UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELAGEM E ANÁLISE DE CONDICIONADORES DE AR DOS TIPOS CONVENCIONAL E INTELIGENTE E INFLUÊNCIA NO COMPORTAMENTO DINÂMICO DAS REDES ELÉTRICAS

SERGIO MANUEL RIVERA SANHUEZA

FEVEREIRO
2007

MODELAGEM E ANÁLISE DE CONDICIONADORES DE AR DOS TIPOS CONVENCIONAL E INTELIGENTE E INFLUÊNCIA NO COMPORTAMENTO DINÂMICO DAS REDES ELÉTRICAS

Tese apresentada por Sergio Manuel Rivera Sanhueza à Universidade Federal de Uberlândia para obtenção do título de Doutor em Ciências aprovada em 02/02/2007 pela Banca Examinadora.

Prof. Geraldo Caixeta Guimarães, PhD. – UFU – (Orientador)

Prof. José Carlos de Oliveira, PhD. – UFU

Prof. Sebastião Ércules Melo Oliveira, Dr. – UFRJ

Prof. Benemar Alencar de Souza, Dr. – UFCG

Prof. Adélio José de Morais, Dr. – UFU

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

R621m Rivera Sanhueza, Sergio Manuel.

Modelagem e análise de condicionadores de ar dos tipos convencional e inteligente e influência no comportamento dinâmico das redes elétricas / Sergio Manuel Rivera Sanhueza. - 2007.

148 f. : il.

Orientador: Geraldo Caixeta Guimarães.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia.

1. Ar condicionado - Teses. 2. Redes elétricas - Teses. I. Guimarães, Geraldo Caixeta. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.56

Elaborado pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

MODELAGEM E ANÁLISE DE CONDICIONADORES DE AR DOS TIPOS CONVENCIONAL E INTELIGENTE E INFLUÊNCIA NO COMPORTAMENTO DINÂMICO DAS REDES ELÉTRICAS

SERGIO MANUEL RIVERA SANHUEZA

Tese apresentada por Sergio Manuel Rivera Sanhueza à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Prof. Geraldo Caixeta Guimarães, PhD	Prof. Darizon Alves de Andrade, PhD
Orientador	Coordenador do Curso de pós Graduação

Aos meus pais, Pedro e Laura, e minha esposa Elizane.

AGRADECIMENTOS

A Jesus Cristo pelos ensinamentos e bondade.

Aos Professores. Geraldo Caixeta Guimarães e José Carlos de Oliveira pela orientação segura, confiança e compreensão durante as etapas desafiadoras deste trabalho.

Ao Prof. Adélio José de Moraes pelas valiosas sugestões.

Ao grande amigo Fernando Lessa Tofoli pelo constante apoio, principalmente nos momentos difíceis.

À minha família pela compreensão dos meus períodos ausentes.

Aos servidores e alunos da Escola Técnica Federal de Palmas pelo apoio dado para a finalização, em especial ao Prof. Luis Medeiros.

Ao Coordenador do curso de pós graduação, Prof. Darizon Alves de Andrade e a secretária Marli Junqueira Buzzi pelo apoio nas questões práticas.

À CAPES pelo apoio financeiro.

“Quando o dedo aponta para a lua, o medíocre olha o dedo.”

Provérbio chinês

RESUMO

Sanhueza, S.M.R., Modelagem e Análise de Condicionadores de Ar dos Tipos Convencional e Inteligente e Influência no Comportamento Dinâmico das Redes Elétricas, FEELT-UFU, 2007, 148p.

Devido à crescente demanda e diversidade de aparelhos de consumo, os sistemas de energia elétrica têm experimentado, atualmente, problemas com a sua operação, tanto em regime permanente para manter o nível de tensão dentro de uma faixa adequada, quanto também em regime transitório diante de perturbações do tipo curto circuito, perda de geração, etc. Para estudar os efeitos destas perturbações no planejamento de sistemas elétricos, modelos de cargas precisos são muito importantes para obtenção de resultados confiáveis. Nas concessionárias de energia elétrica é muito comum a adoção do conhecido modelo ZIP (impedância, corrente ou potência constante), no entanto, quando as cargas da rede são compostas por motores, o modelo estático pode ser inadequado. Isto tem motivado a busca de uma representação mais detalhada de diversas cargas, principalmente daquelas consideradas mais importantes ou que constituem uma grande parcela do carregamento de uma rede elétrica. Neste contexto, os condicionadores de ar merecem destaque, não somente pela sua intensa demanda, mas também por suas peculiaridades dinâmicas, as quais influenciam o comportamento dos sistemas elétricos. presently Assim, este trabalho tem o objetivo de preencher algumas lacunas quanto à utilização e aprimoramento de modelos no domínio do tempo de aparelhos de ar condicionados, não somente aqueles simplesmente controlados por termostato – os condicionadores convencionais, quanto também os mais avançados que possuem controle de temperatura variando a velocidade do motor do compressor – os condicionadores inteligentes. Além disto, são realizadas algumas simulações para avaliar o comportamento dinâmico destes dois tipos de equipamentos perante perturbações numa rede elétrica de distribuição, as quais são também usadas para determinar qual tipo de condicionador apresenta a maior influência.

Palavras chave:
Condicionador de ar, dinâmica de sistemas elétricos, modelagem de cargas, sistema de distribuição.

ABSTRACT

Sanhueza, S.M.R., Modelling and Analysis of Conventional and Intelligent Air Conditioner Types and Influence on Dynamical Behaviour of Electrical Utility Grids, FEELT-UFU, 2007, 148p.

Due to crescent demand and diversity of consumption equipments, the electrical power systems have presently shown operation problems, as in steady state to keep the voltage level within an appropriate range, as well as in transient state when facing disturbances such as short-circuit, generation loss, etc. For studying the effects of such disturbances in the planning stage of electric systems, accurate load models are very important to obtain reliable results. In the electric power utilities it is very common the adoption of the well-known ZIP model (constant impedance, current or power), however, when grid loads are composed by motors, such static model cannot be valid. This has motivated the search of a more detailed representation of several loads, mainly those considered more important or that are a larger proportion of the electric grid. In this context, the air conditioners deserve prominence, not only because of their high demand, but also for their dynamic peculiarities which influence the behaviour of the electric systems. Thus, this work has the objective of filling out some gaps as for the use and improvement of time domain models of air conditioner appliances, not only those simply controlled by thermostat – the conventional air conditioners, but also the most advanced ones that possess temperature control by varying the motor speed – the intelligent air conditioners. Besides, some simulations are accomplished to evaluate the dynamical behaviour of these two types of equipments after disturbances in the electric distribution grid and also to determine which type of air conditioner causes the largest influence.

Key-words:
Air conditioner, power system dynamics, load modelling, distribution system.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - Introdução Geral **01**
1.1 – Considerações Iniciais 01
1.2 – Estado da Arte sobre Modelagem de Condicionadores de Ar 04
1.3 – Propostas e Contribuições desta de Tese 09
1.4 – Estrutura da Tese 10

CAPÍTULO II - Aspectos Gerais Sobre Condicionadores de Ar **13**
2.1 – Considerações Iniciais 13
2.2 – Princípio Físico dos Condicionadores de Ar 14
2.3 – Composição e Características de Funcionamento dos Compressores 16
2.4 – Classificação dos Condicionadores de Ar 19
2.4.1 – Condicionador de ar Tipo Convencional 20
2.4.2 – Condicionador de Ar Tipo Inteligente 22
2.4.3 – Tipos de Controle para Condicionadores Inteligentes 25
2.5 – Considerações Finais 26

CAPÍTULO III - Modelagem de Condicionadores de Ar Convencional e Inteligente **28**
3.1 – Considerações Iniciais 28
3.2 – Modelagem de Condicionadores de Ar Convencionais 30
3.3 – Modelagem de Condicionadores de Ar Tipo Inteligente 36
3.3.1 – Operação com Fluxo de Entreferro Constante 43
3.3.2 – Operação com V_s/f_s constante 45
3.3.3 – Funcionamento do Conversor de Freqüência 49
3.3.4 – Fundamentação e Modelagem Matemática da Técnica de Sustentação Durante Afundamentos de Tensão 55
3.4 – Metodologia Para a Agregação de Motores de Indução 60

3.5 – Implementação Computacional dos Condicionadores de Ar no Simulador SABER 69
3.6 – Considerações Finais 74

CAPÍTULO IV - Estudos Computacionais dos Modelos de Condicionadores Convencional e Inteligente 76
4.1 – Considerações Iniciais 76
4.2 – Metodologia de Cálculo das Potências 77
4.3 – Metodologia e Análise 82
4.3.1 – Caso 1: Regime Permanente 85
4.3.2 – Caso 2: Afundamento de Tensão 88
4.3.3 – Caso 3: Interrupção 100
4.4 – Considerações Finais 112

CAPÍTULO V - Análise do Comportamento de um Sistema Elétrico Típico 115
5.1 – Considerações Iniciais 115
5.2 – Termos Referentes à Modelagem de Cargas 116
5.3 – Sistema Elétrico Utilizado 117
5.3.1 – Dados de carga 118
5.3.2 – Dados de linhas e transformadores 120
5.4 – Estudos de casos 122
5.4.1 – Caso 1: Análise em Regime Permanente 122
5.4.2 – Caso 2: Análise de Curto-Circuito 124
5.5 – Considerações Finais 130

CAPÍTULO VI – Conclusões Finais 132

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 136

APÊNDICE – Exemplo de agregação de motores de indução 141

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Tensão após falta em uma subestação de 138kV. 03
Figura 2.1 – Ciclo de refrigeração de um condicionador de ar tipo janela. 14
Figura 2.2 – Detalhe do condicionador de ar tipo janela, ilustrando o sentido dos fluxos de ar. 15
Figura 2.3 – Perspectiva do ambiente ilustrando o sentido dos fluxos de ar. 16
Figura 2.4 – Característica conjugado–velocidade do compressor durante a partida. 18
Figura 2.5 – Componentes de um condicionador de ar tipo convencional. 20
Figura 2.6 – Condicionador de ar tipo convencional "*split*". 21
Figura 2.7 – Ciclo do termostato em operação normal. 22
Figura 2.8 – Comparação entre os equipamentos com velocidade variável nos mercados japonês e norte–americano. 23
Figura 2.9 – Levantamento dos equipamentos acionados com velocidade variável no mercado japonês. 23
Figura 2.10 – Arranjo físico. 24
Figura 2.11 – Arranjo típico de um condicionador de ar inteligente. 24
Figura 3.1 – Tipos de ligações de motores monofásicos usados em condicionadores de ar tipo convencional. 30
Figura 3.2 – Características conjugado–velocidade para motores monofásicos. 31
Figura 3.3 – Enrolamentos do motor a capacitor permanente. 33
Figura 3.4 – Representação dos campos do estator e do rotor para o motor de indução monofásico. 34
Figura 3.5 – Circuito equivalente do motor de indução. 36
Figura 3.6 – Circuito equivalente do motor de indução de gaiola simples em regime transitório. 37
Figura 3.7 – Campos do estator e do rotor para o motor de indução trifásico. 39
Figura 3.8 – Características de torque–velocidade para um motor de indução sob E/f constante. 45
Figura 3.9 – Características de conjugado de um motor de indução para a operação sob V_s/f_s constante. 48
Figura 3.10 – Estratégias de ajuste da característica V/f para a manutenção do fluxo de entreferro. 49
Figura 3.11 – Arranjo do condicionador de ar com conversor VSI. 50
Figura 3.12 – Modulação por largura de pulso (PWM). 51
Figura 3.13 – Formas de onda da tensão de saída para o inversor PWM senoidal trifásico. 52
Figura 3.14 – Tensão de saída do inversor. 53

Figura 3.15 – Sobremodulação com o inversor PWM. 54
Figura 3.16 – Descrição do processo de sustentação durante subtensões no elo CC. 55
Figura 3.17 – Rampa de aceleração utilizada. 57
Figura 3.18 – Rotação do fasor V_r. 58
Figura 3.19 – Malha implementada para o controle *V/f*. 59
Figura 3.20 – Agregação de vários motores em um único motor equivalente. 61
Figura 3.21 – Modelos de um circuito equivalente de um motor de indução trifásico. 62
Figura 3.22 – Agrupamento de *n* motores trifásicos. 63
Figura 3.23 – Circuitos equivalentes. 64
Figura 3.24 – Circuito equivalente do motor de indução monofásico. 68
Figura 4.1 – Método para obtenção das potências. 77
Figura 4.2 – Fluxograma da função *medPQD*. 82
Figura 4.3 – Corrente de Alimentação – Convencional. 85
Figura 4.4 – Corrente de alimentação – inteligente. 86
Figura 4.5 – Espectro harmônico da corrente – convencional. 86
Figura 4.6 – Espectro harmônico da corrente – inteligente. 87
Figura 4.7 – Perturbação aplicada no caso 2. 88
Figura 4.8 – Freqüência da moduladora: caso 2. 89
Figura 4.9 – Velocidade do eixo do motor – convencional:caso 2. 89
Figura 4.10 – Velocidade do eixo do motor – inteligente: caso 2. 90
Figura 4.11 – Potência mecânica do motor – inteligente: caso 2. 90
Figura 4.12 – Potência mecânica do motor – convencional: caso 2. 91
Figura 4.13 – Tensão no elo CC: caso 2. 92
Figura 4.14 – Ampliação da tensão no elo CC: caso 2. 93
Figura 4.15 – Corrente de alimentação – convencional: caso 2. 93
Figura 4.16 – Corrente de alimentação – inteligente: caso 2. 94
Figura 4.17 – Conjugado eletromagnético – convencional: caso 2. 95
Figura 4.18 – Conjugado eletromagnético – inteligente: caso 2. 95
Figura 4.19 – Fluxo no entreferro do motor – inteligente no modo normal: caso 2. 96
Figura 4.20 – Fluxo no entreferro do motor no modo adaptado: caso 2. 96
Figura 4.21 – Potência ativa – convencional: caso 2. 97
Figura 4.22 – Potência ativa – inteligente: caso 2. 98
Figura 4.23 – Potência reativa – convencional: caso 2. 99
Figura 4.24 – Potência reativa – inteligente: caso 2. 99
Figura 4.25 – Perturbação aplicada ao caso 3. 100
Figura 4.26 – Freqüência da moduladora. 101
Figura 4.27 – Velocidade do eixo do motor – convencional: caso 3. 101
Figura 4.28 – Velocidade do eixo do motor – inteligente: caso 3. 102
Figura 4.29 – Potência mecânica no eixo – convencional: caso 3. 103

Figura 4.30 – Potência mecânica no eixo – inteligente: caso 3. 103
Figura 4.31 – Tensão no elo CC: caso 3. 104
Figura 4.32 – Ampliação da tensão no elo CC: caso 3. 104
Figura 4.33 – Corrente de alimentação – convencional: caso 3. 105
Figura 4.34 – Corrente de alimentação – inteligente: caso 3. 106
Figura 4.35 – Conjugado eletromagnético – convencional: caso 3. 106
Figura 4.36 – Conjugado eletromagnético – inteligente: caso 3. 107
Figura 4.37 – Fluxo no entreferro do motor operando no modo normal: caso 3. 108
Figura 4.38 – Fluxo no entreferro do motor operando no modo adaptado: caso 3. 108
Figura 4.39 – Potência ativa – convencional: caso 3. 109
Figura 4.40 – Potência ativa – inteligente: caso 3. 109
Figura 4.41 – Potência reativa – convencional: caso 3. 110
Figura 4.42 – Potência reativa – inteligente: caso 3. 111
Figura 5.1 – Terminologia utilizada na estrutura de modelagem de carga baseada em componentes. 116
Figura 5.2 – Sistema de distribuição analisado. 118
Figura 5.3 – Corrente no secundário do transformador T_5. 122
Figura 5.4 – Corrente no alimentador da rede de distribuição. 123
Figura 5.5 – Tensões na saída do alimentador e no primário do transformador T_5. 124
Figura 5.6 – Tensão resultante na subestação localizada na barra 5. 125
Figura 5.7 – Potência ativa – estática. 125
Figura 5.8 – Potência ativa – convencional. 126
Figura 5.9 – Potência ativa – inteligente. 126
Figura 5.10 – Potência reativa – estática. 127
Figura 5.11 – Potência reativa – convencional. 128
Figura 5.12 – Potência reativa – inteligente. 129
Figura A.1 – Circuito equivalente do MIT. 142
Figura A.2 – Corrente de partida. 145
Figura A.3 – Potência ativa durante a partida. 146
Figura A.4 – Potência ativa durante a partida. 146
Figura A.5 – Corrente durante o afundamento de tensão. 147
Figura A.6 – Potência ativa durante o afundamento de tensão. 147
Figura A.7 – Potência reativa durante o afundamento de tensão. 148

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Parâmetros de entrada no *template controle_weg_microline_gh.*	74
Tabela 4.1	Parâmetros do condicionador convencional.	82
Tabela 4.2	Parâmetros do motor do condicionador inteligente.	83
Tabela 4.3	Características do conjugado resistivo do compressor.	83
Tabela 4.4	Variáveis de entrada para os *templates.*	83
Tabela 4.5	Casos estudados.	84
Tabela 4.6	Análise em regime permanente.	88
Tabela 5.1	Parâmetros do motor de indução monofásico equivalente.	119
Tabela 5.2	Parâmetros do motor de indução equivalente para o condicionador inteligente.	119
Tabela 5.3	Parâmetros da parcela de carga correspondente a refrigeradores.	119
Tabela 5.4	Dados de linhas.	120
Tabela 5.5	Dados de transformadores.	120
Tabela 5.6	*Templates* utilizados nas simulações.	121
Tabela 5.7	Características de simulação para cada modelo utilizado.	129
Tabela A.1	Características de simulação para cada modelo utilizado.	143
Tabela A.2	Características de simulação para cada modelo utilizado.	144
Tabela A.3	Características de simulação para cada modelo utilizado.	144

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

e	Base do logaritmo neperiano;
f_1	Freqüência corrigida;
f_a	Freqüência de amostragem;
f_{max}	Freqüência máxima de simulação;
f_{nom}	Freqüência nominal de operação [Hz].
f	Freqüência de estator [Hz];
i	Corrente instantânea;
i_a	Corrente instantânea da fase a do estator;
i_A	Corrente instantânea da fase A do rotor;
i_b	Corrente instantânea da fase b do estator;
i_B	Corrente instantânea da fase B do rotor;
i_c	Corrente instantânea da fase c do estator;
i_C	Corrente instantânea da fase C do rotor;
j	Contador do número de amostras por ciclo;
k	Ganho de tensão por unidade de freqüência;
k_1	Parcela da carga que varia linearmente com a velocidade;
k_2	Parcela da carga que varia com quadrado da velocidade;
k_o	Parcela da carga que não varia com a velocidade;
k_w	Fator de enrolamento;
n	Velocidade do eixo do motor;
p	Número de pólos;
q_1	Número de fases do estator;
s	Escorregamento;
$step_{Max}$	Passo máximo de simulação;
t	Tempo;
v	Tensão instantânea;
v_a	Tensão instantânea da fase a do estator;
v_A	Tensão instantânea da fase A do rotor;
v_b	Tensão instantânea da fase b do estator;
v_B	Tensão instantânea da fase B do rotor;
$\mathrm{v_c}$	Amplitude da onda portadora;
v_c	Tensão instantânea da fase c do estator;
v_C	Tensão instantânea da fase C do rotor;
v_{cap}	Tensão instantânea no capacitor;
v_r	Amplitude da onda moduladora;

$[I]$ Vetor coluna das correntes de fase;
$[L]$ Matriz indutância;
$[R]$ Matriz resistência;
$[V]$ Vetor coluna das tensões de fases;
B *C*oeficiente de atrito viscoso;
C *C*apacitor permanente;
D Potência distorcida;
E_s Força eletromotriz induzida;
H Constante de inércia;
H_{eq} Constante de inércia do motor equivalente;
I Valor eficaz da corrente;
I_R Corrente do rotor;
I_s Corrente do estator;
J Momento de inércia;
J_{eq} Momento de inércia equivalente;
L_{aA} Indutância de dispersão dos enrolamentos *a* e *A*;
L_{Aa} Indutância de dispersão dos enrolamentos *A* e *a*;
L_{aB} Indutância de dispersão dos enrolamentos *a* e *B*;
L_{Ab} Indutância de dispersão dos enrolamentos *A* e *b*;
$\mathrm{L_{dr}}$ Indutância de dispersão do rotor
L_{ii} Indutância de dispersão dos enrolamentos. (*i*=*a*, *b*, *A*, *B*);
L_R Indutância de dispersão por fase do rotor, referida ao estator;
L_{RR} 2/3 da indutância de magnetização por fase;
L_S Indutância de dispersão por fase do estator;
L_{SR} 2/3 da indutância de magnetização por fase;
L_{SS} 2/3 da indutância de magnetização por fase;
M_{aA} Indutância mútua entre os enrolamento *a* do estator e *A* do rotor;
M_{aB} Indutância mútua entre os enrolamento *a* do estator e *B* do rotor;
M_{bA} Indutância mútua entre os enrolamento *b* do estator e *A* do rotor;
M_{bB} Indutância mútua entre os enrolamento *b* do estator e *B* do rotor;
N Ordem harmônica;
N_a Número de amostras por ciclo;
N_s Número de espiras em série por fase.
P Potência Ativa;
P_{g1} Potência elétrica transferida do estator ao rotor;
P_{g1}^{ag} Potência elétrica transferida do estator ao rotor do motor equivalente;
P_{mec} Potência mecânica;
P_{mec}^{ag} Potência mecânica do motor agregado;
Q Potência Reativa;
R_a Resistência do estator da fase a;
R_A Resistência do rotor da fase A;
R_b Resistência do estator da fase b;

R_B	Resistência do rotor da fase B;
R_R	Resistência do rotor;
R_s	Resistência do estator;
T	Conjugado eletromagmético;
T_C	Conjugado resistivo da carga;
T_{nom}	Conjugado nominal da carga;
V	Valor eficaz da tensão;
V_0	Valor da tensão"*boost*" [V];
V_1	Tensão corrigida;
Vd	Tensão de referência para o elo CC;
Vd'	Tensão atual do elo CC;
V_{non}	Tensão nominal na saída do inversor [V];
V_s	Tensão nos terminais do estator;
X'	Reatância transitória;
X_0	Reatância de circuito aberto;
X_a	Reatância do estator da fase a;
X_A	Reatância do rotor da fase A;
X_b	Reatância do estator da fase b;
X_B	Reatância do rotor da fase B;
X_M	Reatância do ramo magnetizante;
X_R	Reatância do rotor;
X_{RR}	Reatância própria do rotor;
X_S	Reatância do estator;
X_{SS}	Reatância própria do estator;
Z_{fct}	Impedância fictícia do motor;
Z_{fct}^{ag}	Impedância fictícia do motor agregado;
Z_m	Impedância do ramo magnetizante;
Z_m^{ag}	Impedância do ramo magnetizante do motor agregado;
Z_r	Impedância do rotor;
Z_r^{ag}	Impedância do rotor do motor equivalente;
Z_s	Impedância do estator;
Z_s^{ag}	Impedância do estator do motor equivalente;
ϕ	Ângulo descrito pelo fasor v_r;
ω	Velocidade angular do rotor;
ω_1	Freqüência angular da onda moduladora;
ω_s	Velocidade angular síncrona [rad/s];
τ_0	Constante de tempo de circuito aberto;
ω	Velocidade angular da carga;
ω_{sr}	Freqüência angular de escorregamento;
λ	Fluxo concatenado.
θ	Ângulo entre os campos do estator e do rotor.

Δf	Freqüência de amostragem;
θ_{max}	Temperatura máxima;
θ_{min}	Temperatura mínima;
Φ_s	Fluxo magnético de entreferro [Wb];
fem	Força Eletromotriz
fmm	Força Magnetomotriz
pu	Por Unidade
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
CC	Corrente Contínua
CSI	Current Source Inverter
EPRI	Electric Power Research Institute
FFT	Fast Fourier Transform
IEC	International Electrotechnical Commission
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PWM	Pulse Width Modulation
VSI	Voltage Source Inverter
ZIP	Impedância, Corrente e Potência Constante

CAPÍTULO I

Introdução Geral

1.1 - Considerações Iniciais

Os sistemas de potência devem ser planejados e operados de forma a fornecer aos consumidores índices de qualidade dentro de padrões internacionalmente definidos, sendo o nível de tensão e a freqüência fatores importantes a serem considerados. Neste contexto, destacam-se duas áreas de estudos com forte correlação com o atendimento a tais requisitos, quais sejam: a qualidade da energia e a dinâmica de sistemas elétricos. Para ambas, as cargas possuem influência decisiva no comportamento de um sistema elétrico e, nestas circunstâncias, uma modelagem adequada torna-se essencial para se atingir resultados norteadores para os trabalhos de planejamento, operação e outros. De fato, a literatura [1] destaca situações que evidenciam que uma representação inadequada deste importante segmento do setor elétrico pode acarretar interpretações errôneas que podem até mesmo comprometer o funcionamento seguro dos sistemas.

Focando, especificamente os estudos de dinâmica de sistemas, muitas vezes são empregados modelos fundamentados na clássica estrutura conhecida por ZIP [2], ou seja, através de uma combinação apropriada entre as conhecidas: impedância, corrente e potência constante. Quando da implementação de tais

procedimentos, concretizado através de representações algébricas, as simulações computacionais são mais rápidas. No entanto, quando uma grande parcela de motores se faz presente nos complexos elétricos, a mencionada representação ZIP, para muitas aplicações, não oferece resultados realísticos [3] e, diante destas situações, há a necessidade da busca de modelos mais precisos.

Na verdade, estas preocupações não são específicas para os motores, mas poderiam ser estendidas a outras cargas com características operacionais tais que as representações simplificadas poderiam comprometer fortemente o seu real desempenho em campo. Este é o caso de alguns dispositivos eletrônicos de médio e grande porte, a exemplo dos: retificadores, inversores e diversas outras [4].

Dentro do cenário de preocupações acima aparecem, na atualidade, os equipamentos condicionadores da temperatura ambiente. Estes dispositivos, para os quais os motores de indução ocupam destaque como unidades de potência, têm aumentado consideravelmente sua importância nos sistemas elétricos. De fato, à medida que o nível de conforto cresce e as condições ambientais determinam, os aparelhos de ar condicionado constituem-se em cargas de expressivas potências perante as demais, com longos períodos operacionais diários e ainda, com uma forte tendência de aumento com o decorrer do tempo. Estes fatores, conciliados aos aspectos dinâmicos associados com um sistema elétrico orientam para que os estudos avaliativos de desempenho através de modelos mais adequados destes dispositivos tornem-se imperativos para o sucesso da operação das redes elétricas sob condições normais e adversas.

Um exemplo que mostra como os condicionadores de ar influenciam o comportamento de um sistema elétrico pode ser verificado numa ocorrência no estado da Flórida – EUA. No dia 18/08/1988 às 16h25min, período em que a

temperatura estava alta, havendo intensa utilização de condicionadores de ar [3]. Naquela ocasião, ocorreu uma falta trifásica no sistema de 230kV, desconectando 825MW de carga, sendo o distúrbio eliminado 3,5 ciclos depois. Ainda que a duração do fenômeno tenha sido curta, foi constatado que a tensão em uma das subestações de 138kV demorou cerca de 10s para retornar ao valor nominal, conforme ilustra a Figura 1.1. A citada figura ilustra resultados de campo e correspondentes desempenhos computacionais associados com a mesma perturbação. Fica evidenciado que os impactos produzidos são fortemente atrelados com o modelo da carga aqui reportada, como se constata quando da representação dos motores via carga estática ou através de modelos dinâmicos de motor de indução. Como se verifica, esta última estratégia conduz a resultados mais condizentes com o ocorrido em campo e ressalta a importância da busca de modelos mais próximos ao comportamento real das cargas.

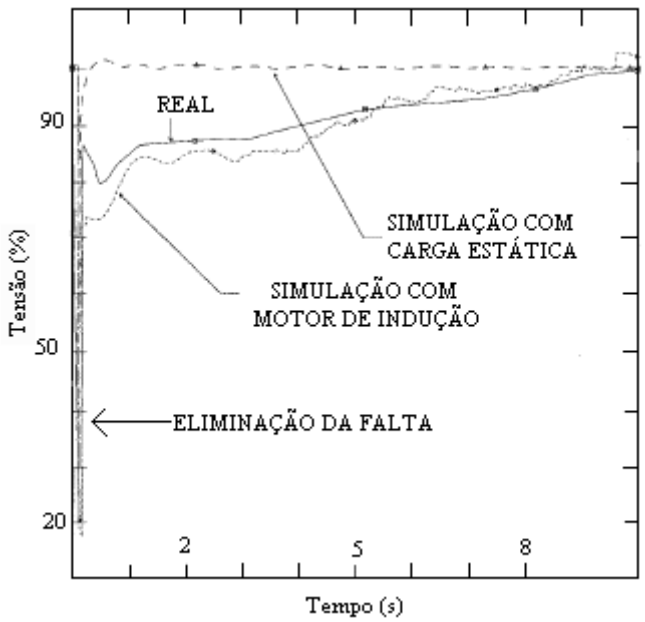


Figura 1.1 – Tensão após falta em uma subestação de 138kV.

Em um estudo realizado pelo ONS [5], que considera a influência do modelo de carga de redes de distribuição no sistema de transmissão, foi constatado que o modelo estático de carga ZIP pode ser considerado satisfatório para condições que impliquem pequenas variações de tensão. No entanto em simulações que objetivem analisar manobras em anel e contingências em linhas de transmissão em sistemas considerados frágeis tais como os radiais e aqueles com baixo nível de curto circuito, é necessário considerar o comportamento dinâmico das cargas e a dependência da tensão e da freqüência com o tempo.

1.2 - Estado da Arte sobre Modelagem de Condicionadores de Ar

- ***Quanto aos modelos para a representação dinâmica dos condicionadores de ar***

As discussões sobre as estratégias para o estabelecimento dos modelos iniciam-se pela menção da tradicional representação ZIP [1], a qual, como se sabe, utiliza princípios bem estabelecidos da área de dinâmica de sistemas. Este procedimento consiste, basicamente, em subdividir uma dada potência consumida na forma de uma parcela representada por impedância constante (Z), outra por corrente constante (I) e uma terceira por potência constante (P). Esta forma vem sendo utilizada pela maioria das concessionárias de energia elétrica, a exemplo da Companhia Energética do Estado do Tocantins (CELTINS). Na região da cidade de Palmas, considera-se que a demanda de energia ativa é composta por 78% de corrente constante e 22% de impedância constante. A potência reativa é constituída por 100% de impedância constante. Deve-se

ressaltar que, para esta região, 84,05% dos condicionadores são do tipo residencial, e que as altas temperaturas prevalecem na maior parte do ano.

Considerando ainda os modelos estáticos, pode-se reconhecer outras propostas, como aquela voltada para o emprego de expressões que correlacionam os consumos P e Q com as tensões (V) e freqüência (f) na forma de equações exponenciais ou polinomiais. Esta estratégia foi inicialmente proposta pelo EPRI ("*Electric Power Research Institute*") conforme [1]. Não obstante as melhorias advindas desta metodologia há de se reconhecer que, para algumas aplicações, os modelos aqui considerados ainda deixam a desejar. Assim sendo, o EPRI apresenta ainda um modelo mais especifico para os condicionadores de ar através da representação mais apropriada para os motores de indução trifásicos, não só para o tipo residencial, mas também para o tipo central. Todavia, como os condicionadores de ar utilizados em residências possuem motor de indução monofásico, os motores trifásicos foram substituídos por outra representação, em consonância com o motor real. Neste particular utilizou-se da proposta constante na referência [6]. Entretanto, não se encontrou qualquer documentação que relate sobre o emprego deste mecanismo para a agregação de vários motores, de forma a se obter um único motor equivalente, ou ainda, para estudos de dinâmica de sistemas elétricos. Indiscutivelmente, este se constitui num ponto importante, visto que o modelo elaborado por Krause é para o tipo de motor utilizado pelos condicionadores de ar residenciais.

Complementarmente aos condicionadores de ar convencionais, reconhece-se, na atualidade, uma grande tendência do emprego de uma outra filosofia de equipamentos fundamentada nas modernas técnicas da eletrônica de potência e seus respectivos controles. De fato, em [7] são mencionados os princípios operacionais desta nova vertente de produtos, ressaltando-se suas

potencialidades, vantagens e outros aspectos. De um modo geral, tais equipamentos têm sido denominados por ***condicionadores de ar inteligentes***, designação esta atrelada ao fato de possuir, internamente, recursos que correlacionam efetivamente seu funcionamento com as condições ambientais existentes. Neste campo pode-se afirmar que a bibliografia reportando modelos dinâmicos é ainda mais escassa. A única referência encontrada que se destina a este propósito é a [8], que faz uma análise dos aparelhos perante afundamentos de tensão e interrupções, no entanto o modelo proposto é fundamentado em equações empíricas.

No ano de 1999, surgiu no mercado asiático uma nova proposta para a versão definida por condicionador inteligente. Este avanço constituiu-se, fundamentalmente, pela inserção de recursos adicionais na forma de um controle para proteção do compressor contra variações de tensão, em especial, quanto aos afundamentos de tensão. O aparelho funciona da mesma forma que o aparelho inteligente inicial, no entanto, durante um afundamento de tensão a freqüência de operação do compressor é reduzida, fazendo com que o aparelho diminua a solicitação de energia da rede elétrica [9]. Para o condicionador inteligente provido desta técnica, não se encontraram relatos de estudos relacionados à qualidade da energia ou à dinâmica de sistemas elétricos.

- ***Quanto à correlação entre os afundamentos de tensão e o desempenho dos condicionadores de ar***

As redes elétricas, na sua grande maioria, estão sujeitas a variações de tensão de curta duração. Destes fenômenos, os afundamentos momentâneos de

tensão são os mais corriqueiros e, quando manifestados, conduzem a tensões que se situam entre 0,1 e 0,9 pu, com duração de um ciclo até três segundos.

No contexto nacional reconhece-se a existência de dois documentos que contemplam o assunto, sendo um deles o PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) Módulo 8, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [10]. O outro, aplicável à rede básica, tem por denominação Procedimentos de Rede - Modulo 8 e foi elaborado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [11].

No que se refere especificamente ao impacto de afundamento de tensão em condicionadores de ar destacam-se as seguintes referências: [12], [13], [14] e [8]. A primeira consiste numa dissertação de mestrado da UFU, que realiza uma completa análise do condicionador tipo convencional no contexto da qualidade da energia elétrica através de ensaios experimentais e simulações computacionais empregando o modelo proposto por Krause que apresentou resultados satisfatórios.

A referência [13] também aborda o condicionador tipo convencional perante afundamentos de tensão e variações de freqüência na rede elétrica. O estudo realizado através de simulações computacionais compara o modelo dinâmico de Krause com as representações estáticas propostas pelo EPRI. Esta investigação apontou para o fato que o modelo dinâmico apresenta resultados bem mais satisfatórios e confiáveis que as representações estáticas.

Em [14] é feita uma comparação entre o comportamento dos condicionadores convencional e inteligente (desprovido da técnica acima mencionada) perante afundamentos de tensão e interrupções de fornecimento. Verifica-se que, o condicionador tipo convencional apresenta comportamento mais severo para a rede durante a perturbação, pois a sua corrente se eleva

quando a tensão da rede está debilitada. No entanto, ao final da perturbação, o condicionador inteligente apresenta maior impacto, pois solicita uma elevada corrente para recarga do capacitor do elo CC.

Na referência [8] também é realizada uma análise comparativa entre os condicionadores convencional e inteligente através de ensaios experimentais e simulações computacionais, no entanto, os modelos empregados são empíricos. Mais uma vez verifica-se que o tipo convencional apresenta grande solicitação de corrente durante o afundamento de tensão, enquanto o inteligente se mostra mais crítico ao final da perturbação.

- ***Quanto a agregação de cargas tipo ar condicionador***

A utilização de modelos agregados de cargas individuais para a inclusão de um conjunto de dispositivos similares em estudos dinâmicos de sistemas de potência constitui-se em técnica amplamente difundida na engenharia. Para realizar a agregação de motores de indução trifásicos destacam-se as referências [15] [16], em que se faz o agrupamento das máquinas através do paralelismo do circuito equivalente. Este procedimento pode ser prontamente estendido aos produtos focados nesta pesquisa, visto que, num sistema elétrico, conforme determinado pela região de localização, o número de aparelhos de condicionadores de ar se apresenta de forma marcante na composição da carga da rede elétrica. No entanto, focando este tema quanto à agregação de condicionadores de ar, quer seja do tipo convencional com motor monofásico, quer seja do tipo inteligente, não se detectou qualquer bibliografia que contemplasse o assunto.

