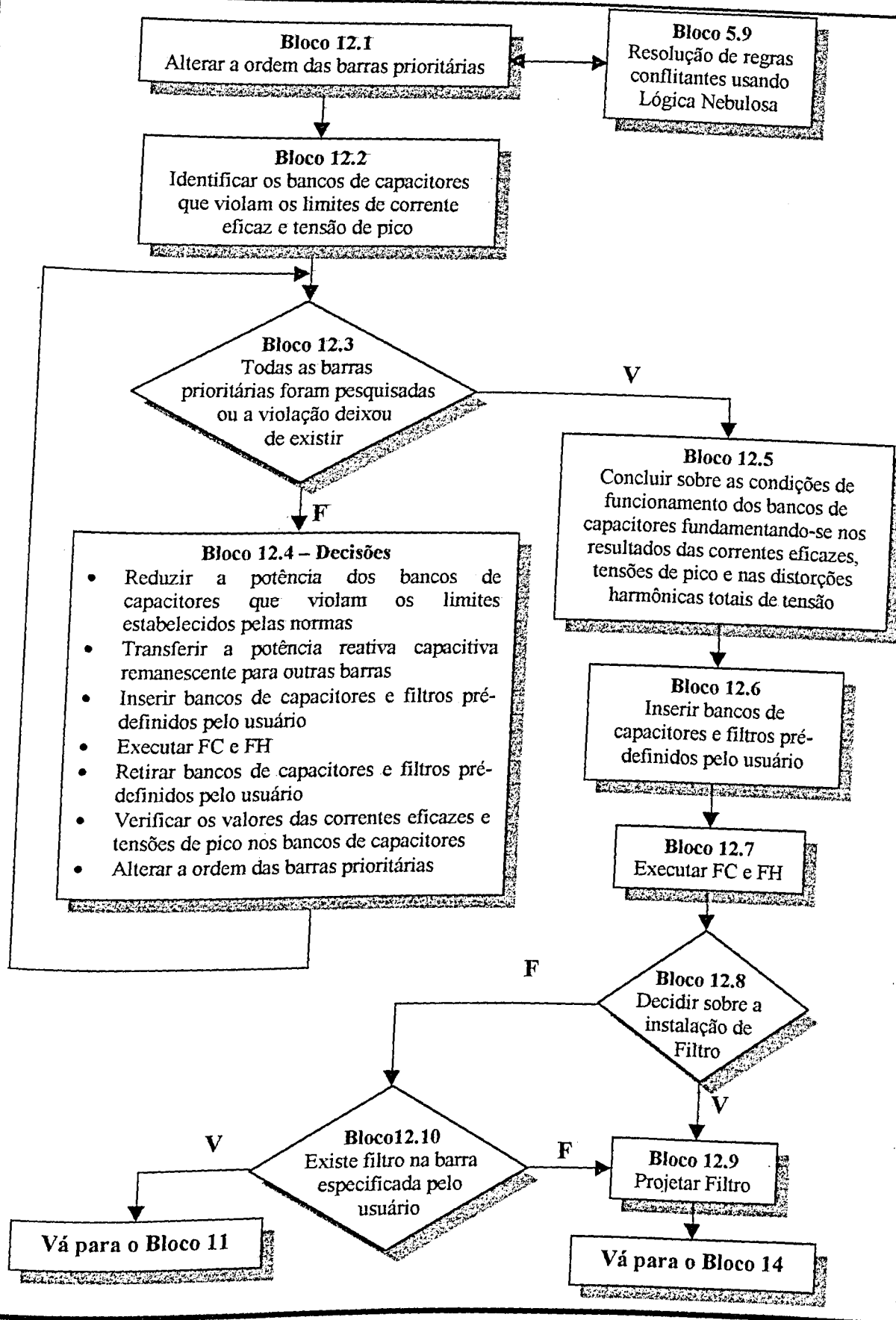


Figura 3.9 – Estratégia de controle das perturbações nos bancos de capacitores e decisão final quanto a configuração dos bancos de capacitores no sistema elétrico.

Em linhas gerais, o objetivo das operações realizadas pelos blocos da Figura 3.9 é, em uma primeira instância, eliminar a infração ocorrida nas grandezas supra citadas usando, apenas, bancos de capacitores. Para tanto, busca-se uma nova distribuição dos mesmos no sistema elétrico. Esta estratégia é justificável por ser economicamente mais viável do que a instalação de filtros. Assim, na tentativa de eliminar os resultados excedidos usando apenas bancos de capacitores várias configurações são testadas até que tal objetivo seja alcançado ou até o esgotamento das alternativas com bancos de capacitores. Se a violação nos bancos de capacitores persiste, o sistema IPQ toma a decisão final de instalar filtro no sistema elétrico.

Uma abordagem mais detalhada de cada bloco da Figura 3.9 é estabelecida na sequência:

**BLOCO 12.1 – Alterar a lista de prioridades**

Na ocorrência de limites excedidos na corrente eficaz total ou na tensão de pico de um ou mais bancos de capacitores procurar-se-á alterar a ordem das barras na lista de prioridades. Neste ponto, propensas à compensação de reativos serão aquelas com a menor distorção harmônica total de tensão ( $DHV_T\%$ ). Desta maneira, acredita-se que as barras com menor  $DHV_T\%$  terão mais condições de receber potência reativa capacitiva do que aquelas barras que possuem maior  $DHV_T\%$ .

Para tanto neste bloco, são acrescentados à lista de prioridades os campos  $DHV_T\%$ , *Estado\_Antes*, e *Estado\_Depois* conforme mostrado na Tabela 3.23.

Tabela 3.23 – Os novos campos:  $DHV_T\%$ , *Estado\_Antes* e *Estado\_Depois*.

Prioridade das barras para a compensação de reativos	Potência do banco de capacitor previsto (kVAR)	Margem de Acréscimo (kVAR)	$DHV_T\%$ (menor o $DHV_T\%$ , maior a prioridade da barra)	Estado Antes	Estado Atual
$b_n$	$Q_n$	$Q_{An}$	$DHV_{Tn}\%$	S/N	S/N



Os campos *Estado\_Antes* e *Estado\_Depois* se referem ao estado de um determinado banco de capacitor, quanto as infrações na sua corrente eficaz total ou na tensão de pico anteriormente e após o remanejamento das potências reativas capacitivas. Tais campos assumem os valores “S” (Sim) ou “N” (Não), caso haja ou não infração dos limites pré-definidos, respectivamente.

### **BLOCO 12.2 – Identificar os bancos de capacitores que violam os limites de corrente eficaz total ou a tensão de pico**

O estado dos bancos de capacitores é armazenado no campo *Estado\_Antes*, o que possibilita que o sistema IPQ possua um mapa das condições de funcionamentos dos mesmos.

A fim de neutralizar as violações nos bancos de capacitores um processo iterativo é implementado no bloco descrito a seguir.

### **BLOCO 12.3 - Todas as barras prioritárias foram pesquisadas ou a violação deixou de existir**

#### **REGRA 17.1**

**SE**

a violação existe

**OU**

nem todas as barras foram pesquisadas

**ENTÃO**

Reduzir a potência dos bancos de capacitores

**E**

transferir a potência reativa capacitiva remanescente para outras barras

**E**

Instalar bancos de capacitores e filtros pré-definidos pelo usuário

**E**

Executar Fluxo de carga e fluxo harmônico

**E**

Retirar bancos de capacitores e filtros pré-definidos pelo usuário

**E**

Verificar os valores das correntes eficazes e tensões de pico nos bancos de capacitores

**E**

Alterar a ordem das barras prioritárias

A condição da Regra 17.2 garante que, enquanto houver infração, outras configurações com bancos de capacitores serão testadas através da execução de um conjunto de ações, denominadas consequentes, as quais são comentadas a seguir.

**REGRA 17.2****SE**o campo *Estado Antes* é igual a S**ENTÃO**

a potência do banco de capacitor é reduzida para o valor mínimo estipulado pelo usuário

**E**a parcela da potência reativa capacitiva que foi retirada é armazenada na variável  $Q_{AC}$ .

A barra da lista de prioridades cujo limite foi infringido, terá sua potência do banco de capacitor reduzida a um valor mínimo de acordo com o item D (seção 3.3.1). A finalidade desta operação é permitir uma conclusão mais concreta das condições de funcionamento do banco de capacitor perante uma potência mínima. Isto é traduzido da seguinte forma:

Se o banco de capacitor estiver operando com uma potência mínima e a infração persistir, então, a decisão é retirá-lo. Por outro lado, se ao impor uma condição de compensação mínima, a violação deixou de existir, então, deve-se buscar um valor ótimo para a potência do banco de capacitores que se encontre entre a potência que ocasionou a violação e a referida mínima.

Esta análise é feita no Bloco 12.5. A porção de potência reativa capacitiva retirada das devidas barras é armazenada na variável denominada  $Q_{AC}$ , a qual será distribuída entre aquelas cujo valor do campo *Estado\_Antes* seja igual a N.

Ressalva-se que a distribuição desta potência faz uso do mesmo método descrito no Bloco 5.11. Distribuir o valor armazenado na variável  $Q_{AC}$  entre as barras de maior prioridade. Assim, à medida que  $Q_{AC}$  é distribuído, o valor armazenado é reduzido.

Com a nova configuração e mais os bancos de capacitores e filtros pré-definidos pelo usuário, executa-se o fluxo de carga e o fluxo harmônico, após os quais, o sistema **IPQ** avalia o resultado obtido monitorando as correntes eficazes totais e da tensão de pico dos bancos de capacitores.

Finalmente, a última tarefa realizada no laço é a atualização da lista de prioridades, isto é, a classificação da mesma de acordo com a distorção harmônica total de tensão.

Uma vez testadas todas as possibilidades ou não identificado limites excedidos, o sistema analisa os resultados gerados pelas ações anteriores e toma as últimas decisões referentes à tentativa de compensar o sistema elétrico usando apenas bancos de capacitores. Tais decisões são mostradas no Bloco 12.5, a seguir:

**BLOCO 12.5: *Concluir sobre as condições de funcionamento dos bancos de capacitores fundamentando-se nos resultados das correntes eficazes, tensões de pico e nas distorções harmônicas totais de tensão.***

Este bloco tem a função de analisar os resultados obtidos através das operações ocorridas no bloco anterior. Para isso, a Tabela 3.24 mostra um resumo das possíveis decisões a serem tomadas, comprando-se o estado dos bancos de capacitores (Situação A) e depois (Situação B) da nova configuração obtida.

Tabela 3.24 – Resumo das decisões do sistema especialista mediante uma nova configuração.

Hipóteses	Estado Antes Violação	Estado Depois Violação	Decisão do sistema IPQ
1	S	S	Retira toda potência capacitiva da barra
2	N	N	Mantém a potência determinada pela Situação B
3	N	S	Retorna o valor da potência do banco da Situação A
4	S	N	Verifica a possibilidade de aumento da potência capacitiva

Todas as decisões mostradas na Tabela 3.24, são regidas por quatro regras apresentadas a seguir:

**REGRA 18.1**

SE

antes e depois da redistribuição de reativos o banco de capacitor apresenta infração (**Hipótese 1**)

ENTÃO

o banco de capacitor é retirado da respectiva barra

E

o valor da potência retirada é armazenado na potência acumulada ( $Q_{AC}$ )

Se, após a redistribuição de reativos a infração num determinado banco de capacitores persiste, o efeito da Regra 18.1 é a retirada definitiva do banco de capacitores que apresenta violação, pois, este já se encontra com potência mínima nesta situação. Na sequência, a potência referente a tal banco é acrescida à variável  $Q_{AC}$ .

**REGRA 18.2**

SE

antes e depois da redistribuição de reativos não houve infração (**Hipótese 2**)

ENTÃO

a potência do banco do capacitor é mantida

**REGRA 18.3**

- SE**
  - antes da nova configuração não havia violação
- E**
  - com o remanejamento esta passou a existir (**Hipótese 3**)
- ENTÃO**
  - é mantida a potência do banco de capacitor anterior à nova configuração
- E**
  - o valor de  $Q_{AC}$  é alterado

Com a nova configuração do sistema, algum banco de capacitor pode passar a apresentar certo tipo de infração. Neste caso, a potência do mesmo é reduzida até o valor anterior ao remanejamento e,  $Q_{AC}$  é alterado, assumindo tal diferença.

**REGRA 18.4**

- SE**
  - antes da nova configuração o banco de capacitor apresentava violação
- E**
  - com o remanejamento esta deixou de existir (**Hipótese 4**)
- ENTÃO**
  - o sistema **IPQ** verifica a possibilidade da instalação de mais potência reativa capacitiva na respectiva barra
- E**
  - $Q_{AC}$  é decrescida na mesma quantidade do referido aumento

De acordo com a Regra 17.1, todos os bancos de capacitores que apresentam violação, têm suas potências reduzidas a um valor mínimo. Portanto, neste novo patamar de potência, certos bancos, senão todos, podem ter suas infrações extintas. Neste caso, o sistema **IPQ** considera a possibilidade de tais potências serem elevadas.

Uma vez verificadas as condições de funcionamento dos bancos de capacitores, o próximo passo consiste em conferir os respectivos níveis das



distorções harmônicas totais de tensão. Assim, esta variável é controlada pela seguinte regra:

**REGRA 18.5****SE**

a distorção harmônica total de tensão no banco de capacitores estiver acima do limite estabelecido

**ENTÃO**

a potência do mesmo é reduzida a zero

**E**

a variável  $Q_{AC}$  é adicionado tal valor

A decisão do sistema IPQ em retirar o banco de capacitor que esteja apresentando uma distorção harmônica total de tensão acima dos limites aceitáveis, significa uma tendência à instalação de filtros no complexo elétrico em estudo.

**BLOCO 12.6 – Inserir bancos de capacitores e filtros pré-definidos pelo usuário**

Para que as decisões finais acerca da compensação de reativos realizada pelo sistema IPQ sejam devidamente analisadas, os bancos de capacitores e filtros pré-definidos pelo usuário são, novamente, instalados no sistema elétrico.

**BLOCO 12.7 – Executar FC e FH**

Executa-se o fluxo de carga e o fluxo harmônico atualizando, desta maneira, as variáveis do sistema elétrico.

## BLOCO 12.8 – *Decidir sobre Instalação de Filtro*

Os procedimentos adotados até aqui fornecem um indicativo ao sistema IPQ quanto ao meio de compensação do sistema elétrico, ou seja:

- apenas bancos de capacitores
- bancos de capacitores e filtros
- somente filtros

A definição final, é baseada no processamento das Regras 19.1, 19.2, 19.3 e 19.4, mostradas a seguir:

### REGRA 19.1

SE

o conteúdo da variável  $Q_{Ac}$  for igual a zero

E

não existir violação na corrente eficaz total ou na tensão de pico nos bancos de capacitores

E

as distorções harmônicas totais de tensão nos mesmos se encontrarem dentro dos limites aceitáveis

ENTÃO

a compensação é provisoriamente realizada sem a colocação de filtros no sistema elétrico (com exceção daqueles já pré-definidos)

E

o Bloco 12.10 é executado

No caso das condições da Regra 19.1 serem verdadeiras, duas conclusões são imediatas:

- fator de potência está corrigido de acordo com o requerimento do item B (seção 3.3.1)
- as distorções harmônicas nos bancos são aceitáveis, portanto, não é necessário a instalação de filtros. Diante disso, a configuração final do complexo elétrico é, a priori, determinada.

Tal topologia é provisória uma vez que o sistema IPQ deve, ainda, conferir o valor da distorção harmônica total de tensão nas barras que possuem fonte harmônica. Caso este se encontre acima do limite permitido, o sistema consulta a entrada de dados do usuário indicado no item G (seção 3.3.1), onde é verificado, a obrigatoriedade, ou não, da instalação de filtros em tais barras. Essa decisão é tomada pelo Bloco 11.

**REGRA 19.2****SE**o valor armazenado pela variável  $Q_{AC}$  for igual a zero**E**

não existir violação na corrente eficaz total ou na tensão de pico nos bancos de capacitores

**E**

as distorções harmônicas totais de tensão nos mesmos se encontrarem acima dos limites aceitáveis

**ENTÃO**

Inicia-se o projeto de filtro (Bloco 12.9)

A Regra 19.2, indica que o fator de potência requerido está sendo atendido, haja visto, que o valor armazenado na variável  $Q_{AC}$  é igual a zero. Todavia, existe infração na distorção harmônica total de tensão. Assim sendo, o sistema decide em instalar filtro (Bloco 12.9).

**REGRA 19.3****SE**a variável  $Q_{AC}$  está com atribuição diferente de zero**E**o campo *Margem de Acréscimo (kVar)* do banco de dados PRIORIDADES é igual a zero**ENTÃO**

o processo de compensação de reativos é encerrado



A Regra 19.3 estabelece que não há possibilidade do sistema elétrico absorver todo o valor armazenado na variável  $Q_{AC}$ , conseqüentemente, o fator de potência não está sendo atendido. Desta forma, o processo de compensação de reativos é encerrado, pois, as barras prioritárias não possuem capacidade de absorver mais potência capacitiva. Isto pode ocorrer devido ao número reduzido de barras escolhidas pelo usuário como prioritárias. A solução, portanto, é aumentar o número de barras prioritárias ao estudo do item E (seção 3.3.1).

**REGRA 19.4**

- SE**
  - E** o conteúdo da variável  $Q_{AC}$  é diferente de zero
  - E** não existe violação quanto a corrente eficaz total ou na tensão de pico nos bancos de capacitores
  - E** as distorções harmônicas totais de tensão nos mesmos se encontrarem dentro dos limites aceitáveis
  - E** o campo *Margem de Acréscimo* ( $Q_A$ ) do banco de dados PRIORIDADES é diferente de zero
- ENTÃO**
  - E** os bancos de capacitores são provisoriamente pré-definidos
  - E** inicia-se o projeto de filtros (Bloco 12.9)

Os bancos de capacitores não apresentam limites excedidos. Contudo, o fator de potência não está sendo atendido pelo fato de que o valor de  $Q_{AC}$  é diferente de zero. A razão disto é que as tentativas de encontrar outras configurações de bancos de capacitores não foram bem sucedidas. Assim sendo, a potência capacitiva prevista para uma determinada barra é retirada e

armazenada na variável  $Q_{AC}$ . Assim sendo, esta potência será re-alocada sob a forma de filtros.

### BLOCO 12.10 - *Existe filtro na barra especificada pelo usuário?*

Realizada a compensação de reativos provisória, pode acontecer que o valor da distorção harmônica total de tensão na barra que possui fonte harmônica esteja acima do limite máximo permitido. Isto é possível de ocorrer, pois, o objetivo é fazer a compensação usando um número mínimo de filtros.

Entretanto, antes da concretização da compensação de reativos, o sistema IPQ faz uma consulta ao item G (seção 3.3.1). O objetivo desta consulta é verificar a obrigatoriedade da instalação de filtros nas barras que possuem fonte harmônica, caso a distorção harmônica de tensão esteja acima do limite máximo. Com isso, o sistema inicia o projeto de filtro nas correspondentes barras. Nestes projetos de filtros, a potência capacitiva será obtida das barras menos prioritárias.

A Regra 20 ilustra esta análise.

#### REGRA 20

- SE
- E a compensação provisória de reativos foi realizada
- E existe valor de distorção harmônica acima do permitido nas barras que possuem fonte harmônica
- E nestas barras é obrigatória a instalação de filtros – item G (seção 3.3.1)
- ENTÃO
- E instalar filtro nestas barras (Bloco 12.9)
- E a potência capacitiva para o projeto do filtro é obtida retirando-se das barras menos prioritárias

## BLOCO 12.9 – *Projetar Filtro*

A premissa básica da estratégia de compensação de reativos é utilizar apenas bancos de capacitores. Todavia, como isso nem sempre é possível, devido às distorções harmônicas, o sistema IPQ pode optar pela instalação de filtros no sistema elétrico. Assim, as Regras 19.1, 19.2, 19.3 e 19.4 definem os equipamentos necessários à compensação de reativos, isto é:

- apenas bancos de capacitores;
- bancos de capacitores e filtros ou
- somente filtros.

Uma vez identificada a necessidade da instalação de filtros, é executado um procedimento para o projeto dos mesmos, o qual é descrito neste bloco e consiste, em linhas gerais, dos seguintes passos:

- Procurar a melhor barra do sistema elétrico para a instalação do filtro;
- Determinar a potência do banco de capacitor para o filtro;
- Obter, automaticamente, a ordem de sintonia do filtro (Bloco 12.9.5);
- Verificar o valor da distorção harmônica total de tensão na barra do filtro projetado;
- Observar a necessidade de projetar mais de um filtro para uma determinada barra e
- Investigar a possibilidade de alocar a potência acumulada ( $Q_{Ac}$ ) remanescente usando bancos de capacitores.

A Figura 3.10 ilustra com mais detalhes os procedimentos executados por este bloco.

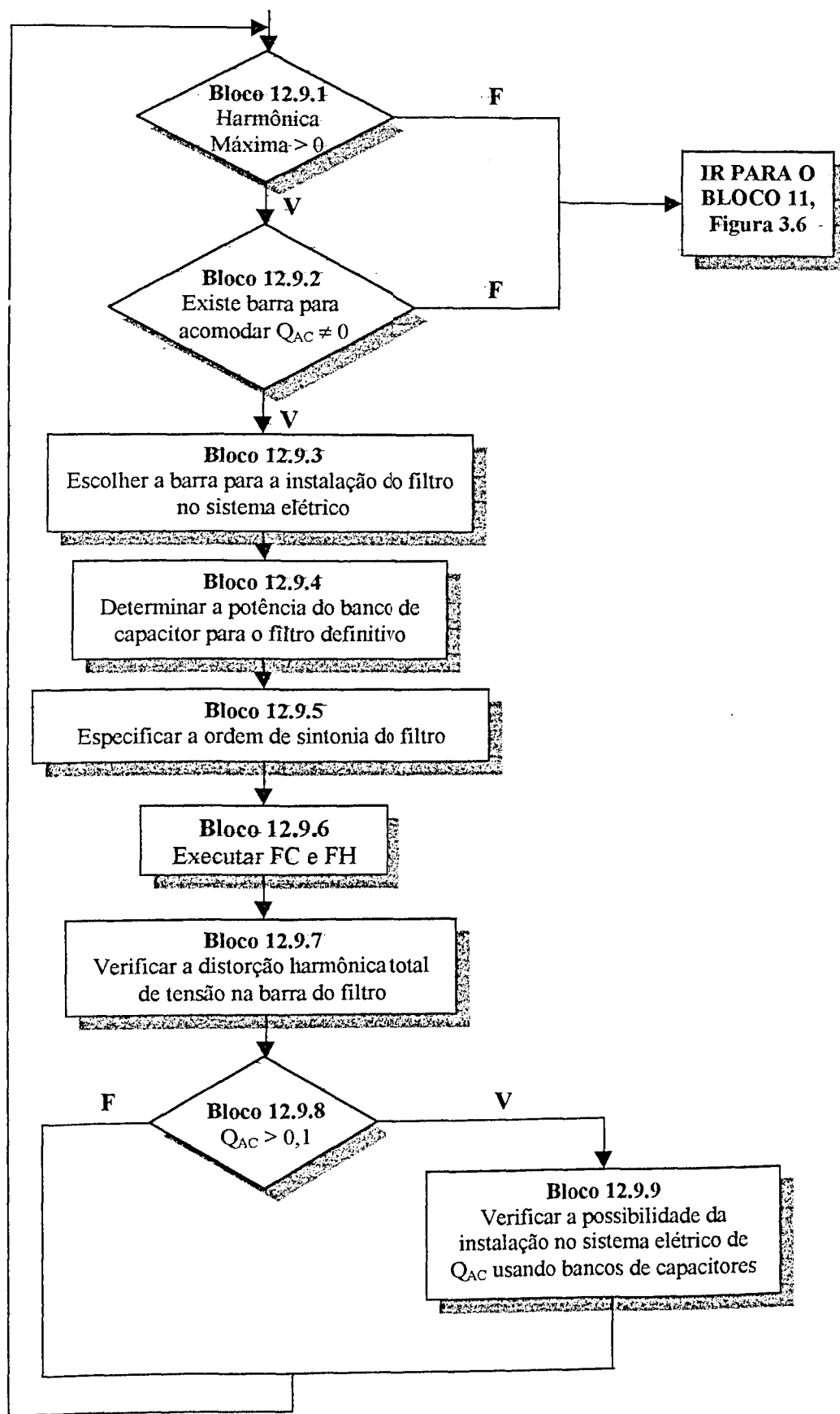


Figura 3.10 – Estratégia para o projeto do filtro.

### BLOCO 12.9.1 - *Harmônica Máxima > 0?*

A função deste bloco é impedir que o sistema inicie o projeto de filtros para um sistema elétrico que não possua fonte harmônica.

### BLOCO 12.9.2 - *Existe barra para acomodar $Q_{AC} \neq 0$ ?*

Este bloco, através da Regra 21, estabelece que: enquanto o conteúdo da variável  $Q_{AC}$  (potência acumulada) não for zero e, ainda, existir alguma barra na lista de prioridades que tenha condições de alocar tal potência capacitiva, será executado o projeto para um determinado filtro.

#### REGRA 21

SE

o valor da variável  $Q_{AC}$  for diferente de zero

E

existir barra para acomodar tal potência capacitiva

ENTÃO

projetar filtro

CASO CONTRÁRIO

finalizar o processo de compensação (Bloco 15, a ser descrito)

Caso a condição imposta pela Regra 21 seja atendida, são executados os Blocos 12.9.3 a 12.9.9.

### BLOCO 12.9.3 – *Escolher a barra para a instalação do filtro no sistema elétrico*

Ao início do projeto do filtro, o sistema IPQ busca a barra mais apropriada para a instalação do mesmo, sendo que, o fator preponderante para tal escolha é a presença de fontes harmônicas. Neste ponto, é aplicada a Regra 22.

## REGRA 22

SE

existir mais de uma barra possuidora de fonte harmônica na lista de prioridades

ENTÃO

definir a barra de referência

E

projetar filtros padrões

E

encontrar a fonte harmônica que mais influencia a barra de referência

**CASO CONTRÁRIO**

executar as Regras 23 e 24

No caso da condição imposta pela Regra 22 ser verdadeira, são executados os Blocos 12.9.3.1 a 12.9.3.3, caso contrário, é executado o Bloco 12.9.3.4, descritos a seguir.

### BLOCO 12.9.3.1: Definir a barra de referência

Quando o sistema em estudo possui mais de uma fonte harmônica, surge a seguinte questão:

*Qual das fontes harmônicas influencia mais intensamente nas distorções existentes no sistema?*

Diante disso, este bloco escolhe uma barra para referência, que é definida como sendo aquela de maior distorção harmônica total de tensão, independentemente de constar ou não na lista de prioridades e, além disso, não deve possuir fonte harmônica instalada.

### **BLOCO 12.9.3.2: Projetar filtros padrões**

O filtro padrão é o elemento utilizado para identificar em que barra (ou barras) será instalado o definitivo. Dessa forma, uma vez estabelecidos os parâmetros do filtro padrão através deste bloco (potência do banco de capacitores, frequência de sintonia e fator de qualidade), são procedidas as avaliações dos efeitos da sua instalação (Bloco 12.9.3.3) para encontrar a fonte harmônica que mais influencia a barra de referência.

Nesse contexto, primeiramente, é definida a potência capacitiva do filtro padrão ( $Q_{FP}$ ). Tal valor consiste da menor margem de acréscimo ( $Q_A$ ) encontrada entre as barras que possuem fonte harmônica e que não tenham bancos de capacitores ou filtros instalados.

Em seguida, são identificadas as quatro maiores amplitudes de corrente harmônica presentes na barra de referência ( $I_1 > I_2 > I_3 > I_4$ ) e, conseqüentemente, as suas respectivas ordens harmônicas ( $n_1, n_2, n_3$  e  $n_4$ ). Com isso, o filtro padrão é sintonizado, inicialmente, apenas para a ordem cuja corrente seja a de maior amplitude ( $n_1$ ). Entretanto, no processo de avaliação dos efeitos deste filtro (Bloco 12.9.3.3), as demais ordens ( $n_2, n_3$  e  $n_4$ ) podem, também, ser solicitadas.

Finalmente, para o fator de qualidade, é adotado um valor fixo igual a 55.

### **BLOCO 12.9.3.3: Encontrar a fonte harmônica que mais influencia a barra de referência**

A decisão sobre em qual das barras, possuidoras de fonte harmônica, deve ser instalado o filtro, é tomada através da identificação daquela que mais influencia no  $DHV_T\%$  da barra de referência. Para tanto, este bloco utiliza uma estratégia, cujo esquema é mostrado na Figura 3.11.

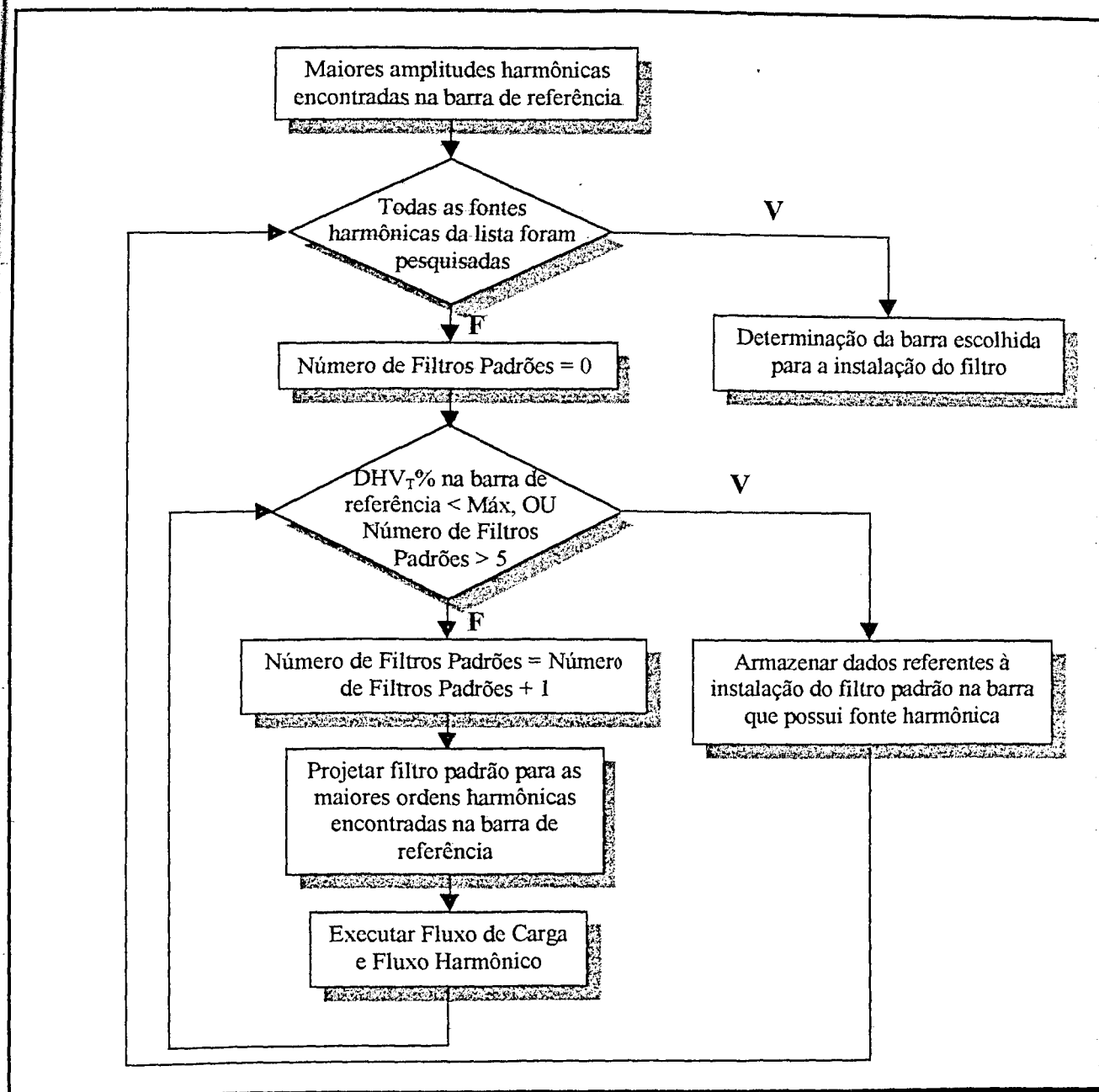


Figura 3.11 – Metodologia empregada para encontrar a fonte harmônica que mais influencia a barra de referência.

Através da figura anterior observa-se que, para cada barra com fonte harmônica, é analisada uma topologia de instalação de filtros padrões, individualmente. Tais topologias variam entre os possíveis resultados do projeto de filtros, que podem ser visualizados na Tabela 3.25.



Tabela 3.25: Resultado do projeto dos filtros padrões na Figura 3.11.

NÚMERO DE FILTROS PADRÕES	POTÊNCIA DO BANCO DE CADA FILTRO	ORDENS DE SINTONIA PARA CADA FILTRO
1	$Q_{FP}/1$	$n_1$
2	$Q_{FP}/2$	$n_1$ e $n_2$
3	$Q_{FP}/3$	$n_1$ , $n_2$ e $n_3$
4	$Q_{FP}/4$	$n_1$ , $n_2$ , $n_3$ e $n_4$

Nota: As ordens de sintonia  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  e  $n_4$  foram definidas no Bloco 12.9.3.2.

Ainda, de acordo com a Figura 3.11 e a Tabela 3.25, a busca de novos filtros padrões continua até que o  $DHV_T\%$  na barra de referência se encontre abaixo do máximo permitido ou que o número de filtros padrões seja igual a quatro. Este último valor, baseando-se na experiência do profissional especialista, pode ser considerado suficiente para se identificar uma tendência na determinação da barra de instalação do filtro definitivo.

Finalmente, uma vez armazenados os dados sobre o número de filtros padrões utilizados e respectivos  $DHVs_T\%$  resultantes na barra de referência, para cada barra com fonte harmônica, é feita uma comparação entre os mesmos, de onde pode-se concluir que:

*A barra mais indicada à instalação do filtro definitivo será aquela que requereu um menor número de filtros padrões para reduzir o  $DHV_T\%$  no ponto de referência. Entretanto, no caso de duas ou mais barras necessitarem do mesmo número de filtros padrões, será escolhida aquela que resultou na menor distorção harmônica total de tensão na barra de referência.*

### **BLOCO 12.9.3.4: Instalar filtro na única barra com fonte harmônica ou naquela com maior $DHV_T\%$**

Na situação em que o sistema possui apenas uma, ou nenhuma, fonte harmônica, o sistema IPQ utiliza as Regras 23 e 24 para tomar a decisão sobre em que barra instalar o filtro.

#### **REGRA 23**

**SE** na lista de prioridades constar apenas uma barra com fonte harmônica

**ENTÃO** o filtro será instalado na própria barra da fonte harmônica

#### **REGRA 24**

**SE** na lista de prioridades não constar barra com fonte harmônica

**ENTÃO** a barra a escolhida para instalação do filtro será aquela, pertencente à lista de prioridades, com maior distorção harmônica total de tensão

Uma vez determinada a barra para a instalação do filtro, a próxima etapa é especificar a potência do banco de capacitores utilizada pelo mesmo.

### BLOCO 12.9.4 – *Determinar a potência do banco de capacitores do filtro definitivo*

No Bloco 12.9.3 foi determinada, apenas, a localização do filtro definitivo, sendo que, a potência do banco de capacitores do mesmo é obtida neste bloco e dependerá das características apresentadas pela barra escolhida. Deste modo, o valor de tal potência é encontrado com a aplicação da Regra 25.

#### REGRA 25

SE

a potência acumulada ( $Q_{Ac}$ ) for menor ou igual à margem de acréscimo ( $Q_A$ )

ENTÃO

a potência do banco de capacitor ( $Q_F$ ) disponível ao projeto de filtro será a própria potência acumulada

E

a potência acumulada remanescente é igualada a zero ( $Q_{Ac} = 0$ )

CASO CONTRÁRIO

a potência do banco de capacitor ( $Q_F$ ) do filtro será igual a margem de acréscimo ( $Q_A$ )

E

da potência acumulada remanescente é reduzido o valor da margem de acréscimo ( $Q_{Ac} = Q_{Ac} - Q_A$ )

Obs.: O valor da margem de acréscimo ( $Q_A$ ) é referente à barra escolhida para a instalação do filtro.

### BLOCO 12.9.5 – *Especificar a ordem de sintonia do filtro*

O principal objetivo deste bloco é encontrar uma frequência de sintonia para o filtro definitivo, que resulte em uma menor distorção harmônica total de tensão possível. Essa busca automática é feita em uma faixa de frequência predefinida, entre as ordens  $h=1,5$  a  $h=25$  (90 a 1500 Hz, para o sistema de 60Hz) e com um passo de variação igual a 0,1, cujo procedimento obedece ao esquema da Figura 3.12.