Para estudos de recomposição de carga em sistemas elétricos após um longo período de interrupção, destacam-se as modelagens que abordam o comportamento de cargas controladas por termostato, como condicionadores de ar e refrigeradores [17]. No instante do restabelecimento da energia elétrica, todas as cargas entram em funcionamento simultaneamente, fazendo com que a demanda atinja um valor bem acima da nominal. Nestas representações é feita a relação entre a temperatura ambiente e a demanda total do sistema, cuja agregação é considerada como a soma da potência nominal de todas as cargas individualmente. Este método permite constatar que à medida que os aparelhos conseguem reduzir a temperatura, o termostato desconecta os aparelhos, fazendo com que a demanda total do sistema se estabeleça num patamar nominal. Cabe ressaltar que neste tipo de estudo não são considerados aspectos pertinentes aos sistemas elétricos como tensão, corrente, freqüência, reativos, etc. A referência [17] trata deste assunto através da programação orientada a objetos considerando apenas o comportamento da demanda da carga e não da rede elétrica.

1.3 - Propostas e Contribuições desta Tese

A partir das discussões anteriores fica evidenciado a existência de lacunas no campo da representação das cargas constituídas por aparelhos de ar condicionado e sua apropriação aos estudos de dinâmica de sistemas elétricos de potência. Reconhecendo estes fatos surgiu a idéia desta pesquisa a qual contempla, fundamentalmente, os seguintes pontos básicos:

- Embora a existência de modelos individuais para aparelhos de ar condicionado do tipo convencional, o grande número de equipamentos que

compõem os complexos elétricos impede que estes sejam modelados de modo individual. Nestes termos, utilizando recursos já existentes na literatura procede-se, inicialmente, a proposta de uma estratégia para agregação de cargas individuais com vistas a se atingir um modelo redundante e apropriado aos fins aqui almejados;

- No que tange aos dispositivos denominados por sistemas inteligentes, estes não foram ainda contemplados com modelos apropriados aos estudos de dinâmica. Assim sendo serão obtidas representações adequadas para os equipamentos individuais e também proposta uma forma para a agregação de um grande número de aparelhos em uma carga equivalente;
- Incorporação dos modelos individuais e equivalentes numa base computacional que emprega técnicas de modelagem no domínio do tempo e avaliações de desempenho;
- Simulações computacionais sobre o desempenho de sistemas elétricos de distribuição sob a ação de afundamentos temporários de tensão e com a presença marcante das cargas consideradas nesta pesquisa. Estes trabalhos são voltados para uma análise comparativa dos impactos advindos de instalações constituídas pelas duas filosofias de equipamentos focados na pesquisa, quais sejam: convencional e inteligente.

1.4 - Estrutura desta Tese

Diante das lacunas encontradas e a importância da área de conhecimento sob consideração, o presente trabalho de pesquisa será desenvolvido e documentado através da estrutura a seguir, à qual se soma o presente capítulo.

Capítulo II – Aspectos Gerais Sobre Condicionadores de Ar

Esta unidade, de cunho didático, apresenta o princípio de funcionamento dos dois tipos básicos de condicionadores contemplados na pesquisa, destacando: o mecanismo da troca de calor em um recinto e os principais componentes elétricos e mecânicos, com ênfase ao compressor o seu reflexo no sistema de potência. Também são apresentados os principais arranjos de ligação, assim como classificados os aparelhos comercialmente disponíveis.

Capítulo III – Modelagem dos Condicionadores Convencional e Inteligente

Este Capítulo apresenta, inicialmente, o detalhamento da modelagem matemática, no domínio do tempo, do motor de indução monofásico, o qual constitui-se no elemento motriz do condicionador tipo convencional e que encontra-se diretamente interfaceando a rede de suprimento. A seguir, objetivando tecer considerações relativas ao condicionador de ar tipo inteligente, descreve-se o funcionamento do conversor de freqüência tipo PWM, destacando-se a estratégia no controle de velocidade para motores de indução. Este dispositivo consiste na unidade de conexão do produto com a rede elétrica de suprimento. Com grande relevância para este trabalho, também é desenvolvida a modelagem computacional do sistema de controle para sustentação durante afundamentos de tensão, conforme proposta tecnológica encontrada para a melhoria do desempenho do conjunto equipamento e sistema de potência. Somado a estes aspectos, são também apresentadas as bases para o estabelecimento do processo de agregação destes aparelhos para fins de estudos dinâmicos em sistemas elétricos de potência.

Capítulo IV – Estudos Computacionais dos Modelos de Condicionadores de Ar Convencional e Inteligente

De posse dos respectivos modelos discutidos no capítulo 3, são realizadas simulações computacionais, considerando a análise em regime permanente, além da aplicação de afundamento de tensão e interrupção no fornecimento de energia. A discussão dos resultados visa identificar os níveis das correlações existentes entre o funcionamento dos aparelhos e os impactos nos sistemas elétricos.

Capítulo V – Análise do Comportamento Dinâmico de um Sistema Elétrico Típico

Esta unidade está direcionada a realização de estudos computacionais empregando um sistema elétrico de distribuição típico de uma região nacional em que a presença de aparelhos de ar condicionado é marcante diante do consumo total de potência. Assim procedendo será possível avaliar os impactos advindos de uma e outra filosofia construtiva de equipamentos.

Capítulo VI – Conclusões Gerais

Neste capítulo são consolidadas as principais discussões e conclusões finais dos capítulos precedentes, apontando os aspectos mais relevantes encontrados na realização dos trabalhos. Finalmente, são ressaltadas questões associadas às contribuições efetivas do trabalho e também alguns tópicos correlatos e que certamente poderão constituir-se em temas para futuros desenvolvimentos.

CAPÍTULO II

Aspectos Gerais Sobre Condicionadores de Ar

2.1 - Considerações Iniciais

Desde o surgimento dos primeiros condicionadores de ar até os dias atuais, a indústria deste setor evoluiu significativamente, tanto no que se refere à capacidade de melhor refrigeração quanto à fabricação de aparelhos com maior eficiência energética. Com o custo cada vez mais acessível, os consumidores podem adquirir aparelhos com diversas características. Devido a grande diversidade de produtos e, à luz dos objetivos desta tese, torna-se essencial, antes de se concentrar nos aspectos elétricos propriamente ditos, que sejam discutidos os princípios físicos e outros pontos relevantes à compreensão dos equipamentos a serem modelados para os estudos de dinâmica de sistemas elétricos.

Desta forma, este capítulo tem por finalidade:

- Sintetizar o princípio físico de funcionamento dos condicionadores de ar;
- Identificar os principais componentes mecânicos e elétricos, bem como os arranjos elétricos utilizados em dispositivos disponíveis comercialmente;
- Classificar os tipos de compressores e seus respectivos impactos;

- Classificar os condicionadores de ar de acordo com sua utilização;
- Descrever de forma didática os tipos de aparelhos contemplados na pesquisa, quais sejam: convencionais e eletrônicos.

2.2 - Princípio Físico dos Condicionadores de Ar

Todos os aparelhos que realizam o processo denominado ciclo de refrigeração [12], ou seja, retirando o ar quente de um recinto e insuflando ar frio, são denominados condicionadores de ar. Assim, existe grande semelhança no ciclo de refrigeração dos diversos sistemas existentes. Basicamente, todos utilizam os mesmos tipos de componentes elétricos e mecânicos, diferindo somente quanto à capacidade, respectivos dispositivos de controle e proteção. Um ciclo completo de refrigeração à compressão é semelhante ao processo da Figura 2.1.

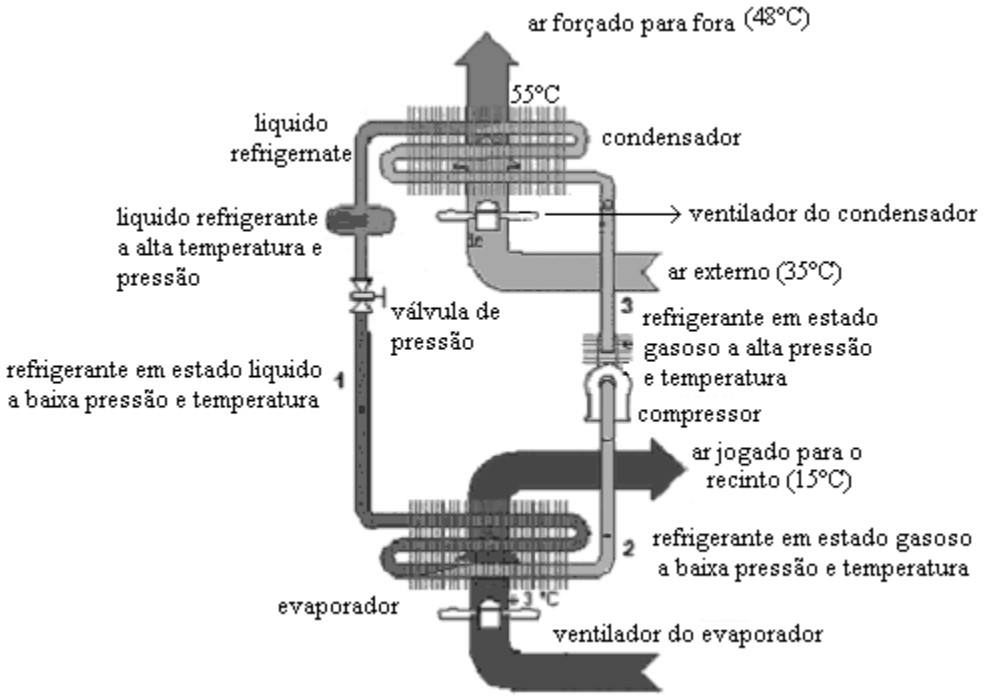


Figura 2.1 – Ciclo de refrigeração de um condicionador de ar tipo janela.

O ciclo de refrigeração inicia-se com o compressor aspirando o vapor refrigerante do evaporador à baixa pressão. Este é comprimido, de forma que há o aumento da pressão e da temperatura. Então, o gás é enviado ao condensador. No condensador, o vapor refrigerante é transformado em líquido por convecção (natural ou forçada), liberando calor para o meio ambiente. O líquido refrigerante à alta pressão deixa o condensador e, atravessando o filtro, penetra no tubo capilar (ou válvula de expansão, dependendo do equipamento) que, por sua vez, opera como um dispositivo regulador de refrigerante, produzindo a queda de pressão necessária para o evaporador. O gás líquido chega ao evaporador em forma de "chuveiro", e em virtude do amplo espaço existente, perde pressão, vaporizando-se e absorvendo o calor latente do espaço refrigerado. A seguir, é novamente aspirado pelo compressor, iniciando-se um novo ciclo de refrigeração.

Na Figura 2.2 e na Figura 2.3, são indicados os sentidos dos fluxos de ar para um condicionador do tipo janela.

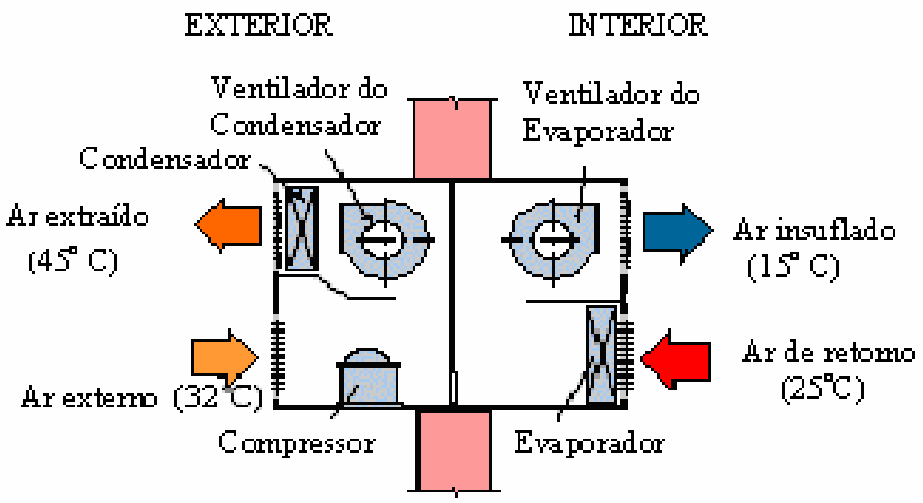


Figura 2.2 – Detalhe do condicionador de ar tipo janela, ilustrando o sentido dos fluxos de ar.

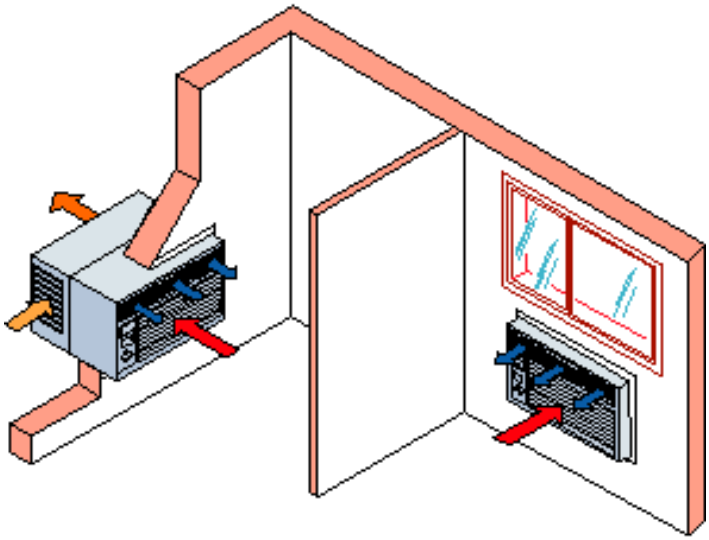


Figura 2.3 – Perspectiva do ambiente ilustrando o sentido dos fluxos de ar.

2.3 - Composição e Características de Funcionamento dos Compressores

O compressor é o principal elemento de um sistema de refrigeração, sendo responsável pelas transformações físicas que ocorrem no fluido refrigerante, as quais culminam no fenômeno da refrigeração. Sua função é aspirar e impulsionar o gás refrigerante, para que este possa circular no sistema. Esta unidade é constituída, basicamente, por duas partes distintas: uma elétrica e outra mecânica. Ambas as unidades, dependendo principalmente do porte do equipamento, podem ser encontradas juntas, em uma mesma unidade, formando os chamados "compressores herméticos". Nos equipamentos de maior capacidade, por motivos de ordem técnica, as partes elétricas e mecânicas são montadas separadamente, embora haja acoplamento mecânico. Estes são os compressores conhecidos como semi-herméticos ou abertos.

Grande parte das aplicações de pequeno porte, tais como refrigeradores, "*freezers*", bebedouros e aparelhos de ar condicionado residencial, utilizam compressores do tipo hermético.

No que tange aos compressores utilizados em condicionadores de ar, reconhece-se a existência de dois tipos, quais sejam: compressores alternativos e rotativos.

O compressor alternativo apresenta menor eficiência, porém baixo custo de fabricação. Por isso, possui a maior demanda do mercado brasileiro, encontrando aplicações desde a refrigeração doméstica até a industrial. Os compressores de palheta rotativa possuem um custo de fabricação maior, mas oferecem como benefício um maior rendimento energético. Assim, para reduzir o custo da energia elétrica, a tendência mundial é a substituição dos compressores alternativos pelos rotativos, mesmo a um custo inicial maior.

De forma a destacar o motivo pelo qual a operação simultânea de condicionadores de ar no sistema elétrico merece atenção, deve-se analisar o comportamento mecânico do compressor e sua correlação com sua carga, a qual possui baixa inércia. Devido a isto, a velocidade do eixo tende a diminuir mais acentuadamente quando da ocorrência de subtensões na rede elétrica. Subseqüentemente, quando a tensão na rede elétrica é restabelecida, o motor solicita uma potência adicional para que o compressor retome a velocidade nominal, o que se assemelha a uma nova partida. Este efeito possui fortes implicações para o sistema elétrico, visto que o fenômeno ocorre simultaneamente para um expressivo número de unidades em operação.

O conjugado resistivo (T_c) de uma carga mecânica acoplada ao eixo do motor é função da velocidade aplicada à mesma. Para fins da carga aqui considerada, a expressão genérica para o citado conjugado [12] é:

$$T_c = T_{nom}(k_0 + k_1\omega + k_2\omega^2) \tag{2.1}$$

Onde:

- k_o – parcela da carga que não varia com a velocidade;
- k_1 – parcela da carga que varia linearmente com a velocidade;
- k_2 – parcela da carga que varia com quadrado da velocidade;
- T_{nom} – conjugado nominal da carga [N·m];
- ω– velocidade angular da carga [rad/s].

Para o caso específico de compressores de condicionadores de ar de pequeno porte, a equação (2.1) apresenta diferentes coeficientes durante a partida e a operação em regime permanente. Na partida, o gás ainda não está comprimido, de modo que o conjugado resistente possui uma característica similar à Figura 2.4. Quando a carga está em repouso, há um conjugado resistente de 30%, e durante o processo da partida o conjugado tende a se comportar de forma quadrática com a velocidade [18].

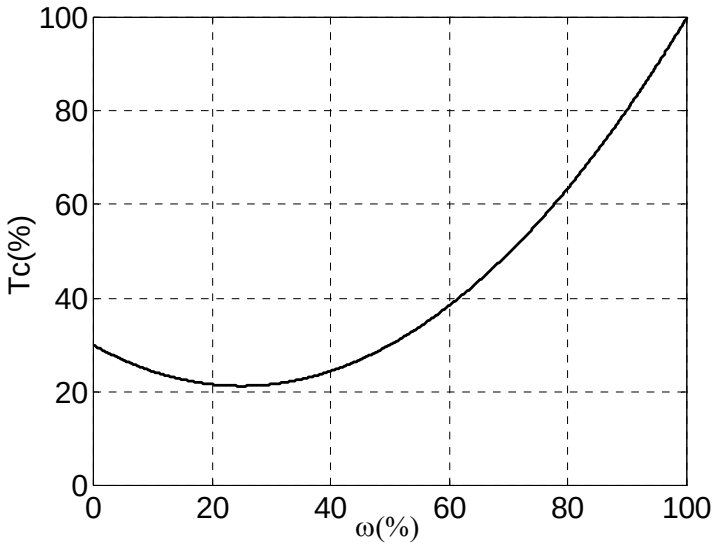


Figura 2.4 – Característica conjugado-velocidade do compressor durante a partida.

Após o compressor atingir sua velocidade plena, o gás adquire a pressão nominal de funcionamento, e assim o conjugado resistente T_c não depende mais da velocidade do motor, permanecendo constante. Em regime permanente, os coeficientes k_1 e k_2 da equação (2.1) são nulos. Desta forma, quando um compressor é desligado, é necessário esperar a descompressão do gás para ligar novamente o equipamento, pois o motor é dimensionado para partir com o compressor descarregado. Este processo pode demorar de 2 a 5 minutos.

2.4 - Classificação dos Condicionadores de Ar

O condicionador de ar pode ser uma simples unidade que refrigera um único recinto, ou ainda uma unidade com potência maior para refrigerar vários recintos, onde o ar é distribuído por dutos. Este último tipo é normalmente utilizado em ambientes amplos tais como edifícios comerciais, sendo denominado unidade central de ar condicionado.

Tanto os aparelhos individuais quanto os centrais são classificados em dois grupos:

- Tipo convencional: que opera com uma mesma potência e;
- Tipo inteligente: cuja potência é variável em função das mudanças de temperatura interna do recinto.

A seguir, são descritos os tipos de condicionadores supracitados.

2.4.1 - Condicionador de ar Tipo Convencional

Este é o equipamento mais comum de se encontrar em instalações residenciais e comerciais. Sua maior difusão encontra-se justificada por questões de custo e maiores facilidades de instalação.

O equipamento é constituído por um módulo único, no qual estão inseridos o evaporador, o condensador e o compressor, conforme mostra a Figura 2.5.

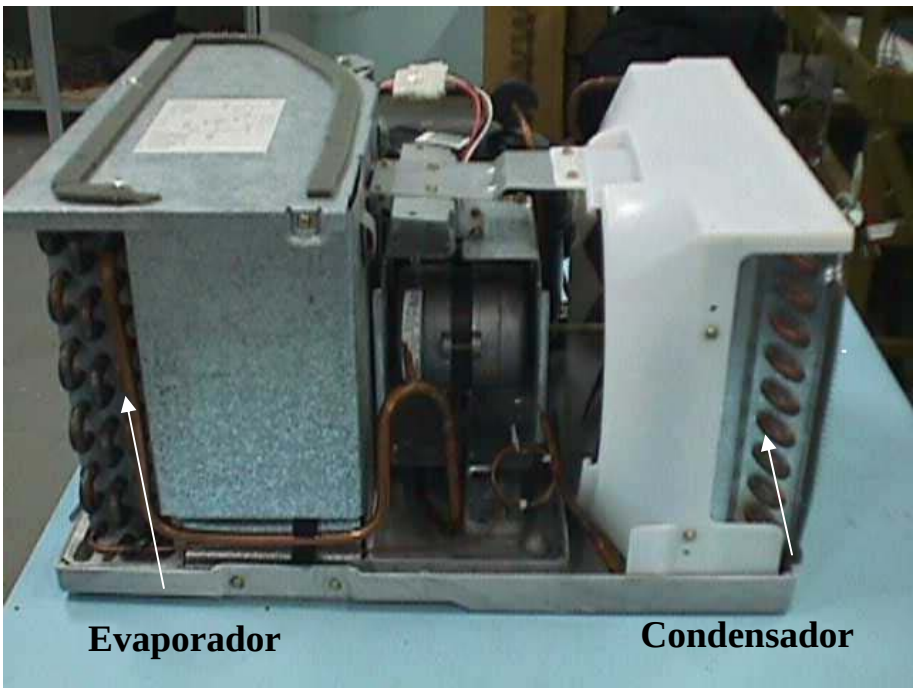


Figura 2.5 – Componentes de um condicionador de ar tipo convencional.

O aparelho acima é conhecido por tipo janela, pois é instalado diretamente em um orifício aberto na parede. Esta versão traz um forte inconveniente relacionado com o ruído sonoro produzido durante o funcionamento, muitos usuários optam por dispositivos constituídos por um evaporador e condensador montados em compartimentos separados. Esta última configuração origina as denominadas versões "*split*". Conforme mostra a Figura 2.6, somente o

evaporador é instalado internamente e a troca de calor é realizada através de um duto.

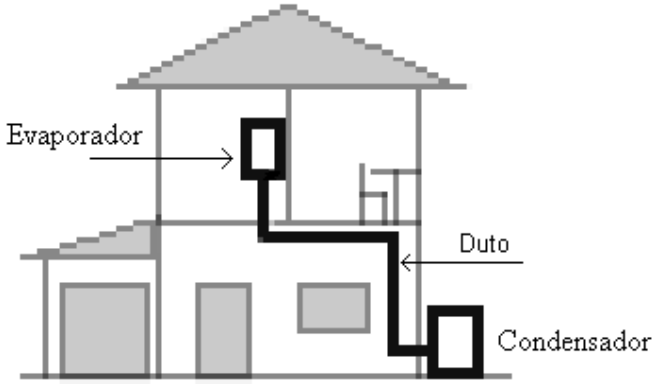


Figura 2.6 – Condicionador de ar tipo convencional "*split*".

Através de um termostato, estes aparelhos devem operar em uma temperatura de referência, mantida entre dois valores previamente definidos, sendo um limite máximo (θ_{max}) e outro mínimo (θ_{min}). Desta forma, o termostato aciona o aparelho quando a temperatura do recinto atinge o valor máximo, e o desliga quando a temperatura cai ao valor mínimo. A Figura 2.7 ilustra o desempenho gráfico da temperatura em consonância com este princípio operacional.

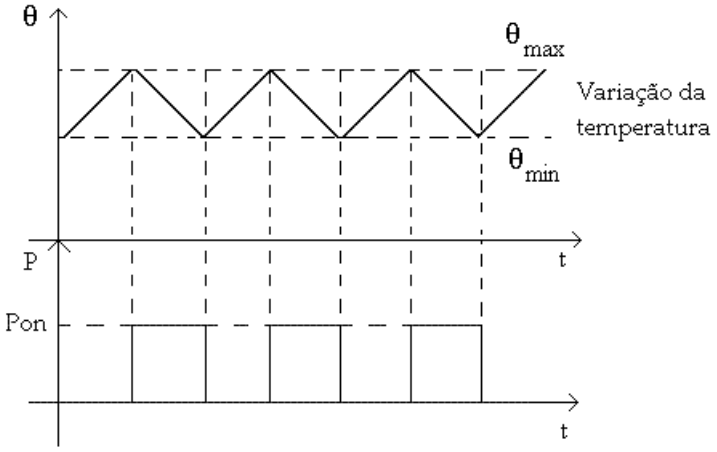


Figura 2.7 – Ciclo do termostato em operação normal.

2.4.2 - Condicionador de Ar Tipo Inteligente

Conforme visto, os condicionadores de ar do tipo convencional funcionam na mesma potência, independentemente da temperatura do recinto. Todavia, com o passar dos anos e as oportunidades criadas pelos avanços tecnológicos, surgiu a necessidade e a factibilidade da construção de aparelhos que, de modo inteligente, compatibilizassem o funcionamento do aparelho com as mudanças de parâmetros do recinto, a exemplo de: número de pessoas no interior, posicionamento das janelas, níveis de insolação e a própria mudança da temperatura externa.

Para implementar tal filosofia de funcionamento, o motor do compressor deveria assumir, fundamentalmente, velocidade variável, o que, na atualidade, é totalmente factível através do emprego de uma fonte de alimentação via um conversor de freqüência. Desta forma, quando a temperatura está alta, a velocidade aumenta, aumentando também o consumo de energia elétrica e produzindo o efeito desejado sobre o ambiente. Quando a temperatura atinge níveis mais baixos, a velocidade diminui, reduzindo a solicitação de potência para o compressor. Esta estratégia, indiscutivelmente, constitui-se também em um processo voltado para a redução do desperdício e a racionalização do uso da energia elétrica.

A idéia não é nova nem exclusiva para os equipamentos condicionadores de ar. De fato, considerando o mercado internacional, o uso de eletrodomésticos com velocidade variável já é intenso em vários paises.

Os dados a seguir mostram uma comparação realizada em 1999 [19]. Contabilizando o número de condicionadores de ar, refrigeradores e lavadoras de roupas, verificou-se que naquele ano, apenas 1% destes aparelhos utilizam conversores de freqüência na América do norte, enquanto no Japão 63% dos

equipamentos citados eram acionados por velocidade variável, sendo este perfil representado na Figura 2.8.

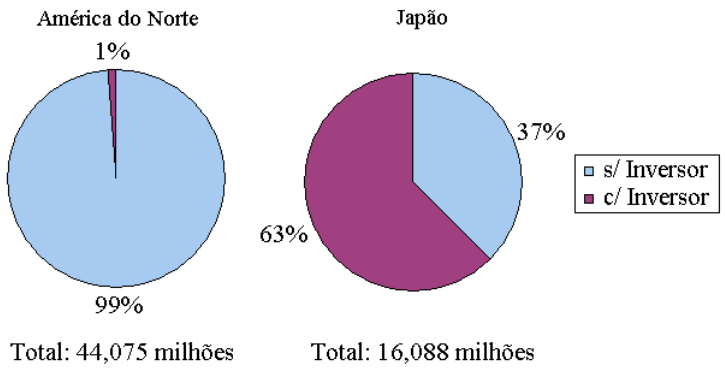


Figura 2.8 – Comparação entre os equipamentos com velocidade variável nos mercados japonês e norte-americano.

Considerando apenas o mercado japonês, utilizou-se a mesma comparação analisando cada tipo de equipamento separadamente. Assim procedendo, fica evidenciado que, no Japão, 86% dos condicionadores de ar são acionados com velocidade variável.

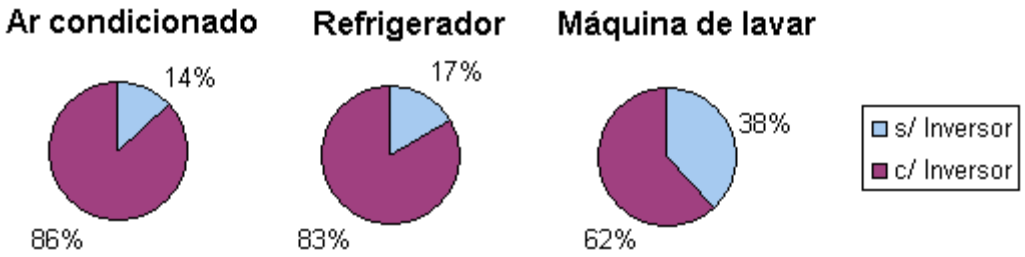


Figura 2.9 – Levantamento dos equipamentos acionados com velocidade variável no mercado japonês.

No Brasil, o número de condicionadores de ar que utiliza este recurso é ainda muito reduzido, porem, diante das vantagens inerentes à tecnologia eletrônica, há uma forte tendência do aumento do número destes aparelhos. O

grande contraponto quanto à difusão desta tecnologia está centrado nos custos visto que o valor inicial destes aparelhos é de cerca do dobro daqueles controlados por termostato [7].

Na versão eletrônica ou inteligente, o condensador e o evaporador também estão em unidades separadas. O compressor e o conversor de freqüência utilizado para o controle de velocidade, ficam instalados externamente ao recinto, junto com o condensador, conforme mostra a Figura 2.10.

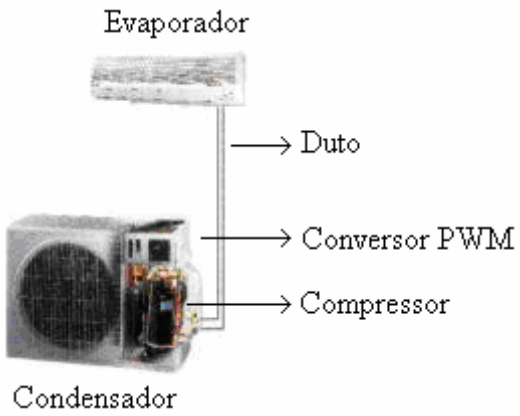


Figura 2.10 – Arranjo físico.

No interior do condensador, encontram-se: o compressor, o conversor de freqüência, o controlador de temperatura e um ventilador que serve para captar e insuflar o ar para o evaporador.

Eletricamente, o aparelho é composto por um retificador, um elo CC com filtro capacitivo e um inversor. A Figura 2.11 sintetiza o arranjo assim obtido.

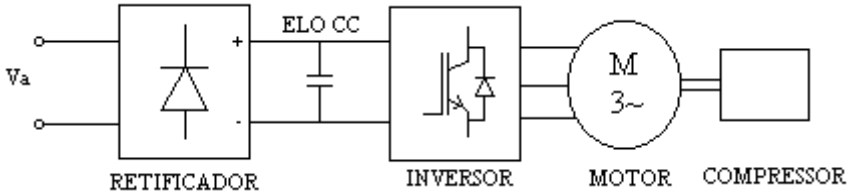


Figura 2.11 – Arranjo típico de um condicionador de ar inteligente.

Por não ser um equipamento de elevada potência, o retificador utilizado é monofásico, pois possibilita a sua instalação em qualquer edificação, sem a necessidade de um sistema trifásico. O inversor possui a saída em três fases, a fim de usufruir as vantagens do motor trifásico em relação ao monofásico, dentre as quais se pode citar: conjugado de partida, menor corrente de partida e maior rendimento.

2.4.3 - Tipos de Controle para Condicionadores Inteligentes

Os sistemas de controle para condicionadores de ar inteligentes visam manter a temperatura interna adequada para o recinto onde estão instalados, sendo assim o controle deve gerar uma ação corretiva em função da variação de temperatura ambiente [20].

Neste contexto destacam-se cinco técnicas atualmente empregadas:

- **Controle "on"-"off"**: utilizado pelos condicionadores convencionais e fundamentado no emprego de um termostato, que liga e desliga o equipamento, nas temperaturas máxima e mínima respectivamente;
- **Controle proporcional**: neste caso o controle atua observando a proporcionalidade do erro advindo entre os valores de temperatura medido e desejado para a variável de controle;
- **Controle proporcional e integral (PI)**: adicionalmente à estratégia acima, este controle utiliza também uma parcela correspondente a integral do erro entre os valores de temperatura medido e desejado;

- **Controle proporcional integral derivativo (PID)**: além da atuação do item anterior, o controlador possui ainda uma ação derivativa proporcional ao erro entre as temperaturas;
- **Controle adaptativo:** Trata-se da aplicação de técnicas digitais para monitoração de variáveis, através de dispositivos microprocessados;
- **Controle inteligente:** Além das estratégias de controle tradicionais apresentadas anteriormente, também são utilizadas em sistemas de ar condicionado técnicas derivadas de inteligência artificial. Este é o caso da lógica "*fuzzy*", algoritmos genéticos e redes neurais. Dentre as vantagens que podem ser obtidas deste controlador destacam-se: melhoria do tempo de resposta e diminuição do consumo de energia.

Um exemplo de condicionador inteligente disponibilizado no mercado de refrigeração corresponde ao modelo "*Set Free* Série 3", da Hitachi. Este produto obedece a última filosofia de controle supra mencionada. Segundo o fabricante, consegue-se uma economia de energia de cerca de 13% ao ano em relação aos equipamentos de mesma capacidade. Isto também se deve ao fato da partida ocorrer com apenas 30% da respectiva potência nominal do equipamento e apenas uma vez por dia. Para este produto o compressor só atinge 100% do consumo em casos esporádicos quando a situação assim o exigir [7].

2.5 - Considerações Finais

Este capítulo, de cunho didático, contemplou aspectos gerais considerados relevantes ao entendimento dos princípios funcionais dos condicionadores de ar, com destaque aos seus componentes básicos elétricos e mecânicos.

Foram apresentados os dois tipos de aparelhos a serem objetos desta pesquisa, quais sejam, o convencional e o inteligente. As vantagens e desvantagens associadas a cada um foram destacadas e as diferenças de seus princípios funcionais também ressaltadas. Ficou também esclarecido que, no que tange ao mercado nacional, o domínio dos dispositivos convencionais ainda é marcante, fato este que se deve, naturalmente, a grande diferença de custos iniciais dos produtos. Os elementos básicos constituintes dos dois tipos de aparelhos também foram discutidos, ficando latente que a modelagem do equipamento convencional deve primar por uma boa representação de seu motor. Por outro lado, os inteligentes contemplam, além do respectivo motor, uma topologia que utiliza os modernos recursos da eletrônica de potência e técnicas de controle.

Isto posto, os próximos passos da pesquisa estarão direcionados ao estabelecimento dos modelos equivalentes dos produtos focados objetivando sua inserção em programas computacionais destinados à avaliação do desempenho dinâmico de sistemas elétricos de potência.

CAPÍTULO III

Modelagem de Condicionadores de Ar Convencional e Inteligente

3.1 - Considerações Iniciais

Objetivando a implementação dos equipamentos previamente considerados em programas computacionais que utilizam técnicas de modelagem no domínio do tempo, as atividades a serem consideradas na seqüência dos trabalhos são direcionadas ao estabelecimento dos modelos matemáticos apropriados aos fins aqui almejados.

Iniciando pelo condicionador de ar do tipo convencional, é conveniente destacar que diversos estudos podem ser encontrados, a exemplo daqueles relacionados em [12], [13] e [14], os quais enfocam o funcionamento isolado de um único equipamento. Os resultados demonstram que os modelos propostos são apropriados aos estudos de diversas perturbações e se adaptam plenamente aos objetivos desta pesquisa. Não obstante este fato vale lembrar que, para fins da avaliação do desempenho de grandes sistemas elétricos de potência, conforme os interesses deste trabalho, a carga sob foco não se apresenta isolada, mas sim, na forma de um conjunto que expressa uma significativa parcela dos consumos P+jQ. Por tal motivo, torna-se imperativo que, além da busca de

modelos específicos de dispositivos, a questão da agregação de cargas também seja tratada com grande relevância às metas deste trabalho.

Adicionalmente à família de equipamentos anteriores, como destacado ao longo deste trabalho, os estudos de desempenho também estão focados para as investigações com os aparelhos condicionadores de ar inteligentes. Diferentemente dos anteriores, estudar o desempenho destes equipamentos em sistemas de potência requer uma compreensão prévia do controle de velocidade dos motores de indução, pois a temperatura depende da velocidade de funcionamento do compressor. Esta correlação compreende aprofundamentos no processo do acionamento do motor, o qual passa a ser suprido via um conversor de freqüência PWM, assim como também investigações sobre as estratégias de controle empregadas e implementadas nas versões comerciais destes produtos.

Dentro deste contexto, este capítulo dedica-se à modelagem matemática e também ao método de agregação de aparelhos condicionadores de ar para fins de estudos de sistemas de potência, considerando as duas versões comerciais acima identificadas. Os pontos básicos a serem tratados compreendem:

- Apresentação das possíveis alternativas para os arranjos físicos que constituem os equipamentos condicionadores de ar comercialmente utilizados, tanto os convencionais como os inteligentes;
- Modelagem de equipamentos individuais, considerando os dois tipos de aparelhos contemplados nesta pesquisa, incluindo, quando for o caso, os controles e as questões vinculadas com a operação e proteção dos conversores de freqüência e;
- Proposição de uma metodologia para a agregação de cargas.

3.2 - Modelagem de Condicionadores de Ar Convencionais

Os aparelhos de ar condicionado tipo convencional utilizam um compressor acionado por um motor monofásico. Este, como se sabe, não possui conjugado de partida, sendo necessário um enrolamento auxiliar para a produção de um campo magnético girante e, conseqüentemente, do conjugado de partida.

Existem quatro tipos básicos de ligação para estes motores na condição de partida [21]. Estes são ilustrados na Figura 3.1. Todas as configurações visam defasar as correntes dos enrolamentos principal e auxiliar em ângulo próximo a 90º, e assim produzir o necessário conjugado de partida.

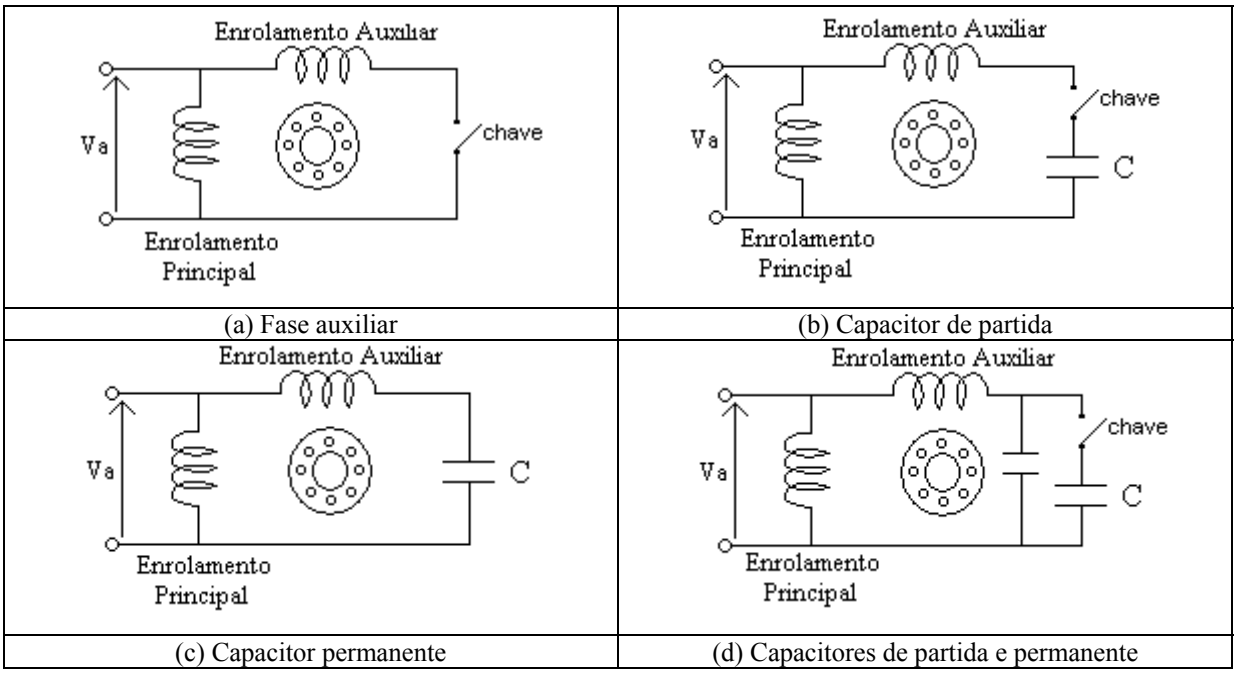


Figura 3.1 – Tipos de ligações de motores monofásicos usados em condicionadores de ar tipo convencional.

Para estas configurações, as características do conjugado de partida em função velocidade estão indicadas na Figura 3.2. Observa-se que somente o enrolamento principal não é capaz de produzir conjugado de partida. Na ordem

crescente, tem-se o motor com capacitor permanente com menor conjugado, seguido dos arranjos fase auxiliar, duplo capacitor e com capacitor de partida.

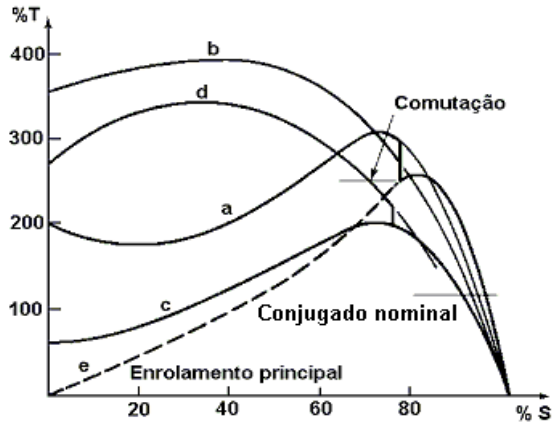


Figura 3.2 – Características conjugado-velocidade para motores monofásicos.

Na ligação com fase auxiliar, representada na Figura 3.1 (a), o enrolamento auxiliar possui uma relação entre resistência e reatância mais alta que a do enrolamento principal. Após a partida do motor, o enrolamento auxiliar é desligado, usualmente por meio de uma chave centrífuga, que opera em torno de 75% da rotação nominal. O conjugado de partida é moderado e o motor possui baixa corrente de partida.

Algumas aplicações típicas incluem ventiladores, bombas centrífugas e equipamentos de escritório. As potências variam de 1/20 a 1/2HP, pois nesta faixa são os motores de menor custo disponíveis, o que faz com que não sejam atraentes para aparelhos de refrigeração. A título de exemplo, o condicionador de 7500 BTU/h, um dos menores da categoria, é acionado por um motor de 1 CV, cuja potência está fora do campo de aplicação do motor com fase auxiliar.

O motor com capacitor de partida, representado na Figura 3.1 (b), também utiliza fase auxiliar, embora o defasamento seja realizado através de um

capacitor, que também é desligado por uma chave centrífuga após a partida do motor. Estes motores são utilizados para compressores, bombas, refrigeração, condicionamento de ar e outras cargas de partida difícil.

É importante ressaltar que nos motores monofásicos são produzidas pulsações de conjugado a dupla freqüência de estator. Isto ocorre através das interações das ondas de fluxo e *fmm* que giram em sentidos opostos, passando uma pela outra e duas vezes a velocidade síncrona. Estas interações não produzem conjugado médio, mas tendem a fazer o motor mais ruidoso do que um motor polifásico. Tais pulsações de conjugado são inevitáveis nos motores monofásicos devido às pulsações na potência instantânea de entrada, interentes de um circuito monofásico [21], o que torna atraente o uso de capacitores para atenuação destas pulsações.

Na Figura 3.1 (c), o capacitor não é desligado após a partida do motor. A sua construção pode ser feita simplesmente pela omissão da chave. Nesta configuração o capacitor e o enrolamento auxiliar podem ser projetados para perfeita operação bifásica para qualquer carga desejada. As pulsações de freqüência dupla do estator podem ser reduzidas, pois o capacitor funciona como reservatório de energia para aplainar as pulsações na entrada da linha monofásica. O resultado é um motor sem vibração. O conjugado de partida precisa ser sacrificado porque o capacitor é dimensionado para operação em regime permanente. Devido a estas razões este motor apresenta melhor rendimento e fator de potência em funcionamento a plena carga e assim tem a sua aceitação mais ampla no mercado de condicionadores de ar.

O motor com um capacitor de partida e outro de plena carga, mostrado na Figura 3.1 (d), possui as vantagens dos dois arranjos anteriores, obtendo-se, assim, um melhor desempenho em condições transitórias e também em regime permanente. O inconveniente desta ligação é o custo elevado, visto que são utilizados dois capacitores e a chave centrífuga.

Com base nestas informações técnicas, os fabricantes de condicionadores de ar optam pelos motores com capacitores, sendo na sua maioria com capacitor permanente, em função do baixo custo e também porque o usuário visa uma maior eficiência energética. Sendo assim neste trabalho será dada ênfase a modelagem deste tipo de motor para os estudos aqui realizados.

Os enrolamentos deste tipo de máquina são indicados na Figura 3.3, onde há dois pares de enrolamentos ortogonais entre si, sendo um para o estator e outro para o rotor.

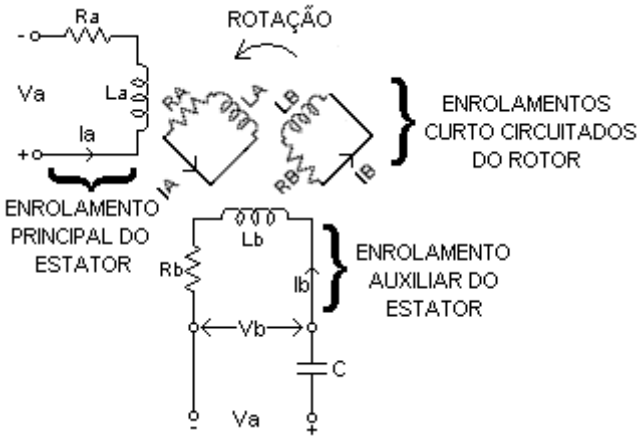


Figura 3.3 – Enrolamentos do motor a capacitor permanente.

O capacitor C está em série com o enrolamento auxiliar e os enrolamentos do rotor estão em curto circuito por se tratar de um rotor em gaiola.

Considerando as conexões da Figura 3.3, o modelo no domínio do tempo é obtido pela análise dos campos do estator e do rotor, cuja representação está na Figura 3.4.

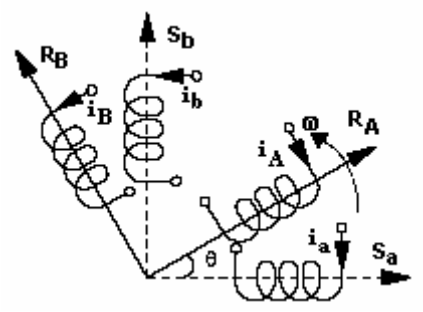


Figura 3.4 - Representação dos campos do estator e do rotor para o motor de indução monofásico.

Os eixos estacionários S_a e S_b representam os enrolamentos principal e auxiliar respectivamente, enquanto que os eixos rotativos R_A e R_B representam os enrolamentos do rotor.

O modelo proposto em [6] está fundamentado nas equações abaixo, todas utilizando o domínio do tempo como base para representação.

- *Equações elétricas:*

$$\begin{aligned} v_a &= r_a i_a + L_{aa}\dot{i}_a + L_{aA}\cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)\dot{i}_A - L_{aA}\frac{p}{2}\operatorname{sen}\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_A\omega \\ &+ L_{aB}\operatorname{sen}\left(\frac{p}{2}\theta\right)\dot{i}_B + L_{aB}\frac{p}{2}\cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_B\omega \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\begin{aligned} v_b &= r_b i_b + \mathrm{L}_{bb}\dot{i}_b - \mathrm{L}_{bA}\operatorname{sen}\left(\frac{p}{2}\theta\right)\dot{i}_A - \mathrm{L}_{bA}\frac{p}{2}\cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_A\omega \\ &+ \mathrm{L}_{bB}\cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)\dot{i}_B - \mathrm{L}_{bB}\frac{p}{2}\operatorname{sen}\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_B\omega + v_{cap} \end{aligned} \tag{3.2}$$

$$0 = r_A i_A + \mathrm{L}_{AA}\dot{i}_A + \mathrm{L}_{aA}\cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)\dot{i}_a - \mathrm{L}_{aA}\frac{p}{2}\mathrm{sen}\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_a\omega$$
$$-\mathrm{L}_{bA}\,\mathrm{sen}\left(\frac{p}{2}\theta\right)\dot{i}_b - \mathrm{L}_{bA}\cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)\frac{p}{2}i_b\omega \tag{3.3}$$

$$0 = r_B i_B + \mathrm{L}_{BB}\dot{i}_B + \mathrm{L}_{aB}\,\mathrm{sen}\left(\frac{p}{2}\theta\right)\dot{i}_a + \mathrm{L}_{aB}\frac{p}{2}\cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_a\omega$$
$$+\mathrm{L}_{bB}\cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)\dot{i}_b - \mathrm{L}_{bB}\frac{p}{2}\mathrm{sen}\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_b\omega \tag{3.4}$$

$$T = -\left(\frac{p}{2}\right)\left[\mathrm{L}_{aA}\,\mathrm{sen}\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_A + \mathrm{L}_{aB}\cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_B\right]i_a$$
$$+\left(\frac{p}{2}\right)\left[\mathrm{L}_{bA}\cos\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_A - \mathrm{L}_{bB}\,\mathrm{sen}\left(\frac{p}{2}\theta\right)i_B\right]i_b - J\dot{\omega} - B\omega \tag{3.5}$$

$$0 = -\frac{1}{C}i_b + \dot{v}_{cap} \tag{3.6}$$

$$0 = -\omega + \dot{\theta} \tag{3.7}$$

onde:

- v_a, v_b, i_a, i_b: tensões e correntes instantâneas nos enrolamentos do estator;
- v_A, v_B, i_A, i_B: tensões e correntes instantâneas dos enrolamentos do rotor;
- v_{cap}: tensão instantânea no capacitor;
- C: capacitor permanente;
- T: conjugado eletromagnético;
- L_{ii}: indutância de dispersão dos enrolamentos. (i=a, b, A, B);
- M_{ij}: indutância de mutua entre enrolamentos do estator (i=a, b) e do rotor (j=A, B);
- J: momento de inércia;
- B: coeficiente de atrito viscoso;
- p: número de pólos;

- ω: velocidade angular do rotor;
- θ: ângulo entre os campos do estator e do rotor.

Nas equações anteriores, as tensões rotóricas v_A e v_B aparecem com valor nulo em função do rotor estar em curto circuito.

3.3 - Modelagem de Condicionadores de Ar Tipo Inteligente

Este tipo de aparelho utiliza o motor de indução trifásico, conectado a um conversor de freqüência.

Para estudos de estabilidade é utilizado o modelo no domínio da freqüência que considera os transitórios elétricos e mecânicos do rotor [22]. Em regime permanente é valido o circuito equivalente da Figura 3.5, que mostra as resistências e reatâncias do estator, do rotor, além da reatância do ramo magnetizante.

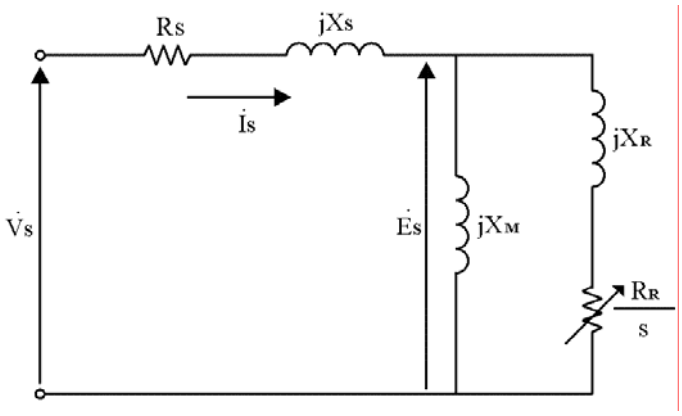


Figura 3.5 - Circuito equivalente do motor de indução.

Já em regime transitório, o circuito equivalente é considerado como uma tensão transitória atrás de uma reatância transitória, conforme mostrado na Figura 3.6.

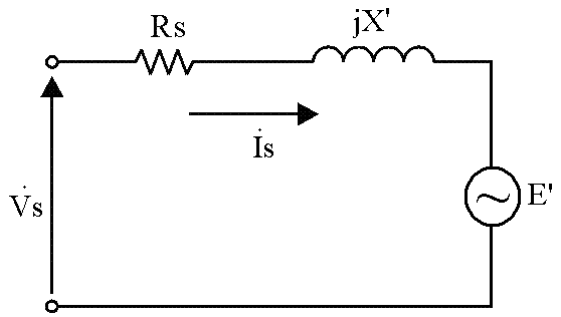


Figura 3.6 - Circuito equivalente do motor de indução de gaiola simples em regime transitório.

Na Figura 3.6 é utilizada a seguinte notação:

- E´: Tensão transitória do motor;
- X´: Reatância transitória do motor.

O modelo é composto pelas seguintes equações:

$$\dot{V}_s - \dot{E}' = \left(R_s + jX'\right)\dot{I}_s \tag{3.8}$$

$$\frac{d\dot{E}'}{dt} = \frac{1}{\tau'_o}\left[j\left(X_o - X'\right)\dot{I}_s - \dot{E}'\right] - j2\pi f\, s\, \dot{E}' \tag{3.9}$$

$$T = \mathrm{Re}\left\{\dot{E}'\, \dot{I}_s^*\right\} \tag{3.10}$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{2H}(T - T_c) \tag{3.11}$$

Onde:

- V_s: Tensão nos terminais do estator;
- I_s: Corrente no estator;
- s: Escorregamento;
- H: Constante de inércia.

As reatâncias transitória (X'), de circuito aberto (X_0) e a constante de tempo de circuito aberto τ_0 são dadas por:

$$X' = X_S + \frac{X_M X_R}{X_M + X_R} \tag{3.12}$$

$$X_o = X_S + X_M \tag{3.13}$$

$$\tau'_o = \frac{X_R + X_M}{2\pi f R_R} \tag{3.14}$$

Este modelo é amplamente utilizado no programa de estabilidade TRANSUFU do Grupo de Dinâmica de Sistemas Elétricos da UFU.

As tensões e correntes envolvidas são todas na forma fasorial e também é considerada a representação unifilar. Porém, o fato de se considerar o funcionamento do motor conectado a um inversor trifásico, com três formas de onda definidas, este modelo não é apropriado, sendo necessária a representação do motor no domínio do tempo. Isto permite a avaliação de diversas grandezas que o modelo anterior não permite, no entanto os tempos de simulação são bem maiores.

O desenvolvimento do modelo no domínio do tempo consiste na análise gráfica dos campos do estator e do rotor, cuja representação está indicada na Figura 3.7.

Os eixos estacionários S_A, S_B e S_C representam os enrolamentos do estator, enquanto que os eixos girantes R_A, R_B e R_C representam os enrolamentos do rotor.

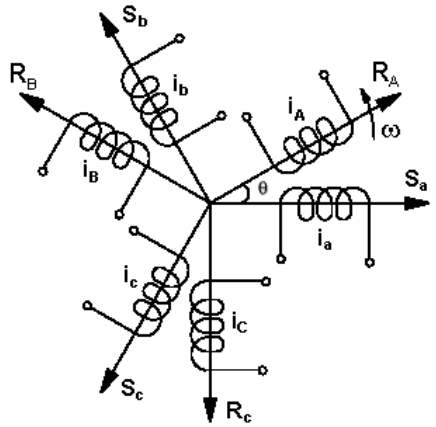


Figura 3.7 - Campos do estator e do rotor para o motor de indução trifásico.

Segundo [23], é convencionado "a,b,c" como as fases do estator, e "A, B, C" como as fases do rotor. Assim, pode-se escrever genericamente:

$$v_i = r_i i_i + \frac{d\lambda_i}{dt} \tag{3.15}$$

onde:

- v_i,i_i: valores instantâneos da tensão e corrente na fase "i"(i pode ser a,b,c,A,B,C);
- λ_i: fluxo concatenado na fase "i".

O valor instantâneo do conjugado eletromagnético (T) pode ser obtido através da variação da coenergia magnética em relação aos deslocamentos

angulares mecânicos do rotor. Desta forma, obtém-se como resultado a expressão (3.16), onde p é o número de pólos da máquina.

$$T = \frac{p}{2} \sum \sum i_i i_j \frac{dL_{ij}}{d\theta} \tag{3.16}$$

onde i_i e i_j são as correntes nos enrolamentos i e j respectivamente, com i e j assumindo os índices a,b,c,A,B,C.

Fazendo-se "i" assumir: a,b,c,A,B,C, obtém-se, a partir de (3.17), o sistema de equações, que pode ser colocado na forma matricial. Aplicando-se a segunda Lei de Newton no eixo da máquina, obtém-se (3.18) e (3.19).

$$\frac{d[I]}{dt} = [L]^{-1}\left([V] - [D][I]\right) \tag{3.17}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J}\left(T - T_c\right) \tag{3.18}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \tag{3.19}$$

onde:

- [L]: diagonal principal $\Rightarrow$ L_i para i = a,b,c,A,B,C;
- [D]: d[L]/dt + [R];
- [R]: matriz diagonal das resistências por fase de estator e rotor;
- [I]: vetor coluna das correntes das fases a,b,c,A,B,C;
- [V]: vetor coluna das tensões das fases a,b,c,A,B,C;
- J: momento de inércia das partes girantes;

- T: conjugado eletromagnético dado por (3.16);
- T_c: conjugado resistente de carga em função de ω.

Para o caso particular da máquina equilibrada, a matriz [L] e a equação do conjugado T tornam-se (3.20) e (3.21), respectivamente.

$$[L]=\begin{bmatrix} L_{SS}+L_S & M_{SS} & M_{SS} & MA_{SR} & MB_{SR} & MC_{SR} \\ M_{SS} & L_{SS}+L_S & M_{SS} & MC_{SR} & MA_{SR} & MB_{SR} \\ M_{SS} & M_{SS} & L_{SS}+L_S & MB_{SR} & MC_{SR} & MA_{SR} \\ MA_{SR} & MC_{SR} & MB_{SR} & L_{RR}+L_R & M_{RR} & M_{RR} \\ MB_{SR} & MA_{SR} & MC_{SR} & M_{RR} & L_{RR}+L_R & M_{RR} \\ MC_{SR} & MB_{SR} & MC_{SR} & M_{RR} & M_{RR} & L_{RR}+L_R \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

$$T=-L_{SR}\frac{p}{2}\left\{\begin{array}{l} (i_a i_A+i_b i_B+i_c i_C)sen\theta \\ +\left(i_a i_B+i_b i_C+i_c i_A\right)sen\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) \\ +\left(i_a i_C+i_b i_A+i_c i_B\right)sen\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) \end{array}\right\} \tag{3.21}$$

$$M_{SS}=L_{SS}\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \tag{3.22}$$

$$M_{RR}=L_{RR}\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \tag{3.23}$$

$$MA_{SR}=L_{SR}\cos\theta \tag{3.24}$$

$$MB_{SR}=L_{SR}\cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) \tag{3.25}$$

$$MC_{SR}=L_{SR}\cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) \tag{3.26}$$

onde:

- L_S: indutância de dispersão por fase do estator;
- L_R: indutância de dispersão por fase do rotor, referida ao estator;
- $L_{SR} = L_{RR} = L_{SS}$: 2/3 da indutância de magnetização por fase;

Os parâmetros L_{SR}, L_{RR}, L_{SS}, bem como M são calculados a partir dos parâmetros do circuito equivalente.

Como já destacado ao longo deste trabalho, estes aparelhos diferem dos convencionais pela inclusão de uma estratégia para o controle de velocidade do motor do compressor com a finalidade de manter a temperatura ambiente num patamar desejado. Para a composição da estrutura construtiva deste novo produto utiliza-se duas unidades principais, a saber, um conversor de freqüência para o suprimento do motor e um sistema de controle que, em observância às variáveis a serem controladas (temperatura), definem a operação do dispositivo de eletrônica de potência.

Ao longo dos anos, duas técnicas para o controle dos conversores de freqüência foram desenvolvidas e consagradas na literatura. Estas, de um modo global, encontram-se sintetizadas em [24].

Na primeira delas, denominada de controle escalar as variáveis de controle são as amplitudes das grandezas CC. A segunda estratégia, mais atual e ainda menos difundida, fundamenta-se no conhecido controle vetorial. Ao utilizar esta metodologia, as variáveis são controladas tanto em magnitude como em ângulo de fase. Neste trabalho, em sintonia com a realidade do mercado, adota-se como premissa o controle escalar, que é empregado para fins do processo de modulação de largura de pulsos (PWM) do conversor de freqüências.

3.3.1 - Operação com Fluxo de Entreferro Constante

Tradicionalmente, os condicionadores de ar possuem controle de velocidade que utilizam o principio da constância da relação entre o valor RMS da tensão de saída e a sua respectiva freqüência (relação volts/hertz constante). Esta operação tem por meta principal obter um conjugado constante.

Para uma melhor compreensão deste princípio [24] seja o circuito equivalente de um motor de indução trifásico, no domínio da freqüência, mostrado na Figura 3.5.

O fluxo magnético girante induz a força eletromotriz (*fem*) E_s no enrolamento do estator, a qual, classicamente é dada por:

$$E_s = \frac{\omega_s \Phi_s k_w N_s}{\sqrt{2}} = 4,44 k_w f_s \Phi_s \tag{3.27}$$

onde:

- ω_s – velocidade angular [rad/s];
- Φ_s – fluxo magnético de entreferro [Wb];
- k_w – fator de enrolamento;
- f_s – freqüência de estator [Hz];
- N_s – número de espiras em série por fase.

O fluxo pode se expressar como:

$$\Phi_s = \frac{1}{4,44 k_w} \frac{E_s}{f_s} = k \frac{E_s}{f_s} \tag{3.28}$$

sendo:

$$k = \frac{1}{4,44k_w} \tag{3.29}$$

Conclui-se, então, que o fluxo Φ_s é proporcional a E_s/f_s. Portanto, para uma operação nos termos postulados, o fluxo de entreferro deve ser mantido constante para todas as freqüências de operação definidas para o conversor; o que se obtém quando a relação E_s/f_s for constante.

Através do circuito equivalente do motor de indução é obtida a seguinte expressão do conjugado eletromagnético [24].

$$T = 3\left(\frac{p}{2}\right)\left(\frac{E_s}{\omega_s}\right)^2\left[\frac{\omega_{sr}R_R}{R_R{}^2 + \left(\omega_{sr}L_R\right)^2}\right] \tag{3.30}$$

onde:

- p: Número de pólos;
- ω_s: Freqüência angular síncrona;
- ω_{sr}: Freqüência angular de escorregamento;
- R_R: Resistência do rotor;
- L_R: Indutância de dispersão do rotor.

Através da equação (3.30) verifica-se que se a relação E_S/ω_S, ou E_S/f_S, for mantida constante, o conjugado será função somente da freqüência de escorregamento. Em outras palavras, o conjugado eletromagnético é proporcional ao quadrado do fluxo, para uma dada freqüência de escorregamento.

As curvas características do conjugado são iguais para diferentes valores de ω_S, sendo apenas transladadas umas das outras, conforme mostra a Figura 3.8.

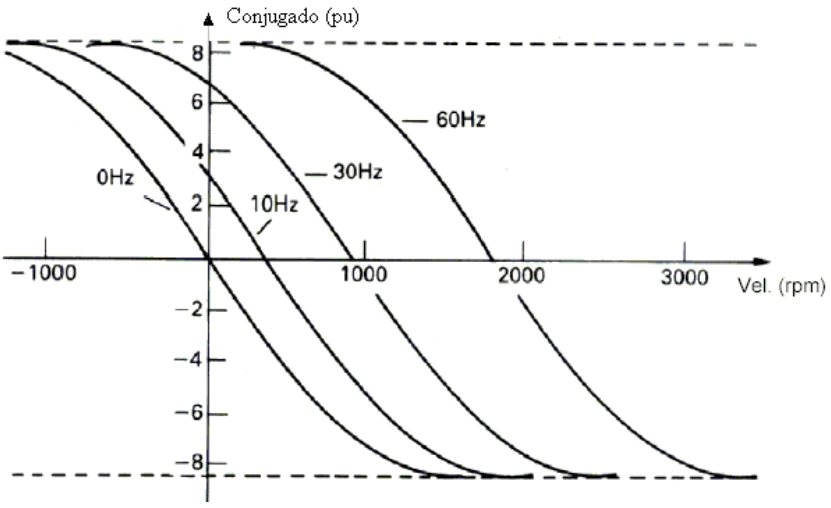


Figura 3.8 - Características de conjugado-velocidade para um motor de indução sob E/f constante.

Na prática o controle E_S/ω_S não é muito utilizado pois requer máquinas com controle de fluxo, além de malhas de realimentação e integração de sinais de corrente, tornando o processo mais caro. Em decorrência disso a adoção do controle V_S/f_s constante por parte dos fabricantes.

3.3.2 - Operação com V_s/f_s constante

A expressão (3.30) determina o valor do conjugado em função de E_S, mas também é possível obtê-lo em função da tensão do estator V_s, conforme mostra a equação (3.31) [24].

$$T = 3\left(\frac{p}{2}\right)\left(\frac{V_s}{\omega_s}\right)^2 \frac{\left(\frac{X_M{}^2\omega_{sr}}{R_R}\right)}{\left[R_S - \frac{\omega_{sr}}{\omega_s R_R}\left(X_{SS}X_{RR} - X_M{}^2\right)\right]^2 + \left[X_{SS} + \frac{\omega_{sr}R_S X_{RR}}{\omega_s R_R}\right]^2} \tag{3.31}$$

onde:

- $X_{SS}=X_S+X_M$;
- $X_{RR}=X_R+X_M$.

Verifica-se que o conjugado depende da relação V_s/ω_s, ou V_s/f_s, além da freqüências angulares síncrona ω_s e de escorregamento ω_{sr}.

Caso a resistência de estator seja nula, a equação (3.31) fica da seguinte forma:

$$T = 3\left(\frac{p}{2}\right)\left(\frac{V_s}{\omega_s}\right)^2 \frac{\left(\frac{X_M{}^2\omega_{sr}}{R_R}\right)}{\left[-\frac{\omega_{sr}}{\omega_s R_R}\left(X_{SS}X_{RR} - X_M{}^2\right)\right]^2 + X_{SS}{}^2} \tag{3.32}$$

Colocando as reatâncias em função das indutâncias, o conjugado pode ser dado por:

$$T = 3\left(\frac{p}{2}\right)\left(\frac{V_s}{\omega_s}\right)^2 \frac{\left(\frac{\omega_s{}^2 L_m{}^2\omega_{sr}}{R_R}\right)}{\left[-\frac{\omega_{sr}}{\omega_s R_R}\omega_s{}^2\left(L_{SS}L_{RR} - L_M{}^2\right)\right]^2 + \omega_s{}^2 L_{SS}{}^2} \tag{3.33}$$

que simplificando-se resulta em:

$$T = 3\left(\frac{p}{2}\right)\left(\frac{V_s}{\omega_s}\right)^2 \frac{\left(\frac{L_M{}^2\omega_{sr}}{R_R}\right)}{\left[-\frac{\omega_{sr}}{R_R}\left(L_{SS}L_{RR} - L_M{}^2\right)\right]^2 + L_{SS}{}^2} \tag{3.34}$$

Assim constata-se que quando a resistência do estator for nula, o conjugado depende da relação V_s/ω_s e da freqüência de escorregamento ω_{sr}, ficando agora independente da freqüência síncrona ω_s, de forma similar ao controle E_s/ω_s. No entanto, a resistência do estator não é nula por razões construtivas.

Se a queda de tensão no estator é pequena, V_s e E_s são aproximadamente iguais e, sob tais circunstâncias, o fluxo de entreferro é mantido inalterado através da conservação da relação V_s/f_s constante.

Ao contrário da operação com fluxo constante, está filosofia de operação é largamente utilizada em sistemas mais simples, com malha aberta. É importante mencionar que, à medida que a freqüência de operação é bastante reduzida, o desempenho deste acionamento pode apresentar perda das propriedades almejadas.

Para uma relação V_s/f_s nos terminais do motor, a característica de conjugado pode ser obtida quando os parâmetros das máquinas são conhecidos. A Figura 3.9 mostrada na seqüência ilustra o comportamento do conjugado em função da velocidade do rotor, para diferentes relações V_s/f_s [24]:

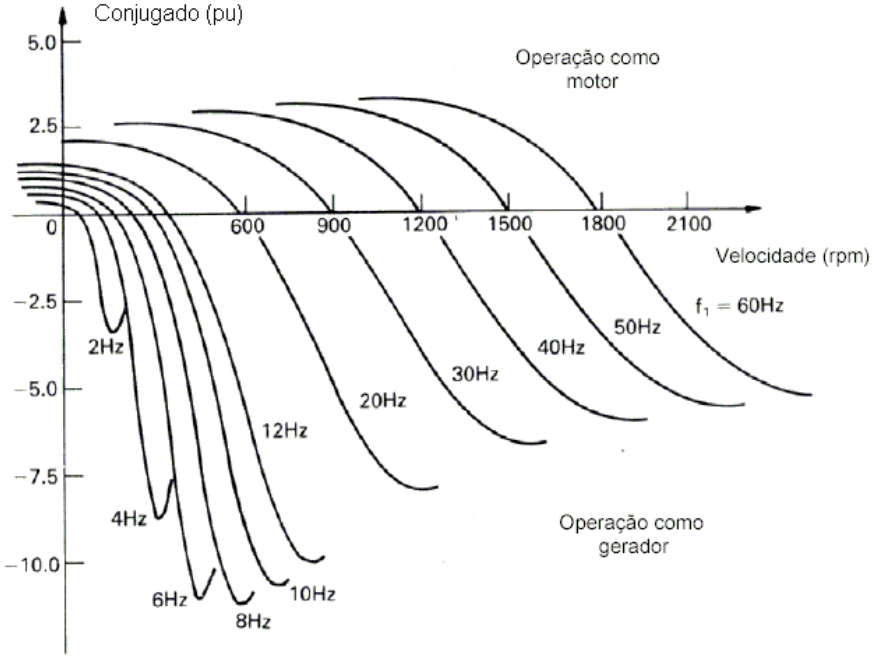


Figura 3.9 - Características de conjugado de um motor de indução para a operação sob V_s/f_s constante.

Observa-se na Figura 3.9, que para os pontos de funcionamento que requerem baixas freqüências, a tensão V_s é menor, acarretando uma acentuada queda de tensão na resistência do estator R_sI_s. Isto causa uma severa sub-excitação, ocasionando uma intolerável redução na capacidade de produção de conjugado.

Este problema pode ser contornado através da implementação de uma lógica complementar no controle da relação tensão/freqüência. Isto se faz presente através de um reforço do valor RMS da tensão estabelecida pelo conversor quando de seu funcionamento com freqüências mais baixas. Este recurso é conhecido por "reforço de tensão" ou "*boost*" de tensão. Para o uso desta estratégia pode-se empregar alguns recursos em amplo uso pela eletrônica de potência. Duas soluções típicas encontram-se na Figura 3.10, uma empregando o que se denomina por *off-set* linear e outra que utiliza de um *off-set* não-linear. Na característica não-linear, os valores de tensão e freqüência são

proporcionais em freqüências maiores, mas um incremento na tensão é gradualmente introduzido à medida que a freqüência nula se aproxima. Na característica linear, uma componente de tensão de valor constante é adicionada à componente proporcional à freqüência, definindo a tensão terminal do conversor.

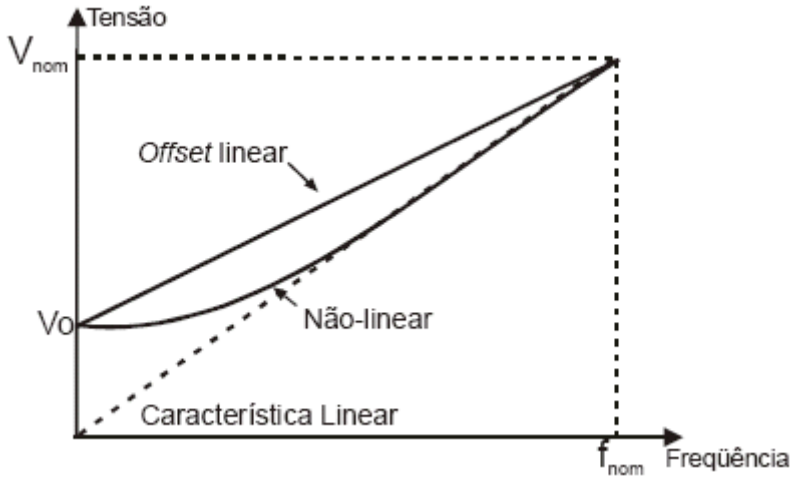


Figura 3.10 – Estratégias de ajuste da característica *V/f* para a manutenção do fluxo de entreferro.

3.3.3 - Funcionamento do Conversor de Freqüência

O conversor de freqüência é composto por uma ponte retificadora, um elo CC e um inversor com saída trifásica. Os inversores podem ser classificados conforme o tipo de alimentação CC existente na sua entrada, isto é:

- VSI ("*Voltage Source Inverter*") – inversor por fonte de tensão;
- CSI ("*Current Source Inverter*") – inversor por fonte de corrente.

O inversor VSI utiliza um filtro capacitivo no elo CC, enquanto o tipo CSI utiliza um indutor. Nas aplicações para condicionadores de ar, utiliza-se o inversor VSI, cuja topologia construtiva é sintetizada na Figura 3.11.