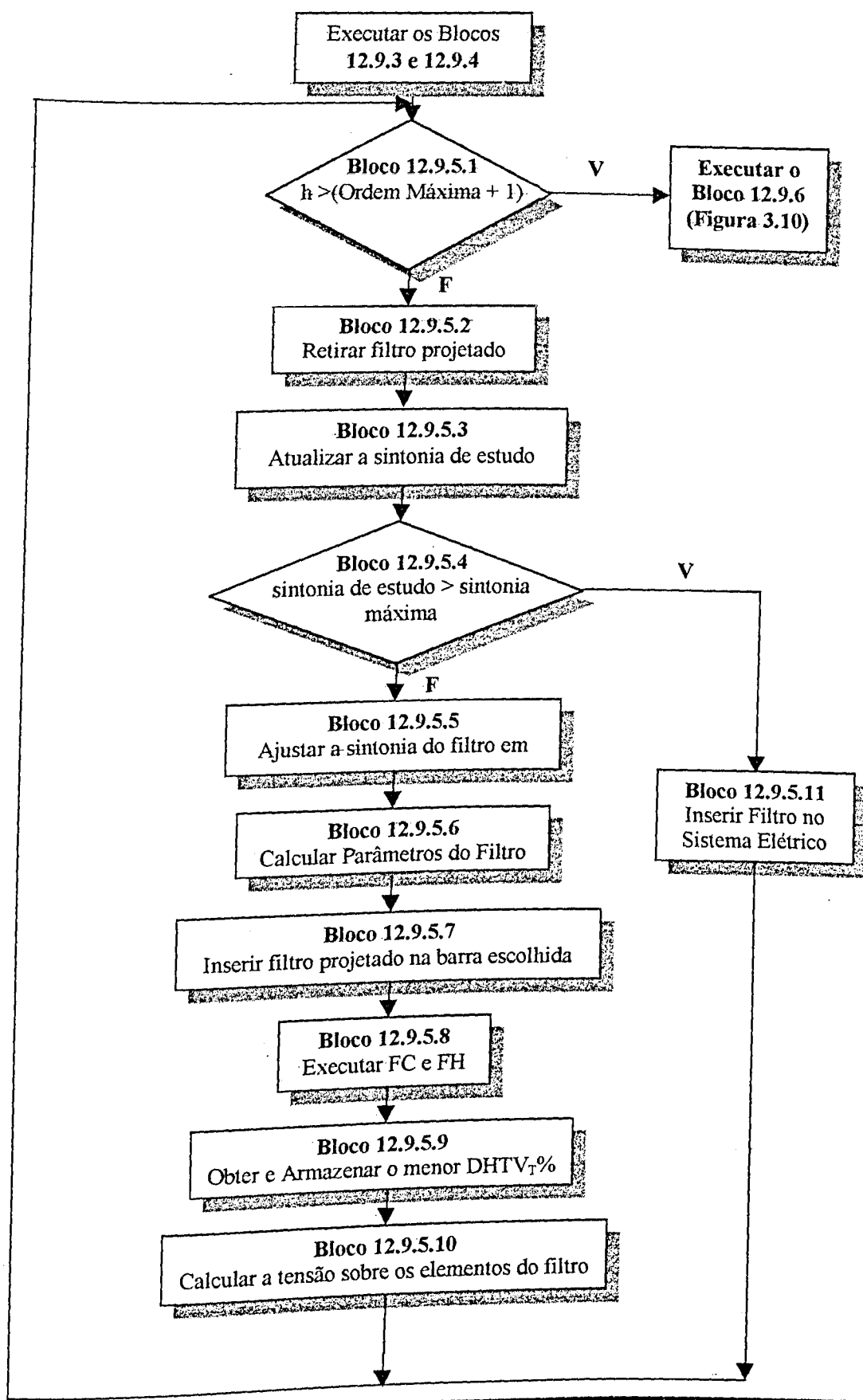


Figura 3.12 – Procedimentos adotados para encontrar automaticamente a ordem de sintonia do filtro.

### **BLOCO 12.9.5.1 - $h > (\text{Ordem Máxima} + 1)$**

Trata-se de um *loop* cujas fronteiras é a ordem harmônica mínima e a ordem harmônica máxima e, tendo  $h$  como variável contadora. Inicialmente, o valor de  $h$  é  $h = \text{ordem harmônica mínima}$ . Cada vez que este bloco é executado  $h$  é aumentado de 0,1.

### **BLOCO 12.9.5.2 – Retirar filtro projetado**

Sempre que se inicia um novo projeto de filtro com o intuito de encontrar a melhor sintonia, o filtro especificado para a ordem  $h$  é retirado do sistema elétrico. Assim, inicia-se o projeto do próximo filtro cuja ordem de sintonia é igual a  $h=h+0,1$ .

### **BLOCO 12.9.5.3 – Atualizar a sintonia de estudo**

Este bloco faz o ajuste do contador  $h$  do laço, isto é, o passo de variação mais o valor anterior de  $h$ . Ressalta-se que a primeira vez que este bloco é executado o valor de  $h$  é igual a ordem de sintonia mínima.

### **BLOCO 12.9.5.4 – Sintonia de estudo $>$ Sintonia Máxima**

É um bloco “decisor” que estabelece que quando a sintonia de estudo ( $h$ ) for maior que a sintonia máxima ( $h=25$ ), o processo de busca automática do filtro é encerrado. Assim, o Bloco 12.9.5.11 é executado. Caso contrário, executa-se o Bloco 12.9.5.5.

**BLOCO 12.9.5.5 – Ajustar a sintonia do filtro em Hz**

Neste bloco, é calculada a frequência de sintonia atual, em Hertz, através da equação (3.18).

$$f = h * f_1 \quad (3.18)$$

Onde:

- $f$  - frequência de sintonia atual [Hz]
- $h$  - ordem de sintonia atual
- $f_1$  - frequência fundamental (50 ou 60) [Hz]

**BLOCO 12.9.5.6 – Calcular os parâmetros do filtro**

Este bloco calcula os parâmetros do filtro em função da frequência de sintonia atual ( $f$ ). Para tanto, são utilizadas as expressões (3.19) a (3.21).

$$L = (-X_{C1} * f) / ((f^2 - f_1^2) * 2 * \pi) \quad (3.19)$$

$$C = -(f^2 - f_1^2) / 2 * \pi * X_{C1} * f_1^2 * f \quad (3.20)$$

$$R = 2 * \pi * f_1 * L / \Theta \quad (3.21)$$

Onde:

- $X_{C1}$  - reatância capacitiva [ $\Omega$ ]
- $\Theta$  - fator de qualidade
- $L$  - indutância do filtro [H]
- $C$  - capacitância do filtro [F]
- $R$  - resistência do filtro [ $\Omega$ ]
- $f$  - frequência em estudo [HZ]
- $f_1$  - frequência fundamental [HZ]

### **BLOCO 12.9.5.7 – Inserir filtro projetado na barra escolhida**

Uma vez obtidos os parâmetros do filtro para a frequência de sintonia atual ( $f$ ), o presente bloco faz a inserção do mesmo no sistema.

### **BLOCO 12.9.5.8 – Executar FC e FH**

A execução dos fluxos de carga e harmônico determina um novo valor de  $DHV_T\%$  nas barras em estudo, tendo o filtro, com a frequência de sintonia atual ( $f$ ), inserido no sistema.

### **BLOCO 12.9.5.9 – Obter e Armazenar o Menor $DHV_T\%$**

Este bloco compara o  $DHV_T\%$  atual com aquele armazenado (que foi considerado como o menor  $DHV_T\%$  para a frequência de sintonia anterior) e opta por arquivar o menor deles, juntamente com os respectivos dados do filtro.

### **BLOCO 12.9.5.10 – Calcular a tensão sobre os elementos do filtro**

Com o propósito de fornecer maiores detalhes operacionais acerca do filtro, este bloco faz o cálculo das tensões sobre os elementos ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ) do mesmo.

### **Bloco 12.9.5.11 – Inserir Filtro no Sistema Elétrico**

Quando a ordem de sintonia do estudo for maior que a ordem de sintonia máxima, as informações armazenadas pelo Bloco 12.9.9 são consultadas e,

consequentemente, o filtro com a sintonia apropriada (aquela que proporcionou o menor  $DHV_T\%$ ) é instalado provisoriamente no sistema elétrico.

### BLOCO 12.9.6 – Executar FC e FH

Os fluxos de carga e harmônico são executados a fim de atualizar o estado da qualidade da energia elétrica do complexo elétrico.

### BLOCO 12.9.7 – Verificar a distorção harmônica total de tensão na barra do filtro projetado

Para que a especificação do filtro, encontrado nos blocos anteriores, seja definitiva, é necessário que o resultado da distorção harmônica total de tensão na barra de instalação do mesmo seja menor ou igual àquela determinada pelo usuário (seção 3.3.1 - item F). Caso isto não ocorra, o sistema inicia o projeto de mais um filtro, o que é evidenciado pela Regra 26.

#### REGRA 26

**SE**

a distorção harmônica total de tensão for menor ou igual ao máximo permitido (seção 3.3.1 - item F)

**ENTÃO**

a especificação do(s) filtro(s) é definitiva e executa-se o Bloco 12.9.8

**CASO CONTRÁRIO**

inicia-se o projeto de mais um filtro

A partir da Regra 26, havendo a necessidade de se projetar um segundo filtro, a estratégia mostrada na Tabela 3.26 é adotada.



*Tabela 3.26: Passos para o projeto do segundo filtro.*

PASSO	DESCRIÇÃO
1	Para o primeiro filtro, manter a frequência de sintonia encontrada
2	Dividir a potência do banco de capacitor $Q_F$ (determinada no Bloco 12.9.4), em partes iguais, entre o primeiro e o segundo filtro
3	Instalar, provisoriamente, o primeiro filtro no sistema elétrico com a nova potência capacitiva
4	Buscar a ordem de sintonia do Segundo filtro (Bloco 12.9.4).

Uma vez obtida a ordem de sintonia para o segundo filtro, o mesmo é também introduzido, provisoriamente, no sistema elétrico. Com a nova configuração executa-se os fluxos de carga e harmônico e, novamente, a Regra 26 é aplicada.

Caso o valor da distorção harmônica total de tensão na barra onde foram instalados os dois filtros permaneça acima do permitido (item F - seção 3.3.1), deve-se recorrer ao projeto do terceiro filtro, em que os passos a serem seguidos são apresentados na Tabela 3.27.

*Tabela 3.27: Passos para o projeto do terceiro filtro.*

PASSO	DESCRIÇÃO
1	Para o primeiro e o segundo filtro, manter a frequência de sintonia encontrada
2	Dividir a potência do banco de capacitor $Q_F$ (determinada no Bloco 12.9.4), em partes iguais, entre os três filtros em análise
3	Instalar, provisoriamente, o primeiro e o segundo filtro no sistema elétrico com as novas potências capacitivas
4	Buscar a ordem de sintonia do terceiro filtro (Bloco 12.9.4).

Do mesmo modo procedido para o segundo filtro, uma vez obtida a ordem de sintonia para o terceiro, o mesmo é introduzido, provisoriamente, no sistema elétrico. Assim, a distorção harmônica total de tensão é verificada e, desta vez, independentemente do seu valor, o processo de instalação de filtros na barra em estudo é encerrado e as especificações dos filtros são efetivadas.

Assim, de acordo com a Figura 3.10 mostrada anteriormente, na sequência, é executado o Bloco 12.9.8.

#### **BLOCO 12.9.8 – A potência acumulada $Q_{Ac} > 0,1$ ?**

Este bloco tem a finalidade de pesquisar se, ainda, existe potência capacitiva a ser distribuída, isto é, se  $Q_{Ac} > 0,1$ . Se a resposta for positiva, o sistema procura instalar tal potência remanescente usando, para tanto, apenas bancos de capacitores (Bloco 12.9.9). Caso contrário, o processo de compensação de reativos é encerrado.

#### **BLOCO 12.9.9 – Verificar a possibilidade da instalação da potência capacitiva acumulada remanescente ( $Q_{Ac}$ ) usando bancos de capacitores**

Com a instalação do(s) filtro(s) no sistema elétrico, surge a hipótese de que a distribuição da potência acumulada de compensação pode ser realizada usando, apenas, bancos de capacitores.

A comprovação, ou recusa, desta hipótese ocorre após uma nova execução dos blocos de alocação de bancos de capacitores vistos anteriormente, a partir do Bloco 5.11, mais especificamente.

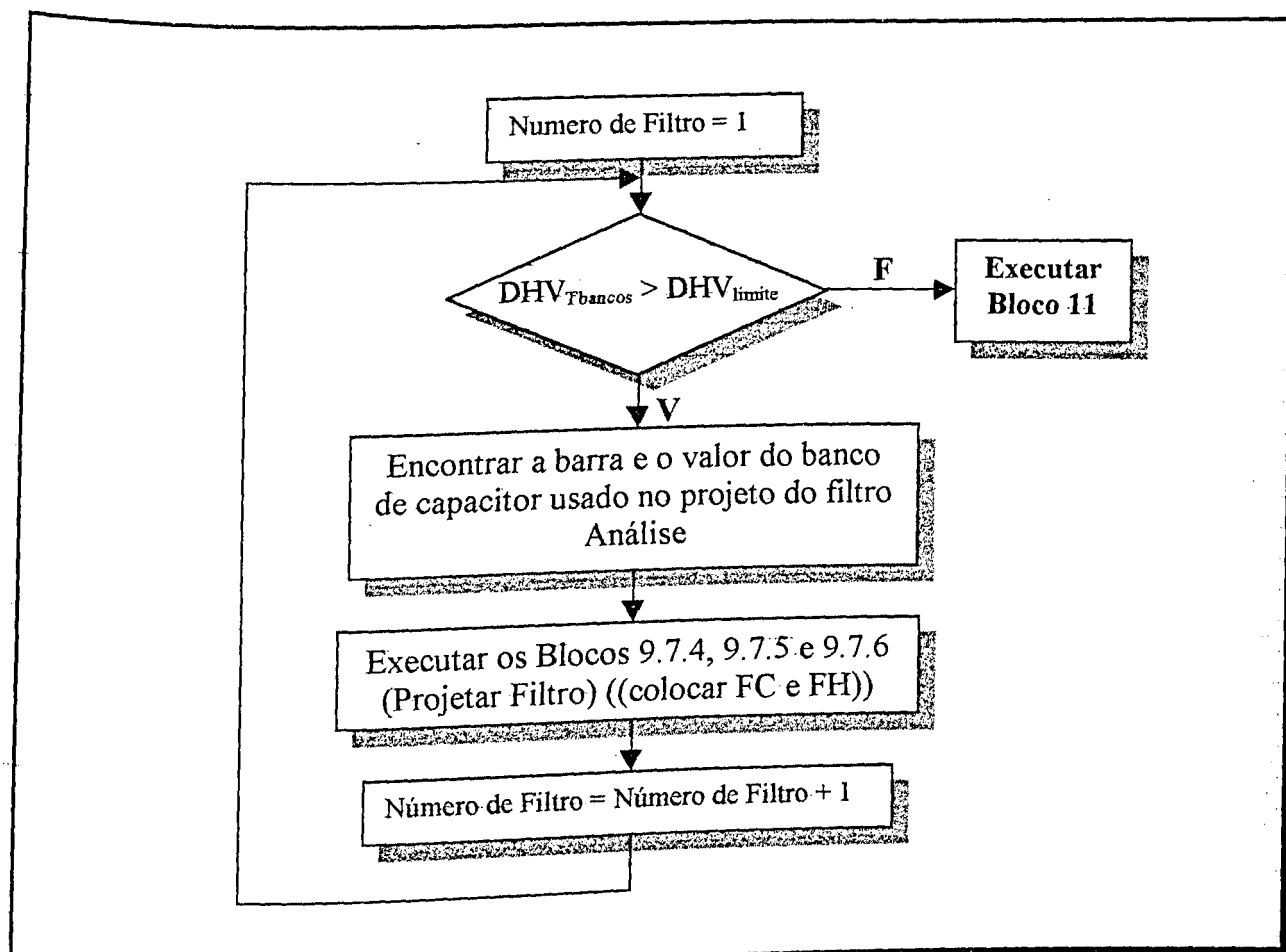
Uma vez efetuadas tais verificações, o fluxo de controle é enviado ao Bloco 12.9.1 como mostra a Figura 3.10, onde é aplicada novamente a Regra 21.

### ***BLOCO 13 – Substituir o(s) banco(s) com $DHV_{Ts}\%$ violados por filtro(s) equivalente(s)***

O objetivo deste bloco é substituir aqueles bancos de capacitores, cujas barras se encontram com os limites de  $DHV_T\%$  excedidos, por filtros equivalentes. Entretanto, antes de se proceder tal substituição pura e simplesmente, é necessário que os seguintes fatores sejam analisados pois, estes podem influenciar, sobremaneira, na escolha da barra mais apropriada para a instalação do filtro e na sua potência:

- Localização dos bancos de capacitores com relação às fontes harmônicas.
- Pertinência das fontes harmônicas à lista de prioridades para compensação de reativos.

Diante do exposto, a estratégia utilizada pelo presente bloco obedece ao esquema da Figura 3.13.



*Figura 3.13 – Operações simplificadas do Bloco 13.*

A figura anterior mostra que, para cada substituição de banco por filtro (em que as análises e os projetos são feitos pelos Blocos 10.1 e 10.2, respectivamente), são executados os fluxos de carga e harmônico a fim de que, sejam obtidas as novas condições do sistema ( $DHV_{Tbancos}\%$ ) e verificada a necessidade de um próximo filtro. Se não for necessária uma nova substituição, o fluxo de controle é deslocado para o Bloco 11. Caso contrário, os Blocos 13.1 e 13.2, descritos a seguir, são executados novamente.

### **BLOCO 13.1 – Encontrar a barra para instalação e o valor do banco de capacitores usado no projeto do filtro**

Como dito anteriormente, para cada banco de capacitores com violação de  $DHV_T\%$  a ser substituído por filtro, devem ser feitas algumas análises, as quais são regidas pelas Regras 29 e 30, executadas neste bloco.

### REGRA 29

**SE**

o banco de capacitores com violação de  $DHV_T\%$  estiver localizado na mesma barra que uma fonte harmônica

**ENTÃO**

a instalação do filtro é feita nessa barra utilizando a própria potência do banco para o projeto do filtro

**CASO CONTRÁRIO**

aplicar a Regra 30

### REGRA 30

**SE**

existir mais de uma fonte harmônica na lista de prioridades

**ENTÃO**

identificar qual delas tem maior influência sobre o  $DHV_T\%$  do banco (Regra 22 - Bloco 12.9.3.3)

**CASO CONTRÁRIO**

aplicar as Regras 23 ou 24 (descritas no Bloco 12.9.3.4)

A Regra 29 prevê que, para os bancos com  $DHV_{TS}$  violados que estiverem situados em barras com fonte harmônica, os filtros substitutos farão uso dos próprios bancos. Deve-se frisar que, se vários bancos estiverem na mesma situação, aquele de maior potência tem prioridade para a instalação do filtro.

Por outro lado, se os capacitores não se encontrarem nas mesmas barras das fontes harmônicas, o objetivo passa a ser identificar qual das fontes tem maior influência sobre um determinado banco (Regra 22), para que nela seja instalado o filtro. Entretanto, no caso de existir apenas uma, ou nenhuma, fonte harmônica, o local de instalação do filtro é determinado pelas Regras 23 e 24, apresentadas no Bloco 12.9.3.4.

Deve-se ressaltar que, quando o resultado da Regra 30 indicar a instalação do filtro em alguma barra com fonte harmônica, a potência do mesmo ( $Q_F$ ) é obtida de acordo com a Regra 31.

**REGRA 31****SE**

a potência do banco com  $DHV_T\%$  violado ( $Q_{C \text{ violado}}$ ) for maior que a margem de acréscimo ( $Q_A$ ) da barra com fonte harmônica

**ENTÃO**

a potência do filtro será:  $Q_F = Q_A$

**E**

a nova potência do banco com  $DHV_T\%$  violado será:  $Q_{C \text{ violado nova}} = Q_{C \text{ violado}} - Q_A$

**CASO CONTRÁRIO**

a potência do filtro será:  $Q_F = Q_{C \text{ violado}}$

**E**

a nova potência do banco com  $DHV_T\%$  violado será:  $Q_{C \text{ violado nova}} = 0$

## **BLOCO 14 – Verificar a obrigatoriedade de se instalar filtros em fontes harmônicas**

Neste ponto, as etapas de compensação de reativos referentes às decisões do sistema IPQ já se encontram concluídas. Mesmo assim, algumas barras, onde estão localizadas fontes harmônicas sem bancos de capacitores, podem continuar a apresentar o  $DHV_T\%$  acima do limite especificado pelo usuário na entrada de dados (seção 3.3.1- item F). Esta situação se justifica, uma vez que a estratégia de compensação de reativos adotada neste trabalho, buscou verificar as violações dos limites nas barras possuidoras de bancos de capacitores.