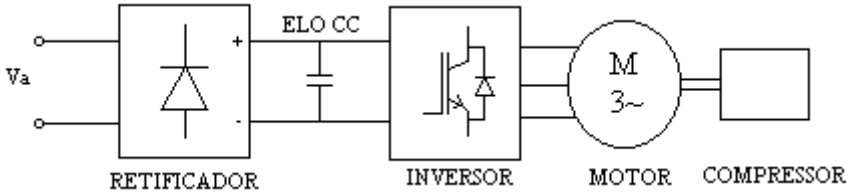


Figura 3.11 – Arranjo do condicionador de ar com conversor VSI.

O arranjo da Figura 3.11 compreende as seguintes unidades básicas:

a) Retificador

Constitui-se de uma ponte retificadora não controlada, cuja saída alimenta o elo CC.

b) Elo CC

Trata-se de um filtro capacitivo, com o objetivo de manter a tensão CC constante e com ondulação reduzida. Outra função do capacitor é estabilizar a tensão na saída do retificador, mesmo na ocorrência de distúrbios no lado CA.

c) Inversor

Consiste de uma ponte inversora trifásica controlada. De acordo com a freqüência de chaveamento dos elementos semicondutores, a tensão trifásica CA pode ser variada em amplitude e freqüência. Desta forma, pode-se obter um controle efetivo da velocidade do motor.

d) Lógica de disparo

Esta unidade é responsável pelo instante de abertura e fechamento das chaves semicondutoras do inversor. A técnica PWM é a mais utilizada nos inversores VSI. A definição do instante de operação de cada chave é realizada pela comparação de um sinal senoidal com uma onda triangular, conforme mostra a Figura 3.12. Assim, quando a moduladora v_r (referência senoidal) é maior que a portadora v_c (triangular), a saída do comparador causa a entrada em condução da chave semicondutora correspondente, e quando v_r é menor que v_c a chave semicondutora é bloqueada.

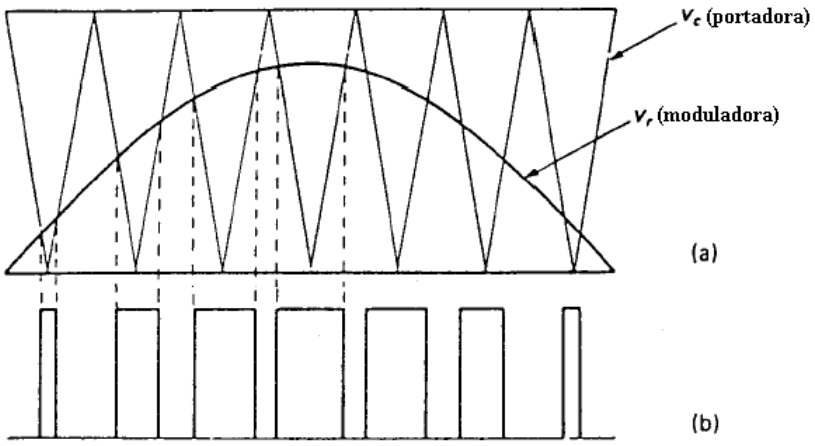


Figura 3.12 – Modulação por largura de pulso (PWM).

Deve-se ressaltar que a freqüência da onda moduladora v_r determina a freqüência fundamental da tensão nos terminais do inversor. Assim, quando é necessário alterar a freqüência de operação do motor, deve-se modificar a freqüência da moduladora.

A Figura 3.13 (a) mostra as tensões de saída de um inversor PWM trifásico, onde são apresentadas as tensões senoidais de referência e a onda triangular. Observa-se que as referências trifásicas equilibradas são comparadas com

somente uma onda triangular. A Figura 3.13 (b), (c) e (d) corresponde às saídas de cada um dos três comparadores, e também às chamadas tensões de pólos do inversor, que combinadas resultam nas tensões de linha de saída, como mostra a Figura 3.13 (e).

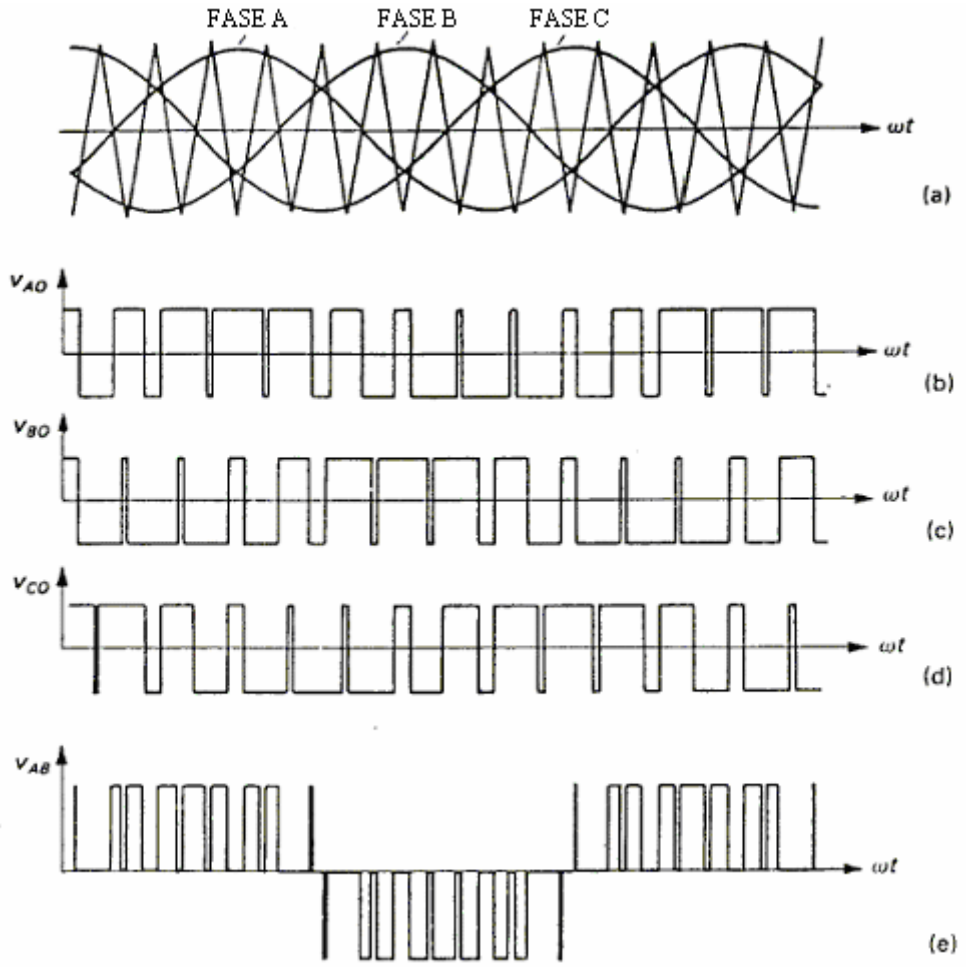
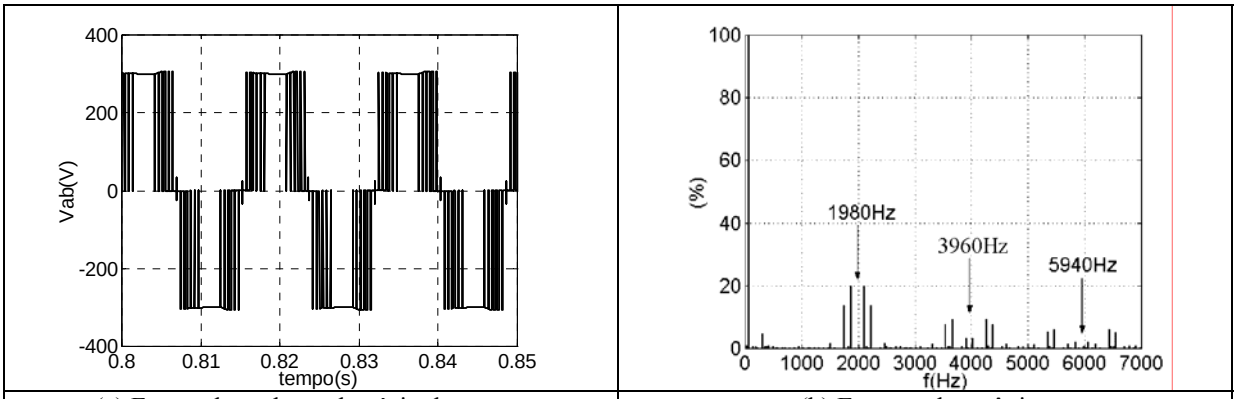


Figura 3.13 – Formas de onda da tensão de saída para o inversor PWM senoidal trifásico.
(a) Tensões de entrada nos comparadores
(b), (c) e (d) Tensões de pólo
(e) Tensão de linha v_{ab} nos terminais de saída do inversor.

O número de chaveamentos por meio ciclo de freqüência fundamental é definido pela relação entre as freqüências das ondas senoidais e triangular.

Quando esta relação é elevada, o inversor fornece uma tensão de saída com elevada qualidade, pois as componentes harmônicas são de ordem elevada, podendo ser facilmente filtradas pela reatância de dispersão do motor.

As componentes harmônicas da tensão de saída do inversor aparecem em bandas laterais dos múltiplos inteiros da freqüência de chaveamento. Assim, para um inversor que esteja operando em 1980Hz, as componentes que aparecem são as bandas laterais a 1980Hz, 3690Hz, 5940Hz e assim por diante, conforme mostra a Figura 3.14.



(a) Forma de onda no domínio do tempo | (b) Espectro harmônico

Figura 3.14 – Tensão de saída do inversor.

Para eliminar as componentes de menor ordem, que são as mais prejudiciais ao motor, uma elevada freqüência de chaveamento apresenta-se como uma boa opção.

Outro aspecto importante a ser observado na lógica de chaveamento PWM é o índice de modulação, que é dado pela relação entre as amplitudes da onda senoidal e triangular. A amplitude da tensão de saída do inversor na freqüência fundamental é diretamente proporcional a este índice, e alcança o valor máximo de 86,3% da tensão do elo CC quando o índice de modulação é unitário [24], ou seja, quando as amplitudes das ondas senoidais e de referência são iguais. Isto

quer dizer que o maior valor eficaz possível da tensão de linha com índice de modulação unitário é de 61% da tensão do elo CC. Por isso, conversores industriais operam com sobremodulação, ou seja, como índice de modulação maior que a unidade, conforme indicado na Figura 3.15. Assim, é possível aproveitar melhor a tensão do elo CC e reduzir o número de chaveamentos por ciclo, mas com a possibilidade de reaparecimento de harmônicas de baixa ordem na tensão de saída.

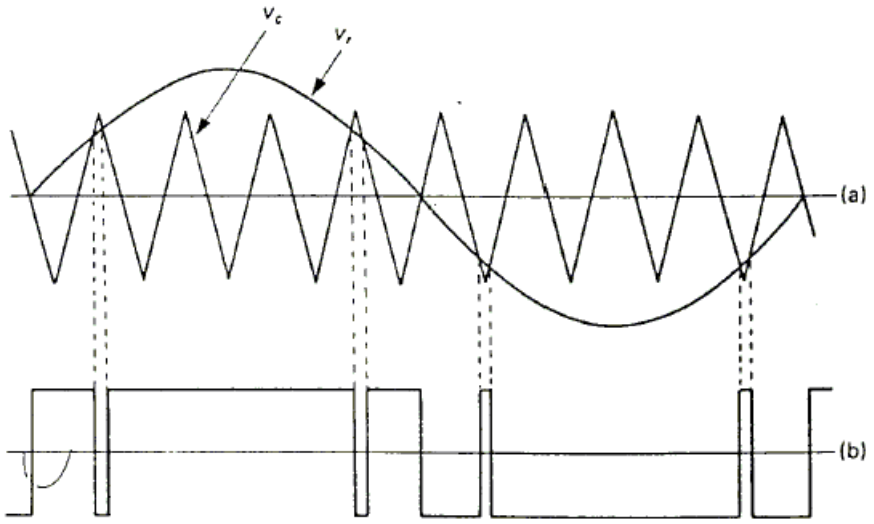


Figura 3.15 – Sobremodulação com o inversor PWM.
(a) Sinais de entrada no comparador
(b) Sinal de saída no comparador.

De forma resumida, o controle da saída de um conversor de freqüências, nos termos aqui discutidos, é feito da seguinte forma:

- Tensão: através do índice de modulação, alterando-se a relação entre as amplitudes das ondas senoidal e triangular;
- Freqüência: através da freqüência da onda moduladora senoidal.

A estratégia desta filosofia visa controlar a velocidade da carga, no entanto, o motor ainda fica susceptível aos afundamentos de tensão, o que pode ocasionar momentaneamente travamento no rotor. Assim, para evitar danos ao compressor, uma proposta encontrada em [9] consiste em incluir um controle adicional para impedir este travamento. Isto é descrito a seguir.

3.3.4 - Fundamentação e Modelagem Matemática da Técnica de Sustentação Durante Afundamentos de Tensão

Devido a perturbações de diversas naturezas que ocorrem no sistema elétrico, a tensão no elo CC poderá ser reduzida. Deste modo, a operação do motor será prejudicada, já que haverá uma redução na relação *V/f*, acarretando um enfraquecimento do fluxo de entreferro.

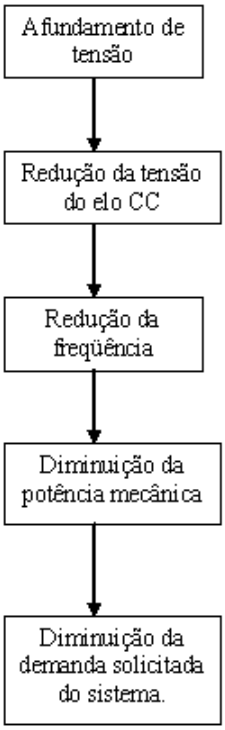


Figura 3.16 – Descrição do processo de sustentação durante subtensões no elo CC.

De modo a garantir que o funcionamento do compressor fique imune a subtensões no elo CC, a estratégia de controle referida em [9] e implementada aqui consiste na redução da freqüência de operação do motor de acordo com a rampa de aceleração de modo a manter a relação *V/f* constante. Como a freqüência é reduzida, a potência mecânica desenvolvida no eixo do motor também diminui, de forma que o equipamento solicita uma menor demanda da rede elétrica.

Como mencionado, para o cálculo da nova freqüência de operação, utiliza-se a rampa de aceleração que descreve o comportamento da tensão em função da freqüência. No caso da operação em modo "*offset*" linear, mostrado na Figura 3.10, tem-se uma equação do seguinte tipo:

$$V_{nom} = V_0 + kf_{nom} \tag{3.35}$$

onde:

- V_{nom} – tensão nominal na saída do inversor [V];
- V_0 – valor da tensão"*boost*" [V];
- k – ganho de tensão por unidade de freqüência, ou seja, coeficiente angular da reta [V/Hz];
- f_{nom} – freqüência nominal de operação [Hz].

Para se calcular a nova freqüência de operação do motor para um determinado valor de tensão, é necessária uma equação que forneça esta relação. Verifica-se na Figura 3.17 que, nas condições nominais, os valores de freqüência

e tensão são f_{nom} e V_{nom}, respectivamente. Caso a tensão seja reduzida para um valor V_1, a freqüência deve ser alterada para f_1.

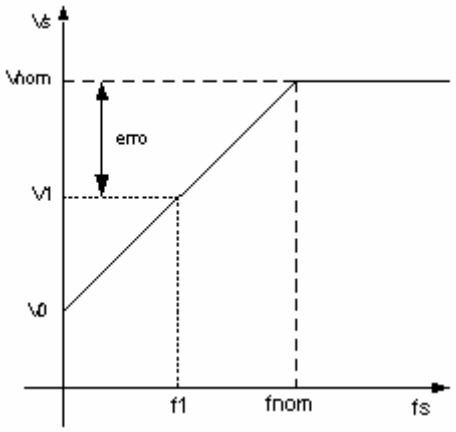


Figura 3.17 – Rampa de aceleração utilizada.

Manipulando a equação (3.35), pode-se definir o coeficiente angular como sendo:

$$k = \frac{V_{nom} - V_0}{f_{nom}} \tag{3.36}$$

No entanto, quando a tensão na saída do conversor é reduzida de V_{nom} para V_1, o coeficiente angular pode também ser obtido por:

$$k = \frac{V_{nom} - V_1}{f_{nom} - f_1} \tag{3.37}$$

Define-se como erro a diferença entre o valor nominal de tensão (V_{nom}) e o atual (V_1). Assim, obtém-se o novo valor da freqüência de operação do motor (f_1) em função do erro e do valor de *boost* de tensão, expresso em função de *k*.

Quando não há erro de tensão, a freqüência de operação é a própria freqüência nominal (f_{nom}).

$$f_1 = f_{nom} - \frac{\text{erro}}{k} \tag{3.38}$$

Para a freqüência f_1, tem-se a velocidade angular ω_1. Desta forma, a onda moduladora é representada por:

$$v_r = V_r \operatorname{sen}(\omega_1 t) \tag{3.39}$$

onde:

- V_r – amplitude da moduladora [V];
- ω_1 – velocidade angular atualizada [rad/s];
- t – tempo [s].

Considerando que V_r é um fasor que gira na velocidade angular ω_1 a partir do eixo de referência, este descreve um arco de ângulo ϕ, conforme a Figura 3.18.

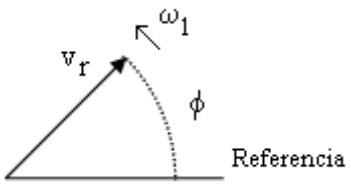


Figura 3.18 – Rotação do fasor V_r.

Se ω_1 for constante no decorrer do tempo, o valor de ϕ é dado por:

$$\phi = \omega_1 t \tag{3.40}$$

Logo, a equação (3.39) torna-se:

$$v_r = V_r \operatorname{sen}(\phi) \tag{3.41}$$

No entanto, para um novo valor de ω_1, alterado em função da variação de tensão, a equação (3.40) deve ser reescrita da seguinte forma:

$$d\phi = \omega_1 dt \tag{3.42}$$

Integrando ambos os lados de (3.42), tem-se:

$$\phi = \int \omega_1 dt \tag{3.43}$$

Assim, a integral da freqüência angular é o valor que deve ser inserido na equação (3.41).

A partir das equações (3.38) a (3.43), é construído o diagrama de blocos para a malha de controle, apresentado na Figura 3.19.

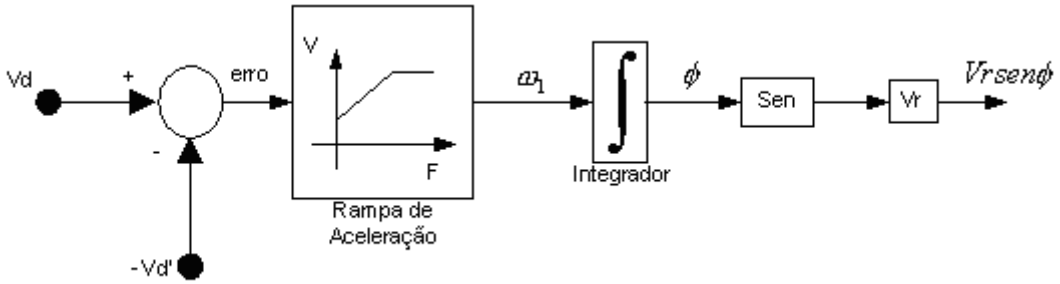


Figura 3.19 – Malha implementada para o controle *V/f*.

As etapas de funcionamento da malha de controle podem ser assim sintetizadas:

(i) O processo é iniciado comparando-se a diferença entre a tensão atual do elo CC (V_d') com o valor nominal (V_d). Os valores de V_d e V_d' são dados por:

$$V_d = \sqrt{2}V_{nom} \tag{3.44}$$

$$V_d^{'} = \sqrt{2}V_1 \tag{3.45}$$

(ii) O valor de erro é aplicado na equação (3.38), que representa a rampa de aceleração, e assim é obtido o novo valor da freqüência angular.

(iii) Em seguida, aplica-se o valor de ω_1 a um bloco integrador, obtendo o valor de ϕ.

(iv) Finalizando, calcula-se o valor de $sen(\phi)$ e multiplica-se pela amplitude V_r, obtendo assim a nova onda moduladora, dada por (3.41).

Para analisar o desempenho desta técnica diante de perturbações que possam ocorrer na rede elétrica, deve-se compará-la com o equipamento condicionador de ar equivalente que possua apenas o conversor de freqüência, o que será realizado no capítulo 4.

3.4 - Metodologia Para a Agregação de Motores de Indução

Objetivando estudos em sistemas de maior porte, torna-se evidente que investigações conduzidas com um único equipamento, ou através da inserção de dezenas ou centenas de dispositivos, não se constituiriam em estratégias lógicas

para as avaliações de desempenho das redes elétricas nas quais os condicionadores de ar constituem-se em cargas expressivas. Por tal motivo considera-se extremamente relevante que, adicionalmente a uma boa representação individual, também se disponha de uma metodologia confiável para a modelagem de um conjunto destas cargas. Este procedimento consiste na essência no método da agregação discutido na seqüência e ilustrado na Figura 3.20. Nesta, como princípio, tem-se que a potência do motor equivalente corresponde a soma das potências individuais das unidades isoladas. Também, quando se aborda o assunto da equivalência, deve-se ter em mente que o modelo, necessariamente, deva reproduzir elétrica e mecanicamente o conjunto de equipamentos específicos. Estes fatos determinam que o assunto deva ser aprofundado, como será feito na seqüência.

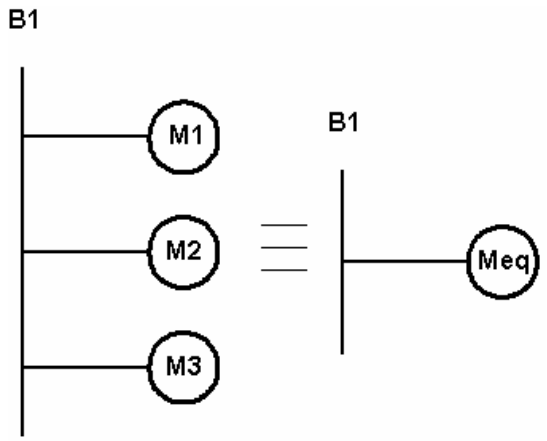


Figura 3.20 – Agregação de vários motores em um único motor equivalente.

A literatura contempla o tema da agregação com alguns documentos. Este é caso da referência [15], a qual descreve uma proposta para a obtenção de um motor de indução equivalente representativo de um conjunto de máquinas

trifásicas diversas. Este procedimento é iniciado através do circuito equivalente do motor mostrado na Figura 3.5.

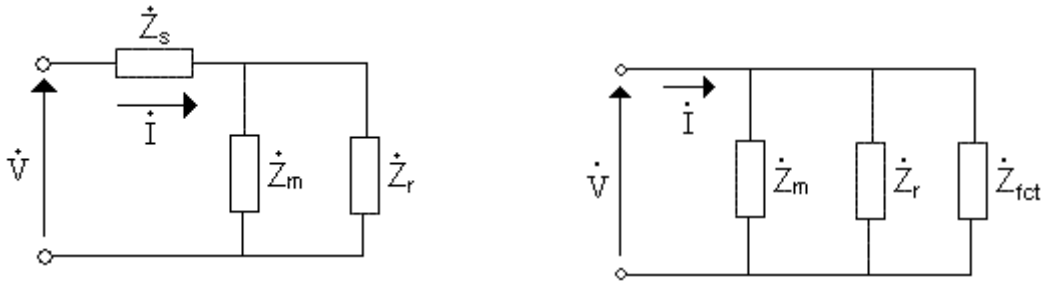
A metodologia consiste em conectar em paralelo os diversos circuitos individuais obtendo-se, assim, os parâmetros de um motor equivalente que, conectado ao barramento comum, exerça os mesmos efeitos elétricos e mecânicos que o conjunto de cargas individuais.

(i) Parâmetros do circuito equivalente

Tomando por base um motor de indução trifásico e sendo:

- $Z_s=R_s+jX_s$: a impedância do estator, em ohms;
- $Z_r=(R_r/s)+jX_r$: a impedância do rotor;
- $Z_m=jX_m$: a impedância de magnetização, em ohms.

O circuito equivalente pode ser expresso como na Figura 3.21(a). Sem perda de generalidade, o arranjo pode ser visto na forma de três impedâncias em paralelo, como na Figura 3.21(b). Nesta figura Z_{fct} representa uma impedância fictícia, calculada para garantir que ambos os modelos sejam equivalentes.



(a) Representação usual (b) Representação alternativa

Figura 3.21 – Modelos de um circuito equivalente de um motor de indução trifásico.

Sendo ambos os circuitos equivalentes, pode-se escrever:

$$\dot{Z}_s + \frac{1}{\frac{1}{\dot{Z}_m} + \frac{1}{\dot{Z}_r}} = \frac{1}{\frac{1}{\dot{Z}_m} + \frac{1}{\dot{Z}_r} + \frac{1}{\dot{Z}_{fct}}} \tag{3.46}$$

Considerando que o processo da agregação esteja direcionado para a obtenção de um circuito equivalente à *n* ramos conectados em paralelo, e supondo ainda, que estes estejam representados pela configuração alternativa de circuito das três impedâncias em paralelo, pode-se agrupar as impedâncias na forma mostrada na Figura 3.22.

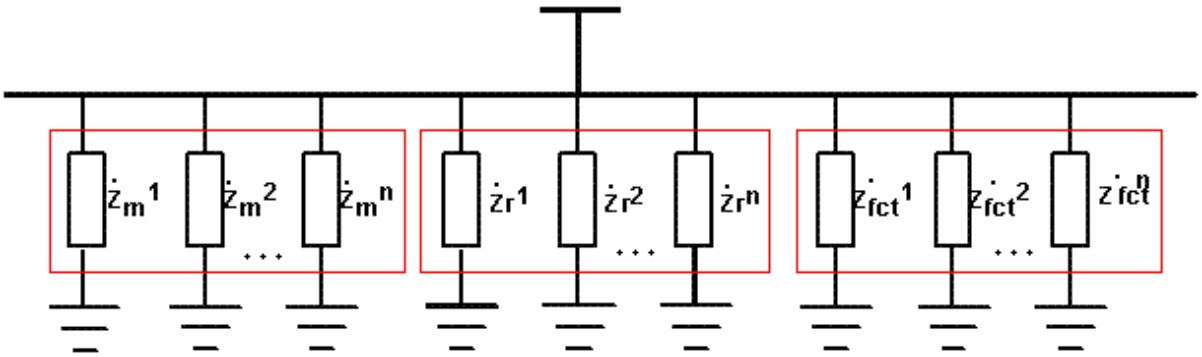


Figura 3.22 – Agrupamento de *n* motores trifásicos.

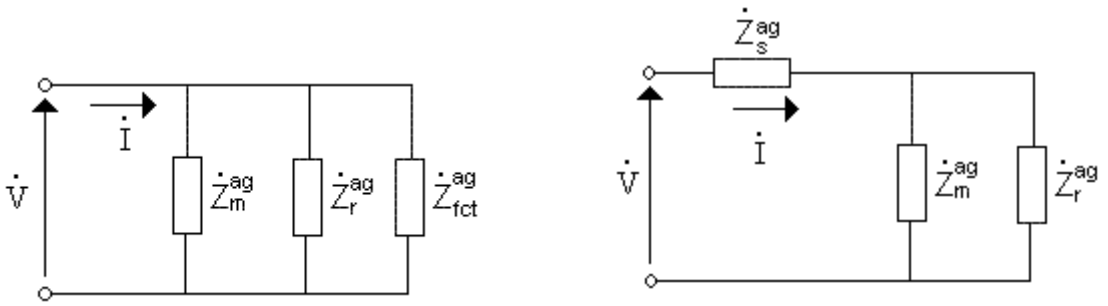
Observando os arranjos em paralelo fica evidenciado que as impedâncias equivalentes podem ser dadas por:

$$\dot{Z}_m^{ag} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\dot{Z}_m^i}} \tag{3.47}$$

$$\dot{Z}_r^{ag} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\dot{Z}_r^i}} \tag{3.48}$$

$$\dot{Z}_{fct}^{ag} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\dot{Z}_{fct}^{i}}} \tag{3.49}$$

A Figura 3.23 (a) é indicativa do circuito equivalente na forma da combinação paralela dos seus respectivos parâmetros equivalentes calculados pelas expressões (3.47), (3.48) e (3.49). Alternativamente, utilizando a topologia inicial para o circuito do motor, tem-se que a Figura 3.23 (b) retorna à convenção tradicional para as conexões das impedâncias.



(a) Representação alternativa (b) Representação usual

Figura 3.23 – Circuitos equivalentes.

Para o último circuito anterior pode-se obter as seguintes expressões [15]:

$$Z_r^{ag} = \left(R_r^{ag} / s\right) + jX_r^{ag} \tag{3.50}$$

$$\dot{Z}_s^{ag} = \frac{\dot{Z}_m^{ag}\,\dot{Z}_r^{ag}}{\dot{Z}_m^{ag} + \dot{Z}_r^{ag}} \left[\frac{\dot{Z}_{fct}^{ag}\left(\dot{Z}_m^{ag} + \dot{Z}_r^{ag}\right)}{\dot{Z}_{fct}^{ag}\left(\dot{Z}_{fct}^{ag} + \dot{Z}_r^{ag}\right) + \dot{Z}_m^{ag}\,\dot{Z}_m^{ag}} - 1 \right] \tag{3.51}$$

Para fins de uma eventual transformação das grandezas acima em valores pu, já que a tensão de alimentação a que se encontram referidos os diversos equipamentos é a mesma, torna-se relevante a caracterização da potência do equipamento ou motor equivalente o qual, indiscutivelmente, será dada por:

$$P_{eq} = \sum P_i \tag{3.52}$$

Onde:

P_i : potência individual de cada motor [W];

P_{eq} : potência total do motor equivalente, em [W].

(ii) Escorregamento nominal do motor agregado

Verifica-se que pela expressão (3.50), a impedância do rotor para o motor equivalente continua dependendo do escorregamento e conseqüentemente da carga mecânica. Individualmente cada motor apresenta um escorregamento específico a plena carga e para saber qual será este escorregamento para o motor equivalente será necessário considerar a potência que atravessa o entreferro para cada motor.

No motor de indução a potência elétrica transferida do estator ao rotor [21] é dada por:

$$P_{g1} = q_1 I_R{}^2 \frac{R_R}{s} \tag{3.53}$$

onde:

- P_{g1}: Potência elétrica transferida do estator ao rotor;
- q_1: Número de fases do estator;

- I_R: Corrente do rotor;
- R_R: Resistência do rotor;
- s: Escorregamento.

Já a potência mecânica desenvolvida é dada por:

$$P_{mec} = (1 - s) P_{g1} \tag{3.54}$$

Para cada motor é possível calcular os valores de P_{g1} e P_{mec}. Considerando a equivalência entre o motor obtido na agregação e os motores do conjunto, a potência elétrica entregue ao rotor do motor agregado é a soma das potências individuais de cada motor, assim como a potência mecânica, o que permite escrever as seguintes equações:

$$P_{g1}{}^{ag} = \sum_{i=1}^{n} P_{g1i} \tag{3.55}$$

$$P_{mec}{}^{ag} = \sum_{i=1}^{n} P_{mec\,i} \tag{3.56}$$

Para encontrar o escorregamento a plena carga do motor agregado s^{ag} faz-se uma analogia com a equação (3.54), porém considerando agora as potências elétrica e mecânica do motor equivalente:

$$P_{mec}{}^{ag} = \left(1 - s^{ag}\right) P_{g1}{}^{ag} \tag{3.57}$$

(iii) Momento de Inércia do Motor Agregado

No capítulo anterior, observou-se que o comportamento da carga mecânica do motor possui forte influência sobre o desempenho do sistema de potência, sendo assim, para a determinação de um motor equivalente é também relevante a determinação do momento de inércia resultante da agregação. Conforme estabelece a referência [15], o assunto é merecedor de cuidados, visto que cada carga mecânica pode apresentar características distintas entre si. Todavia, no que tange aos condicionadores de ar, este processo pode ser simplificado, pois os compressores não apresentam características substancialmente divergentes quando são da mesma potência, além do que, em regime permanente, o conjugado resistente é constante em relação a velocidade [3].

Para facilitar os cálculos é mais conveniente trabalhar com a constante de inércia H, que é definida como a energia cinética em relação a potência total da máquina.

$$H = \frac{J\omega_{rs}^{\ 2}}{2P} \tag{3.58}$$

onde:

- ω_{rs}: Velocidade angular;
- P: Potência da máquina.

Dentro destas premissas a constante de inércia equivalente pode ser obtida através da conservação da energia, ou seja, a energia cinética do motor equivalente é igual a soma das energias de cada motor [16].

$$H_{eq}P_{eq} = H_1P_1 + H_2P_2 + \cdots + H_nP_n \tag{3.59}$$

onde:

H_1, H_2,..., H_n – constantes de inércia dos motores 1, 2,…, n, respectivamente, em [s];

Para realizar a agregação no caso dos aparelhos de ar condicionado do tipo convencional deve-se aplicar a mesma metodologia anterior ao motor de indução monofásico, cujo circuito equivalente no domínio da freqüência [25] é mostrado na Figura 3.24.

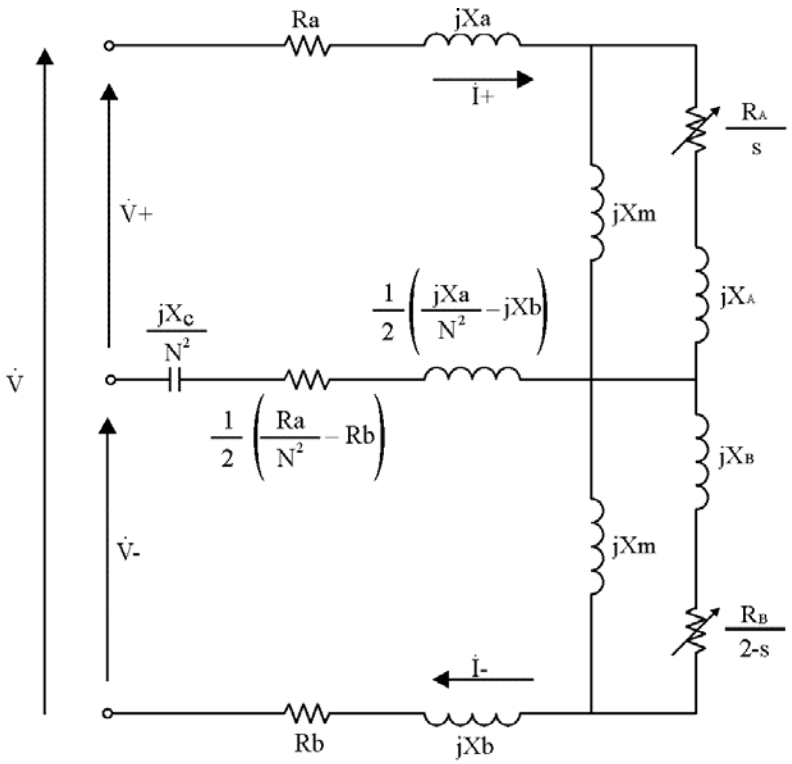


Figura 3.24 - Circuito equivalente do motor de indução monofásico.

Muito embora a figura não evidencie que os correspondentes elementos estejam conectados em paralelo quando um conjunto de motores se encontra em funcionamento simultâneo, a simetria entre os arranjos permite concluir que esta

propriedade é aplicável. Nestas circunstâncias pode-se constatar que o motor equivalente possuirá elementos individuais dados pela composição paralela de seus correspondentes componentes individuais. Em suma, tudo se passa como se cada um dos elementos de cada motor estivesse em paralelo com o correspondente componente dos motores sucessivos. Assim sendo, as expressões anteriormente destacadas para um motor trifásico poderão ser prontamente estendidas ao caso dos motores bifásicos.

Com relação ao momento de inércia, o procedimento é o mesmo anterior, porém para a determinação dos parâmetros do circuito equivalente, o processo é feito em três etapas. Isto se deve ao fato que, como indicado no circuito da Figura 3.24, esta é formada por três ramos distintos, os quais deverão originar o equivalente final.

3.5 - Implementação Computacional dos Condicionadores de Ar no Simulador SABER

Antes de se proceder à implementação computacional propriamente dita do conversor de freqüência utilizado, é interessante apresentar o simulador utilizado como ferramenta para a realização dos trabalhos investigativos. Nesse item é feita uma síntese das principais características do Saber, evidenciando suas potencialidades e facilidades no manuseio das grandezas de entrada/saída, assim como também, sua poderosa interface gráfica.

O Saber é uma ferramenta para simulação de sistemas analógicos, digitais, analógicos operados por eventos, ou a combinação destes três tipos. O simulador foi desenvolvido para microcomputadores, permitindo a simulação de sistemas

complexos e com elevados níveis de detalhe. Embora o software ofereça um grande número de modelos de componentes, existe também a possibilidade de serem criados novos modelos, pelo próprio usuário. Isto pode ser feito utilizando-se tanto a linguagem MAST ou outras linguagens compatíveis de alto nível, como C ou FORTRAN.