Em alguns casos, tais violações remanescentes do  $DHV_T\%$  podem não oferecer maiores problemas, devido a uma possível robustez da fonte harmônica e, até mesmo, de outra carga conectada ao mesmo barramento. Assim, nenhum esforço é destinado à redução da referida distorção harmônica. Entretanto, no caso do usuário decidir pela instalação, incondicional, de filtro em alguma(s) dessas barras, devido às características intrínsecas do seu sistema, essa opção é feita na entrada de dados (seção 3.3.1 – item G).

Diante do exposto, este bloco consulta as informações fornecidas através do item G (seção 3.3.1), a fim de verificar a obrigatoriedade da instalação de filtros nas barras com fonte harmônica cujo  $DHV_T\%$  esteja violado (Regra 32).

Deve-se ressaltar que, para esta análise, são consideradas aquelas barras que ainda não tenham filtros instalados.

### **REGRA 32**

**SE**

é obrigatória a instalação de filtro em uma barra com fonte harmônica

**E**

existem bancos de capacitores disponíveis para o projeto do filtro

**ENTÃO**

projetar o filtro, com os bancos das barras de menor prioridade

**CASO CONTRÁRIO**

o Bloco 15 é executado

O projeto de filtro, executado pela Regra 32 é procedido para cada barra, onde seja confirmada a necessidade de sua instalação, obedecendo a lista de prioridades definida pelo Bloco 5.9. Além disso, a potência capacitiva de cada filtro é definida pela margem de acréscimo de reativos ( $Q_A$ ) da respectiva barra e, na mesma proporção, é debitada daqueles bancos previstos para as barras de menor prioridade na compensação de reativos.

### **Bloco 15 – Emissão do parecer conclusivo**

Este bloco tem como objetivo emitir um parecer ao usuário, sobre as condições finais das seguintes variáveis:

- fator de potência na barra da concessionária.
- distorções harmônicas de tensão nas barras com fonte harmônica
- valores das tensões fundamentais nas barras.

Procurando, sobretudo, informar tanto sobre o sucesso da compensação de reativos, quanto aos objetivos não alcançados na correção do fator de potência e redução das distorções harmônicas. Para este último caso, são emitidas mensagens específicas relacionadas ao insucesso de uma determinada fase do referido processo de compensação de reativos.

### 3.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve por objetivo descrever os elementos do sistema IPQ o qual foi fundamentado na teoria dos Sistemas Especialistas e da Lógica Nebulosa.

Primeiramente, ilustrou-se a interface entre o usuário e o sistema IPQ. Através desta interface, o usuário pode interferir nos resultados baseando-se nos seguintes itens:

- Fator de potência mínimo do sistema elétrico sob o ponto de vista da concessionária;
- Fator de potência desejado na barra da concessionária;
- Fator de potência máximo para cada barra do sistema elétrico sob análise;
- Potência mínima dos bancos de capacitores;
- Definição das barras a serem desconsideradas na lista de prioridades de instalação de bancos/filtros;
- Nível máximo de distorção harmônica total de tensão e
- Identificação das barras possuidoras de fontes harmônicas, nas quais são admitidas distorções harmônicas totais de tensão maior que o permitido.

Posteriormente, foram traçadas as características e o conteúdo da máquina de inferência que, em linhas gerais, foi estruturada sob os seguintes aspectos:

- conhecimento adquirido sob a técnica de entrevista foi representado na forma de regras heurísticas SE-ENTÃO-CASO CONTRÁRIO;
- para a resolução de conflitos de regras de decisão, foi usada a lógica nebulosa.

A máquina de inferência possibilitou a determinação dos tipos de equipamentos (bancos de capacitores/filtros) necessários à compensação de



reativos do sistema elétrico em estudo, como também, a escolha das barras mais apropriadas para a alocação dos mesmos.

Nesse contexto, a máquina de inferência faz, primeiramente, a compensação de reativos usando apenas bancos de capacitores. Esta escolha é consolidada pelo sistema **IPQ** caso os resultados da corrente eficaz total, da tensão de pico e da distorção harmônica total de tensão sobre os bancos de capacitores se mantenham dentro dos limites recomendados.

Por outro lado, se os resultados das variáveis citadas se mantiverem acima dos padrões recomendados, a decisão da máquina de inferência é pela instalação de filtros. Estes são, automaticamente, especificados e inseridos no sistema elétrico.

A máquina de inferência do sistema **IPQ** permite que o sistema elétrico seja compensado de forma que as tensões e correntes sejam mantidas dentro dos padrões recomendados. Para tanto, usou-se uma estratégia que abordou os seguintes aspectos:

- definição da melhor configuração para a compensação de reativos (bancos de capacitores e/ou filtros),
- Especificação e alocação dos bancos de capacitores/filtros a serem usados para a compensação;
- Distribuição da potência reativa capacitiva total necessária ao sistema nas barras definidas como prioritárias;
- Verificação da suportabilidade dos bancos de capacitores;
- Avaliação da qualidade do nível de harmônicos de tensão e corrente;
- Definição automática da ordem de sintonia do filtro e a barra mais apropriada para a instalação do mesmo;
- Conclusão e informação ao usuário de metas que não foram atendidas.

## **CAPÍTULO IV**

# **APLICAÇÃO DO SISTEMA IPQ EM ESTUDOS DE SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS**

### **4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Objetivando verificar o desempenho e a confiabilidade do sistema IPQ, nas análises e soluções de problemas relacionados com a qualidade da energia elétrica, foram realizados estudos e simulações com diversos complexos elétricos industriais reais com características e necessidades distintas. Assim, este capítulo apresenta uma seleção de alguns casos estudados, onde procurou-se convalidar as decisões do programa desenvolvido, enfocando principalmente:

- Distribuição da potência reativa global, necessária à compensação, entre as barras prioritárias;
- Verificação do fator de potência na barra da concessionária, corrente eficaz e tensões de pico sobre os bancos de capacitores e distorções harmônicas totais de tensão.

- Decisões quanto à forma de compensação de reativos (bancos de capacitores e/ou filtros sintonizados);

Para tal propósito, o conjunto dos sistemas elétricos escolhidos é composto por uma usina de açúcar e álcool, uma metalúrgica e uma aciaria, cujos respectivos detalhes são abordados na próxima seção.

## 4.2 - SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Uma vez que os complexos industriais, abordados nesta seção, apresentam características e necessidades diferentes, a apresentação dos estudos envolvendo os mesmos será feita de forma independente, seguindo a estrutura mostrada na Tabela 4.1.

*Tabela 4.1 - Descrição dos sistemas estudados.*

CASO	REFERÊNCIA	DESCRIÇÃO
01	CONSUMIDOR "A"	Usina de açúcar e álcool localizada no estado de Minas Gerais.
02	CONSUMIDOR "B"	Metalúrgica situada no estado de São Paulo.
03	CONSUMIDOR "C"	Aciaria localizada no estado do Rio de Janeiro.

## 4.2.1 - CASO 01: CONSUMIDOR “A”

### 4.2.1.1 - OBJETIVO

O objetivo desta simulação computacional é verificar o desempenho do sistema IPQ no complexo elétrico de uma usina sucro-alcooleira, referida neste trabalho como CONSUMIDOR “A”. Tal desempenho, que consiste das decisões tomadas pelo referido sistema quanto à compensação harmônica e de reativos, é comparado com as conclusões dos estudos realizados por uma empresa de consultoria [39]. Para tanto, foram adotados os procedimentos descritos na Tabela 4.2.

*Tabela 4.2 - Descrição das etapas a serem executadas.*

ETAPA	DESCRIÇÃO
I	Determinação da potência reativa total necessária à compensação de acordo com o fator de potência desejável na barra da concessionária. Para tanto, são executados os fluxos de carga e harmônico com, apenas, a barra da concessionária liberada para compensação (CAPÍTULO III- seção 3.3.1 - item E).
II	Distribuição da potência reativa total entre as demais barras do sistema elétrico, por meio da liberação das mesmas para a compensação (CAPÍTULO III- seção 3.3.1 - item E).
III	Comparação entre as decisões do sistema IPQ e aquelas efetuadas pela empresa de consultoria.
IV	Verificação do comportamento do sistema elétrico perante uma expansão de carga e consequente decisão do sistema IPQ, quanto à compensação de reativos, para essa nova condição.

### 4.2.1.2 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA INDUSTRIAL

O diagrama unifilar simplificado representando o sistema elétrico do CONSUMIDOR “A” é apresentado na Figura 4.1 o qual, além das cargas lineares, possui duas fontes harmônicas.

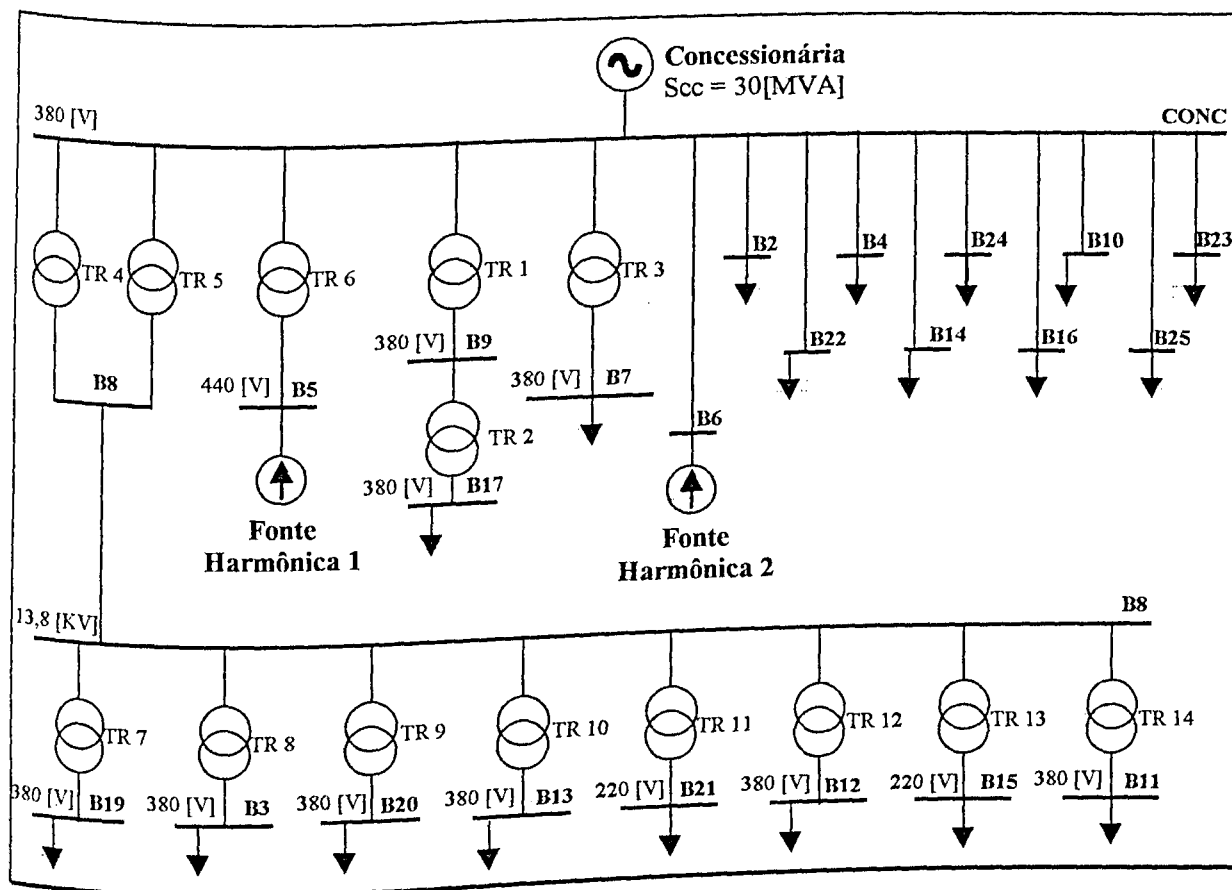


Figura 4.1 - Diagrama unifilar do CONSUMIDOR “A”.

As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam os parâmetros dos componentes constituintes do referido diagrama unifilar, os quais foram utilizados nas simulações. A Tabela 4.5 mostra os valores fornecidos pelo usuário através da interface do sistema IPQ.

Tabela 4.3 – Parâmetros elétricos das barra e ramos usados na simulação.

DADOS DE BARRA				DADOS DE RAMO				
BARRA	Tensão [V]	Fator de Potência	Potência [kVA]	CABOS		TRANSFORMADORES		
				Resistência [Ohm/Km]	Reatância [Ohm/Km]	Distância Média [Km]	TRANSFORMADOR	Potência [kVA]
								Z %
CONC	380	0,76	-	0,001	0,01	0,2	TR1	1000
B2	380	0,86	339	-	-	-	TR2	500
B3	380	0,79	289	-	-	-	TR3	625
B4	380	0,78	246	-	-	-	TR4	1500
B7	380	0,92	182	-	-	-	TR7	1000
B8	13200	0,84	-	-	-	-	TR8	500
B9	380	0,8	-	-	-	-	TR9	300
B10	380	0,74	298	-	-	-	TR10	750
B11	380	0,85	85	-	-	-	TR11	225
B12	380	0,86	341	-	-	-	TR12	750
B13	380	0,89	236	-	-	-	TR13	45
B14	380	0,75	392	-	-	-	TR14	125
B15	220	0,85	30	-	-	-	-	-
B16	380	0,75	346	-	-	-	-	-
B17	380	0,85	232	-	-	-	-	-
B19	380	0,94	698	-	-	-	-	-
B20	380	0,9	189	-	-	-	-	-
B21	220	0,9	41	-	-	-	-	-
B22	380	0,7	454	-	-	-	-	-
B23	380	0,76	104	-	-	-	-	-
B24	380	0,87	306	-	-	-	-	-
B25	380	0,74	234	-	-	-	-	-
Observação: Os parâmetros dos cabos foram considerados iguais na simulação.								

Tabela 4.4 - Parâmetros elétricos das fontes harmônicas 1 e 2 da Fig. 4.1.

CARACTERÍSTICAS GERAIS		
PARÂMETRO	BARRA	
	B5	B6
Potência [kVA]	777	504
Tensão [V]	440	380
Fator de Potência	0,59	0,81
CORRENTES HARMÔNICAS INJETADAS		
ORDEM HARMÔNICA	Corrente [A]	
	BARRA	
	B5	B6
2	12	2,1
3	6	4,0
4	12	1,0
5	183	6,3
6	13	1,0
7	11	4,5
8	7	1,1
9	14	2,1
10	9	0,4
11	73	5,7
12	6	0,2
13	50	5,3
14	8	0,3
15	13	0,9
16	7	0,4
17	58	3,3
18	3	0,5
19	39	3,0
20	4	0,4
21	12	0,7
22	4	0,4
23	45	1,2
24	0	0,6
25	31	1,2
26	2	0,1
27	12	0,2
28	5	0,3
29	30	1,4
30	4	0,8
31	20	0,8

Tabela 4.5 – Entrada de dados do usuário.

ITEM	DESCRIÇÃO	VALOR - ETAPA			
		I	II	III	IV
A	Fator de potência mínimo	0,92	0,92	0,92	0,92
B	Fator de potência desejável na barra da concessionária	0,94	0,94	0,94	0,94
C	Fator de potência máximo nas barras de baixa/média tensão do sistema elétrico sob análise	0,99	0,99	0,99	0,99
D	Potência mínima para os bancos de capacitores	0	0	0	0
E	Barras prioritárias ao estudo	CONC	Todas	Todas	Todas
F	Máxima distorção harmônica de tensão (%)	5	5	5	5
G	As barras onde se encontram as fontes harmônicas podem admitir distorção harmônica total de tensão maior que o máximo permitido?	Todas	Todas	Todas	Todas



### 4.2.1.3 - RESULTADOS COMPUTACIONAIS

#### ETAPA I - *Determinação da potência reativa global necessária através do sistema IPQ*

Em função dos resultados dos fluxos de carga e harmônico e do fator de potência desejado na barra de geração, o sistema IPQ determina, segundo a Tabela 4.6, o quanto de potência reativa capacitiva o sistema elétrico necessita para atingir um fator de potência igual a 0,94 na barra da concessionária.

*Tabela 4.6 - Potência reativa necessária à correção do fator de potência.*

CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA BARRA DA CONCESSIONÁRIA	
Fator de Potência Desejado	0,94
Potência Reativa Necessária [MVar]	2,205

#### ETAPA II - *Distribuição da potência reativa global entre as demais barras do sistema elétrico*

A partir das regras de decisão, apresentadas no CAPÍTULO III, o programa IPQ define a distribuição de bancos de capacitores entre as demais barras do complexo elétrico em estudo. Assim, a configuração do sistema, com a localização dos bancos distribuídos, é mostrada na Figura 4.2, enquanto que os valores das suas respectivas potências encontram-se plotados na Figura 4.3. Além disso, a Tabela 4.7 mostra um resumo das condições operacionais do sistema e dos bancos de capacitores, para a atual configuração (Figura 4.2), juntamente com alguns limites normalizados.

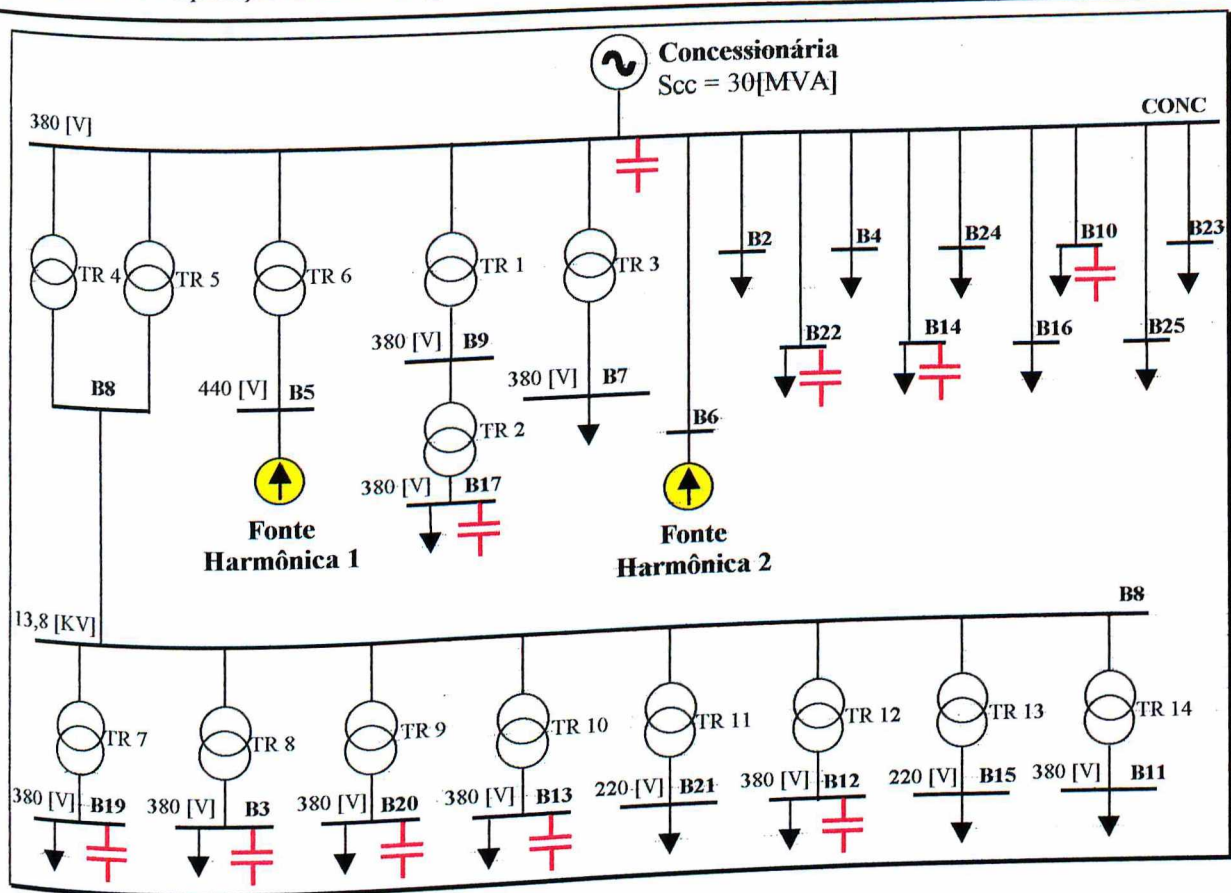


Figura 4.2 - Localização dos bancos de capacitores no sistema elétrico do CONSUMIDOR "A".