O sistema integrado do Saber oferece uma interface gráfica dotada de numerosos recursos, muito úteis tanto para montagens do sistema a ser simulado, como para a análise dos resultados obtidos na simulação. Através da interface gráfica de entrada, os componentes são introduzidos por meio de blocos predefinidos, que podem ser interconectados diretamente utilizando-se *mouse* ou outro recurso qualquer de desenho. Desta forma, todo o equacionamento do sistema é facilmente introduzido, pois cada bloco traz consigo o modelo matemático do elemento que representa. A observação e análise dos resultados obtidos também são realizadas através deste recurso, diretamente, de forma gráfica. Há várias facilidades de visualização e análise dos resultados, tais como o uso de *zoom*, medição das grandezas, operações matemáticas com as formas de onda, análise espectral, dentre outras. Todas as facilidades oferecidas pelo programa encontram-se descritas e exemplificadas nos manuais do fabricante [26].

A modelagem dos diversos componentes simulados é feita através de rotinas denominadas *templates*, que são desenvolvidos utilizando-se a linguagem mencionada, que possui facilidades específicas para a simulação de sistemas. Esta linguagem acessa automaticamente a rotina de resolução de sistemas dinâmicos do Saber. No caso de desenvolvimento de funções complexas, envolvendo, por exemplo, componentes não-lineares, pode ser conveniente a utilização da linguagem C ou FORTRAN. Os detalhes dessa

conexão e as diretivas para a elaboração de *templates* são fornecidos no manual [26].

Os *templates* são compostos de várias seções, podendo-se utilizar uma ou mais delas, dependendo das necessidades do modelo que está sendo desenvolvido.

Dentro de um *template* pode-se, em qualquer ponto do mesmo, chamar outros arquivos, cujos conteúdos são anexados ao *template* ativo. Os arquivos incluídos desta forma denominam-se "*include files*". Um *template* pode ser único ou pode conter alguns "*include files"*.

Finalizando esta seção de apresentação da ferramenta computacional, a seguir, é mostrado um conjunto de comandos, que evidencia as seções possíveis que podem fazer parte de um *template*.

```
Definições de Unidade
Definições de Pinos de Conexão
Cabeçalho do Template
Declarações do Cabeçalho
{
    Declarações Locais
    Seção de Parâmetros
    Seção da Netlist
    Declarações When
    Seção de Valores
    Seção de Controle
    Seção de Equações
}
```

Uma vez feita a apresentação do simulador utilizado e mostradas as possíveis formas de interagir com o mesmo, o restante deste item é utilizado para mostrar a implementação computacional dos equipamentos.

(i) Condicionador de ar convencional

A sua implementação consiste em inserir as equações (3.1) a (3.7). Este procedimento já foi realizado em [12] e o *template* gerado tem a denominação *mt_ind_bf*.

(ii) Condicionador de ar inteligente

Para a representação deste equipamento, são necessários os *templates*, do conversor de freqüência com seu respectivo controle e do motor de indução trifásico. Estes foram criados em [27] com as seguintes denominações:

Conversor de freqüência:*conver_weg_microline*
Controle *controle_weg_microline*
Motor de indução *mt_ind_abc*

O modelo do controle do conversor referido acima não proporciona a alteração da freqüência em caso de afundamento de tensão. Com o objetivo de avaliar o comportamento do controle utilizado em [9], foi elaborado um novo *template* que tem como fundamentação a modelagem descrita no item anterior, utilizando o diagrama da Figura 3.19, que pode alterar a freqüência de operação a partir das variações da tensão no elo CC, conforme já mostrou o item anterior, sendo assim é apresentado o seu detalhamento:

a) Descrição do template

Determina os sinais de gatilho para as chaves do inversor através da comparação da onda portadora (triangular) com três ondas moduladoras (senoidais) defasadas de 120°, geradas em sincronismo com as tensões da rede CA, porém a freqüência é variável em função da tensão do elo CC. Para esta finalidade é empregada a técnica de modulação de largura de pulsos (PWM), a partir da "medição" da tensão de saída do retificador.

b) Cabeçalho do template

O cabeçalho deste *template*, denominado *controle_weg_microline_gh*, é mostrado na seqüência:

element template controle_weg_microline_gh g1 g2 g3 g4 g5 g6 ptri psa vpm2=fon,fnom,fop,ton,tfr,vnom,vrede,psen,fchav,voff

c) Descrição dos elementos constantes no template

Neste ponto são descritas as declarações que compõe o cabeçalho do *template* do controle do conversor de freqüência.

- **controle_weg_microline_gh** – Nome do template;
- **g1 g2 g3 g4 g5 g6** – Pinos de conexão do sistema de pulsos do gatilhos aplicados as chaves do inversor;
- **ptri** – Pino através do qual é aplicado o sinal triangular;
- **psa** – Pino através do qual é aplicado o sinal senoidal para o controle PWM, com freqüência variável com a tensão do elo CC;
- **vpm2** – Pino que recebe a tensão do elo CC;
- **fon,fnom,fop,ton,tfr,vnom,vrede,psen,fchav,voff,vo**– Parâmetros.

d) Parâmetros de entrada

A Tabela 3.1 mostra os parâmetros de entrada necessários para a geração dos pulsos de disparo do inversor.

Na seção de equações do *template* são inseridas as equações (3.36) a (3.45) para realizar o cálculo da nova freqüência de operação e como variável de saída são fornecidas as três ondas moduladoras para a geração dos pulsos das chaves do inversor.

Tabela 3.1 - Parâmetros de entrada no *template controle_weg_microline_gh*.

Parâmetro	Descrição	Unidade
fnom	Freqüência nominal de operação do conversor.	Hz
ton	Instante em que o conversor inicia sua operação.	s
fon	Freqüência de operação do conversor no inicio da primeira rampa.	Hz
fop	Freqüência de operação do conversor ao término da primeira rampa.	Hz
tfr	Intervalo de tempo após o inicio da operação do conversor (ton), para o termino da rampa de freqüência.	s
psen	amplitude da senoide de controle a ser comparada com a onda triangular para definição da modulação PWM.	V
fchav	Freqüência de chaveamento do inversor.	Hz
vrede	Tensão nominal eficaz fase-fase da rede que alimenta o conversor.	V
voff	Tensão *offset* para o cálculo da nova freqüência de operação.	V
vo	Tensão de referência do elo CC.	V

3.6 - Considerações Finais

Este capítulo foi dedicado à modelagem matemática dos condicionadores de ar convencional e inteligente. Com esse foco, o primeiro passo concretizado

foi a apresentação do modelo do condicionador convencional, que utiliza o motor de indução monofásico.

Em relação ao condicionador inteligente apresentaram-se inicialmente o modelo do motor de indução trifásico e o detalhamento do controle de velocidade através da técnica PWM, necessário para a elaboração da modelagem matemática do controle do conversor de freqüência, que além da geração dos pulsos das chaves semicondutoras, também proporciona um modo de operação mais seguro ao compressor no caso de afundamento de tensão.

Visando a utilização dos modelos dos dois tipos de condicionadores para estudos de dinâmica de sistemas de potência, houve uma abordagem sobre agregação de motores. Através de uma metodologia conhecida para motores trifásicos, que aplica o paralelismo dos circuitos equivalentes, procedeu-se a sua extensão para os motores dos condicionadores convencionais.

Com base no modelo matemático do controle mencionado, procedeu-se a implementação computacional no simulador SABER com a criação de um novo *template*. Tendo disponível este recurso, é possível avaliar através de simulações como o comportamento deste tipo de condicionador irá refletir no sistema de potência.

Tendo assim os modelos disponíveis para os dois tipos de condicionadores, e também do conversor de freqüência com a nova estratégia de controle implementada para este trabalho, será dado inicio aos estudos computacionais.

CAPÍTULO IV

Estudos Computacionais dos Modelos de Condicionadores Convencional e Inteligente

4.1 - Considerações Iniciais

Antes de analisar um sistema de potência com grande demanda de condicionadores de ar, é necessário conhecer o comportamento individual de cada equipamento durante perturbações. Como este estudo é direcionado a sistemas de potência, as variáveis de maior interesse são as potências ativa e reativa e a distorção harmônica.

Os modelos discutidos anteriormente serão submetidos a distúrbios do tipo afundamento de tensão e interrupções de curta duração, pois estes são comuns na rede elétrica. Para o condicionador de ar tipo inteligente, deve-se ainda estudar o comportamento de variáveis internas como tensão no elo CC, conjugado eletromagnético e potência mecânica no eixo. Esta análise é necessária para avaliar o desempenho da proteção contra subtensões implementada no capítulo anterior.

As simulações computacionais serão realizadas com o simulador SABER. Entretanto, este aplicativo fornece apenas os valores instantâneos de tensão e de corrente, mas não os perfis das potências no decorrer do tempo. Além disso, deve-se considerar a presença de correntes não senoidais. Portanto, antes de realizar as respectivas simulações, deve-se implementar um algoritmo que

permita coletar os dados de tensão e corrente a partir do aplicativo SABER, de forma a efetuar os cálculos das potências ativa e reativa em função do tempo, distorção harmônica e fator de potência. Para esta finalidade, utiliza-se o MATLAB, uma vez que este programa possui interface com o SABER.

Dentro deste enfoque, o presente capítulo encontra-se estruturado da seguinte forma:

- Implementação de uma rotina em MATLAB para o cálculo das potências a partir dos dados de tensão e corrente do simulador SABER;
- Simulação computacional e discussão de resultados de perturbações dos modelos discutidos anteriormente.

4.2 - Metodologia de Cálculo das Potências

Para estudos em sistemas de potência, é necessário mostrar o comportamento das potências ativa e reativa no decorrer do tempo. Possuindo os valores instantâneos de tensão e corrente, em sistemas trifásicos, é possível aplicar a transformação de Park e assim obter a potência instantânea. No entanto, as simulações envolvidas neste capítulo tratam de aparelhos com entrada monofásica, o que não é aplicável com a transformação de Park.

Para contornar este problema, deve-se coletar os dados de tensão e corrente e transferi-los para um programa elaborado em MATLAB. O algoritmo também serve para analisar resultados experimentais, como mostra a Figura 4.1.

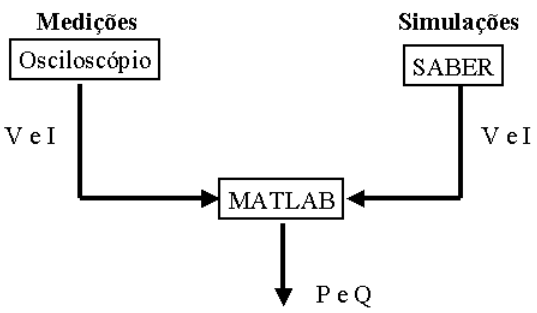


Figura 4.1 – Método para obtenção das potências.

No caso experimental, os valores de tensão e corrente são extraídos do osciloscópio. Para testes de simulação, os resultados são obtidos a partir do simulador SABER. Como resultado, o programa elaborado em MATLAB fornece os valores de potência ativa e reativa, além de fator de potência e distorção harmônica. O programa utiliza o método de Budeanu [28], pois desta forma é possível analisar cargas não lineares.

O procedimento é iniciado calculando-se o valor eficaz de tensão e corrente em cada ciclo. Sabendo-se que os as grandezas são distribuídas discretamente, os valores eficazes são dados por:

$$V = \sqrt{\frac{1}{N_a}\sum_{j=1}^{N_a} v_j^{\,2}} \tag{4.1}$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{N_a}\sum_{j=1}^{N_a} i_j^{\,2}} \tag{4.2}$$

onde:

V – tensão em valor eficaz por ciclo;

I – corrente em valor eficaz por ciclo;

v – valor instantâneo de tensão;

i – valor instantâneo de corrente;

N_a – número de amostras por ciclo;

j – contador do número de amostras por ciclo.

Assim, o valor da potência aparente em cada ciclo é dado por:

$$S = VI \tag{4.3}$$

As potências ativa P e reativa Q obtidas através do método de Budeanu, são dadas por:

$$P = \sum_{i=1}^{N} V_i I_i \cos\phi_i \tag{4.4}$$

$$Q = \sum_{i=1}^{N} V_i I_i \operatorname{sen}\phi_i \tag{4.5}$$

onde:

V_i – i-ésima componente harmônica de tensão;

I_i – i-ésima componente harmônica de corrente;

ϕ_i – defasagem entre as i-ésimas componentes de tensão e corrente.

N – ordem harmônica.

Cabe ressaltar que neste método existe a potência distorcida D dada por:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \tag{4.6}$$

Os respectivos valores de tensão e corrente, para cada componente harmônica, são obtidos aplicando o algoritmo da FFT ("*Fast Fourier Transform*") a cada ciclo, que para um sinal periódico no domínio do tempo $x(t)$ é dado por:

$$X(k\Delta f) = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta T)\, e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \tag{4.7}$$

onde:

$$\Delta f = \frac{1}{T} = \frac{1}{N\Delta t} = \frac{f_a}{N} \tag{4.8}$$

para k=0, 1, 2,…N-1.

onde:

Δf – freqüência de resolução;

f_a – freqüência de amostragem;

N – ordem harmônica.

Para a aplicação da FFT a um sinal, devem ser obedecidos os seguintes critérios:

- O sinal $x(t)$ deve ser periódico;
- O sinal $x(t)$ não deve conter componentes de ordem superior a $f_a/2$ (critério de Nyquist);
- O intervalo de amostragem deve corresponder exatamente a um número inteiro de períodos.

O MATLAB dispõe de uma função que realiza esta operação, denominada *FFT*. Para aplicá-la a um sinal $x(t)$, basta escrever:

$$X\left(k\Delta f\right) = FFT\left(x\right) \tag{4.9}$$

Caso o sinal $x(t)$ seja uma matriz, o algoritmo da FFT é aplicado coluna a coluna. Assim, os sinais de tensão e corrente são armazenados em uma matriz, onde cada coluna representa um ciclo do sinal, e o número de linhas corresponde ao número de amostras por ciclo. Esta matriz é denominada periódica (V_P). No caso dos valores de tensão $v(t)$, tem-se:

$$[V_P] = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1nc} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2nc} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{na1} & v_{na2} & \cdots & v_{nanc} \end{bmatrix} \tag{4.10}$$

Conforme se pode observar, as linhas variam de um ao número de amostras por ciclo (*na*), e as colunas variam de um ao número de ciclos (*nc*). Desta forma, é elaborada uma função no MATLAB, denominada *medPQD*, mostrada no fluxograma na Figura 4.2.

A vantagem desta função reside na possibilidade de utilização para dados provenientes de qualquer aplicativo de simulação no domínio do tempo como SABER, ATP ou Orcad.

O processo é iniciado coletando os dados de tensão e corrente no domínio do tempo, $v(t)$ e $i(t)$, a partir de resultados experimentais ou de simulação. Em seguida, estes valores são distribuídos na respectiva matriz periódica. Então, é aplicado o algoritmo da FFT ciclo a ciclo junto com o método de Budeanu, fornecendo como resultados as potências ativa e reativa, o fator de potência e a distorção harmônica total.

Alguns pesquisadores, dentre os quais é possível citar Czarnecki [29], alegam que o método de Budeanu não é confiável pelo fato de a potência resultante ser uma soma algébrica, e não fasorial. Em uma situação onde a tensão e a corrente são distorcidas, haveria o cancelamento entre componentes defasadas de 180° para determinadas freqüências. No entanto, para as aplicações deste trabalho não há motivo para esta preocupação, pois somente a corrente apresenta distorção harmônica, enquanto a tensão, fornecida pela concessionária, apresenta somente a componente fundamental.

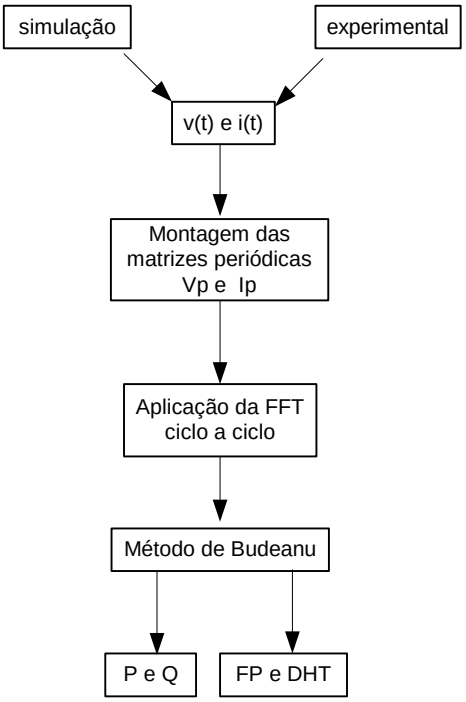


Figura 4.2 – Fluxograma da função *medPQD*.

4.3 - Metodologia e Análise

Serão analisados os três tipos de condicionadores de ar, ou seja, o convencional [11] e o inteligente [9] operando no modo normal e adaptado, que emprega o controle de sustentação durante afundamento de tensão proposto em [9]. Os aparelhos têm potência de 1 CV, cujos parâmetros são mostrados nas tabelas 4.1 e 4.2:

Tabela 4.1 - Parâmetros do condicionador convencional.

R_a Ω	L_a H	R_b Ω	L_b H	R_A=R_B Ω	L_A=L_B H	J kg.m^2	C μF
3.86	0.8662	11.49	0.5477	4.5	0.3980	0.0015	17.5

Tabela 4.2 - Parâmetros do motor do condicionador inteligente.

R_s Ω	L_s H	R_r Ω	L_r H	M H	J kg.m^2
2.3191	0.3739	2.29	3.5086	3.2454	0.0015

No que se refere as características do compressor, a Tabela 4.3 fornece os parâmetros na condição de partida e também em regime permanente [18]. Já a Tabela 4.4 mostra os parâmetros dos *templates* do conversor de freqüência [9].

Tabela 4.3 Características do conjugado resistivo do compressor.

	Coeficientes		$Tc=k_0+k_1\omega+k_2\omega^2$
k_0	k_1	k_2	
0,300	0,700	0,713	Partida
1	0	0	Operação

Tabela 4.4 Variáveis de entrada para os *templates*.

Parâmetros de entrada		***Controle_weg_microline***	***Controle_adaptado***
Tensão da rede [V]	V_{rede}	220	220
Boost de tensão [V]	V_0	-	40
Freqüência de operação [Hz]	f_{op}	60	60
Freqüência de operação [Hz]	f_{chav}	1980	1980
Tempo de alcance de f_{op} [s]	t_{fr}	0,1	0,1
Filtro capacitivo [μF]	C_f	2300	2300
Filtro indutivo [mH]	L_f	0,35	0,35
Amplitude da moduladora [V]	P_{sen}	17	17
Amplitude da portadora [V]	A_{tri}	12	12

O único parâmetro de diferença é o valor do *boost* de tensão, que só esta presente no *template* implementado para este trabalho, pois no existente não há um monitoramento da tensão no elo CC.

Para os estudos computacionais no simulador SABER é possível trabalhar com passo de simulação variável, ou seja, caso a convergência num determinado

período da simulação esteja difícil de ser alcançada, o passo é reduzido. Já no caso em que a convergência esteja fácil, o passo pode ser aumentado para redução do tempo de processamento.

De forma a obter o passo correto para as simulações, deve ser considerado o sinal de maior freqüência do sistema a ser analisado. Num ciclo completo de operação é conveniente obter no mínimo 100 amostras no referido ciclo para uma boa resolução gráfica e processamento dos sinais de tensão e corrente. Assim basta dividir o período da forma de onda de maior freqüência f_{max} por 100, resultando num passo máximo $step_{max}$ dado por:

$$step_{\max} = \frac{1}{100\, f_{\max}} \tag{4.11}$$

No sistema analisado neste trabalho, a maior freqüência é a do chaveamento do inversor que é de 1980Hz, o que resulta num passo de simulação de 5,0μs.

Os casos escolhidos para comparação do desempenho dos aparelhos em estudo compreendem a operação em regime permanente, afundamento temporário de tensão e interrupção, descritos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Casos estudados.

Caso	Descrição
1	Regime permanente
2	Afundamento de tensão: 30% – 30 ciclos
3	Interrupção: 100% – 05 ciclos

A norma IEC 61000-4-11, edição 03/2001, estabelece o nível das perturbações a serem aplicadas em ensaios experimentais para fins de suportabilidade, o que não é o objetivo deste estudo. Assim, decidiu-se neste

trabalho submeter os equipamentos aos distúrbios discriminados na Tabela 4.5, pois os casos 2 e 3 são de comum ocorrência no sistema elétrico, devido às faltas e outros problemas inerentes.

O primeiro caso analisa o comportamento dos condicionadores convencional e inteligente sob o enfoque da qualidade da energia elétrica, comparando a distorção harmônica e o fator de potência. Os dois casos seguintes retratam o comportamento das cargas do ponto de vista da dinâmica do sistema de potência, aplicando perturbações na tensão de suprimento. Em todos os casos, cada aparelho é analisado individualmente. Para obter conclusões do comportamento em um sistema de potência, serão analisadas as variações das potências ativa e reativa, pois estas contribuem para um resultado global.

4.3.1 - Caso 1: Regime Permanente

Este primeiro caso visa analisar o fator de potência e a distorção harmônica da corrente de alimentação, cujas formas de onda estão na figuras 4.3 e 4.4.

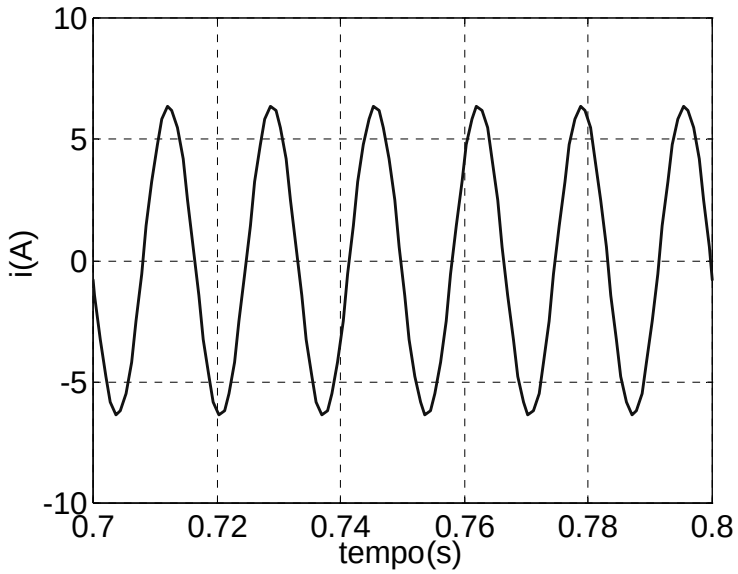


Figura 4.3 - Corrente de Alimentação - Convencional.

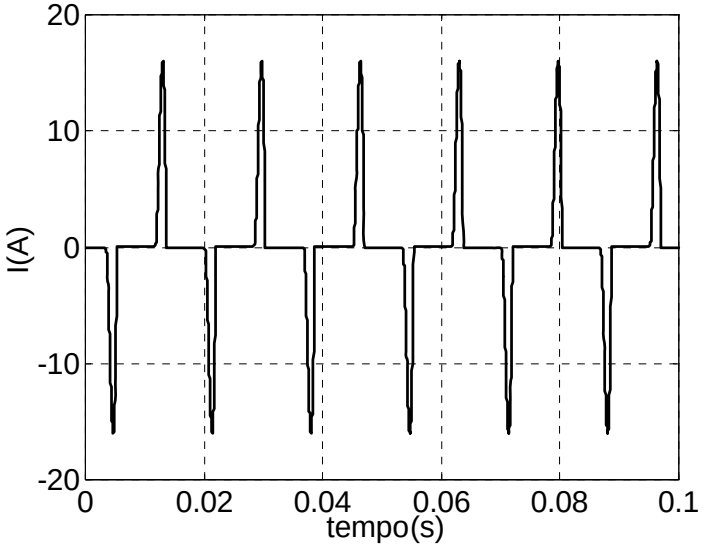


Figura 4.4 – Corrente de alimentação - inteligente.

Observando a Figura 4.4, nota-se claramente que o condicionador tipo inteligente apresenta uma corrente bastante distorcida, já que este emprega um retificador não controlado a diodos.

A análise do espectro harmônico fornece quantitativamente a distorção harmônica de cada forma de onda, o que pode ser visto nas figuras 4.5 e 4.6.

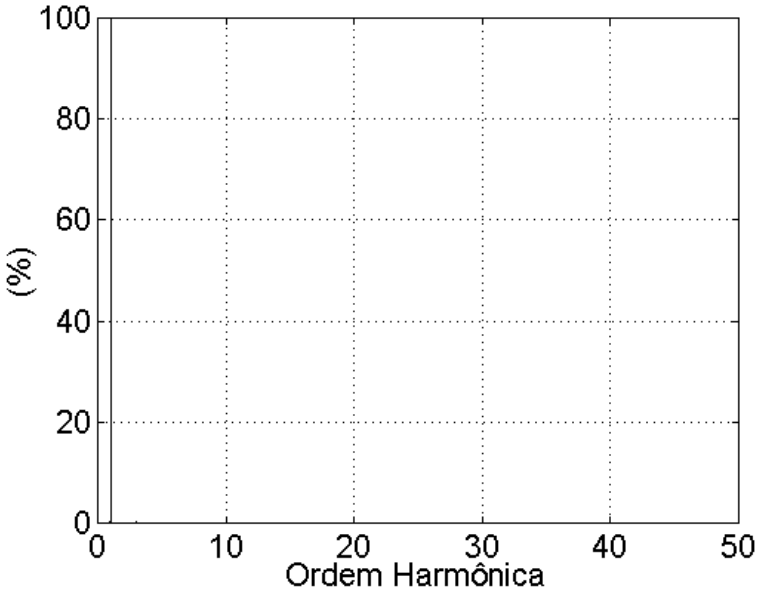


Figura 4.5 – Espectro harmônico da corrente – convencional.

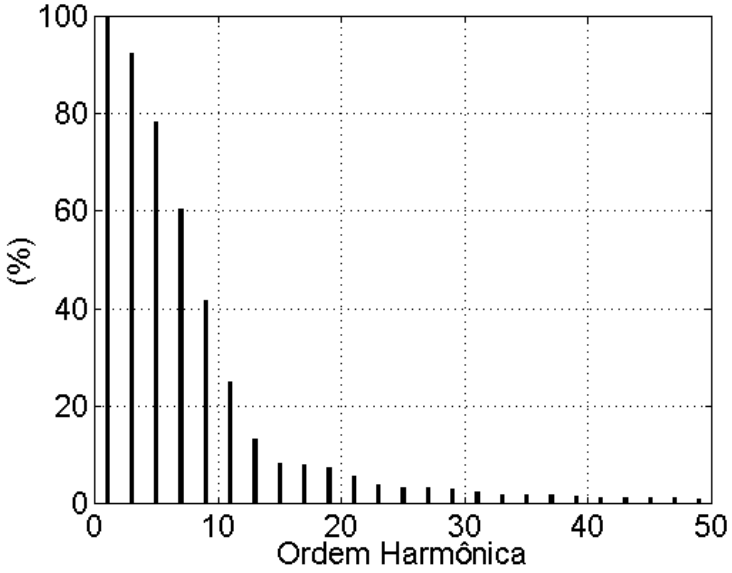


Figura 4.6 – Espectro harmônico da corrente - inteligente.

Pela Figura 4.5, observa-se que o condicionador tipo convencional apresenta apenas a componente fundamental. Deve-se ressaltar que, na modelagem deste aparelho, não foram considerados os efeitos de saturação e a não linearidade do entreferro, porém a diferença não é grande em comparação com valores experimentais constatados no estudo desenvolvido em [12].

Considerando o espectro do condicionador inteligente, apresentado na Figura 4.6, verifica-se que há componentes de baixa ordem, sendo o fator de potência real da ordem de 0,59, o que é uma característica inerente aos equipamentos com retificador.

Resumindo os resultados na Tabela 4.6, observa-se que o condicionador convencional é menos prejudicial ao sistema do ponto de vista da qualidade da energia elétrica. No entanto, deve-se mencionar que, diante da eficiência energética, o desempenho do condicionador inteligente é mais satisfatório em função do controle de temperatura, o que permite ao equipamento operar em uma potência menor quando a temperatura ambiente é mais amena.

Tabela 4.6 - Análise em regime permanente.

Tipo de Condicionador	DHT(%)	fp
Convencional	0,39	1
Inteligente	114,14	0,59

4.3.2 - Caso 2: Afundamento de Tensão

Para o estudo deste caso, será necessário comparar o desempenho do condicionador de ar inteligente que funciona no modo normal, onde não há alteração da freqüência durante subtensões, com o modo adaptado, implementado neste trabalho, e que modifica o valor da freqüência para manter a relação *V/f* constante. Para analisar o comportamento das potências ativa e reativa, também será estudado o condicionador tipo convencional.

De forma a observar melhor o comportamento das variáveis do motor, é aplicado um afundamento de tensão de 30% com 30 ciclos de duração, conforme mostra a Figura 4.7.

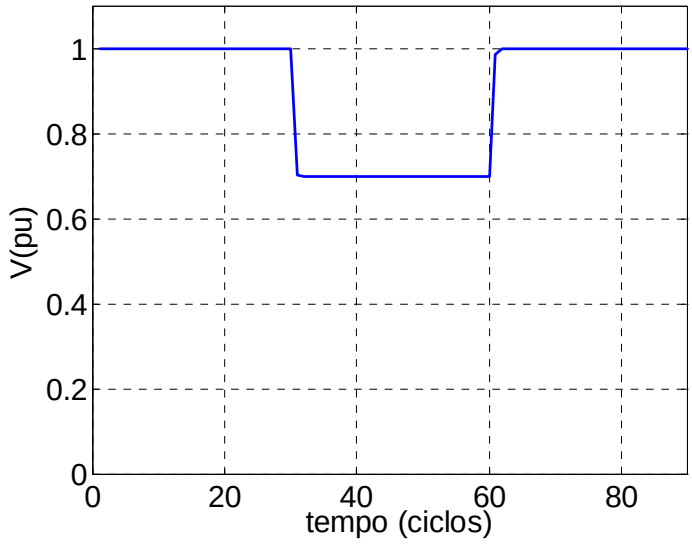


Figura 4.7 – Perturbação aplicada no caso 2.

A Figura 4.8 mostra a freqüência da onda moduladora, onde é possível verificar que, na operação normal, não há variação, porque não existe esta função. No modo adaptado, houve a redução para 38Hz, efetuada pelo controle,

com o objetivo de compensar a redução de tensão. No fim da perturbação, verifica-se que o valor sobe acima de 60Hz. Isto ocorre por causa da recuperação da tensão do elo CC. Deve-se ressaltar que a freqüência da moduladora acompanha as variações do elo CC.

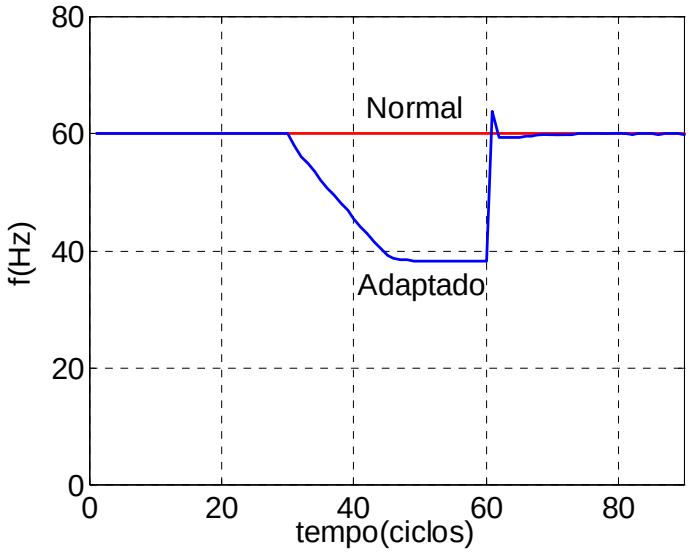


Figura 4.8 – Freqüência da moduladora: caso 2.

De forma a simplificar a interpretação do comportamento das demais variáveis, serão analisadas primeiramente as rotações dos motores através da figuras 4.9 e 4.10.

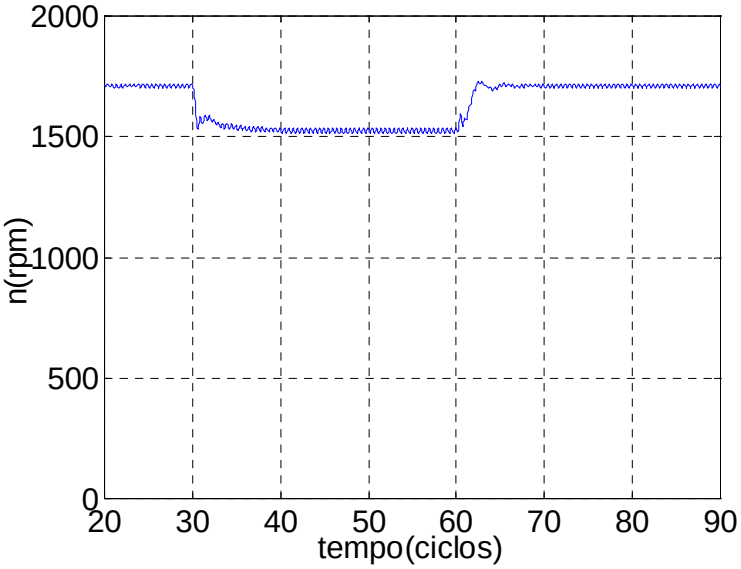


Figura 4.9 – Velocidade do eixo do motor – convencional:caso 2.

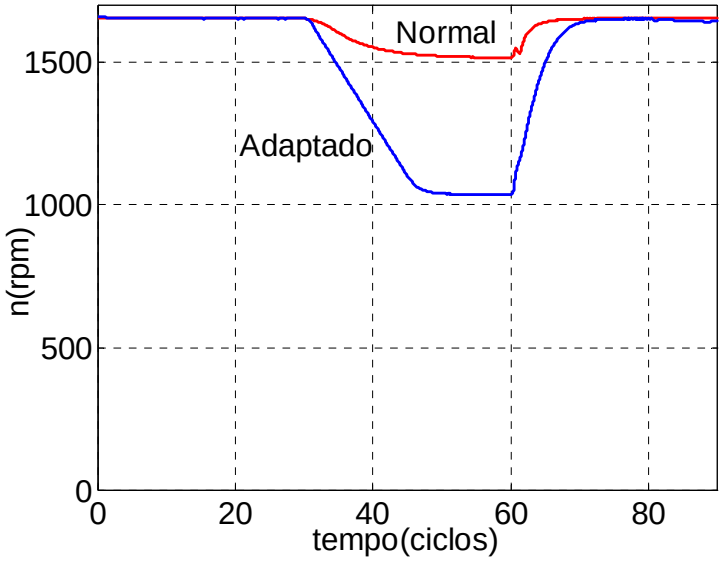


Figura 4.10 - Velocidade do eixo do motor - inteligente: caso 2.

Através da Figura 4.9, verifica-se que na ocorrência da perturbação, a velocidade do condicionador tipo convencional é reduzida para 1500rpm. O mesmo ocorreu para o condicionador tipo inteligente operando no modo normal, embora haja uma diferença de 10 ciclos até este valor ser atingido, porque a tensão nos terminais do motor é mantida pelo elo CC, conforme mostrado na Figura 4.10.

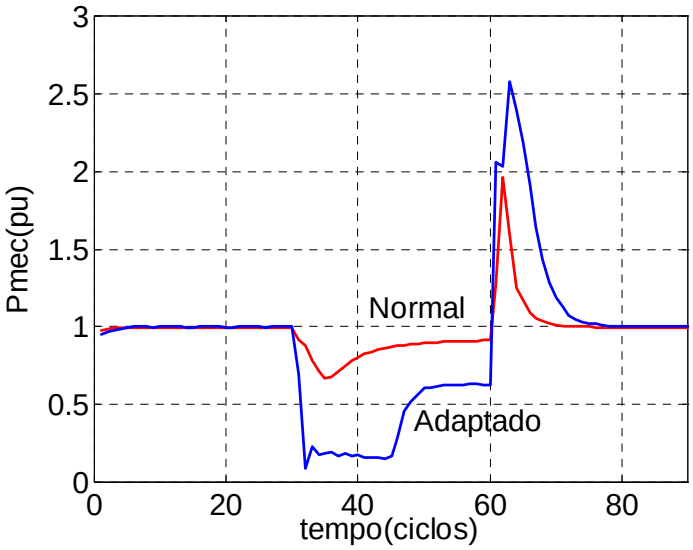


Figura 4.11 – Potência mecânica do motor - inteligente: caso 2.

Para o condicionador inteligente operando no modo adaptado, a velocidade decresce até 1050rpm em função da estratégia de redução da freqüência de operação do motor, cujo objetivo é a redução da potência mecânica, conforme mostrado nas Figura 4.11.

A potência mecânica no eixo do motor é o produto do conjugado pela velocidade angular. Assim como a rotação é menor no modo adaptado, a potência mecânica é mais reduzida que no modo normal, conforme mostra a Figura 4.11. No condicionador tipo convencional, a potência mecânica, vista na Figura 4.12, é reduzida a 0,8pu durante a perturbação. Embora o compressor seja uma carga de conjugado constante, a potência é reduzida em função da diminuição da velocidade do eixo.

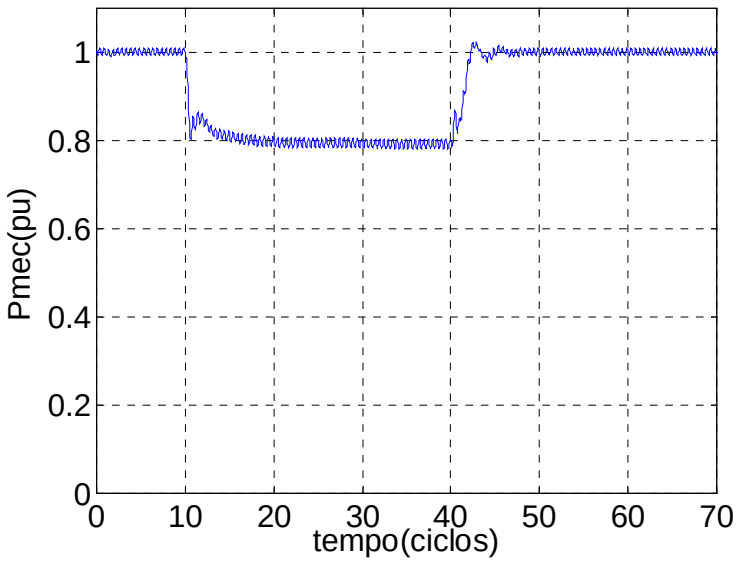


Figura 4.12 – Potência mecânica do motor – convencional: caso 2.

No final da perturbação, com a restauração da tensão no capacitor, o motor reassume a velocidade plena. Para isto, é necessário romper a inércia de toda a massa girante, incluindo o próprio motor e a carga, de forma que há uma solicitação adicional de potência do sistema, como se houvesse uma nova

partida. No modo adaptado, este fenômeno é mais significativo porque com uma velocidade menor, no fim da perturbação, o motor precisa de mais potência para voltar a atingir a velocidade plena. Isto se reflete no comportamento da tensão no elo CC, conforme mostra a Figura 4.13.

A tensão inicial do elo CC em regime é 311V, e atinge 210V durante a perturbação. No entanto, verifica-se que na operação adaptada a tensão decresce mais lentamente, porque o fluxo de potência transmitida do elo CC ao motor é menor, ocasionando uma descarga mais lenta do capacitor.

No fim da perturbação, o capacitor volta a ser carregado pela tensão da rede elétrica, que já está restaurada. A Figura 4.14 mostra o quadro ampliado da tensão do elo CC, representando o processo de restauração da tensão do capacitor. Verifica-se que é atingido um pico de 387V, e na seqüência a tensão reassume o valor original, de 311V. Na operação adaptada, a tensão decresce mais rapidamente para o valor de regime, porque nesta condição o motor solicita um fluxo de potência maior do elo CC.

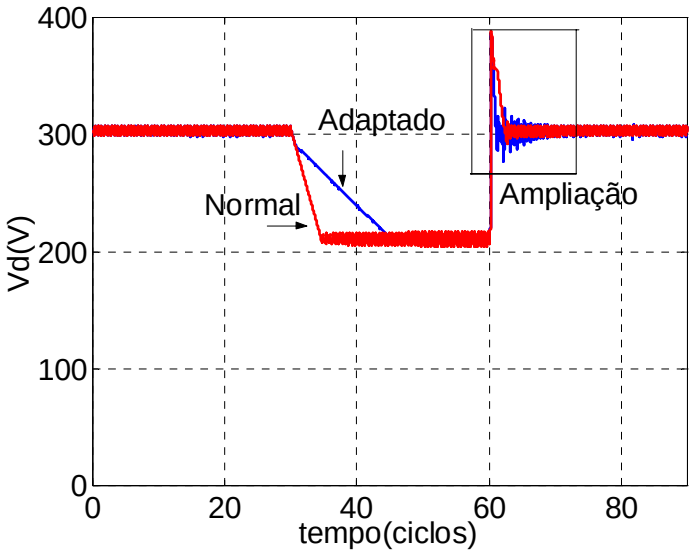


Figura 4.13 – Tensão no elo CC: caso 2.

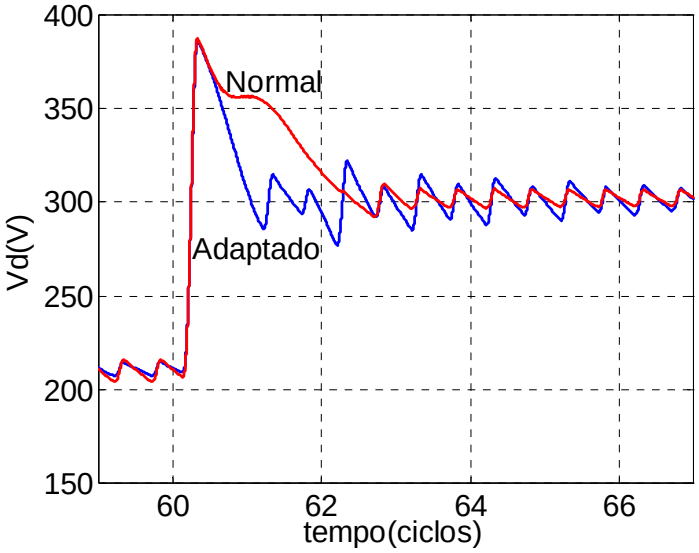


Figura 4.14 – Ampliação da tensão no elo CC: caso 2.

Considerando a corrente de alimentação, verifica-se na Figura 4.15 que, no condicionador tipo convencional, há um aumento devido à tentativa de retomada de velocidade, que é o comportamento típico dos motores de indução.

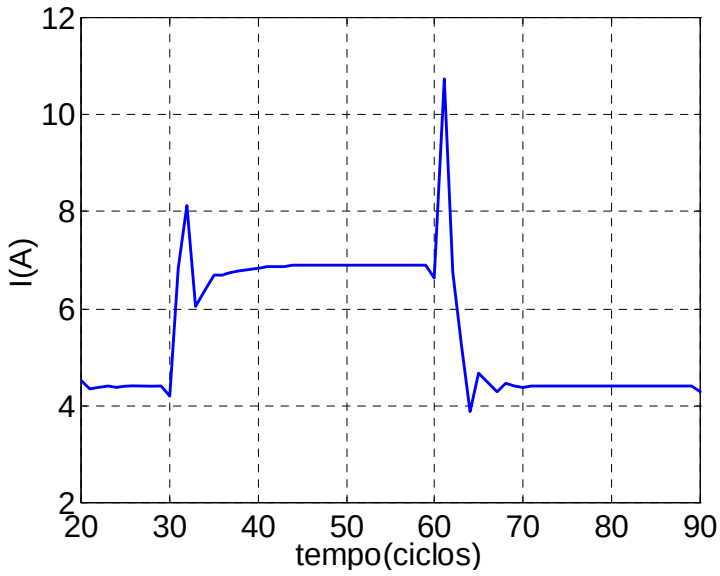


Figura 4.15 – Corrente de alimentação – convencional: caso 2.

A corrente dos condicionadores tipo inteligente é reflexo do comportamento do elo CC, pois no início da perturbação, quando o capacitor

está se descarregando, a tensão da rede é menor que a do elo CC, polarizando reversamente os diodos da ponte retificadora. Assim, no período de descarga, a condução de corrente da rede elétrica para o retificador é nula.

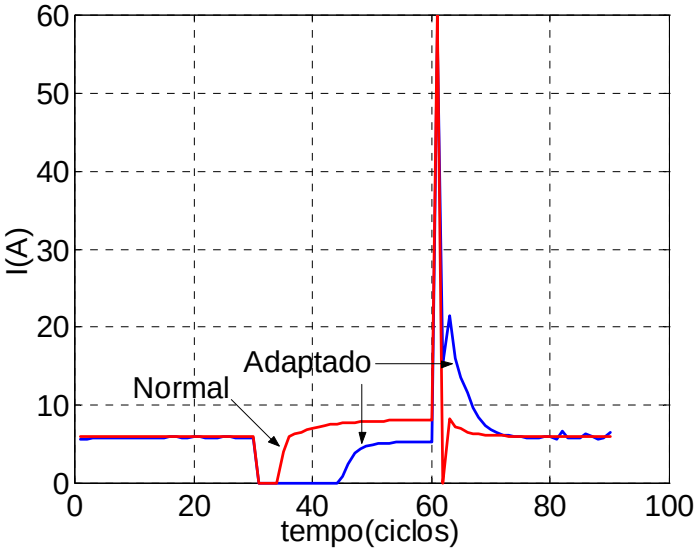


Figura 4.16 – Corrente de alimentação - inteligente: caso 2.

Através da Figura 4.16, verifica-se que, na operação normal, o tempo de corrente nula é igual a 4 ciclos, enquanto na operação adaptada este intervalo corresponde a 34 ciclos. Isto ocorre porque nesta condição o capacitor no elo CC demora mais para se descarregar.

No fim da perturbação, há um aumento brusco na corrente em função da recarga do capacitor. Isto se assemelha a um curto circuito, alcançando-se um pico de corrente de 60A. Verifica-se que no modo adaptado a corrente demora mais para reassumir o valor de regime permanente, porque o motor solicita uma potência da rede maior do que no modo normal, conforme mostra a Figura 4.16.

O mesmo raciocínio é utilizado para explicar o comportamento do conjugado eletromagnético, visto na Figura 4.17, pois para a produção de conjugado é necessário que haja corrente no estator. Analisando o caso adaptado, na Figura 4.18, no início da perturbação, onde os diodos estão bloqueados por um período maior, o conjugado é mais reduzido se comparado à

operação normal. No entanto, no intervalo de tempo em que é atingido um novo patamar para a tensão no capacitor, o conjugado no modo adaptado é ligeiramente maior, porque nesta o controle atua de forma a manter a relação *V*/*f* constante.

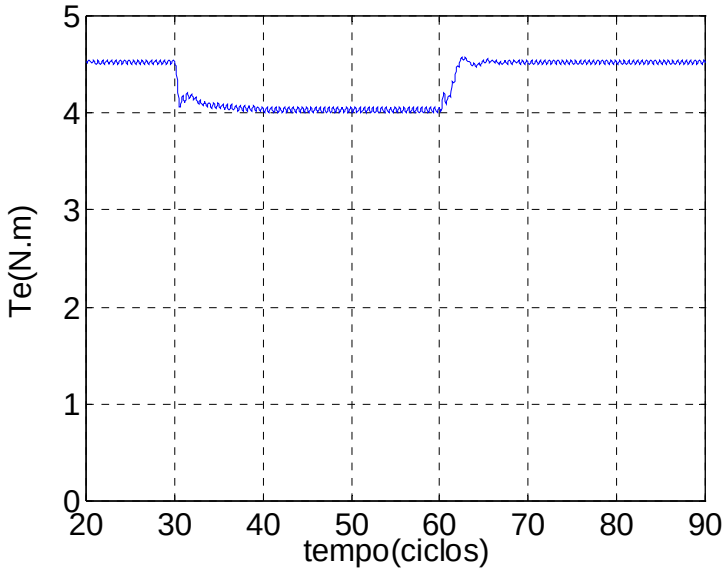


Figura 4.17 – Conjugado eletromagnético – convencional: caso 2.

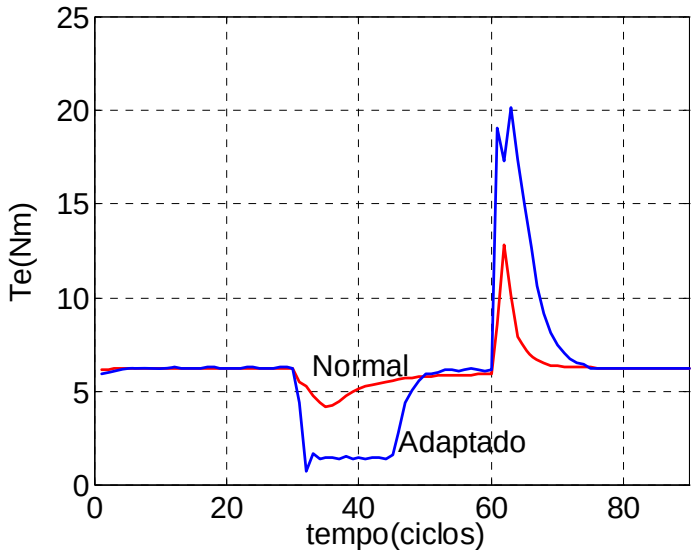


Figura 4.18 – Conjugado eletromagnético - inteligente: caso 2.

Conforme esclarecido anteriormente, a sustentação do conjugado é dependente da manutenção do fluxo no entreferro, e o controle implementado neste trabalho atua neste sentido, conforme pode ser observado na Figura 4.19,

que mostra o comportamento do fluxo no modo normal, onde seu valor acompanha as variações da tensão do elo CC, ou seja, durante o afundamento de tensão há um enfraquecimento do fluxo.

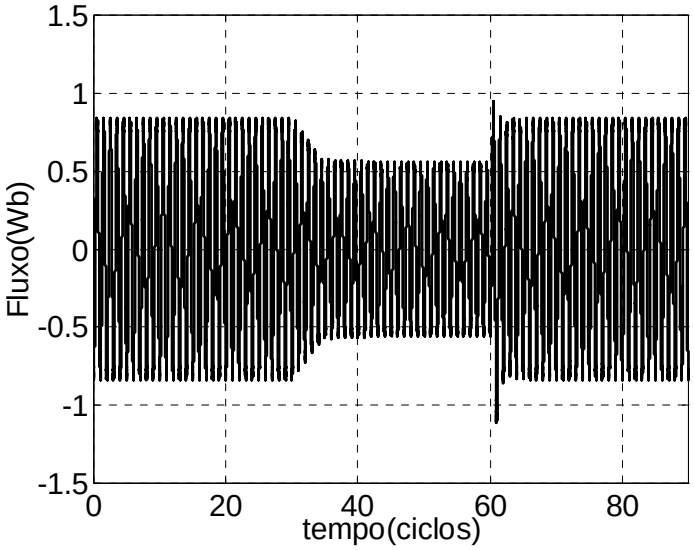


Figura 4.19 - Fluxo no entreferro do motor – inteligente no modo normal: caso 2.

No modo adaptado, verifica-se que durante a perturbação o fluxo é sustentado, porém com uma freqüência menor, em função da atuação do controle. Quando a perturbação é encerrada, o fluxo retoma seu valor original, tanto em magnitude quanto em freqüência, conforme a Figura 4.20.

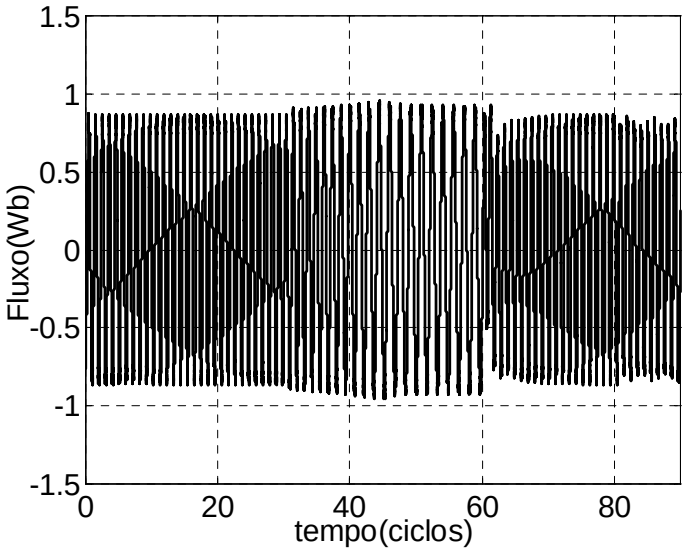


Figura 4.20 – Fluxo no entreferro do motor no modo adaptado: caso 2.

Finalizando o caso 2, será discutido o comportamento das potências ativa e reativa.

A Figura 4.21 mostra que após a perturbação, o condicionador convencional continua a solicitar praticamente a mesma potência ativa da rede elétrica para manter o seu funcionamento. Deve-se ressaltar que cargas do tipo motor possuem característica de potência constante.

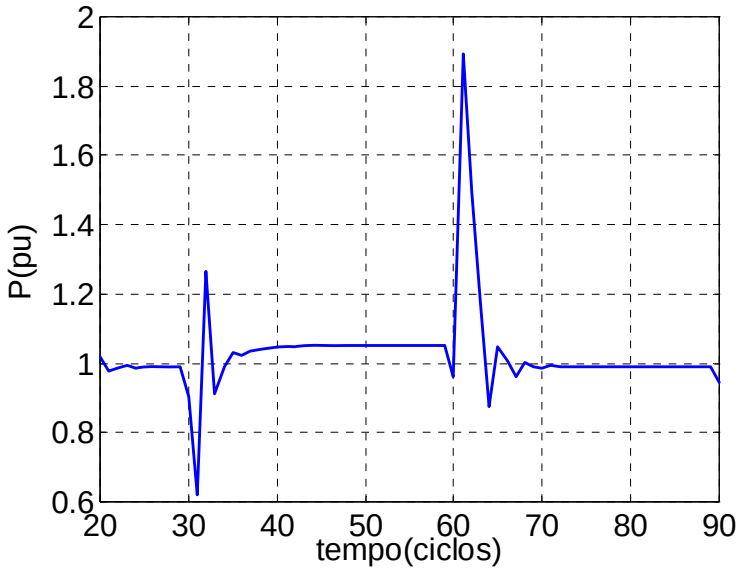


Figura 4.21 – Potência ativa – convencional: caso 2.

Para o condicionador tipo inteligente, verifica-se que no início da perturbação a solicitação de potência ativa é nula. Isto ocorre porque o capacitor sustenta a tensão momentaneamente, de forma que este valor seja maior que a tensão da rede elétrica. Assim, os diodos do retificador são polarizados reversamente, resultando em uma corrente nula.

Com relação ao modo normal, visto na Figura 4.22, o tempo de polarização reversa é menor, pois a descarga do capacitor é mais rápida. Quando o tempo de descarga é superado, a solicitação de potência ativa da rede elétrica volta a ser praticamente 1pu.

Ainda na Figura 4.22 observa-se que no modo adaptado, a descarga do capacitor é mais lenta, de modo que a solicitação de potência ativa seja nula por um período maior. Quando a polarização reversa termina, o sistema alimenta o aparelho com potência inferior a 1pu, pois a potência solicitada pelo compressor é menor durante a perturbação.

No final do distúrbio, os três equipamentos desenvolvem um aumento súbito na potência ativa. No caso do condicionador convencional, isto ocorre devido ao restabelecimento da tensão de alimentação. No entanto, este efeito é bem mais acentuado para o condicionador inteligente, pois além de o motor voltar a funcionar com tensão plena, ocorre a recarga do capacitor do elo CC, que é um fenômeno semelhante a um curto circuito, de modo que o pico ultrapassa 8pu.

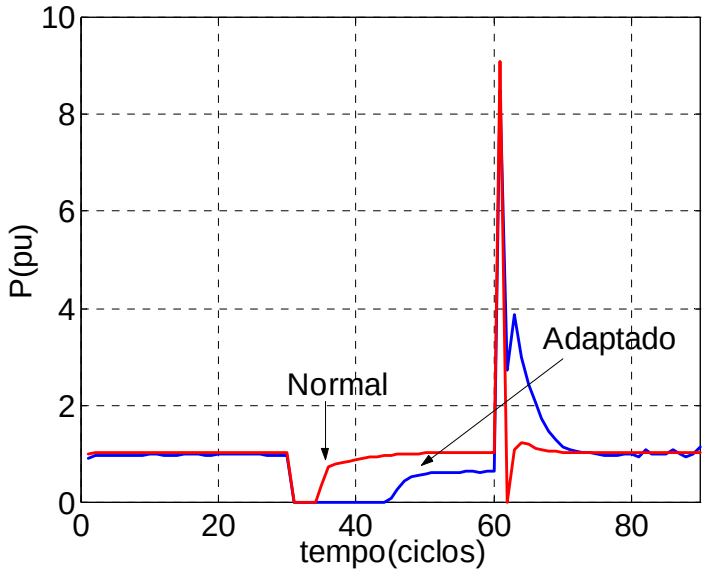


Figura 4.22 – Potência ativa - inteligente: caso 2.

Analisando a potência reativa, na Figura 4.23, verifica-se que o condicionador convencional aumenta a solicitação durante toda perturbação e, além disso, ocorrem elevados picos tanto no início quanto no fim da perturbação. Este comportamento é atribuído à redução da rotação do motor, o

que exige praticamente uma nova partida, e como o conjugado nestas condições é baixo, há uma elevação da corrente de baixo fator de potência.

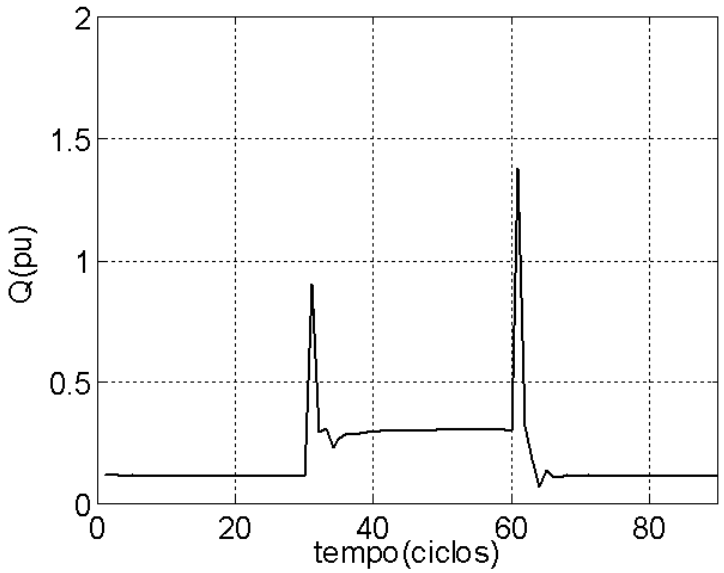


Figura 4.23 – Potência reativa – convencional: caso 2.

No caso do condicionador inteligente, no início da perturbação a solicitação é nula, devido às mesmas razões mencionadas anteriormente, para os modos normal e adaptado. É interessante observar que no final da perturbação o fluxo de reativos é negativo, o que é atribuído à recarga do capacitor.

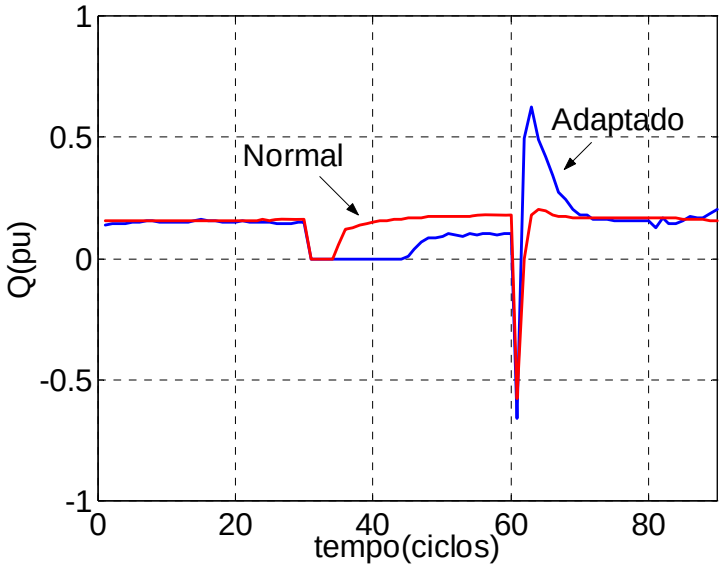


Figura 4.24 – Potência reativa - inteligente: caso 2.

4.3.3 - Caso 3: Interrupção

Desta vez, o comportamento do equipamento é analisado na condição de uma interrupção no fornecimento de energia com duração de 5 ciclos, vista na Figura 4.25.

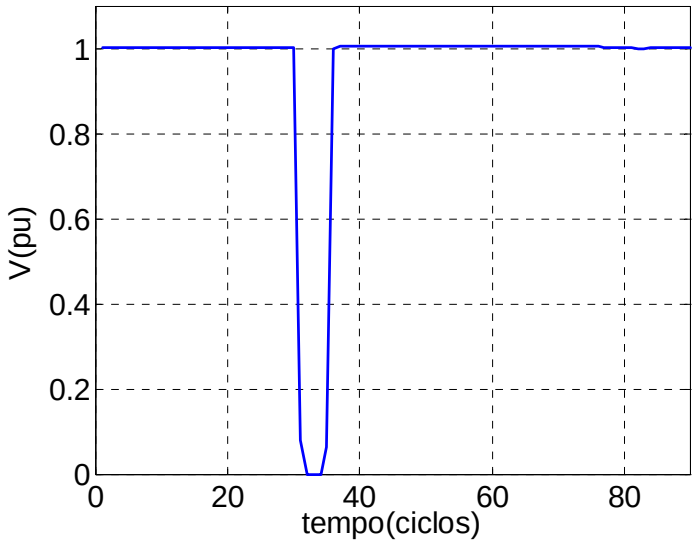


Figura 4.25 – Perturbação aplicada ao caso 3.

A Figura 4.26 mostra que, para compensar a redução na tensão do elo CC, o controle implementado para o modo adaptado reduz a freqüência da moduladora para 52,15Hz. Esta característica produz diferenças no comportamento do equipamento, de acordo com a Figura 4.26.

Da mesma forma que no caso anterior, a redução da tensão de alimentação diminui a tensão do elo CC, que por sua vez causa a redução da velocidade angular no eixo do motor.

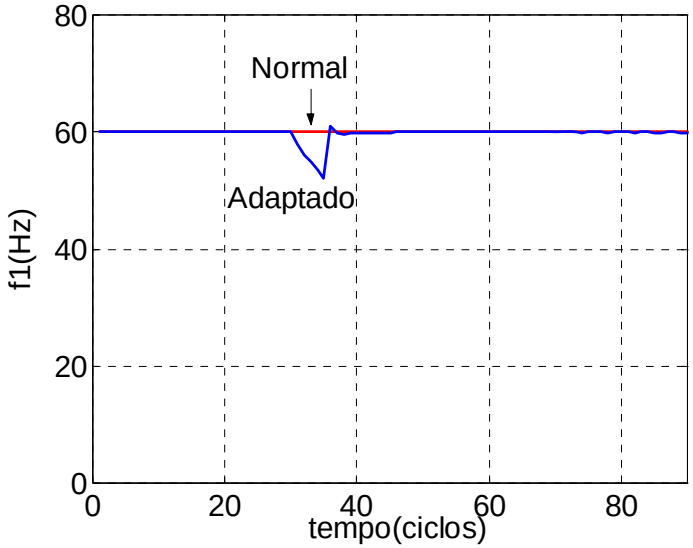


Figura 4.26 – Freqüência da moduladora.

Com relação à velocidade do condicionador tipo convencional, vista na Figura 4.27, verifica-se que esta grandeza chega a se anular, e são decorridos cerca de 20 ciclos até a retomada do valor nominal.

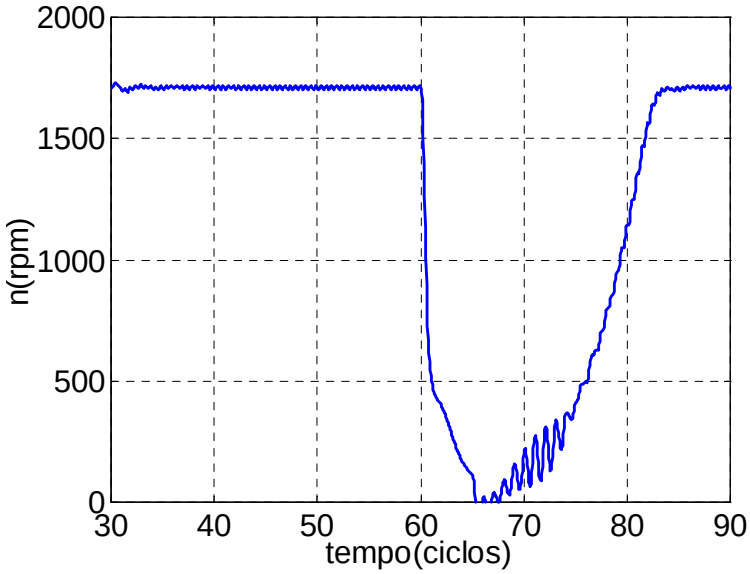


Figura 4.27 – Velocidade do eixo do motor – convencional: caso 3.

No caso dos condicionadores tipo inteligente, a retomada de velocidade foi cerca de 5 ciclos mais rápida. Este comportamento é atribuído ao acúmulo de energia no elo CC.

Assim como na operação do modo adaptado, há também uma diminuição na freqüência da moduladora, e a velocidade sofre maior redução, pois no modo normal é reduzida para 1609rpm, enquanto no modo adaptado atinge 1516rpm, conforme mostra a Figura 4.28.

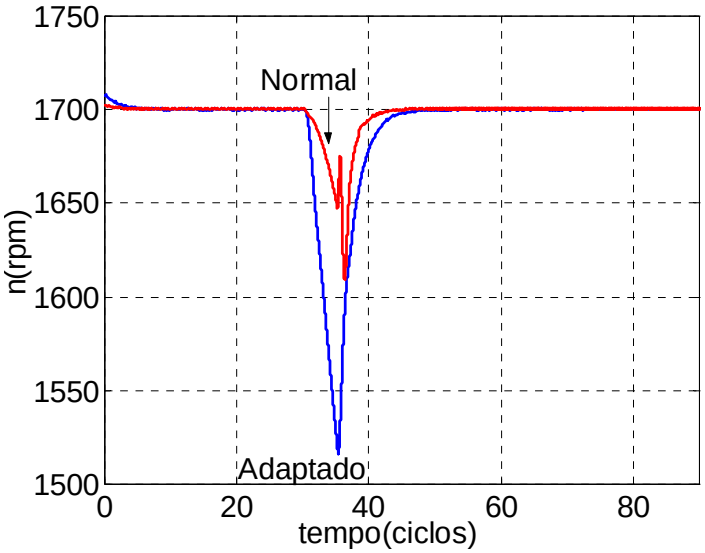


Figura 4.28 – Velocidade do eixo do motor - inteligente: caso 3.

Como a velocidade do condicionador tipo convencional é nula durante a perturbação, a potência mecânica desenvolvida no eixo é anulada, de acordo com a Figura 4.29.

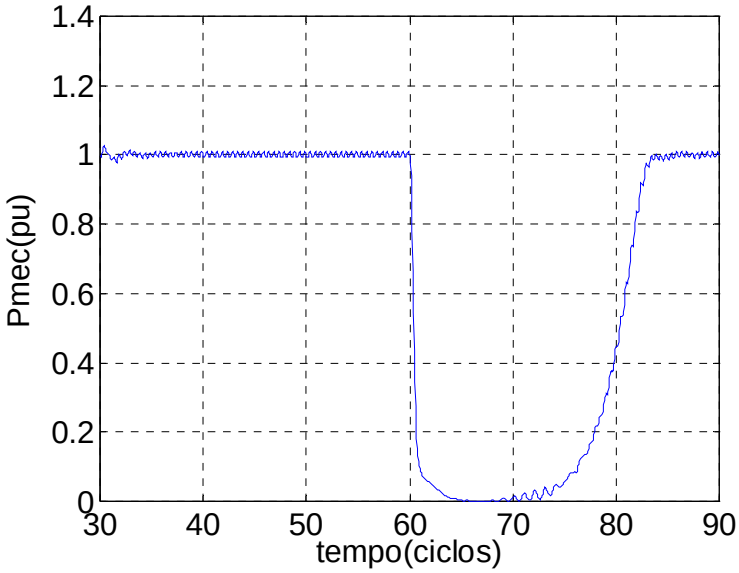
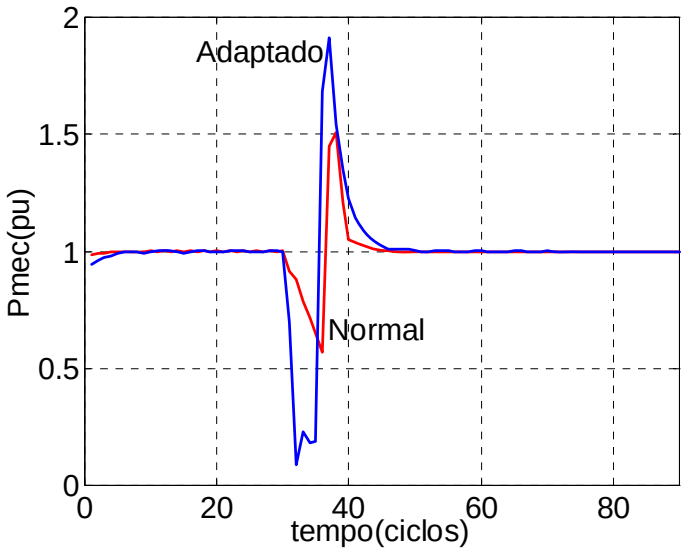


Figura 4.29 – Potência mecânica no eixo – convencional: caso 3.



(b) Tipo inteligente

Figura 4.30 – Potência mecânica no eixo - inteligente: caso 3.

A Figura 4.30 mostra que, para o condicionador tipo inteligente operando no modo normal, a potência mecânica atinge 0,56pu, enquanto no modo adaptado a potência chega a 0,08pu. Esta diferença é atribuída à queda mais acentuada na velocidade angular no modo adaptado.

Durante a perturbação, a potência mecânica é menor para o caso adaptado, assim a tensão do elo CC cai mais lentamente até se igualar a 265V no final da

interrupção, como indicado na Figura 4.31. Considerando o modo normal, a tensão torna-se igual a 200V.

No final da perturbação, o motor exige maior potência no modo adaptado. Para retomar a velocidade, há uma maior solicitação da energia acumulada no elo CC, o que pode ser visto na Figura 4.32. Observa-se que a tensão reassume o valor de regime permanente mais rapidamente, porque há maior solicitação de potência para restaurar as condições nominais de velocidade.

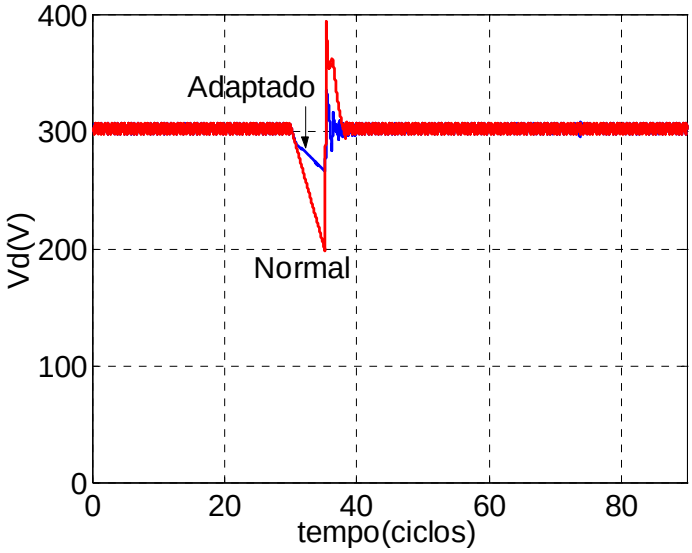


Figura 4.31 - Tensão no elo CC: caso 3.

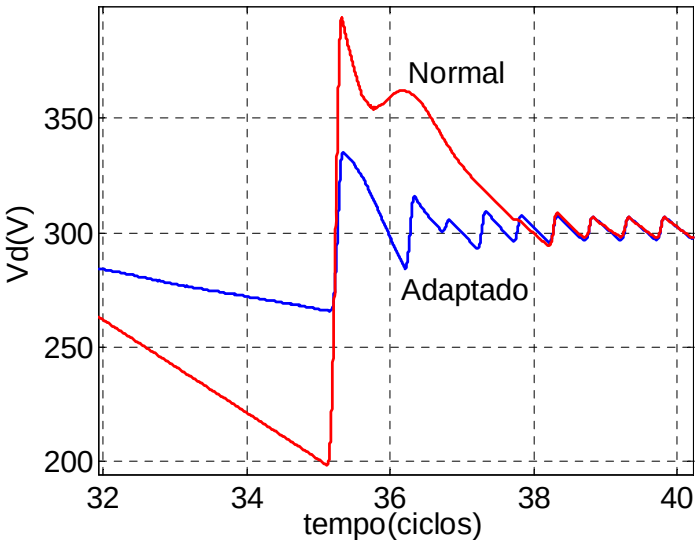


Figura 4.32 – Ampliação da tensão no elo CC: caso 3.