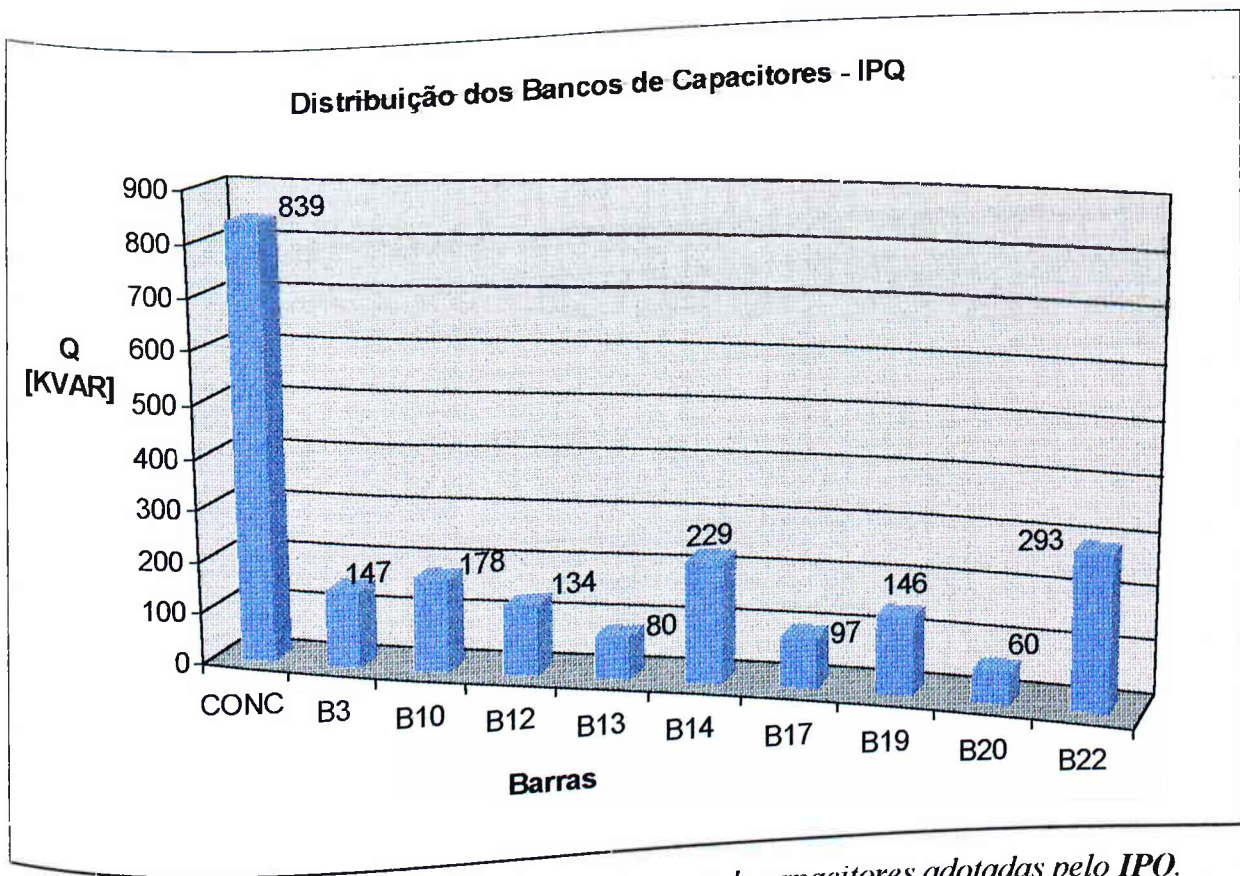


Figura 4.3 - Distribuição e potência dos bancos de capacitores adotadas pelo IPQ.



Tabela 4.7 – Condições de operação obtidas com a instalação dos bancos de capacitores através do IPQ.

SISTEMA					BANCOS DE CAPACITORES						
Barra	Tensão [V]	DHV <sub>T</sub> [%]	Fator de Potência	DHI <sub>T</sub> * [%]	Corrente Eficaz [A]				DHI <sub>T</sub> [%]	Tensão de Pico [V]	
					Fundamental	Resultante	Máxima			Resultante	Máxima
							I <sub>1</sub>	I			
CONC	390,35	1,83	0,934	1,94	1308	1317	1671,77	2297,11	12	569,98	644,88
B2	389,88	1,83	0,86	1,58	-	-	-	-	-	-	-
B3	386	3,25	0,99	2,6	224	228	292,63	402,09	19	565,75	644,88
B4	389,93	1,83	0,78	1,44	-	-	-	-	-	-	-
B5	442,95	4,90	0,59	23,64	-	-	-	-	-	-	-
B6	389,55	1,81	0,81	1,89	-	-	-	-	-	-	-
B7	388,42	1,82	0,92	1,69	-	-	-	-	-	-	-
B8	14050	2,32	0,98	0,46	-	-	-	-	-	-	-
B9	389,63	1,99	0,97	0,4	-	-	-	-	-	-	-
B10	390,29	2,01	0,99	1,7	275,86	280	353	484,52	19	576	644,88
B11	381,32	2,3	0,85	2,0	-	-	-	-	-	-	-
B12	385,84	3,11	0,99	2,69	204,47	207	266,8	366,59	18	566,23	644,88
B13	386,20	2,69	0,99	2,43	121,62	123	158,37	217,61	15	566,23	644,88
B14	390,27	2,04	0,99	1,52	354,6	359	453,32	622,89	17	577,36	644,88
B15	220,43	2,3	0,85	1,97	-	-	-	-	-	-	-
B16	389,73	1,83	0,75	1,39	-	-	-	-	-	-	-
B17	388,92	2,9	0,99	2,5	148	151	191,11	262,59	22	571,73	644,88
B19	384,98	2,84	0,99	2,7	222,28	225	289,43	398,42	16	562,14	644,88
B20	385,38	3,09	0,99	2,8	89,96	91	117,71	161,74	18	564,14	644,88
B21	223,13	2,32	0,9	2,13	-	-	-	-	-	-	-
B22	390,27	2,14	0,99	1,5	454,89	461	581,54	799,06	17	579,27	644,88
B23	390,17	1,83	0,76	1,41	-	-	-	-	-	-	-
B24	389,94	1,83	0,87	1,65	-	-	-	-	-	-	-
B25	389,92	1,83	0,74	1,42	-	-	-	-	-	-	-

Observação: \* O valor desta distorção harmônica de corrente refere-se aos resultados encontrados nas cargas instaladas nas respectivas barras.

### ETAPA III - Comparação entre as decisões do IPQ e aquelas efetuadas pela empresa de consultoria

O resultado das distribuições das potências dos bancos de capacitores efetuadas por uma empresa de consultoria e pelo sistema IPQ, é mostrado na Figura 4.4.

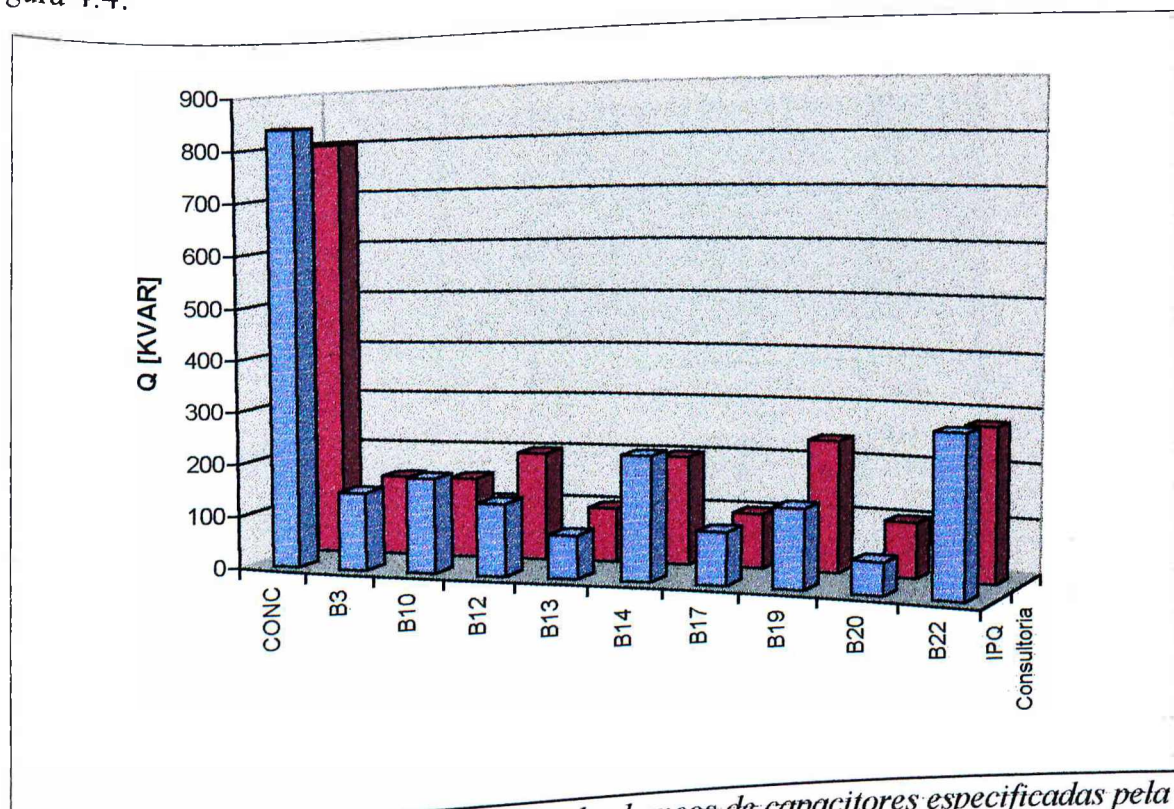


Figura 4.4 - Comparação das potências dos bancos de capacitores especificadas pela empresa de consultoria e pelo IPQ.

### ETAPA IV - Comportamento do programa IPQ perante uma expansão de carga do sistema elétrico

Esta etapa envolve uma previsão de expansão da carga instalada na barra B3, através da substituição da mesma por outra, cujas características elétricas são apresentadas na Tabela 4.8.



Tabela 4.8 - Características da nova carga na barra B3.

CARACTERÍSTICAS GERAIS	
PARÂMETRO	BARRA
	B3
Potência [kVA]	280
Tensão [V]	380
Fator de Potência	0,84
CORRENTES HARMÔNICAS INJETADAS	
ORDEM HARMÔNICA	Corrente [A]
	BARRA
	B3
5	85
7	61
11	40
13	33
17	25
19	23
23	19
25	17
29	14
31	13

Deve-se ressaltar que a nova carga será inserida no mesmo barramento que o banco de capacitores de 147 kVAr, determinado pelo IPQ na Etapa II, o qual no futuro já se encontrará instalado na barra B3. Assim, as decisões tomadas pelo programa nesta etapa, constituirão as medidas e recomendações técnicas definidas para o CONSUMIDOR “A”, mediante tal expansão de carga.

Diante disso, um primeiro conjunto de resultados referentes às condições operacionais do sistema e dos bancos de capacitores, devido à simples instalação da referida carga no sistema elétrico, é apresentado na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Condições de operação obtidas com a instalação da nova carga elétrica na barra B3.

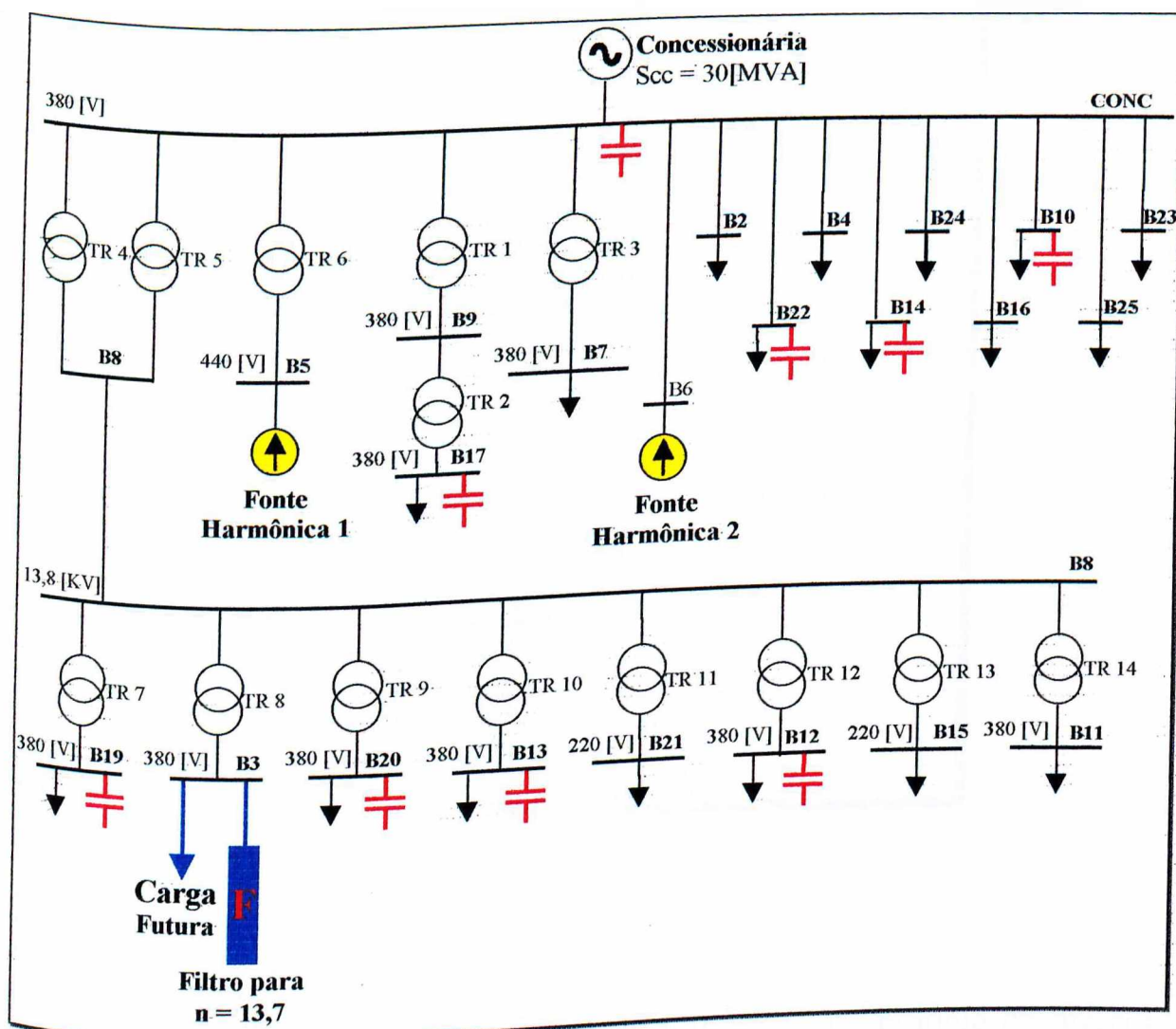
SISTEMA					BANCOS DE CAPACITORES						
Barra	Tensão [V]	DHV <sub>r</sub> [%]	Fator de Potência	DHI <sub>T</sub> * [%]	Corrente Eficaz [A]				DHI <sub>T</sub> [%]	Tensão de Pico [V]	
					Fundamental	Resultante	Máxima			Resultante	Máxima
							I <sub>1</sub>	I			
CONC	390	3,2	0,935	3,5	1308	1328	1671,77	2297,11	18	577,87	644,88
B2	389,45	3,2	0,86	2,77	-	-	-	-	-	-	-
B3	384,46	10,25	0,99	29,37	224	336	292,63	402,09	111	631	644,88
B4	389,53	3,2	0,78	2,52	-	-	-	-	-	-	-
B5	441,49	5,99	0,59	23,71	-	-	-	-	-	-	-
B6	389,09	3,19	0,81	1,89	-	-	-	-	-	-	-
B7	387,07	3,2	0,92	2,95	-	-	-	-	-	-	-
B8	13998,18	3,19	0,94	2,46	-	-	-	-	-	-	-
B9	388,56	3,61	0,97	0,52	-	-	-	-	-	-	-
B10	389,9	3,35	0,99	2,53	275,86	281	353	484,52	23	582	644,88
B11	377,02	3,58	0,85	3,07	-	-	-	-	-	-	-
B12	382,56	5,91	0,99	5,17	204,47	207	266,8	366	50	588	644,88
B13	383,08	4,56	0,99	4,11	121,62	123	158	217,61	33	589	644,88
B14	389,86	3,38	0,99	2,58	354,6	360	453	623	22	584	644,88
B15	217,97	3,58	0,85	3,06	-	-	-	-	-	-	-
B16	389,31	3,2	0,75	2,43	-	-	-	-	-	-	-
B17	386,44	4,58	0,99	3,96	148	152	191,11	262	27	589	644,88
B19	380,49	4,76	0,99	4,48	222,28	225	289,43	398	34	582	644,88
B20	381,34	5,32	0,99	4,85	89,96	91	117,71	161	40	581	644,88
B21	221,49	3,61	0,9	3,26	-	-	-	-	-	-	-
B22	389,86	3,43	0,99	2,46	454,89	461	581,54	799	22	587	644,88
B23	389,8	3,2	0,76	2,47	-	-	-	-	-	-	-
B24	389,52	3,2	0,87	2,82	-	-	-	-	-	-	-
B25	389,53	3,2	0,74	2,41	-	-	-	-	-	-	-

Observação: \* O valor desta distorção harmônica de corrente refere-se aos resultados encontrados nas cargas instaladas nas respectivas barras.

Observação: \* O valor desta distorção harmônica de corrente refere-se aos resultados encontrados nas cargas instaladas nas respectivas barras.



Quanto às consequências da instalação da nova carga no sistema elétrico, a Tabela 4.9 mostra uma violação na corrente eficaz do banco de capacitores situado na barra **B3**, em relação ao limite estipulado pela norma **ABNT**. Devido a esse fato, o sistema **IPQ** busca uma outra alternativa para a compensação de reativos na referida barra, através da instalação de um filtro sintonizado. Assim, a nova configuração do sistema elétrico do CONSUMIDOR “A” é visualizada através da Figura 4.5.



**Figura 4.5** - Configuração do complexo elétrico do CONSUMIDOR "A" com a instalação da nova carga e do filtro sintonizado na barra B3.

A Tabela 4.10 apresenta a especificação do filtro sintonizado para a ordem de 13,7, inserido na barra B3.