Pela Figura 4.33, verifica-se que a corrente do condicionador tipo convencional a que, após aplicada uma interrupção plena (quando a tensão é nula) com duração de 5 ciclos, a corrente decresce para um valor praticamente nulo, com o conseqüente desligamento do equipamento. É importante ressaltar que o desligamento ocorre devido à ausência de conjugado (tensão e corrente nulas), e não pela atuação da proteção. Uma vez restabelecida a tensão de suprimento, a corrente absorvida aumentam até atingir 18A, valore da ordem da corrente de partida direta, na tentativa da retomada do funcionamento.

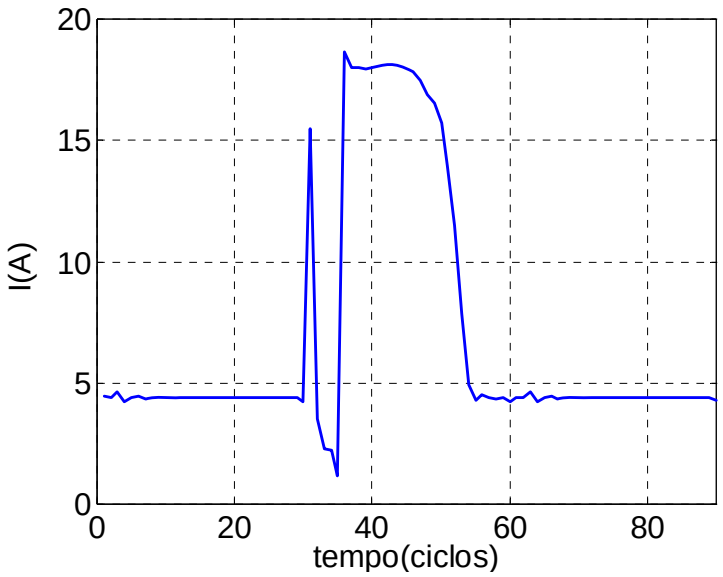


Figura 4.33 – Corrente de alimentação – convencional: caso 3.

A corrente do condicionador tipo inteligente é vista na Figura 4.34. Tanto no modo normal quanto no adaptado, a corrente é nula durante o afundamento de tensão. Isto ocorre porque a tensão do elo CC fica maior que a da rede fazendo com que os diodos do retificador fiquem reversamente polarizados.

Quando a tensão da rede elétrica volta ao valor nominal ocorre uma grande solicitação de corrente da rede elétrica em função da recarga do capacitor. Conforme mostrado na Figura 4.31, durante o afundamento de tensão o

capacitor é mais descarregado no modo normal, o que faz com que a corrente solicitada da rede elétrica seja maior alcançando 60A, o que corresponde a 10,71 vezes o valor nominal. Já no modo adaptado, a corrente alcança 23A, isto é, quatro vezes maior que o valor nominal.

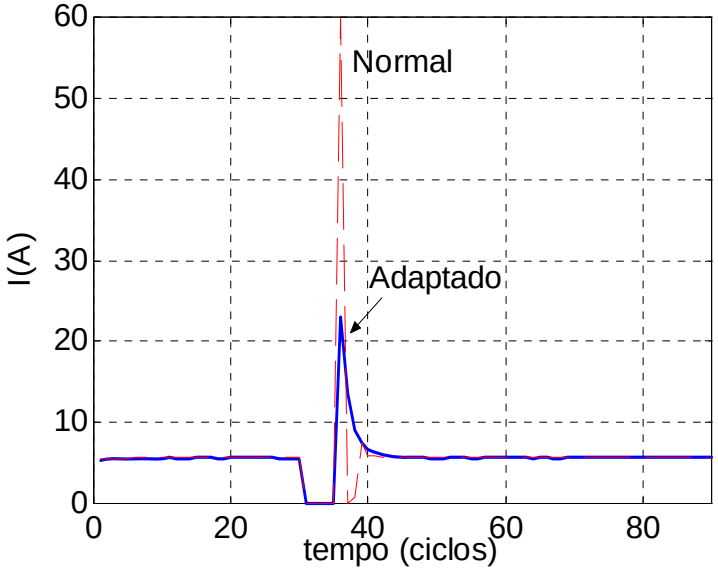


Figura 4.34 – Corrente de alimentação - inteligente: caso 3.

O conjugado eletromagnético do condicionador tipo convencional é anulado, e também há um longo período de restauração, conforme mostra a Figura 4.35.

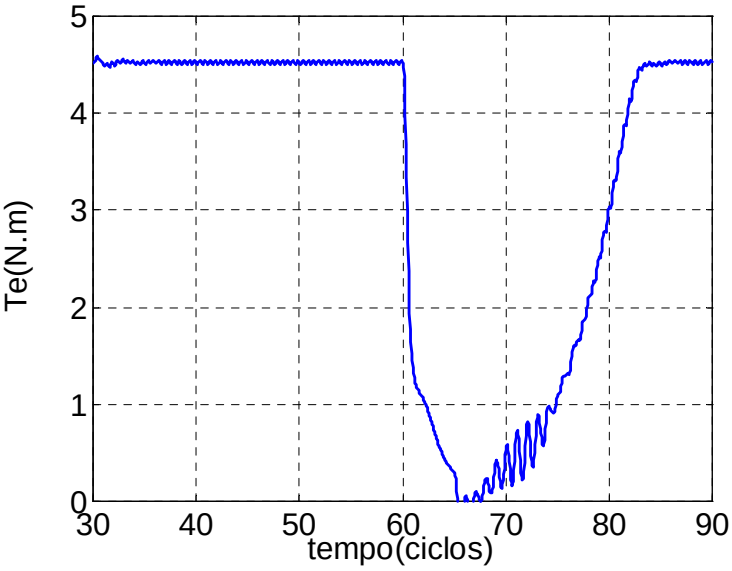


Figura 4.35 – Conjugado eletromagnético – convencional: caso 3.

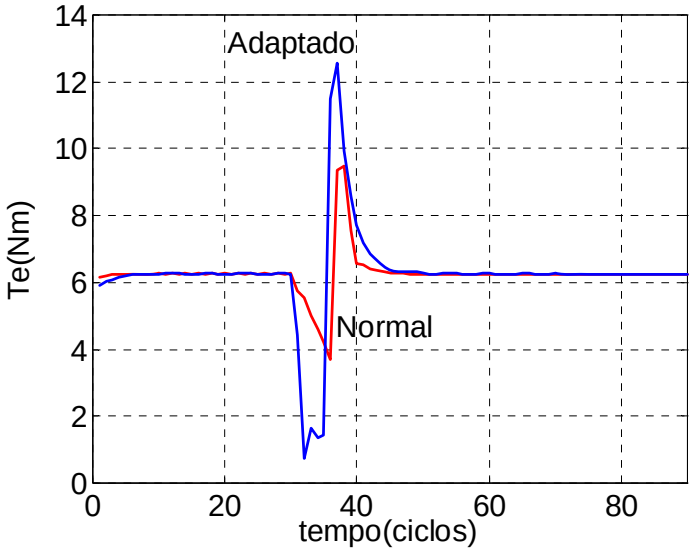


Figura 4.36 – Conjugado eletromagnético - inteligente: caso 3.

Na Figura 4.36, verifica-se que o conjugado eletromagnético do condicionador tipo inteligente adaptado decresce de forma mais acentuada durante a perturbação se comparado com o modo normal, pois como a potência exigida da rede decresce com a redução de tensão, há uma corrente menor, e conseqüentemente o conjugado é reduzido. Como a interrupção é muito curta, não é possível observar a restauração do conjugado, assim como no caso anterior, que trata de um afundamento de 30 ciclos. No entanto, quando a tensão da rede é restaurada, há um crescimento mais acentuado no modo adaptado, já que a velocidade do motor está menor. Assim, com o restabelecimento da corrente, o conjugado aumenta de modo a restaurar as condições de rotação do eixo do motor. A Figura 4.37 ilustra o comportamento do fluxo de entreferro, quando na operação normal o fluxo é reduzido durante a perturbação, ao contrário da operação adaptada, onde este é mantido, porém com freqüência reduzida, visto na Figura 4.38.

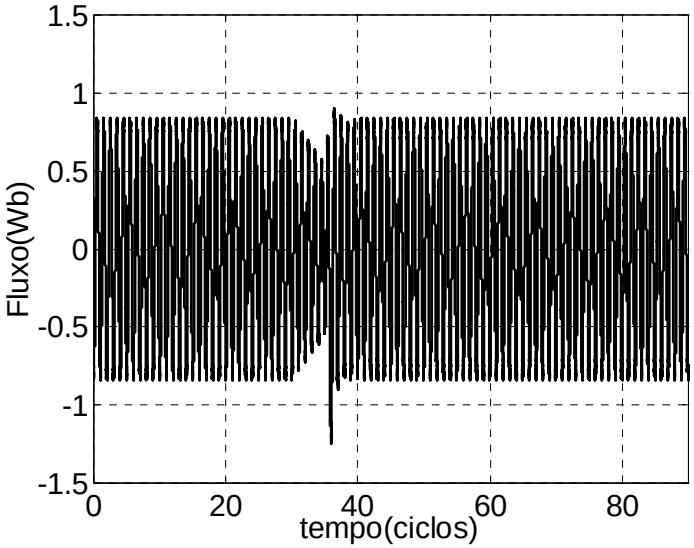


Figura 4.37 – Fluxo no entreferro do motor operando no modo normal: caso 3.

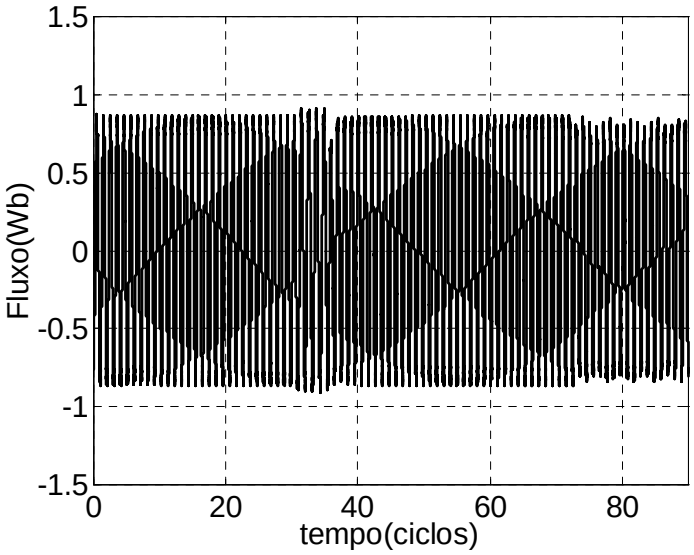


Figura 4.38 – Fluxo no entreferro do motor operando no modo adaptado: caso 3.

A Figura 4.39 mostra a potência ativa do condicionador tipo convencional. Observa-se que, no restabelecimento da tensão de suprimento, há uma elevada solicitação que supera 3pu por mais de 20 ciclos. Este tempo de restauração é mais longo que no caso do condicionador inteligente, devido à maior queda de velocidade, e assim o comportamento é semelhante a uma nova partida.

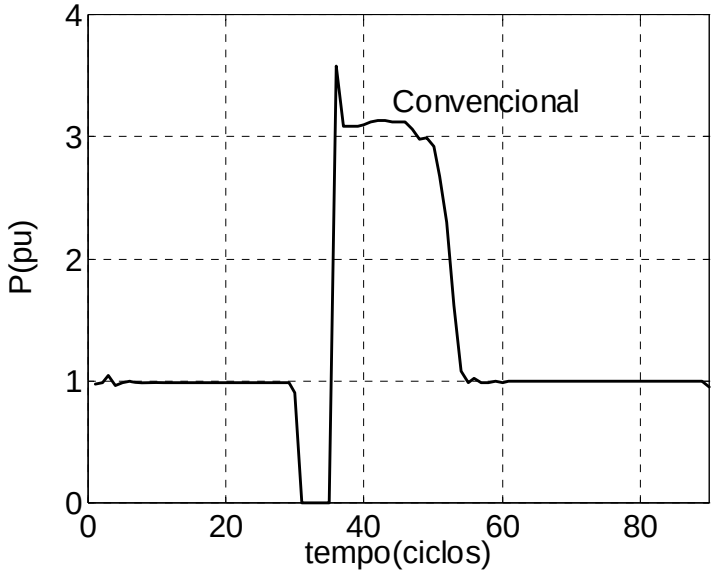


Figura 4.39 – Potência ativa – convencional: caso 3.

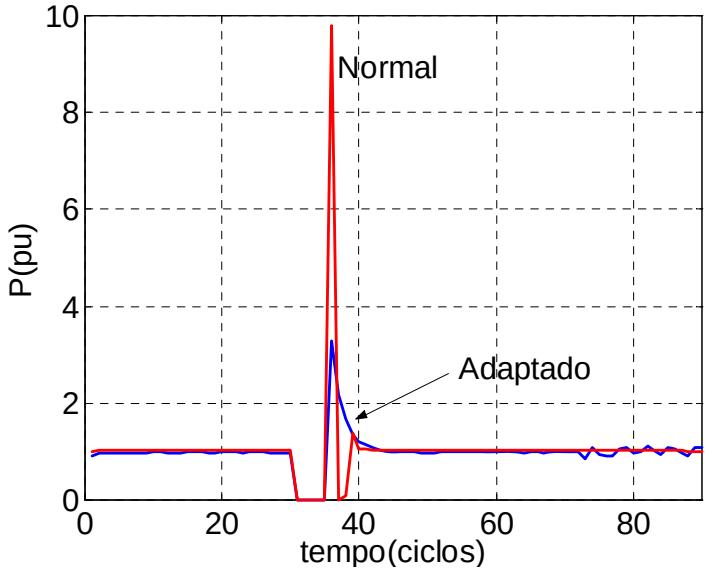


Figura 4.40 – Potência ativa - inteligente: caso 3.

Para o condicionador inteligente, a Figura 4.40 mostra que a potência ativa do aparelho que opera no modo normal apresenta um pico considerável, que supera 9pu no fim da perturbação devido à recarga do capacitor. No modo adaptado, o pico alcançado é menor, em função da redução da potência mecânica que, conseqüentemente, solicita menos energia acumulada no capacitor.

O processo de análise do comportamento da potência reativa é análogo, conforme mostra a Figura 4.41. O condicionador tipo convencional solicita uma grande quantidade de reativos por um longo período, para retomar a velocidade do compressor.

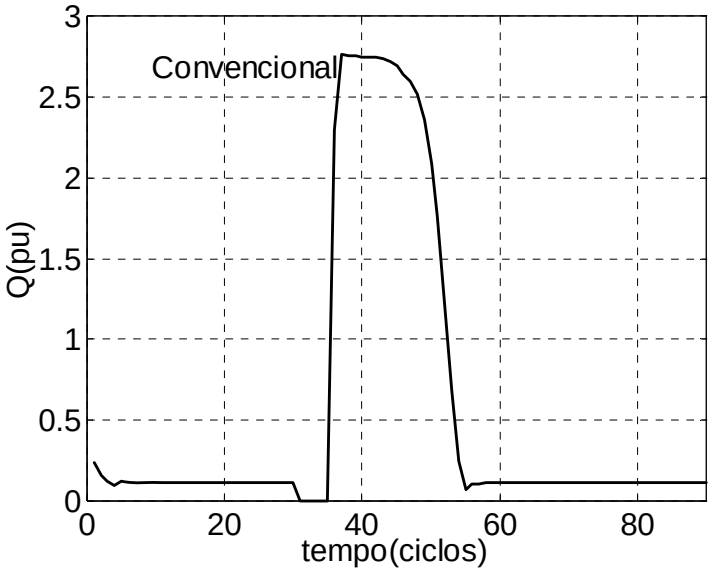


Figura 4.41 - Potência reativa – convencional: caso 3.

Na Figura 4.42, verifica-se que o condicionador inteligente, operando no modo normal, passa a fornecer energia reativa ao sistema, em função da recarga do capacitor.

Para a operação adaptada, não há inversão do fluxo de reativos, pois além da descarga do capacitor ser menor, o sistema precisa restaurar a velocidade do motor, como se houvesse uma nova partida. Assim, o sistema precisa fornecer potência reativa adicional, que neste caso é 0,35pu, representando 1,25 vezes o valor nominal.

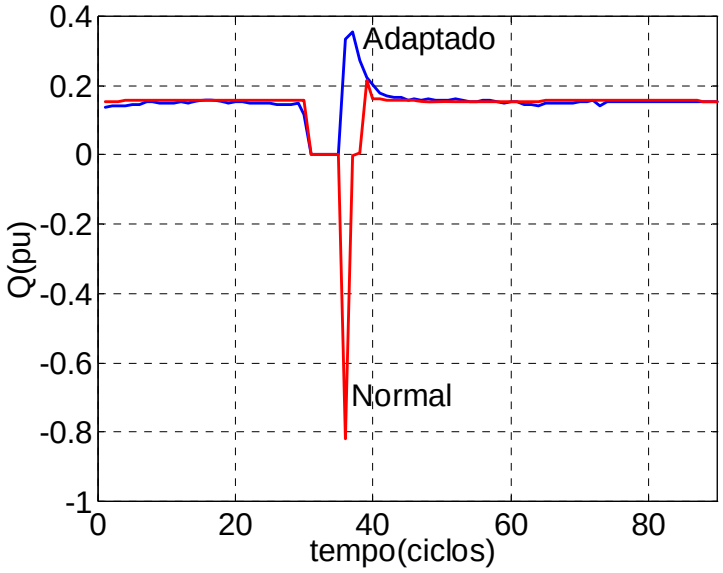


Figura 4.42 – Potência reativa - inteligente: caso 3.

Finalizando o estudo deste capítulo, é necessário comparar o desempenho de cada modelo perante ao tempo de processamento, que é mostrado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Características de simulação para cada modelo utilizado

Modelo	Passo de simulação	Tempo de processamento
Convencional	0,1ms	3,92s
Normal	5,0μs	133s
Adaptado	5,0μs	133s

Nota-se claramente que o modelo do condicionador convencional precisa de um tempo de processamento menor quando comparado com os modelos do tipo inteligente. A razão para isto é a elevada freqüência de chaveamento que precisa de um passo de simulação pequeno. O passo máximo de simulação é dado pela expressão (4.11), e no caso do modelo convencional a maior freqüência que aparece é de 60Hz, o que permite a utilização de um passo de 0,1ms.

4.4 - Considerações Finais

Este capítulo mostrou através de simulações computacionais o comportamento individual de cada um dos condicionadores de ar vistos nos capítulos anteriores, sendo que os aparelhos do tipo inteligente mostraram-se mais eficientes em relação aos convencionais durante perturbações do tipo afundamentos de tensão e interrupções no fornecimento, em função das seguintes constatações:

- No início da perturbação, a corrente é nula, enquanto os aparelhos convencionais aumentam a solicitação de forma a manter a potência no eixo;
- Durante a perturbação, a demanda de potência ativa é menor para o condicionador inteligente, o que alivia o sistema quando o mesmo está debilitado;
- A potência reativa do condicionador convencional desenvolve um aumento significativo durante todo o período do afundamento de tensão;
- No final de uma interrupção de fornecimento, os condicionadores convencionais têm um comportamento similar ao de uma nova partida, pois, ao contrário dos inteligentes, não possuem um elo CC que acumula energia momentaneamente.

No entanto, os aparelhos do tipo inteligente também apresentam algumas desvantagens, tais como:

- Elevada distorção harmônica;
- Baixo fator de potência;

- No final das perturbações, a demanda de potência ativa apresenta um elevado pico, pois nestas condições o capacitor encontra-se descarregado, e a recarga de um capacitor assemelha-se a um curto circuito;
- Maior custo para o usuário.

Através dos resultados das potências ativa e reativa, é possível concluir que um sistema estaria menos debilitado na presença de condicionadores inteligentes. Para o caso de unidades convencionais, os prejuízos ao sistema podem ser maiores.

Na Ásia, este tipo de equipamento é amplamente difundido, e os fabricantes desenvolvem diversas técnicas de controle de temperatura, preocupando-se também com aspectos que se referem à melhoria de distorção harmônica e fator de potência. No que tange à adaptação para afundamentos de tensão, o fabricante Keling Electric [9] implementou um condicionador de ar em que a tensão do elo CC é monitorada constantemente. O objetivo é ajustar a freqüência de operação para manter constante a relação volts/hertz na ocorrência de afundamentos de tensão.

Na literatura, não foi encontrada nenhuma referência que trate da modelagem e do desempenho desta técnica em sistemas de potência. Assim, a lógica de controle foi implementada no simulador SABER.

Conforme observado, a carga mecânica do compressor diminui. Sabendo disto, a partir dos resultados dos estudos de casos foram obtidas as seguintes conclusões:

- Durante os afundamentos de tensão, o capacitor demora mais para descarregar, pois a potência solicitada pelo motor é menor com a redução da freqüência;

- Com a descarga mais lenta, o capacitor bloqueia por mais tempo os diodos da ponte retificadora, de modo que o fluxo de potência da rede elétrica para a carga é nulo, sendo a duração deste fenômeno maior para o condicionador que não regula a freqüência de operação. Isto é interessante para o sistema, visto que a tensão encontra-se em níveis baixos;
- No final do afundamento de tensão, o condicionador que opera no modo adaptado desenvolve uma corrente maior, pois é preciso reacelerar o compressor, que está operando com freqüência menor que a nominal. Já no modo normal, o condicionador tem que reacelerar menos, pois a carga mecânica possui rotação maior;
- O oposto ocorre no fim de uma interrupção de fornecimento, pois, por se tratar de uma perturbação curta, o capacitor não desenvolve uma descarga apreciável. Assim, a corrente produzida no restabelecimento da tensão é menor.

Em função dos resultados alcançados no início e durante as perturbações, é possível afirmar que a operação no modo adaptado oferece diversas vantagens, e que condicionadores deste tipo tendem a oferecer benefícios significativos quando conectados à rede elétrica. Deve-se ressaltar ainda que a redução da potência mecânica não prejudica a climatização do ambiente, pois a temperatura apresenta uma constante de tempo muito grande.

CAPÍTULO V

Análise do Comportamento de um Sistema Elétrico Típico

5.1 - Considerações Iniciais

Conforme foi ressaltado no Capítulo 1, a representação da carga tem adquirido importância cada vez maior nos estudos de sistemas de potência. Assim, modelos matemáticos mais precisos e confiáveis oferecem as condições necessárias para se obter resultados mais realísticos nestes tipos de simulações computacionais.

Um sistema elétrico é composto por vários tipos de cargas. Assim, deve-se considerar também a composição qualitativa e quantitativa de toda a carga de uma rede. Partindo desta premissa, pretende-se simular um sistema elétrico de distribuição analisando a influência da composição e, principalmente, de cada tipo de condicionador de ar abordado no decorrer deste trabalho.

Para facilitar a compreensão, este capítulo inicia-se com a apresentação de definições usuais de termos técnicos referentes à modelagem de cargas. Por fim, tem-se resultados computacionais de um estudo em um sistema de distribuição envolvendo diversos tipos de modelos de cargas.

5.2 - Termos Referentes à Modelagem de Cargas

O termo carga possui vários significados no sistema de potência, isto é, carga pode representar:

- Um equipamento que consome energia;
- O consumo total de todos os equipamentos conectados no sistema;
- Uma porção do sistema que é representada como um único equipamento consumidor de potência conectado a uma barra;
- A potência de saída de um ou vários geradores [1].

Outras definições importantes no tratamento da modelagem de carga são apresentadas a seguir. A Figura 5.1 ilustra as terminologias citadas [1].

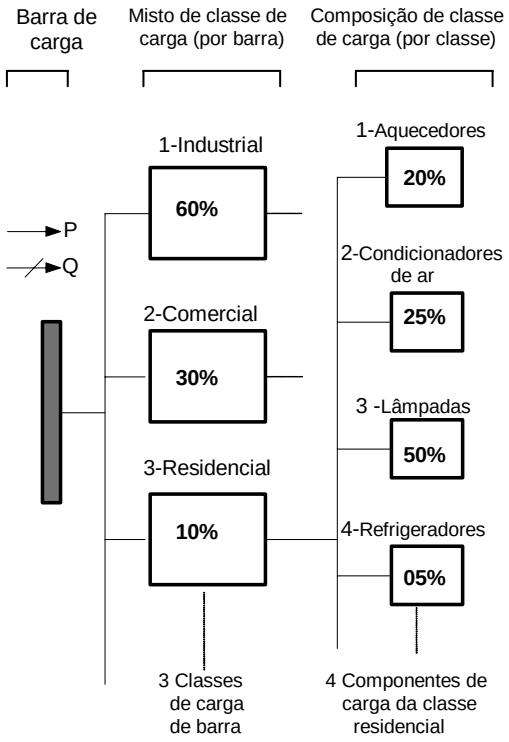


Figura 5.1 – Terminologia utilizada na estrutura de modelagem de carga baseada em componentes.

Componente de carga: é o equivalente agregado de todos os equipamentos de um tipo similar ou específico, tais como aquecedores de água, lâmpadas fluorescentes e condicionadores de ar.

Classe de carga: define uma categoria, isto é, residencial, comercial ou industrial. Para fins de modelagem, é útil agrupar as cargas dentro de várias classes, cada uma possuindo composição e características similares.

Composição de classe de carga: é a composição fracional (ou percentual) da carga dividida em componentes de carga. Esta definição pode ser aplicada à barra ou a uma classe de carga específica.

Misto de classe de carga: é a agregação fracional (ou percentual) da carga da barra, dividida em classes de carga.

Característica de carga: é um conjunto de parâmetros, tais como fator de potência, variação da potência com a tensão (e a freqüência), entre outros, que caracterizam o comportamento de uma carga específica. Esta definição pode ser aplicada a um equipamento específico, a um componente de carga, classe de carga, ou a carga total da barra de carga.

5.3 - Sistema Elétrico Utilizado

Conforme mostrado na Figura 5.2, o sistema [30] tem origem na barra 1 de 13,8 kV com nível de curto circuito de 200 MVA. Em seguida o transformador T_1 eleva a tensão para 69kV, que segue até o transformador T_2, e a partir do secundário deste, correspondente a barra 5, deriva-se a rede de distribuição em 13,8kV.

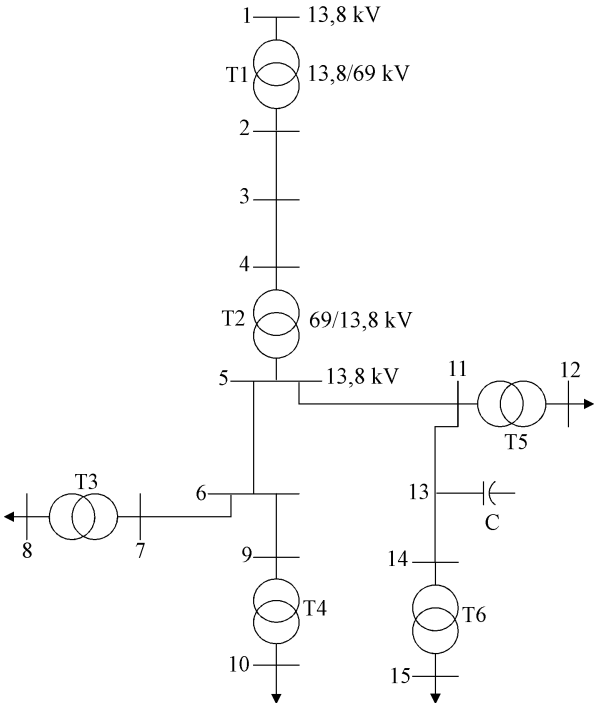


Figura 5.2 – Sistema de distribuição analisado.

Esta rede contém quatro transformadores de 50 kVA (de T3 a T6), operando à plena carga com fator de potência de 0,9 atrasado. Diante do exposto serão fornecidos os dados utilizados para a simulação.

5.3.1 - Dados de carga

As cargas estão conectadas nas barras 8, 10, 12 e 15, e a sua composição é a mesma adotada na [1], onde 25% é composta por condicionadores de ar, 5% de refrigeradores e o restante de 70% é representado por cargas estáticas, sendo estas compostas da seguinte forma:

- Potencia ativa: 78% de corrente constante e 22% de impedância constante;
- Potência reativa: 100% de impedância constante.

Conforme descrito no capítulo inicial, esta composição é utilizada pela CELTINS para estudos no seu sistema elétrico, sendo assim será considerado também nesta análise o caso em que toda a carga seja composta desta forma.

Considerando o modelo dinâmico da carga, a parcela referente aos condicionadores de ar corresponde a um motor equivalente de 12,5 kVA. Após a aplicação dos métodos de agregação discutidos anteriormente, no capítulo 3, foram obtidos os seguintes parâmetros para os condicionadores convencional e inteligente.

Tabela 5.1 – Parâmetros do motor de indução monofásico equivalente.

R_a Ω	L_a H	R_b Ω	L_b H	R_A=R_B Ω	L_A=L_B H	J kg.m^2	C μF
0,48	0,10	1,43	0,06	5,62	0,04	0,0015	140

Tabela 5.2 – Parâmetros do motor de indução equivalente para o condicionador inteligente.

R_s Ω	X_s Ω	R_r Ω	X_r Ω	X_M Ω	J Kg.m²
0,10	0,10	0,01	0,01	0,32	0,0015

Pelo fato dos condicionadores convencionais possuírem duas fases, serão utilizados nas simulações três motores de 4,16 kVA conectados em delta.

Com relação aos refrigeradores, deve-se utilizar um motor equivalente de 2,5kVA, que utiliza os parâmetros da Tabela 5.3 [31].

Tabela 5.3 – Parâmetros da parcela de carga correspondente a refrigeradores.

R_s pu	X_s pu	R_r pu	X_r pu	X_M pu	H s
0.56	0.087	0.05	0.082	2.40	0.28

onde:

R_s – resistência do estator [pu];

X_s – reatância do estator [pu];

R_r – resistência do rotor [pu];

X_r – reatância do rotor [pu];

X_m – reatância de magnetização [pu];

H – Constante de inércia [s].

5.3.2 - Dados de linhas e transformadores

Os dados das linhas e dos transformadores são mostrados nas tabelas seguintes.

Tabela 5.4 – Dados de linhas.

Linha	R(Ω/km)	X(Ω/km)	L(km)
2-3	0,2	0,5	20
5-6	0,19	0,38	4
6-7	0,19	0,38	2,5
6-9	0,19	0,38	2
5-11	0,19	0,38	7
11-13	0,19	0,38	0,5
13-14	0,19	0,38	0,5

Tabela 5.5 – Dados de transformadores.

Transformador	V(kV)	S	X(%)	Ligação
T_1	13,8/69	10MVA	6	Δ/Δ
T_2	69/13,8	10MVA	6	Δ/Δ
T_3	13,8/0,22	50kVA	3	Δ/Y
T_4	13,8/0,22	50kVA	3	Δ/Y
T_5	13,8/0,22	50kVA	3	Δ/Y
T_6	13,8/0,22	50kVA	3	Δ/Y

Nos transformadores é considerado o efeito da não linearidade do núcleo e para as simulações computacionais são utilizados os seguintes *templates*:

Tabela 5.6 - *Templates* utilizados nas simulações.

Template	**Descrição**
Trafodynl	Transformador não linear Δ/Y
Trafoddnl	Transformador não linear Δ/Δ
Cabo3p_pi	Cabo tripolar com modelo π
v_i	Medidor de tensão e corrente
Conses	Elo da concessionária
chave3s	Chave tripolar
Icte	Carga modelada como corrente constante
Zcte	Carga modelada como impedância constante
mt_ind_abc	Motor de indução trifásico
mt_bif	Motor de indução monofásico
conver_weg_microline	Conversor de freqüência
conver_weg_microline_gh	Conversor de freqüência operando no modo adaptado
carga_arco	Carga mecânica representado o compressor

Com exceção do *template conver_weg_microline_gh*, todos os demais foram desenvolvidos em [27].

Para este estudo, os cabos da rede secundária de distribuição foram omitidos em função da pouca influência física que estes exercem, pois neste tipo de linha só prevalece a resistência e a reatância indutiva dos condutores, não havendo suceptância capacitiva em derivação.

Sabe-se que no projeto destas redes tem-se como meta evitar que a queda de tensão entre os transformadores e os pontos de consumo não ultrapasse 3,5%. Devido a este pequeno valor e as pequenas distâncias entre os transformadores e as cargas, a queda de tensão promovida pelos condutores pode ser omitida para a agregação de cargas no secundário do transformador.

5.4 - Estudos de casos

De forma a analisar o desempenho do sistema de distribuição na presença da carga descrita anteriormente serão realizados dois estudos. O primeiro caso será em regime permanente focando a distorção harmônica e o segundo será a aplicação de um curto circuito trifásico de 200ms na barra 3.

5.4.1 - Caso 1: Análise em Regime Permanente

Antes de analisar o desempenho do sistema elétrico diante de uma perturbação, é interessante observar a distorção harmônica da corrente na saída do alimentador da rede de distribuição e também no primário dos transformadores de carga.

Conforme foi visto anteriormente na Tabela 4.6, o condicionador inteligente, operando isoladamente, apresentou distorção harmônica de corrente igual a 114,14% e fator de potência de 0,59. Como todos os transformadores de distribuição têm a mesma capacidade e possuem a mesma carga, será analisada a corrente do transformador T_5, vista na Figura 5.3.

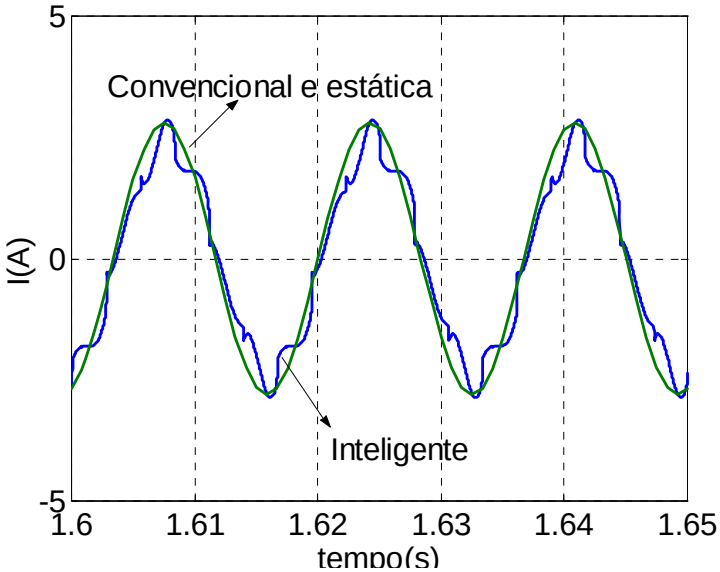


Figura 5.3 – Corrente no secundário do transformador T_5.

Utilizando o modelo estático de carga, a forma de onda da corrente é similar quando se considera a presença do condicionador convencional, apresentando fator de potência unitário e distorção harmônica nula.

Na presença dos condicionadores de ar inteligente a forma de onda da corrente não possui tempo morto, como no caso da operação isolada, vista na Figura 4.4, e a sua distorção harmônica total de corrente é de 6,6%.

Considerando a corrente no secundário do transformador T_2, que alimenta todas as cargas, esta apresentou distorção de 3,1% na presença do condicionador inteligente. Conforme mostra a Figura 5.4, a corrente está bem próxima daquela que corresponde ao caso do condicionador convencional.

No capítulo anterior, a operação isolada do condicionador inteligente apresentou distorção harmônica de corrente de 114,14%, que é um valor bem elevado. Já na operação conjunta com outras cargas a corrente apresentou baixa distorção e a forma de onda mais próxima de uma senoide. Este comportamento é atribuído ao fato de 75% da carga ser linear.

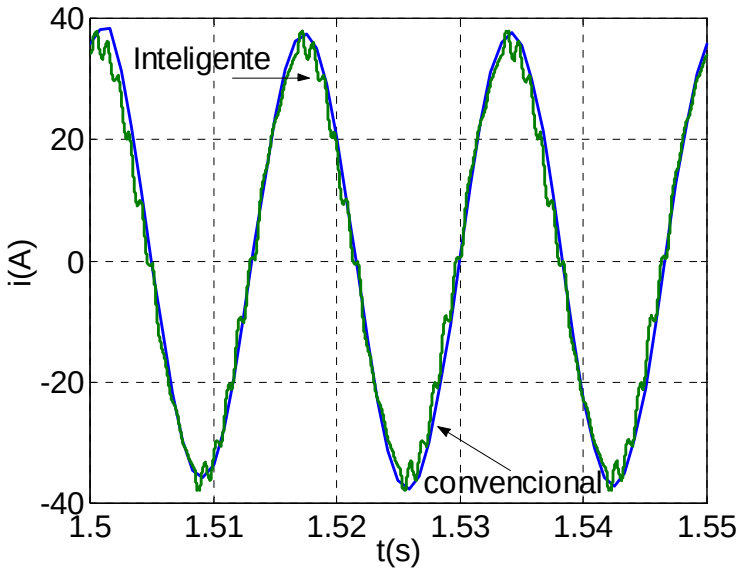


Figura 5.4 - Corrente no alimentador da rede de distribuição

Já as tensões na saída do alimentador (barra 5) e no primário do transformador T_5 (barra 11) não apresentaram distorções em função do elevado nível de curto circuito, conforme mostra a Figura 5.5.