*Tabela 4.10 – Especificação do filtro sintonizado para a barra B3.*

ESPECIFICAÇÃO DO FILTRO SINTONIZADO	
Barra	B3
Potência do Banco de Capacitores [kVAr]	120
Tensão [V]	380
Capacitor [mF]	2,2
Resistência [ $m\Omega$ ]	1,59
Indutor [mH]	0,017
Fator de Qualidade	55
Sintonia	13,7

Finalmente, as condições de operação referentes à topologia mostrada na Figura 4.5 são retratadas na Tabela 4.11.



Tabela 4.11 – Condições de operação obtidas com a instalação da nova carga elétrica e do filtro sintonizado na barra B3.

SISTEMA					BANCOS DE CAPACITORES						
Barra	Tensão [V]	DHV <sub>T</sub> [%]	Fator de Potencia	DHI <sub>T</sub> * [%]	Corrente Eficaz [A]				DHI <sub>T</sub> [%]	Tensão de Pico [V]	
					Fundamental	Resultante	Máxima			Resultante	Máxima
					I <sub>1</sub>	I	ABNT	IEEE			
CONC	389,35	3,25	0,934	3,49	1308	1330	1671,77	2297,11	19	580	644,88
B2	388,8	3,24	0,86	2,81	-	-	-	-	-	-	-
B3	385,06	4,3	0,99	29,14	224	-	-	-	-	-	-
B4	388,88	3,24	0,78	2,56	-	-	-	-	-	-	-
B5	441,81	4,9	0,59	23,74	-	-	-	-	-	-	-
B6	388,4	3,23	0,81	1,89	-	-	-	-	-	-	-
B7	387,42	3,24	0,92	2,99	-	-	-	-	-	-	-
B8	14013,72	3,48	0,96	2,5	-	-	-	-	-	-	-
B9	388,62	3,68	0,97	0,5	-	-	-	-	-	-	-
B10	389,23	3,42	0,99	2,55	275,86	284	353	484,52	24	584	644,88
B11	380,33	3,45	0,85	3,0	-	-	-	-	-	-	-
B12	384,82	4,63	0,99	4,1	204,47	212	266,8	366	27	577	644,88
B13	385,19	4	0,99	3,6	121,62	125	158	217,61	23	577	644,88
B14	389,18	3,46	0,99	3,0	354,6	364	453	623	23	589	644,88
B15	219,86	3,45	0,85	2,95	-	-	-	-	-	-	-
B16	388,66	3,24	0,75	2,47	-	-	-	-	-	-	-
B17	387,9	4,83	0,99	4,07	148	154	191,11	262	30	591	644,88
B19	383,99	4,22	0,99	4,0	222,28	227	289,43	398	23	573	644,88
B20	384,45	4,6	0,99	4,2	89,96	93	117,71	161	26	575	644,88
B21	222,44	3,47	0,9	3,14	-	-	-	-	-	-	-
B22	389,18	3,53	0,99	2,5	454,89	467	581,54	799	23	589	644,88
B23	389,14	3,25	0,76	2,5	-	-	-	-	-	-	-
B24	388,88	3,24	0,87	2,84	-	-	-	-	-	-	-
B25	388,88	3,24	0,74	2,44	-	-	-	-	-	-	-

15

Observação: \* O valor desta distorção harmônica de corrente refere-se aos resultados encontrados nas cargas instaladas nas respectivas barras.

Observação: \* O valor desta distorção harmônica de corrente refere-se aos resultados encontrados nas cargas instaladas nas respectivas barras.

#### 4.2.1.4 - COMENTÁRIOS SOBRE O DESEMPENHO DO SISTEMA IPQ PARA O CONSUMIDOR “A”

A análise das informações contidas nas Tabelas 4.2 e 4.3, permitiram o sistema **IPQ** avaliar o fator de potência na barra de geração. Automaticamente, o programa determina o montante de reativo necessário à compensação baseando-se no fator de potência desejado na barra de geração e nos resultados do fluxo de carga. Neste caso, o fator de potência desejado foi igual a 0,94 o que corresponde a 2,205 [MVar].

A decisão do sistema inteligente **IPQ** foi a distribuição desta potência sob a forma de bancos de capacitores. Enquanto aos resultados desta decisão mostram que as distorções harmônicas de corrente e tensão nas barras do sistema elétrico mantiveram-se dentro de patamares aceitáveis, assim como, a tensão fundamental. Além disso, os limites máximos de tensão de pico e corrente eficaz dos bancos de capacitores não foram excedidos.

As decisões efetuadas pelo programa **IPQ** no tocante a distribuição e o tipo de equipamento a ser usado na compensação de reativos mostraram-se coerentes com aquelas efetuadas pela empresa de consultoria.

Através de comparações efetuadas e ilustradas pela Figura 4.4, observou-se que: as barras escolhidas e a distribuição da potência reativa global realizada pelo sistema **IPQ** se aproximam das decisões tomadas pela empresa de consultoria.

Com relação a análise referente à substituição de carga da barra **B3**, foi mostrado conforme a Tabela 4.8 um aumento do conteúdo harmônico no sistema elétrico, sobretudo, na barra **B3**. O nível da corrente total eficaz no banco de capacitor instalado nesta barra excede o valor máximo determinado pela ABNT. Além disso, a tensão de pico encontrada se aproxima do limite máximo definido pela norma do **IEEE**.

Diante desta situação, o *software* determinou a substituição do banco de capacitor instalado nesta barra por um filtro sintonizado em 13,7, proporcionando distorções harmônicas de tensão de menor intensidade. O fator de potência continua sendo atendido na barra da concessionária e sem causar perturbações inconvenientes ao sistema elétrico.

De uma forma geral, a aplicabilidade do sistema especialista (IPQ) foi bem sucedida, haja visto, a coerência das suas decisões perante àquelas da empresa de consultoria como também àquela referente a expansão de carga do CONSUMIDOR "A".

## 4.2.2 – CASO 02: CONSUMIDOR “B”

### 4.2.2.1 – OBJETIVO

De forma análoga ao Caso 01, procurar-se-á nesta análise averiguar o desempenho do programa **IPQ** quando um complexo elétrico é submetido a intensas perturbações harmônicas. Neste caso, porém, é enfocada a comparação entre a alocação de filtros em média e baixa tensão, seguindo as etapas descritas na Tabela 4.12.

*Tabela 4.12 – Descrição das etapas a serem executadas.*

ETAPA	DESCRIÇÃO
I	Demonstração da intensidade harmônica presente no sistema elétrico por meio dos resultados oriundos dos fluxos de carga e harmônico.
II	Definição da potência reativa total necessária à compensação de acordo com o fator de potência desejável na barra da concessionária, através da execução dos fluxos de carga e harmônico liberando-se, para tanto, apenas a barra da concessionária (CAPÍTULO III- seção 3.3.1 - item E).
III	Liberação das barras do sistema elétrico para a correção do fator de potência (Capítulo III – seção 3.3.1 – item E) e, consequente, decisão do programa <b>IPQ</b> quanto à compensação de reativos.
IV	Decisão final do sistema <b>IPQ</b> segundo a escolha do usuário, para tanto, libera-se apenas a barra da concessionária (CAPÍTULO III- seção 3.3.1 - item E).

4.2.2.2 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA INDUSTRIAL

A Figura 4.6 ilustra um esquema simplificado do complexo elétrico industrial do CONSUMIDOR “B”, o qual é suprido a uma tensão de 13,8 kV no ponto de acoplamento comum com a concessionária, cujo nível de curto-circuito é de 104 [MVA]. Neste sistema, assim como no Caso 01, é verificada a presença de duas fontes harmônicas.

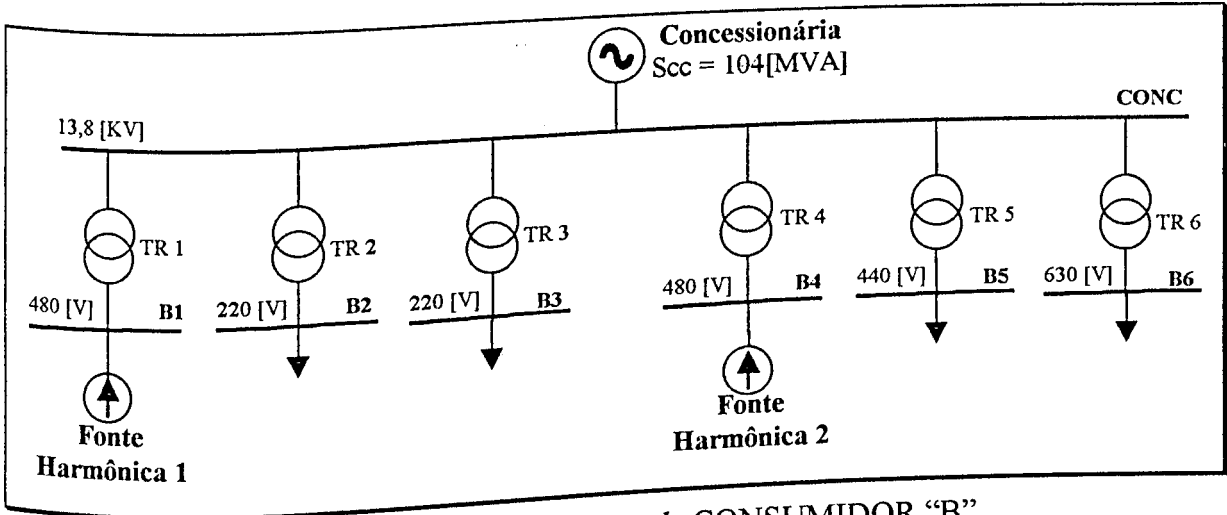


Figura 4.6 – Diagrama elétrico do CONSUMIDOR “B”.

As Tabelas 4.13 e 4.14 mostram os parâmetros que compõe o referido diagrama elétrico. Enquanto que a Tabela 4.15 mostra os valores fornecidos pelo usuário através da interface do sistema IPQ.

Tabela 4.13 – Dados gerais do sistema elétrico

DADOS DE BARRA				DADOS DE RAMO		
BARRA	Tensão [V]	Fator de Potência	Potência [kVA]	TRANSFORMADOR	Potência [kVA]	Z%
CONC	13800	-	-	TR1	3000	8,7
B2	220	0,85	100	TR2	500	4,58
B3	220	0,85	100	TR3	225	4,45
B5	440	0,85	300	TR4	3000	8,7
B6	630	0,85	100	TR5	1000	4,43
-	-	-	-	TR6	350	6,7

Tabela 4.14 – Parâmetros elétricos das fontes harmônicas da Fig. 4.6.

Tabela 4.14 – Parâmetros elétricos das fontes harmônicas da Fig. 4.6.

CARACTERÍSTICAS GERAIS

PARÂMETRO	BARRA	
	B4	B1
Potência [kVA]	2287	2301
Tensão [V]	480	480
Fator de Potência	0,85	0,85

CORRENTES HARMÔNICAS INJETADAS

ORDEM HARMÔNICA	BARRA			
	B4		B1	
	Corrente [A]	Ângulo Graus	Corrente [A]	Ângulo Graus
2	24	-110	64	68
3	80	-169	168	-178
4	8	-20	64	-50
5	496	-116	528	-56
6	8	75	88	119
7	368	130	168	58
8	8	30	16	-44
9	72	3	72	30
10	0	0	40	-175
11	168	72	80	117
12	0	0	16	-26
13	184	-44	32	-162
14	8	170	16	-37
15	56	161	8	7
16	8	-141	16	136
17	8	-101	16	171
18	72	0	80	-41
19	0	143	0	0
20	104	-35	16	-167
21	8	30	24	-163
22	48	39	24	-24
23	8	89	24	-61
24	32	0	24	122
25	0	0	0	0
26	56	-30	0	0
27	8	131	8	18
28	8	-146	24	-8
29	32	-136	16	146
30	8	-73	16	82
31	8	0	8	-69
32	0	0	8	89
33	24	151	8	89



Tabela 4.15 – Entrada de dados do usuário.

ITEM	DESCRIÇÃO	VALOR - ETAPA		
		II	III	IV
A	Fator de potência mínimo	0,92	0,92	0,92
B	Fator de potência desejável na barra da concessionária	0,96	0,96	0,96
C	Fator de potência máximo nas barras de baixa/média tensão do sistema elétrico sob análise	0,99	0,99	0,99
D	Potência mínima para os bancos de capacitores	0	0	0
E	Barras prioritárias ao estudo	CONC	Todas	CONC
F	Máxima distorção harmônica de tensão (%)	5	5	5
G	As barras onde se encontram as fontes harmônicas podem admitir distorção harmônica total de tensão maior que o máximo permitido?	Todas	Nenhuma	Todas

### 4.2.2.3 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS

#### ETAPA I - Verificação das distorções harmônicas totais de tensão e corrente sem compensação

A Tabela 4.16 mostra o conteúdo harmônico presente no sistema elétrico do CONSUMIDOR “B” antes da compensação.

Figura 4.16 – Condições de operação obtidas sem compensação.

Figura 4.16 – Condições de operação Semanal

RESULTADOS DE BARRAS			
BARRA	Tensão [V]	DHV <sub>T</sub> [%]	Fator de Potência
CONC	13797	5,97	0,8
B1	467	14,67	0,85
B2	218	5,94	0,85
B3	219	5,87	0,85
B4	469	20,37	0,85
B5	438	5,92	0,85
B6	626	5,87	0,85
RESULTADOS DE RAMOS			
RAMO	DHI <sub>T</sub> [%]		
Concessionária	18,52		
TR2	5 *		
TR1	24		
TR4	27		
Observação: * Este valor é uma média entre os DHI <sub>T</sub> dos transformadores TR2, TR3, TR5 e TR6, alimentadores das cargas lineares.			

#### ETAPA II - Determinação da potência reativa global necessária através do sistema IPQ

Em função dos resultados dos fluxos de carga e harmônico e do novo fator de potência desejado na barra de geração, o IPQ determina segundo a Tabela 4.17, o quanto de potência reativa capacitiva o sistema elétrico necessita para um fator de potência global igual a 0,92.



Tabela 4.17 – Potência reativa necessária à correção do fator de potência.

CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA BARRA DA CONCESSIONÁRIA	
Fator de Potência Desejado	0,96
Potência Reativa Necessária [MVar]	9

ETAPA III – *Compensação distribuída de reativos efetuada pelo IPQ*

A compensação de reativos deste consumidor deu-se para o fator de potência igual 0,96 na barra da concessionária. O sistema elétrico analisado pelo Sistema Especialista para as condições iniciais apresenta como solução para as atenuações das perturbações harmônicas, a instalação de três filtros na barra **B1** e mais três filtros na barra **B4**. A Tabela 4.18 ilustra as especificações destes filtros e os resultados obtidos após a instalação dos mesmos, enquanto que a Figura 4.7 indica a localização dos filtros no diagrama elétrico do CONSUMIDOR “B”.

Tabela 4.18 – Especificação do filtro sintonizado para as barras B1 e B4.

ESPECIFICAÇÃO DOS FILTROS SINTONIZADOS						
Barra	B1			B4		
Número do Filtro	1	2	3	1	2	3
Potência do Banco de Capacitores [kVar]	230,47	234,02	235,18	362,00	369,82	373,75
Tensão [V]	480	480	480	480	480	480
Capacitor [mF]	2,65	2,7	2,7	4,16	4,24	4,3
Resistência [mΩ]	3,64	2,84	2,54	2,31	1,62	1,12
Indutor [mH]	0,10	0,0661	0,0553	0,0481	0,034	0,0164
Fator de Qualidade	55	55	55	55	55	55
Sintonia	5	6,3	7	5	7	10

Tabela 4.19 – Condições de operação obtidas após a instalação dos filtros distribuídos.

RESULTADOS DE BARRAS			
BARRA	Tensão [V]	DHV <sub>T</sub> [%]	Fator de Potência
CONC	13869	1,53	0,951
B1	475	4,98	0,97
B2	220	1,53	0,85
B3	219	1,51	0,85
B4	480	4,8	0,99
B5	439	1,52	0,85
B6	627	1,51	0,85

RESULTADOS DE RAMOS	
RAMO	DHI <sub>T</sub> [%]
Concessionária	9,72
TR2	1,30 *
TR1	13,95
TR4	13,64

Observação: \* Este valor é uma média entre os DHI<sub>T</sub> dos transformadores TR2, TR3, TR5 e TR6, alimentadores das cargas lineares.

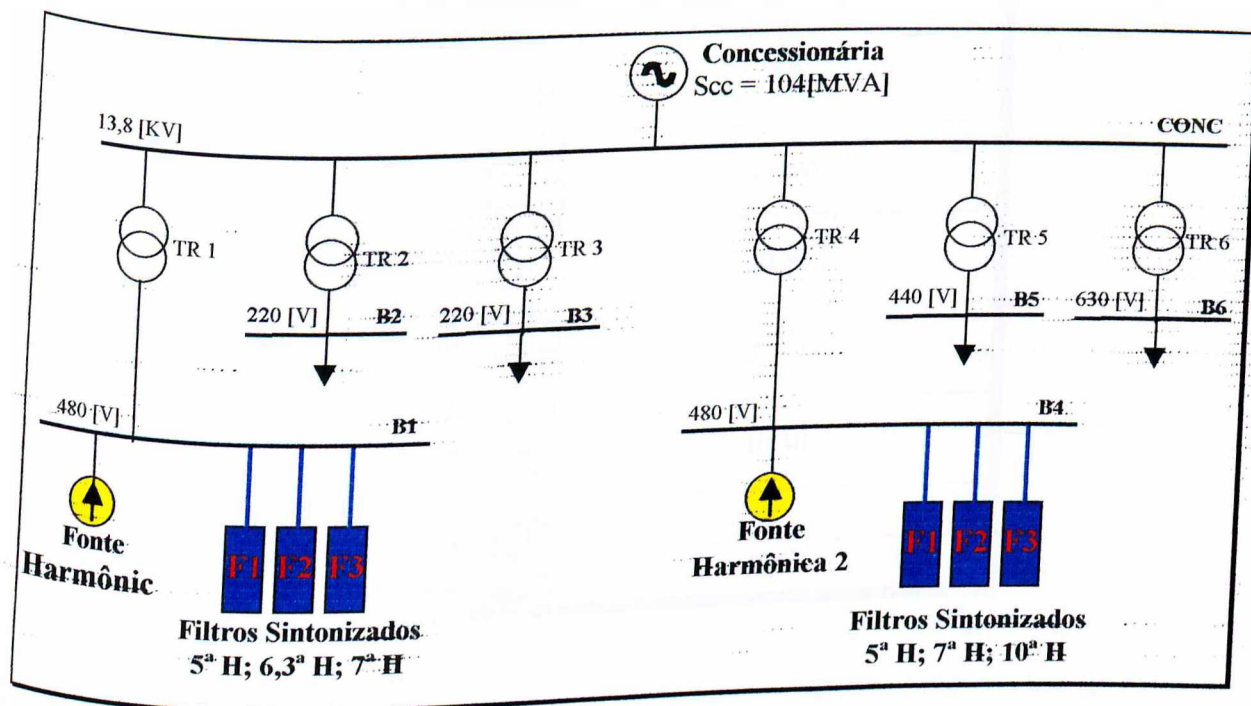


Figura 4.7 – Localização dos filtros no diagrama elétrico do CONSUMIDOR "B".

**ETAPA IV – Decisão final do sistema IPQ segundo a escolha do usuário**

Nesta etapa, o programa **IPQ** levou em consideração as determinações do usuário. De acordo com este, apenas a barra da concessionária deve ser analisada. Assim, o **IPQ** instalou e projetou um filtro na barra da concessionária. A especificação Tabela 4.20 deste e os resultados obtidos Tabela 4.21 com esta decisão são mostrados na. A Figura 4.8 ilustra a localização do filtro no sistema elétrico.

*Tabela 4.20 – Especificação do filtro sintonizado para a barra CONC.*

<b>ESPECIFICAÇÃO DO FILTRO SINTONIZADO</b>	
<b>Barra</b>	<b>CONC</b>
<b>Potência do Banco de Capacitores [kVAr]</b>	1784
<b>Tensão [V]</b>	13800
<b>Capacitor [<math>\mu</math>F]</b>	24,84
<b>Resistência [<math>m\Omega</math>]</b>	373,1
<b>Indutor [mH]</b>	10,46
<b>Fator de Qualidade</b>	55
<b>Sintonia</b>	5,2

Tabela 4.21 – Condições de operação obtidas após a instalação do filtro concentrado.

RESULTADOS DE BARRAS			
BARRA	Tensão [V]	DHV <sub>T</sub> [%]	Fator de Potência
CONC	13912	2,11	0,952
B1	467	10,8	0,85
B2	220	3,09	0,85
B3	219	3,03	0,85
B4	467	16,9	0,85
B5	440	3,07	0,85
B6	628	3,04	0,85

RESULTADOS DE RAMOS	
RAMO	DHI <sub>T</sub> [%]
Concessionária	10,6
TR2	2,6 *
TR1	27
TR4	24

Observação: \* Este valor é uma média entre os DHI<sub>T</sub> dos transformadores TR2, TR3, TR5 e TR6, alimentadores das cargas lineares.

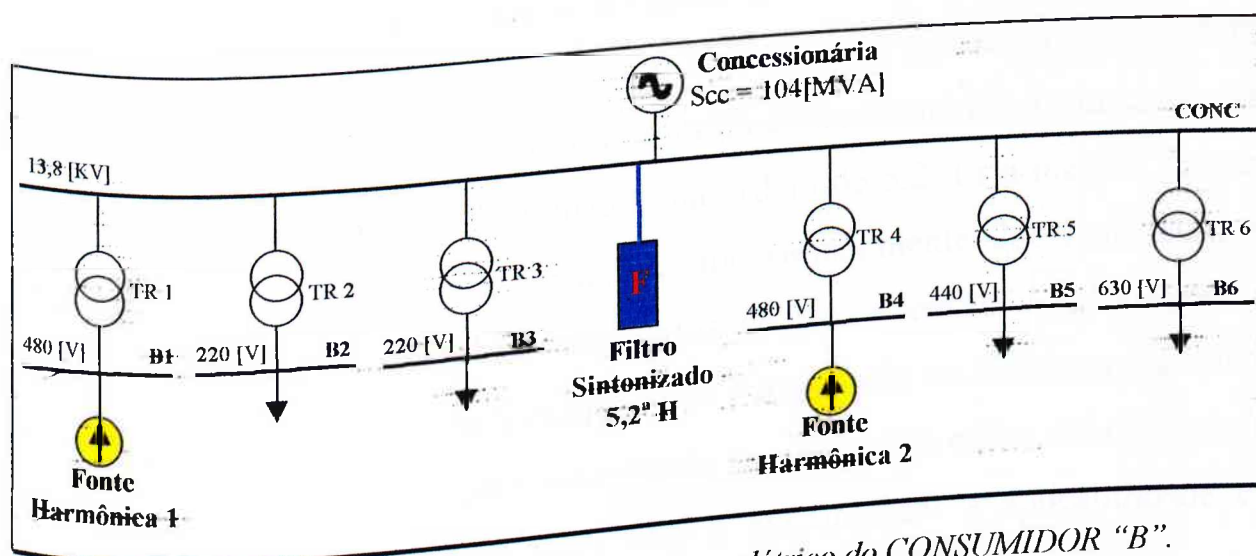


Figura 4.8 – Localização do filtro no complexo elétrico do CONSUMIDOR "B".



#### 4.2.2.4 - COMENTÁRIOS SOBRE O DESEMPENHO DO SISTEMA IPQ PARA O CONSUMIDOR “B”

A priori, demonstrou-se a intensidade das harmônicas geradas pelas cargas não lineares e os correspondentes impactos no sistema elétrico. Os valores encontrados chegam a 20 % de distorção harmônica total de tensão nas barras das cargas não-lineares. Este resultado foi suficiente para influenciar todas as barras do sistema.

Diante desta situação, o programa IPQ compensa o sistema elétrico para um fator de potência igual a 0,96 usando apenas filtros sintonizados em baixa tensão. Para tanto, foram necessários 06 filtros sintonizados. Sendo que três foram definidos para a barra **B1**, enquanto os outros três foram determinados para a barra **B4**, isto é, os filtros foram instalados ao lado das fontes harmônicas como era de se esperar. Este fato fornece um indicativo da confiabilidade das regras de decisão apontadas no CAPÍTULO III. Esta decisão fez com que os valores das distorções harmônicas de tensão em todas as barras do sistema elétrico permanecessem abaixo de 5%, enquanto as distorções de correntes também sofreram redução conforme a Tabela 4.16.

Como última análise deste caso, o sistema IPQ considera para a análise da compensação de reativos apenas a barra da concessionária. Assim, a decisão foi a instalação de um filtro sintonizado na ordem de 5,2. Esta medida garantiu uma distorção harmônica de tensão de aproximadamente 2,5% na barra da concessionária. Por outro lado, nas barras de baixa tensão, as distorções se mantiveram em torno de 3% à exceção das barras onde se encontram as fontes harmônicas, cujo máximo valor encontrado foi de 16,1% como foi ilustrado na Tabela 4.16. Novamente, este caso vem a exemplificar a aplicabilidade e a confiabilidade das regras de decisão do CAPÍTULO III.

### 4.2.3 – CASO 03: CONSUMIDOR “C”

#### 4.2.3.1 – OBJETIVO

A motivação para os estudos efetuados neste caso se deve a uma expansão no complexo elétrico da aciaria denominada por CONSUMIDOR “C” em, aproximadamente, 20[MVA]. Dessa forma, o sistema IPQ foi utilizado com o propósito de assessorar os engenheiros consultores nas decisões sobre a compensação de reativos na nova topologia do referido sistema. Nesse contexto, ainda, procurou-se analisar o comportamento da instalação elétrica global, quanto as unidades de filtragem já instaladas no sistema elétrico e o impacto sobre todo o complexo elétrico do consumidor quando as mesmas falharem. Para tanto, foram cumpridas as etapas mostradas na Tabela 4.22.

*Tabela 4.22 – Descrição das etapas a serem executadas.*

ETAPA	DESCRIÇÃO
I	Definição da potência reativa total necessária à compensação, após a expansão, de acordo com o fator de potência desejável na barra da concessionária, através da execução dos fluxos de carga e harmônico liberando-se, para tanto, apenas a barra da concessionária (Capítulo III-seção 3.3.1).
II	Distribuição da potência reativa total entre as demais barras do sistema elétrico, por meio da liberação das mesmas para a compensação. (Capítulo III-seção 3.3.1).
III	Deteção de problemas harmônicos caso todas as unidades de filtragem da área atual (“ÁREA 1”) falharem.

### 4.3.2.2 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA INDUSTRIAL

O sistema elétrico do CONSUMIDOR “C”, ilustrado na Figura 4.9, contém uma potência de curto-circuito, junto ao barramento 138[KV], igual a 2500 [MVA].

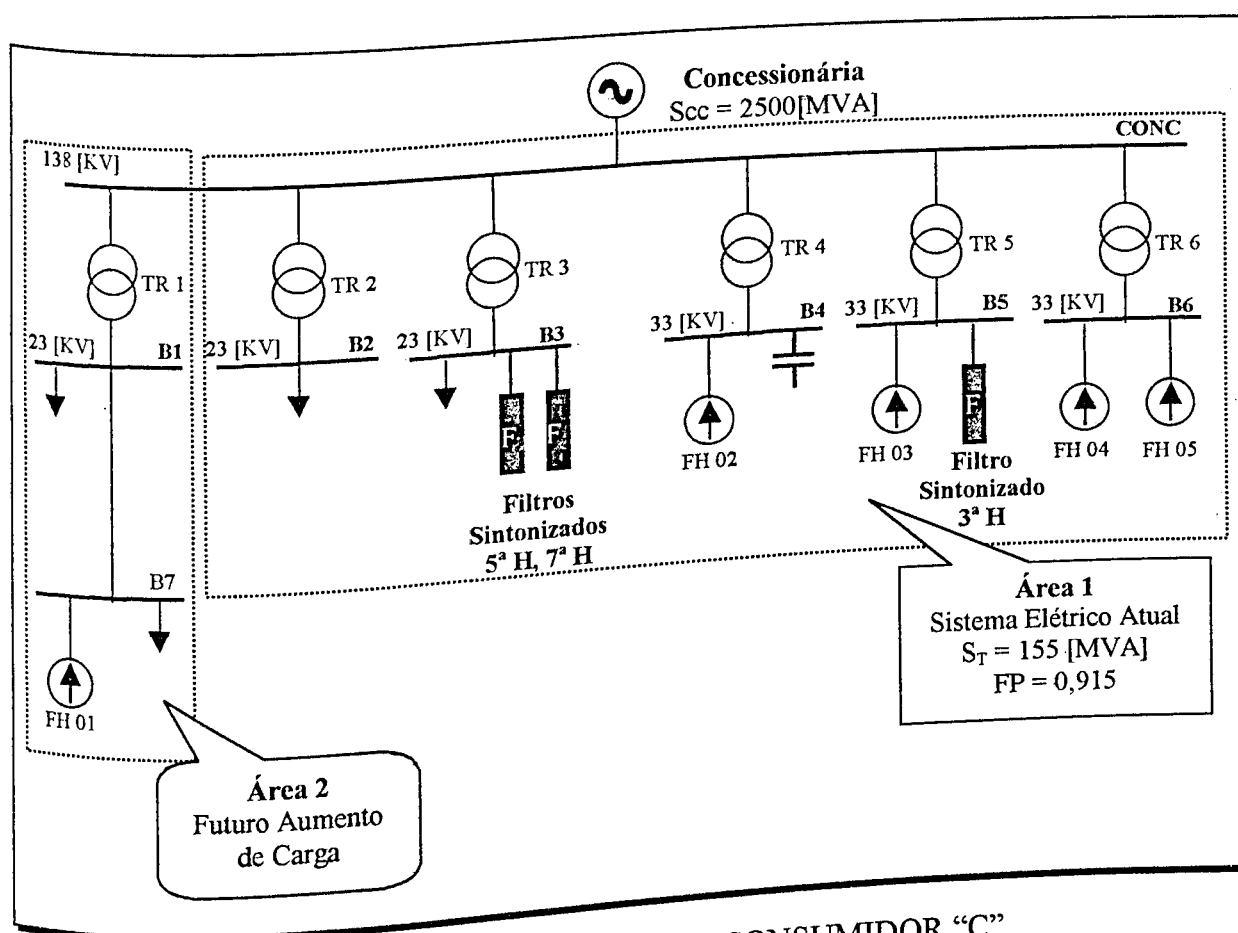


Figura 4.9 - Diagrama elétrico do CONSUMIDOR “C”.

Na Figura 4.9, a instalação elétrica atual é indicada como “ÁREA 1” ( $\cong 155 \text{ [MVA]}$ ) e a parcela da carga referente à expansão encontra-se englobada pela “ÁREA 2”, que é constituída por uma fonte de corrente harmônica somada a uma parcela de carga linear. Ademais, observa-se que na “ÁREA 1”, apesar da presença de fontes harmônicas, já existem filtros instalados para executar as devidas compensações.

Assim, os parâmetros utilizados para simulação do sistema elétrico do CONSUMIDOR “C” são apresentados nas Tabelas 4.23 e 4.24. A Tabela 4.25 apresenta os valores fornecidos pelo usuário através da interface do sistema IPQ.

Tabela 4.23 – Dados gerais do sistema elétrico.

DADOS DE BARRA				DADOS DE RAMO			
BARRA	Tensão [V]	Fator de Potência	Potência [MVA]	TRANSFORMADOR	Potência [MVA]	R[%]	X[%]
CONC	138	-	-	TR1	20	0,38	9,38
AREA1	138	0,915	155,79	TR2	20	0,52	8,81
B1	23	0,837	9,75	TR3	20	0,38	9,50
B7	23	0,947	6,0	TR4	80	0,36	8,16
-	-	-	-	TR5	80	0,22	8,18
-	-	-	-	TR6	50	0,6	10,4

Tabela 4.24 – Parâmetros elétricos da fonte harmônica da Figura 4.9 (FH 01).

Tabela 4.24 – Parâmetros elétricos da fonte harmônica

CARACTERÍSTICAS GERAIS			
PARÂMETRO	BARRA		
	B7		
Potência [kVA]	10,52		
Tensão [KV]	23		
Fator de Potência	0,728		
DHI <sub>T</sub> [%]	19,14		
CORRENTES HARMÔNICAS INJETADAS			
ORDEM HARMÔNICA	Corrente [A]		Corrente [A]
	BARRA		BARRA
	B3		B3
-	-	-	1,75
2	5,3	16	9,0
3	5,3	17	1,75
4	5,3	18	8,3
5	31,5	19	1,75
6	3,5	20	1,75
7	23,4	21	1,75
8	3,5	22	13,7
9	3,5	23	1,75
10	3,5	24	1,75
11	14,0	25	1,75
12	1,75	26	1,75
13	12,1	27	10,9
14	1,75	28	1,75
15	1,75	29	1,75
		30	



Tabela 4.25 – Entrada de dados do usuário.

ITEM	DESCRIÇÃO	VALOR - ETAPA	
		I	II
A	Fator de potência mínimo	0,92	0,92
B	Fator de potência desejável na barra da concessionária	0,92	0,92
C	Fator de potência máximo nas barras de baixa/média tensão do sistema elétrico sob análise	0,99	0,99
D	Potência mínima para os bancos de capacitores	0	0
E	Barras prioritárias ao estudo	CONC	Área 2
F	Máxima distorção harmônica de tensão (%)	5	5
G	As barras onde se encontram as fontes harmônicas podem admitir distorção harmônica total de tensão maior que o máximo permitido?	Todas	Nenhuma

### 4.2.3.3 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS

#### ETAPA I – *Determinação da potência reativa global necessária através do sistema IPQ*

Conforme decidido pela engenharia de manutenção do CONSUMIDOR “C”, a compensação de reativos deverá atender a um fator de potência no mínimo de 0,92 na barra da concessionária e 0,97 na barra de 23[KV] da área em expansão. Para alcançar tais valores de fator de potência, o sistema IPQ determinou um montante de 9 [MVAR] conforme mostrado na Tabela 4.26.

*Tabela 4.26 – Montante de reativo necessário à correção do fator de potência.*

CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA BARRA DA CONCESSIONÁRIA	
Fator de Potência Desejado	0,92
Potência Reativa Necessária [MVar]	9

Deve-se ressaltar que, tal compensação só se fez necessária em consequência da instalação da nova área (Área 2), a qual reduziu o fator de potência na barra da concessionária para 0,89.

#### ETAPA II – *Distribuição da potência reativa global entre as demais barras do sistema elétrico*

A distribuição da potência reativa global ocorreu sob a forma de filtro em uma única barra (B1).

As especificações deste filtro e os resultados obtidos após a instalação do mesmo, são ilustrados nas Tabelas 4.27 e 4.28, enquanto que a Figura 4.10 mostra a sua localização no diagrama elétrico.

Tabela 4.27 – Especificação do filtro sintonizado para a barra B1.

ESPECIFICAÇÃO DO FILTRO SINTONIZADO	
Barra	B1
Potência do Banco de Capacitores [MVar]	9
Tensão [kV]	23
Capacitor [ $\mu$ F]	45,1
Resistência [ $m\Omega$ ]	164
Indutor [mH]	3,68
Fator de Qualidade	55
Sintonia	6,5

Tabela 4.28 – Condições de operação obtidas após a instalação do filtro.

RESULTADOS DE BARRAS			
BARRA	Tensão [kV]	DHV <sub>1</sub> [%]	Fator de Potência
CONC	137,8	2,08	0,92
B1	22,9	3,83	0,97
B7	22,9	3,96	0,82

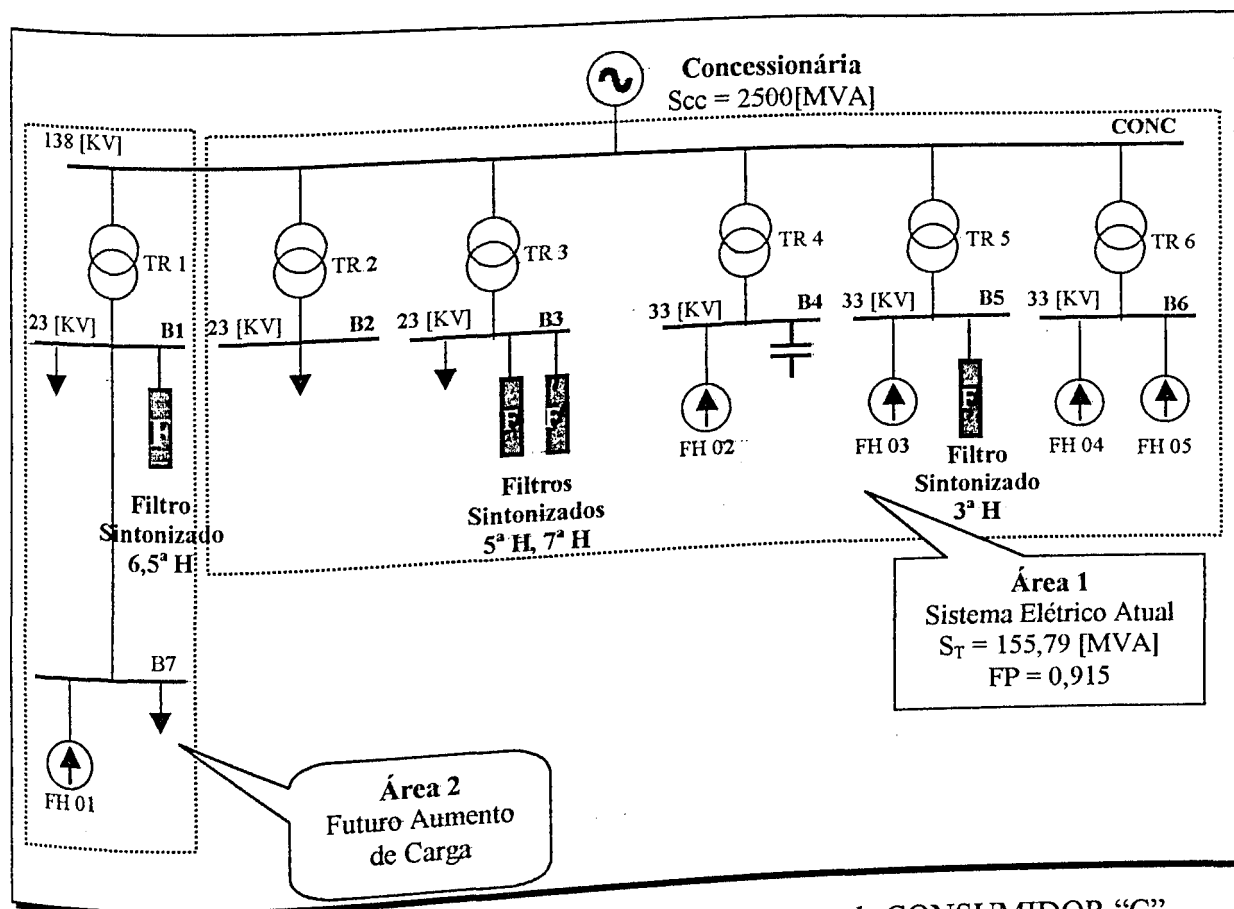


Figura 4.10 - Localização do filtro no complexo elétrico do CONSUMIDOR "C".

### ETAPA III – Detecção de problemas harmônicos na instalação da "ÁREA 1"

Na última etapa de execução do sistema IPQ, o mesmo faz simulações de perdas de unidades de filtros por ramo.

Assim, na situação de perda de todos os filtros instalados na "Área 1", o referido programa detectou que a nova instalação será afetada, com consequente impacto sobre as distorções harmônicas de tensão e corrente conforme os valores indicados na Tabela 4.29.

Tabela 4.29 – Condições de operação obtidas com a perda de todas as unidades de filtragem da “Área 1”.

RESULTADOS DE BARRAS			
BARRA	Tensão [kV]	DHV <sub>T</sub> [%]	Fator de Potência
CONC	137,8	14,85	0,92
B1	22,9	6,59	0,97
B7	22,9	6,96	0,82
RESULTADOS DE RAMOS			
RAMO	DHI <sub>T</sub> [%]		
FILTRO	56,8		

#### 4.2.2.4 – COMENTÁRIOS SOBRE O DESEMPENHO DO SISTEMA IPQ PARA O CONSUMIDOR “C”

Neste caso, o sistema IPQ determinou um montante de reativo global igual a 9[MVAR] para um fator de potência igual a 0,92, na barra da concessionária, levando-se em consideração o funcionamento completo das duas áreas. A distribuição deste montante de reativo se deu sob a forma de filtro a ser alocado na Barra B1. Esta decisão acarretou um fator de potência na barra da concessionária igual a 0,917, enquanto que as distorções harmônicas de tensão mantiveram-se em torno de 3%.

Além disso, foi verificado que quando todas as unidades de filtragem da “ÁREA 1” deixarem de operar, as distorções harmônicas de tensão nas barras B1 e B7 da nova área podem atingir valores de até a 6 %.

### 4.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas elétricos analisados neste capítulo serviram o propósito de consolidar e comprovar a aplicabilidade das regras de decisão mostradas no CAPÍTULO III. Além disso, os sistemas elétricos analisados por terem diferentes necessidades de reativos permitiram que as diversas regras de decisão fossem testadas de formas distintas.

Neste sentido, o primeiro estudo (CONSUMIDOR “A”) as regras enfocadas foram aquelas voltadas para a alocação de bancos de capacitores. Os resultados apresentados em termos de distribuição da potência reativa global aproximaram-se daquela distribuição efetuada por uma empresa de consultoria. Confirmando assim, a aplicabilidade das regras de decisão do CAPÍTULO III em sistemas elétricos em situações nas quais as harmônicas não prevalecem.

Já o segundo caso (CONSUMIDOR “B”), enfatizou tanto as regras associadas a bancos de capacitores como também aquelas voltadas para o projeto de filtros sintonizados. Por se tratar de uma situação bem definida, o resultado em termos de equipamentos para a compensação e o local da compensação é fácil de prever. Sendo assim, o desempenho das regras de decisão foram consideradas coerentes, isto é, a instalação somente de filtros, junto as cargas não-lineares.

Finalmente, o estudo do “CONSUMIDOR C” ilustrou a aplicabilidade do programa desenvolvido neste trabalho quanto ao apoio às decisões dos engenheiros consultores. Além disso, mais uma vez, a resposta do sistema especialista IPQ mostrou-se compatível, haja visto, que a área escolhida para a instalação do filtro foi a parte do complexo elétrico prevista na expansão.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES GERAIS

Esta tese teve por objetivo o desenvolvimento de um Sistema Especialista denominado **IPQ** capaz de realizar a compensação de reativos do sistema elétrico em média e baixa tensão, assegurando a qualidade da energia no tocante ao fator de potência e aos níveis harmônicos de tensão e corrente. Para tanto, os desenvolvimentos foram expostos através de quatro capítulos.

Inicialmente, o **CAPÍTULO I** enfatizou a importância de se manter a qualidade da energia elétrica dentro dos padrões recomendados e, além disso, procurou ponderar os desenvolvimentos ocorridos nos últimos anos no tocante à filosofia de compensação de reativos, conjuntamente com as técnicas utilizadas à execução da mesma. Neste ponto, destacou-se que os trabalhos até então existentes enfatizavam a compensação de reativos, apenas, na frequência fundamental e a nível de transmissão, fazendo uso das técnicas da Inteligência Artificial. Sob este cenário e com o objetivo de dar uma contribuição a mais nesta área da engenharia elétrica, o **CAPÍTULO I**, finalmente, mostrou a finalidade desta tese. Neste sentido, abordou-se os seguintes itens:

- *Compensação de reativos considerando, tanto a frequência fundamental como as componentes harmônicas;*
- *Utilização das técnicas da Inteligência Artificial, mais precisamente, de Sistemas Especialistas, baseado em regras heurísticas, e Conjuntos Nebulosos, para resolução de conflitos das regras de decisão do Sistema Especialista.*

Em seguida, o CAPÍTULO II, de natureza básica, mas importante no tocante à explicação da técnica a ser utilizada nos desenvolvimentos desta tese, apresentou o conceito de Sistemas Especialistas, os elementos e métodos de inferência, *backward* e *forward*. Além disso, foi mostrada a definição de Conjuntos Nebulosos e suas relações.

O CAPÍTULO III apresentou a principal contribuição desta tese de doutorado, culminando no desenvolvimento do Sistema Especialista **IPQ** (*Intelligent Power Quality*) através da aplicação das técnicas de Inteligência Artificial abordadas no CAPÍTULO II. Nesse contexto, em linhas gerais, este capítulo procurou mostrar a estrutura do sistema **IPQ**, e a efetivação dos seguintes itens:

- Comunicação entre o usuário e o sistema **IPQ**;
- Definição das barras prioritárias no tocante à compensação de reativos tanto a nível fundamental como a nível de harmônicos;
- Determinação das potências dos bancos de capacitores e dos filtros sintonizados requeridos pelo processo de compensação;
- Monitoração das corrente eficaz e tensão de pico sobre os bancos de capacitores;



- Automatização da busca do melhor filtro sintonizado para as situações indicadas pelos fluxos de carga e harmônico;
- Verificação da necessidade de vários filtros sintonizados para uma determinada barra;
- Decisão da melhor configuração para a compensação de reativos, a qual pode variar entre a utilização de apenas bancos de capacitores, o uso da composição de bancos e filtros ou, ainda, o emprego somente de filtros;
- Consideração da existência, ou, não do espaço físico para a acomodação dos dispositivos de compensação(bancos de capacitores/filtros);
- Certificação de que o valor do fator de potência nas barras do sistema elétrico não se tornará capacitivo;
- Restrição à instalação de bancos de capacitores junto às fontes harmônicas;
- Preservação da vida útil dos bancos de capacitores;
- Indicação de problemas de queda de tensão;
- Imposição, ou não, da instalação de filtros nas barras que possuem fonte harmônica;
- Emissão de relatório conclusivo sobre a compensação de reativos de um determinado sistema elétrico;
- Monitorações sob o domínio da frequência.

Deve-se ressaltar que, a concretização destes itens se deu através de uma base de conhecimento formada por dados oriundos da experiência de

especialistas da área da qualidade da energia elétrica e normas regulamentadoras. Quanto às características genéricas do *software* (IPQ) desenvolvido destaca-se que:

- A plataforma computacional usada para o desenvolvimento desta tese foi o DELPHI orientado à objeto;
- O banco de dados utilizado foi o Paradox;
- Em termos de linhas código, foi gerado aproximadamente 30.000 linhas;
- O projeto de todo o sistema computacional ocupa em torno de 10[MB] de memória.

No tocante ao CAPÍTULO IV, o mesmo retratou a aplicação da máquina de inferência do IPQ mostrada no CAPÍTULO III. Neste sentido, foram utilizados três sistemas elétricos reais com distintas necessidades de reativos. Estes complexos elétricos foram escolhidos com tal característica para mostrar a abrangência das regras de decisão do CAPÍTULO III e, conseqüentemente, a versatilidade do sistema IPQ. Com isso, em cada caso estudado foi evidenciada uma parte da máquina de inferência, isto é:

- Para o CONSUMIDOR “A”, foram enfatizadas as regras referentes à distribuição dos bancos de capacitores entre as barras do seu complexo industrial. Vale ressaltar que, os resultados obtidos foram comparados e checados com aqueles provenientes de uma consultoria;
- Com relação ao CONSUMIDOR “B”, frizou-se as regras utilizadas na escolha e no projeto dos filtros necessários à compensação harmônica;
- Finalmente, assim como para os casos anteriores, os estudos envolvendo o CONSUMIDOR “C” foram usados para constatar a eficácia e versatilidade do sistema IPQ, como ferramenta de apoio à

decisão aos engenheiros consultores. Os resultados obtidos demonstraram, sobretudo, coerência com a realidade da engenharia elétrica.

Os resultados apresentados no CAPÍTULO IV, permitiram confirmar a aplicabilidade e a confiabilidade da máquina de inferência utilizada pelo sistema IPQ, apresentada no CAPÍTULO III.

Na sequência, são listados os resultados adicionais deste trabalho.

**(i) Suporte computacional para trabalhos desenvolvidos**

- VENTURA, A. C.. **Proposta de uma Compensação Reativa e Harmônica em Residências**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 1999.
- SOARES, E. L.. **Uma Investigação dos Consumidores Residenciais sob o Enfoque da Qualidade da Energia Elétrica**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 1999.

**(ii) Trabalhos publicados em congressos**

- *Expert System for the Analysis of Power Quality*  
*IEE - IEEE - DRPT200 - International Conference on Electric Utility Desregulation and Restructuring, and Power Technologies – London. April. 2000.*
- *Intelligent System to Correct Power Factor considering Power Quality*  
*8th EPE – European Conference Power Electronics and Applications*  
*Lausanne. Swizerland. September. 1999.*

- *Contribution for Power Quality Control using Fuzzy Logic*  
**IEEE – TD PES (Transmission and Distribution Power Engineering Society)**  
– New Orleans. EUA. April. 1999.
- *A New Computing Structure for Power Quality Analysis Using Fuzzy Logic – An Approach Based on RMS Current and Peak Voltage*  
**ICSC (International Conference on Soft Computing and Information/Intelligent Systems)**. Lizuka. Fukuoka. Japan. October. 1998.
- *A new Proposal to Capacitor Bank Allocation using Fuzzy Logic*  
**IEEE – PEDES (Power Electronics Drives and Energy Systems for Industrial Growth)** – Perth. Western Australia. November. 1998.
- *A new Computing Structure for Power Quality Analysis using Fuzzy Logic*  
**IEEE – ICHQP (International Conference on Harmonics and Power Quality)**. Athens. Greece. October. 1998.
- *Stabilization and Control of Electric Power Systems using Fuzzy Controllers*  
**CBA (Congresso Brasileiro de Automática)** – Uberlândia. Brasil. Setembro. 1998.

(ii) Trabalho em revista científica

- *Contribution for the Control Power Quality Analysis using Expert Systems.*  
**Engineering Intelligent Systems** – Londres.  
(Situação: sob avaliação técnica).

Contudo, é reconhecido a necessidade de novos desenvolvimentos, tais como:

- Detectar manobras de contingências e indicar a melhor alternativa;
- Uma melhoria na escolha da sintonia do filtro definida pelo programa;
- Acrescentar à compensação de reativos, a análise econômica.

# **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] – **NORMA ABNT 7094.** Recomendação para o Limite Máximo das Harmônicas no Motor.
- [2] – **NORMA ABNT 5282 e ANSI/IEEE Std 18.** Recomendação para o controle das harmônicas nos bancos de capacitores.
- [3] – **Std. IEEE 519.** Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.. New York, 1993.
- [4] – **VILELA, J. H.. Contribuições ao Diagnóstico da Qualidade da Energia Elétrica.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Fevereiro. 1997.
- [5] – **PEREIRA, F. C.. Contribuições aos Estudos dos Impactos Energéticos Associados a Qualidade da Energia Elétrica.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Fevereiro, 1998.
- [6] – **SOARES, E. L.. Uma Investigação dos Consumidores Residenciais sob o Enfoque da Qualidade da Energia Elétrica.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. 1999.
- [7] – **DUGAN, R. C. & Mc GRANAGHAN, M. F.. Electrical Power Systems Quality.** Editora Mc Graw-Hill, EUA - 1995.

- [8] – GARCIA, F. R.. Desenvolvimento de Fluxo Harmônico, Modelagens, Processo Iterativo e Análise de Sensibilidade. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal de Uberlândia. Maio, 1992.
- [9] – CYME. **International Power Engineering Software Catalog**. 1994.
- [10] – BALLEIRO, A. C. A.. **Análise de Problemas e Procedimentos na Determinação de Filtros Harmônicos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Junho, 1992.
- [11] – LOGOTHETIS, D. N. & LACHS, W. R. & SUTANTO, D.. Power System Control in the Next Century. **IEEE Transactions on Power Systems**. Vol. 11, No. 1, February 1996.pp 11-18.
- [12] – TOMSOVIC, K. & MOMOH, J. A.. Overview and Literature Survey of Fuzzy Set Theory in Power Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 10, No. 3. August.1995.pp. 1676-1690.
- [13] – HATZIARGYRIOU, N. D. & SIDERIS, N. C. & CONTAXIS, G. C.. A Decision Tree Method for On-Line Steady State Security Assessment. **IEEE Transactions Power Systems**, Vol. 9, N0. 2, May, 1994.pp 1052-1059.
- [14] – LIU, CHEN CHING & TOMSOVIC, KEVIN. An Expert System Assisting Decision-Making of Reactive Power/Voltage Control. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. PWRS-1, No. 3, August, 1986.pp 195-201.

- [15] – SU, CHIANG TZONG & LIN, CHIEN TUNG. A New Fuzzy Control Approach to Voltage Profile Enhancement for Power Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. 11, No. 3, August, 1996. pp 1654-1659.
- [16] – CHANG, C. S. & LIEW, A. C. & SRINIVASAN, DIPTI. Demand Forecasting Using Fuzzy Neural Computation, With Special Emphasis On Weekend And Publish Holiday Forecasting. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol 10, No. 4, November, 1995.pp 1899-1901.
- [17] – ABDUL-RAHMAN, K. H. & SHAHIDEHPOUR, S. M. Reactive Power Optimization Using Fuzzy Load Representation. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 9, No. 2, May, 1994.pp 898-948.
- [18] – ABDUL-RAHMAN, K. H. & SHAHIDEHPOUR, S. M. Aplication of Fuzzy Optimal Reactive Power Planning with Security Constraints. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 9, No. 2, May, 1994.pp 589-597.
- [19] – ABDUL-RAHMAN, K. H. & SHAHIDEHPOUR, S. M. A Fuzzy - Based Optimal Reactive Power Control. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 8, No. 2, May, 1993.pp 662-670.
- [20] – ABDUL-RAHMAN, K. H. & SHAHIDEHPOUR, S. M & DANESHDOOST. AI Approach to Optimal VAR Control with Fuzzy Reactive Loads. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 10, No. 1, February, 1995.pp 88-97.

- [21] – PEPONIS, G. J. & PAPADOPOULOS, M. P. & HATZIARGYRIOU, N. D. Optimal Operation of Distribution Networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 11, No. 1, February, 1996.pp 59-67.
- [22] – IBA, KENJI. Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 9, No. 2, May 1994.pp 685-690.
- [23] – SARAIVA, J. TOMÉ & MIRANDA, V. & PINTO, L. M. V. G.. Impact on Some Planning Decisions from A Fuzzy Modelling of Power Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 9, No. 2, May 1994.pp 819-825.
- [24] – ROYTELMAN, I. & WEE, B. K. & LUGTU, R. L.. Volt/Var Control Algorithm for Modern Distribution management System. **IEEE Transactions on Power Systems**. Vol 10, No.3, August, 1995.pp 1452-1458.
- [25] – LIU, EDWIN & GUAN, XIAOHONG. Fuzzy Constraint Enforcement and Control Action Curtailment in An Optimal Power. **IEEE Transactions on Power Systems**. Vol. 11, No. 2, May 1996.pp 639-645.
- [26] – LE, T.L. & NEGNEVITSKY, M.. Expert System Application for Voltage and VAR Control in Power Transmission and Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 12, No. 3. July 1997.



- [27] – MARTINS, RONAN MARCELO. **Controladores Nebulosos Aplicados À Estabilização de um Sistemas de Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Junho, 1995.
- [28] – AZEVEDO, H. R., MARTINS, R. M., OLIVEIRA, J. C., MORAES, A. J., GUIMARÃES, G. C. & ABREU, J. P. G.. **A Fuzzy Logic Stabilizer for an Electric Power System. Proceedings of the International Joint Conference of the Fourth IEEE International Conference on fuzzy Systems and the Second International Fuzzy Engineering Symposium**. Vol III . March, 1995.
- [29] – MARTINS, R. M., AZEVEDO, H. R., TEIXEIRA, E.P. & ABREU, J. P. G.. **Fuzzy Logic Based Control for Electric Power System. International Conference of the IEEE on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation**. Vol. II. November, 1995. pp 1496 - 1501.
- [30] – AZEVEDO, H. R., MARTINS, R. M., OLIVEIRA, J. C., MORAES, A. J., GUIMARÃES, G. C. & ABREU, J. P. G.. **Electric Power System Stabilization Using Fuzzy Logic Controller. Proceedings of the Sixth International Fuzzy Systems Association World Congress**. Vol, I. July, 1995. pp 445-448.
- [31] – AZEVEDO, H. R., MARTINS, R. M., TEIXEIRA, E. P., NERY, J. W. L. & ABREU, J. P. G.. **Fuzzy Stabilizer for Power System Using ZigZag Phase Shift Transformer. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics**. Vol. II. July, 1995. pp 506-511.

- [32] – TASK FORCE ON HARMONICS MODELING AND SIMULATION. Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks Part I e PartII. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol 11, No. 1, january 1996.pp 452-474.
- [33] – TASK FORCE ON THE EFFECTS OF HARMONICS ON EQUIPMENT. Effects of Harmonics on Equipment. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 8, No. 2, April 1993.pp 672-678.
- [34] – RIBEIRO, PAULO F..**Workshop**, Univeridade Federal de Uberlândia. Junho, 1996.
- [35] – ROBERT, A. & DEFLANDRE. Guide for Assessing the Network Harmonic Impedance. **Eléctra**. No. 167, August. 1996.pp 97-131.
- [36] – GIARRETANO, J & RILEY G..Expert Systems – Principles and Programming. **PWS PUBLISHING COMPANY**. ENGLAND – 1998.
- [37] – TEIVE, R. & FONSECA L. G.. A Cooperative Expert System for Transmission Expansion Planning of Electrical Power Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 13, No. 2, May 1998.
- [38] – FERREIRA, D. P. L. **Análise de Diversas Configurações de Controladores Nebulosos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Fevereiro, 1997.
- [39] – Activa Serviços Especiais Ltda.

**“ É graça divina começar bem, é graça maior persistir na caminhada certa, mas a graça das graças é não desistir, podendo ou não podendo e embora caindo aos pedaços, chegar até o fim.”**

**DOM HELDER CÂMARA**