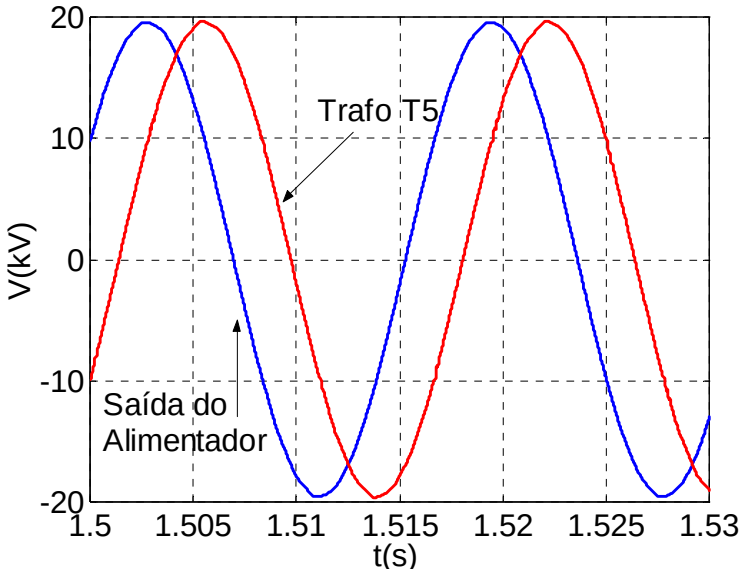


Figura 5.5 - Tensões na saída do alimentador e no primário do transformador T_5.

Cabe ressaltar que para um sistema com tensão entre 13,8 e 69kV, a distorção harmônica de tensão não pode ultrapassar 3% [11].

5.4.2 - Caso 2: Análise de Curto-Circuito

Para analisar a influência global da composição desta carga, será analisado o comportamento das potências ativa e reativa na saída do transformador T_2 frente à ocorrência de um curto circuito, e mais uma vez serão considerados os três tipos de condicionadores de ar previamente citados e analisados.

Aplicando uma falta trifásica na barra 3 com uma impedância de $j113{,}3\Omega$ com duração de 200ms, a tensão resultante no secundário do transformador T_2 chega a 0.81pu, para os três tipos de condicionadores de ar, conforme mostra a Figura 5.6.

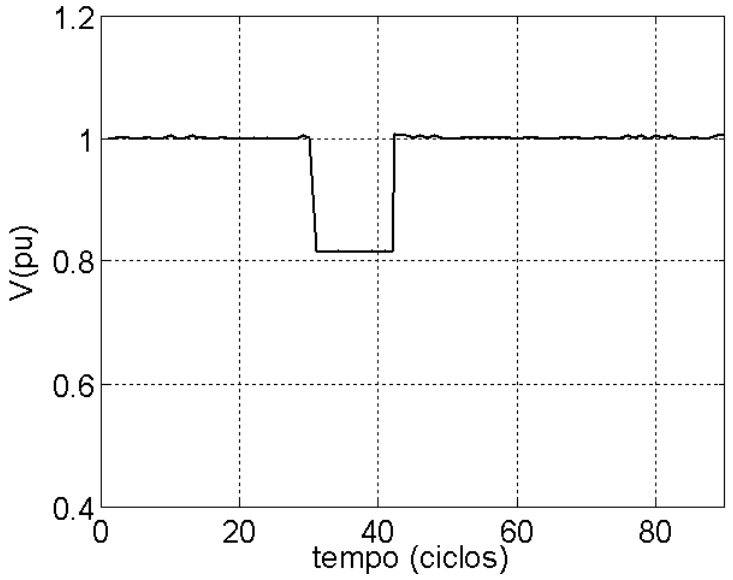


Figura 5.6 – Tensão resultante na subestação localizada na barra 5.

Em regime permanente, a potência ativa de toda a carga corresponde a 127kW. Havendo o curto circuito, a demanda cai para menos de 100kW, considerando a representação ZIP, conforme mostra a Figura 5.7.

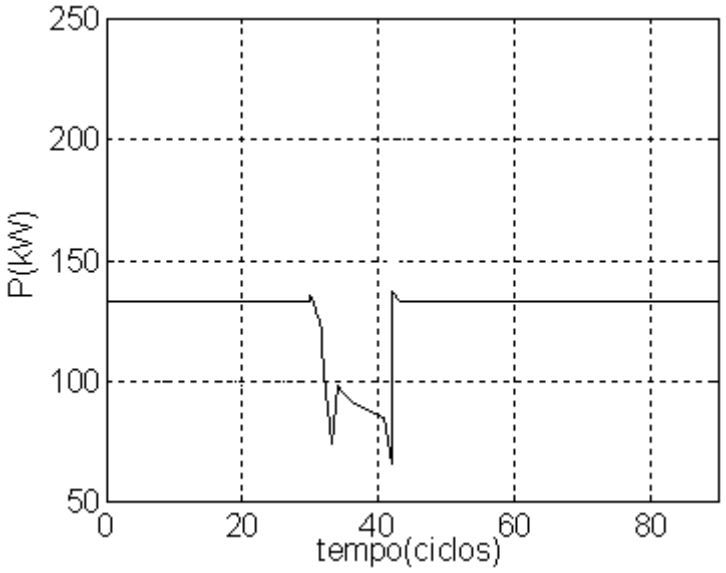


Figura 5.7 - Potência ativa - estática

Considerando que 25% da carga seja de condicionadores do tipo convencional, a demanda cai para 100kW, conforme mostra a Figura 5.8, e no fim da perturbação há um pico de 250kW em função da retomada de velocidade dos compressores e este efeito não foi considerado pela representação ZIP.

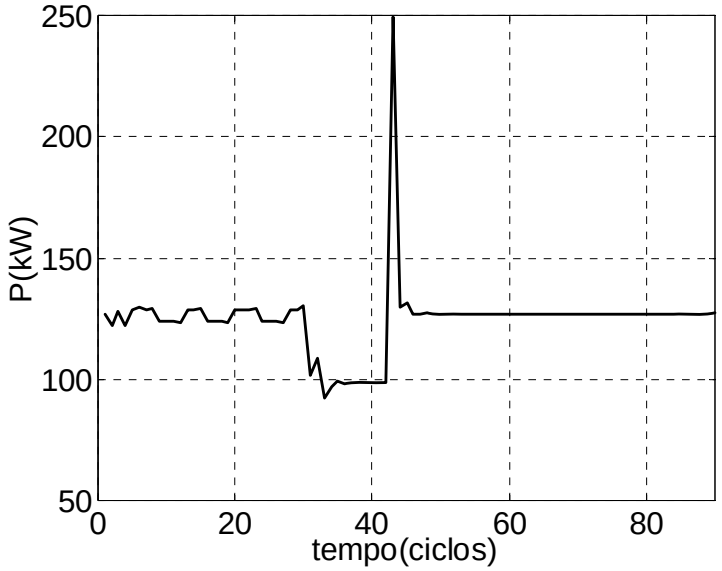


Figura 5.8 - Potência ativa – convencional.

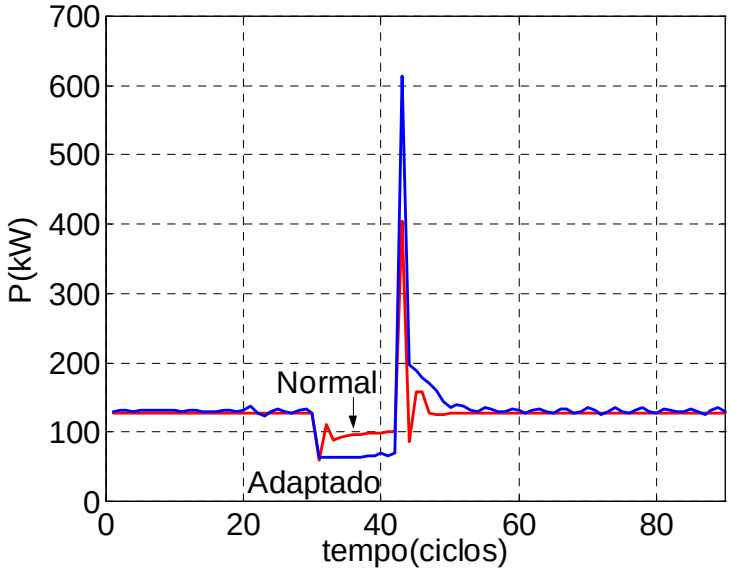


Figura 5.9 – Potência ativa - inteligente.

Já no caso em que todos os condicionadores sejam inteligentes do tipo normal, a potência ativa é reduzida para 95kW, conforme mostra a Figura 5.9, enquanto na presença do tipo adaptado este valor é 64kW, o que corresponde a uma melhor condição durante a perturbação.

Com relação à potência reativa, há solicitação de 102kvar antes da falta. Considerando que a carga seja composta pela representação ZIP, a demanda de reativos cai para 75kW durante a perturbação, conforme mostra a Figura 5.10.

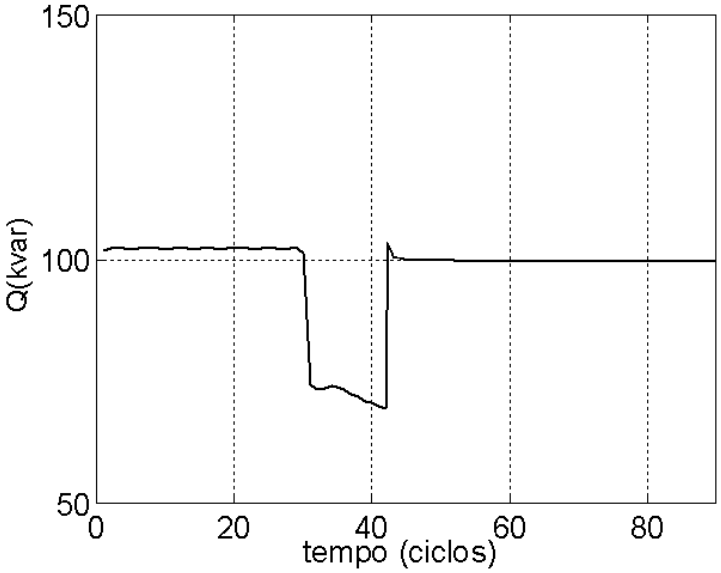


Figura 5.10 - Potência reativa - estática

Na condição em que a parcela referente aos condicionadores seja do tipo convencional, há uma rápida diminuição na absorção de potência reativa, e durante o período da perturbação a solicitação é 92kvar, conforme mostra a Figura 5.11.

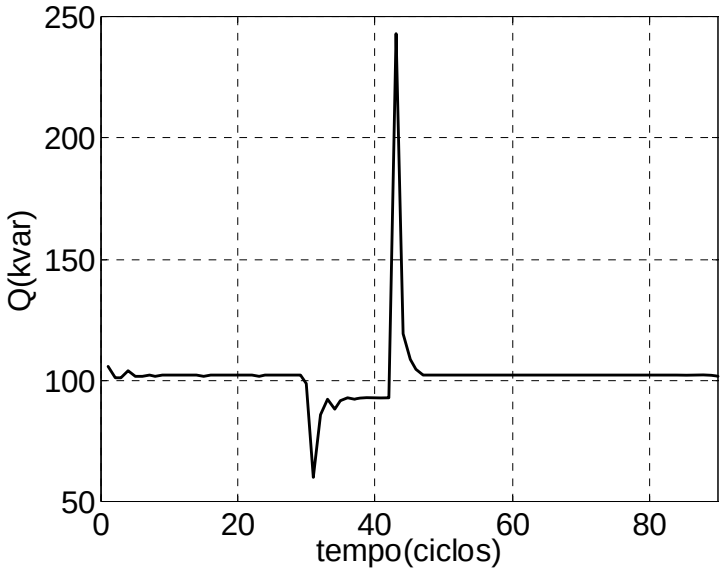


Figura 5.11 – Potência reativa – convencional.

Verifica-se também que há uma forte solicitação de reativos no final da falta em função da retomada de velocidade dos compressores que chegou a 240kvar. Assim como na potência ativa, este efeito não foi observado na representação ZIP.

Considerando que os condicionadores são do tipo inteligente normal, a solicitação de potência reativa decresce para 70kvar, enquanto na presença do condicionador tipo adaptado este valor corresponde a 50kvar, conforme mostra a Figura 5.12. A razão para este comportamento é a menor potência mecânica no modo adaptado na ocorrência da falta.

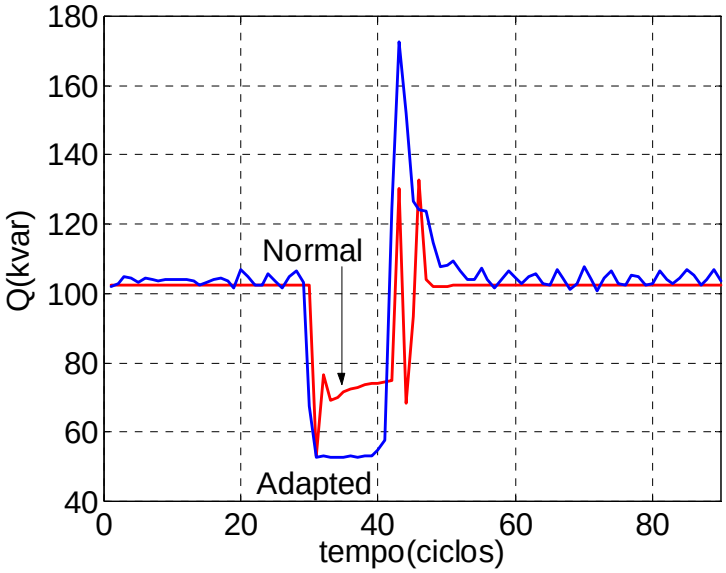


Figura 5.12 – Potência reativa - inteligente.

Em todos os casos em que foram utilizados os modelo dinâmicos, os valores das potências aumentam repentinamente no final da perturbação. Isto é devido à retomada da velocidade para os compressores dos condicionadores de ar, principalmente no caso dos condicionadores convencional e inteligente adaptado, que diminuem a rotação com maior intensidade durante a perturbação.

No que se refere as simulações computacionais, os tempos de processamento estão indicados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Características de simulação para cada modelo utilizado

Modelo	Passo de simulação	Tempo de processamento
Convencional	0,1ms	40s
Normal	5,0µs	64,83min
Adaptado	5,0µs	64,83min
Estático	0,1ms	08s

Conforme se pode observar, a análise com os modelos com conversor de freqüência exigem um elevado tempo de processamento, que ficou em 64,83min, pois precisam considerar a elevada freqüência de chaveamento. O modelo convencional que emprega equações diferenciais teve um tempo de processamento menor que um minuto, pois a maior freqüência envolvida foi de 60Hz. Já a representação com carga estática só precisou de 8s, pois a mesma só envolve equações algébricas, o que facilita a convergência mais rápida.

5.5 - Considerações Finais

Até o presente momento, esta tese enfatizou as características físicas, modelagem e comportamento individual dos condicionadores de ar residenciais do tipo convencional e inteligente.

Atendendo as proposições iniciais, este capítulo apresentou a análise de um sistema de distribuição que alimenta uma área residencial. Foi considerado que os transformadores estavam no ponto máximo de carregamento em função da elevada demanda.

Na operação em regime permanente, a distorção harmônica resultante na saída da subestação e também no primário dos transformadores não apresentou grande valor, sendo viável a utilização deste tipo de aparelho na referida rede elétrica.

Na ocorrência de um curto-circuito, que acarretou um afundamento de tensão, a análise do sistema de distribuição permitiu constatar que os diferentes tipos de condicionadores de ar alteraram o comportamento das potências ativa e reativa, apesar de representarem 25% da carga. E ainda, o resultado destas variáveis se apresentou em consonância do caso da operação isolada dos aparelhos.

Assim, pode-se sintetizar as seguintes conclusões:

- O condicionador convencional solicita maior potência quando a tensão está debilitada, sendo mais prejudicial durante a perturbação;
- O aparelho com controle inteligente solicita corrente menor na ocorrência de um afundamento de tensão, em função do acumulo de energia no elo CC;
- Operando no modo adaptado, o condicionador inteligente é ainda mais brando durante a perturbação, pois a energia do elo CC pode ser sustentada por mais tempo;
- Em contra partida, o condicionador tipo inteligente possui uma elevada corrente na restauração da tensão, em função da recarga do capacitor do elo CC.

CAPÍTULO VI

Conclusões Gerais

Ao término de cada um dos capítulos que conformam esta tese foram tecidos comentários conclusivos sobre os estudos ali realizados. Neste capítulo, contudo, é feita uma abordagem global das atividades desenvolvidas e dos resultados obtidos, de maneira a proporcionar ao leitor uma visão completa de toda a investigação realizada no presente trabalho. Para tanto, faz-se a consolidação das conclusões parciais emitidas ao final de cada capítulo, chegando assim às conclusões gerais a respeito dos estudos aqui realizados, bem como às contribuições decorrentes desta pesquisa.

O capítulo I apresentou, de forma abrangente, a atualidade e importância da operação conjunta dos condicionadores de ar na rede elétrica, focado na influência dos resultados dos diferentes tipos de modelos. Na seqüência, como resultado da pesquisa bibliográfica realizada, foi apresentado o estado da arte de estudos voltados para o desempenho dos diferentes tipos de aparelho com as respectivas modelagens e seus impactos. Ainda a partir da consulta à literatura, ficou evidenciada a lacuna existente no tocante a avaliação de certos aspectos relevantes ao desempenho de condicionadores de ar no contexto da dinâmica de sistemas elétricos, tanto para os aparelhos convencionais e como para os inteligentes. Encerrando o capítulo, foram descritas as contribuições deste trabalho e a estrutura completa da tese.

O capítulo II prestou-se a fazer uma explanação geral a respeito dos condicionadores de ar, detalhando tanto o princípio de funcionamento termodinâmico bem como as características do elemento principal, o compressor, cujo comportamento mecânico influencia na rede elétrica. Com base nestas informações pode-se descrever as principais características dos aparelhos condicionadores comercialmente disponíveis para o setor residencial, classificados em dois tipos: convencional e inteligente. Também se apresentou o resultado de uma pesquisa comercial a respeito da utilização destes aparelhos por parte dos consumidores no mercado internacional.

Identificadas as características de funcionamento destes tipos de dispositivos, no capítulo III, abordou-se aspectos relacionados com a constituição física dos motores e seus respectivos controles, efetuando-se o desenvolvimento matemático de uma técnica de controle contra afundamento de tensão para a proteção do condicionador de ar inteligente. Além disso, apresentou-se uma metodologia para agregação de motores de indução, analisando vários aparelhos funcionando simultaneamente. Posteriormente, culminou-se com a implementação no simulador SABER.

O capítulo IV inicia abordando os aspectos relevantes ao cálculo das potências na presença de componentes harmônicas, as quais resultaram no desenvolvimento de uma rotina em MATLAB para, a partir dos valores de tensão e corrente do SABER, calcular as potências ativa e reativa, fator de potência e distorção harmônica. Tendo isto disponível, procederam-se as simulações computacionais e como resultado verificou-se que o condicionador convencional solicita elevada corrente quando há um afundamento de tensão, o que não acontece com o condicionador inteligente que utiliza a energia acumulada no elo CC. No entanto, este aparelho exige uma corrente elevada da rede elétrica quando a tensão é restaurada.

A partir do comportamento individual de cada tipo de aparelho, o capítulo V abordou a simulação de um sistema de distribuição cuja parte da carga é composta por condicionadores de ar, além de refrigeradores e também de uma parcela estática. Em regime permanente, verificou-se que na presença do condicionador inteligente, a distorção harmônica de corrente não foi elevada, pois a maior parcela de carga é linear. No entanto, a conclusão mais importante do capítulo é que o condicionador de ar, como destacado é um componente importante dentro dos sistemas elétricos, face não apenas a sua massificação, mas também ao seu comportamento dinâmico durante e na recuperação de perturbações, notadamente afundamentos de tensão.

Mesmo diante dos avanços oferecidos por esta tese, os desenvolvimentos e discussões feitos ao longo deste trabalho apontaram claramente a existência de lacunas a serem preenchidas. Desta forma, como sugestões para pesquisas futuras, podem ser destacadas as seguintes:

- Aprimoramento do modelo matemático dos motores de forma a representar melhor o equipamento real incluindo as suas não-linearidades;

- Análise experimental dos condicionadores inteligentes perante estudos da qualidade da energia elétrica, incluindo aquele equipamento que opera no modo adaptado;

- Modelagem computacional e ensaios experimentais do condicionador inteligente com correção ativa do fator de potência [32];

- Extensão dos procedimentos aqui realizados para os condicionadores de ar tipo central empregados em instalações de maior porte;

- Estudo de um sistema elétrico completo contendo geradores e seus reguladores e uma presença marcante de condicionadores de ar.

- Geração dos pulsos do conversor PWM de forma analítica com o objetivo de reduzir os tempos de simulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, Load Representation for Dynamic Performance Analysis, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, no. 2, May 1993, pp. 472-48;

[2] Gonçalves, W.K.A., Contribuições à Modelagem de Cargas Individuais para Estudos de Estabilidade Transitória, Dissertação de Mestrado, UFU, 1997;

[3] SHAFFER, J. W.Air Conditioner Response to Tranmission Faults. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 2, p. 614-621. May 1997;

[4] SANHUEZA, S. M.R, et alli, Behavior of Conventional and Inteligent Air Conditioners Under Approach of Power Systems and Power Quality. Anais da VI Conferência Internacional de Aplicações Industriais. Outubro 2004;

[5] SILVA, R.M; ARAÚJO Jr, A.L., Efeito da Modelagem Dinâmica de Sistemas de Distribuição para Estudos em Sistemas de Transmissão. Anais do XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Outubro 2005;

[6] P.C. Krause, Simulation of Unsymmetrical 2-Phase Induction Machines, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 84, no. 11, 1965, pp. 1025-1037;

[7] http://www.revistadofrio.com.br/revistas/edicaomes-12-01.htm De vilão a aliado: ar condicionado em tempos de crise energética. 27/05/2002;

[8] TOMIYAMA, K.;DANIEL,J.P.;IHARA, S. Modeling Air Conditioner Load for Power System Studies, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, no. 2, pp. 414-421, May 1998;

[9] SHENG, S.G.; SAI, A.; TUGIO, S. Advanced and Economical Household Inverter Air-Conditioner Controller Solution, International IC'99 Conference Proceedings, 1999, pp. 83-92;

[10] Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) Módulo 8, Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Fevereiro – 2006;

[11] Procedimentos de Rede – Submódulo 8.1 – Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Junho – 2003;

[12] CARVALHO, B. C. Desempenho de Aparelho Condicionador de Ar no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado, UFU. Uberlândia-MG, Julho-2002;

[13] SANHUEZA, S.M.R.; et alli, Impact of Simultaneous Operation of Air Conditioners on Power Systems, VII Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, Outubro de 2003, pp. 503-508;

[14] SANHUEZA, S.M.R.; et alli, Análise Comparativa do Desempenho de Condicionadores de Ar Convencionais e Inteligentes no Sistema de Potência, XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Outubro de 2005;

[15] FRANKLIN, D. C. A.Morelato, A.L.M. França, Improving Dynamic Aggregation Of Induction Motor Models. IEEE Transactions on Power Systems, EUA, v. 9, n. 4, p. 1934-1941, 1994;

[16] NOZARI, M.D; KANKAM, W.W, Aggregation of Induction Motors for Transient Stability Studies. IEEE Transactions on Power Systems -Vol-2, n.4, p. 1096-1103-Nov. 1987;

[17] MOTA, L.T.M; MOTA, A.A.; FRANÇA, A.L.M., Metodos de previsão do comportamento de carga na recomposição de sistemas de energia eletrica. Tese de Doutorado, UNICAMP, 2005;

[18] CARRIER AIR CONDIDIONIG COMPANY Handbook of Air Conditioning System Desing. p. 8-18, 1965;

[19] DONLON, J.; ACHHAMMER, J.; IWAMOTO, H.; IWASAKI, M. Power Modules for Appliance Motor Control, *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 8, no. 4, July/August 2002, pp 26-34;

[20] VILLANI, E. Abordagem Híbrida Para Modelagem de Sistemas de Ar Condicionado em Edifícios Inteligentes. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo 2000;

[21] FITZGERALD, A.F.; KINGSLEY, C.; KUSKO, A. Electric Machinery McGraw-Hill, 1971. p. 623;

[22] GUIMARÃES, G.C., Computer Methods for Transient Stability Analysis of Isolated Power Generation Systems With Special Reference to Prime Mover and Induction Motor Modelling , 251p., PhD Thesis, University of Aberdeen, 1990;

[23] MARTINS, L. N.; SALERNO, C.H; ALVARENGA, B.P; Harmonic Inductance in The Linear Analysis of Induction Motor, *Proc. International Conference on Electrical Machines in Australia*, Australia, Adelaide, September 1993;

[24] MURPHY, J., M., D.; TURNBULL, F., G. Power Electronic Control of AC Motors. 1.ed Oxford, Pergamon Press, 1988. 524p;

[25] BARBI, Ivo. Teoria Fundamental do Motor de Indução. 1. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1985. 237p;

[26] SABER Reference Manual, Release 5.1, Analogy Inc., Beaverton, OR, 1999;

[27] Desenvolvimentos de Sistemas elétricos Submarinos: Convênio UFU-Petrobrás. Relatório n°3. Outubro 1998;

[28] BUDEANU, C. I. Puissances Réactives et Fictives, Inst. Romain de I'Energie, Bucharest, 1927;

[29] CZARNECKI L. S. What is Wrong with the Budeanu Concept of Reactive and Distortion Powers and Why It Should Be Abondoned. IEEE Transaction on Instrumentation and Mesureament. Vol. IM-36, pp. 834-837, September, 1987;

[30] ROBBA, E. J.; KAGAN, N.; OLIVEIRA, C.C.B. Introdução a Sistemas Elétricos de Potência – Componentes Simétricas. 2°Edição, Ed. Edgard blucher, São Paulo, 484p;

[31] TAYLOR, C. W. Power System Voltage Stability, EPRI, Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1944;

[32] SUMITO, K.; KANIE, T.; SATO, T.; Development of 3-Phase Active Converter for Packaged Air Conditioners. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Rewiew Vol. 34 n° 2, pp. 76-80, Jun 1997.

APENDICE

Exemplo de Agregação de Motores de Indução

Supondo que três motores estejam conectados num mesmo barramento em 220V, será aplicado o método de agregação descrito no capítulo III. As características de cada motor com as impedâncias dadas em ohms são as seguintes [21]:

Motor 1: P=3,0 CV, s=3%, J=0,0067 kg.m^2, 4 pólos;

$R_S = 2{,}3191$ $R_R = 3{,}04$ $X_M = 83{,}1814$

$X_S = 2{,}3487$ $X_R = 3{,}5056$

Carga mecânica: P=3,0 CV, J=0,2350 kg.m^2;

Motor 2: P=10,0 CV, s=2%, J=0,0407 kg.m^2, 4 pólos;

$R_S = 0{,}294$ $R_R = 0{,}114$ $X_M = 13{,}25$

$X_S = 0{,}053$ $X_R = 0{,}209$

Carga mecânica: P=10,0 CV, J=5,6655 kg.m^2;

Motor 3: P=5,0 CV, s=5%, J=0,0091 kg.m^2, 4 pólos;

$$R_S = 0{,}534 \quad R_R = 0{,}956 \quad X_M = 70{,}10$$
$$X_S = 2{,}45 \quad X_R = 2{,}96$$

Carga mecânica: P=5,0 CV, J=0,3098 kg.m^2;

Aplicando as equações (3.46) a (3.51), são encontradas as seguintes impedâncias em ohms para o motor equivalente:

$$R_S = 0{,}237 \quad R_R = 0{,}116 \quad X_M = 7{,}33$$
$$X_S = 0{,}048 \quad X_R = 0{,}192$$

O escorregamento é encontrado através da análise do circuito equivalente, mostrado na Figura A1.

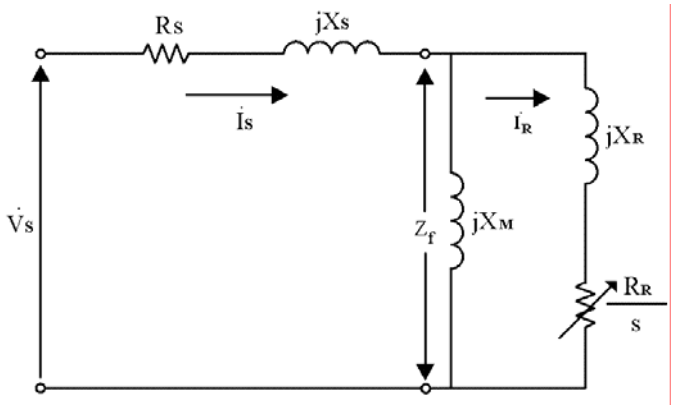


Figura A1 - Circuito equivalente do MIT.

A impedância Z_f representa fisicamente a impedância por fase apresentada ao estator pelo campo de entreferro incluindo do efeito refletido do rotor e o efeito da corrente de excitação.

Analisando o circuito da Figura A1, Z_f é a impedância do rotor em paralelo com o ramo magnetizante:

$$Z_f = \frac{\left(\frac{R_R}{s} + jX_R\right) jX_M}{\frac{R_R}{s} + jX_R + jX_M} \tag{A.1}$$

A impedância vista pelos terminais do estator e a corrente são dadas por:

$$Z_{total} = \left(R_S + jX_S\right) + Z_f \tag{A.2}$$

$$I_s = \frac{V_S}{\left\|Z_{total}\right\|} \tag{A.3}$$

De acordo com [21], a potência transferida do estator ao rotor é dada por:

$$P_{g1} = 3I_R{}^2 \frac{R_R}{s} = 3I_S{}^2 R_f \tag{A.4}$$

Para cada motor são obtidos os seguintes valores de P_{g1} e da potência mecânica *Pmec* são dados por:

Tabela A1 – Potência de entreferro e mecânica dos motores

Motor	P_{g1}[W]	P_{mec}[W]
1	260,73	252,91
2	6147,30	6024,40
3	2089,70	1985,20
M_{eq}	8497,73	8262,51

O escorregamento a plena carga s^{ag} é dado pela equação (3.57), que resulta no valor de 2,7%.

Calculando o valor da constante de inércia de cada motor através da equação (3.58) são obtidos os seguintes valores:

Tabela A2 - Momento e constante de inércia dos motores

Motor	J[kg.m^2]	H[s]
1	0,0067	0,0539
2	0,0407	0,0981
3	0,0091	0,0439

Aplicando as equações (3.58) e (3.59) são obtidos os seguintes valores para a constante de inércia e o momento de inércia do motor equivalente:

H_{eq}=0,0757 s;
J_{eq}=0,0565 kg.m^2.

Para a carga mecânica o mesmo procedimento é aplicado, onde são obtidos os seguintes valores:

Tabela A3 - Momento e constante de inércia das cargas mecânicas

Carga	J[kg.m^2]	H[s]
1	0,2350	1,8889
2	5,6655	13,6613
3	0,3098	1,4991

H_{carga}=8,3208 s;
J_{carga}=6,2113 kg.m^2.

1.1 - Estudo de casos

Para comparar o comportamento do motor equivalente obtido pela agregação com os três motores funcionando simultaneamente, serão analisados os casos da partida e também de um afundamento de tensão de 30% durante 30 ciclos.

1.1.1 - Caso 1: Partida

Realizando uma partida direta, a corrente total dos três motores atinge o valor de 882 A, enquanto que no motor agregado é atingido o valor de 893 A e em ambos os casos a corrente entra em regime após 200 ciclos, conforme mostra a Figura A2.

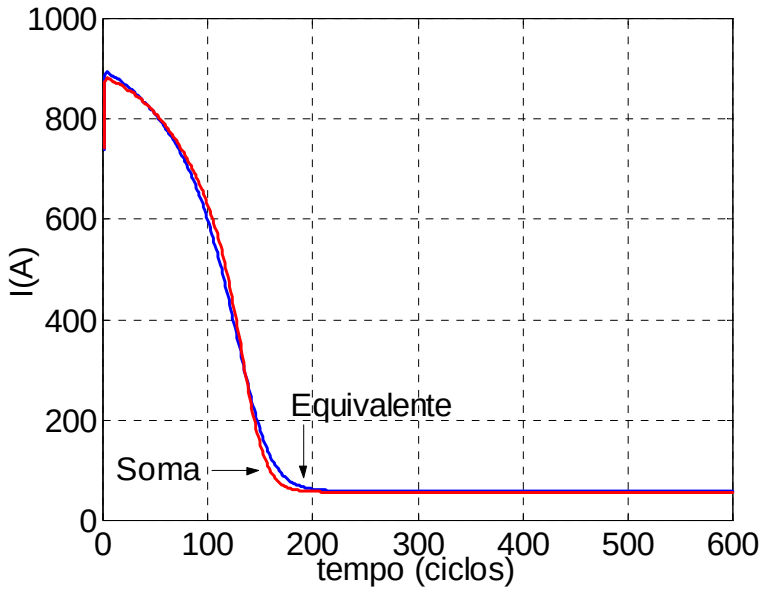


Figura A2 – Corrente de partida.

As figuras A3 e A4 mostram o comportamento das potências ativa e reativa durante a partida, onde a soma dos motores individuais se aproximou bastante do motor equivalente.

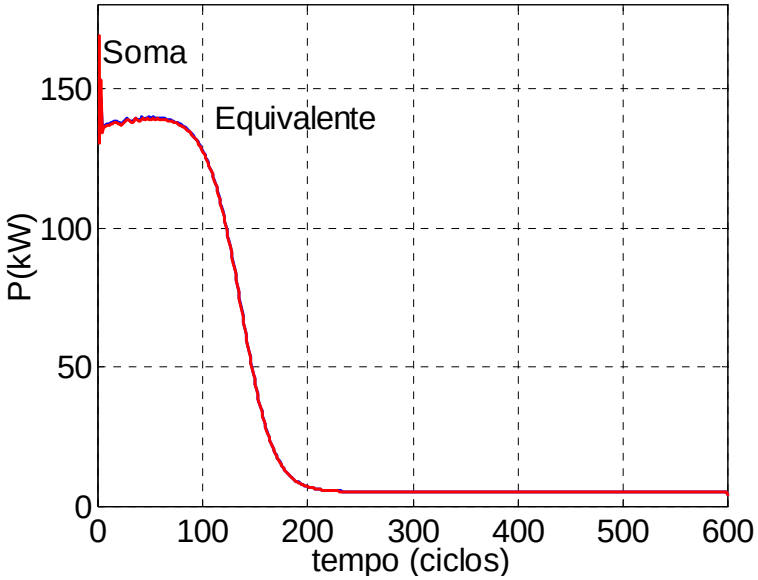


Figura A3 – Potência ativa durante a partida.

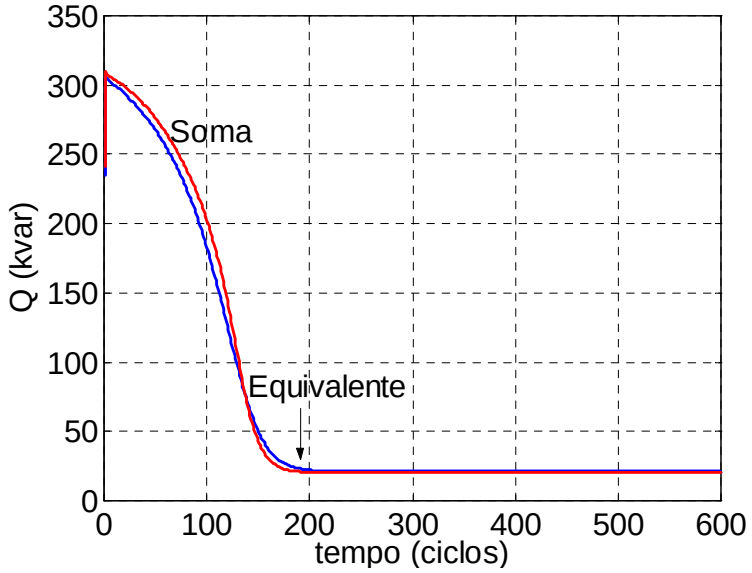


Figura A4 – Potência reativa durante a partida.

1.1.2 - Caso 2: Afundamento de tensão 30%-30ciclos

Da mesma forma que na partida, o motor equivalente obtido também se aproximou muito para o caso de afundamento de tensão, conforme mostram as figuras A5. A6 e A7.

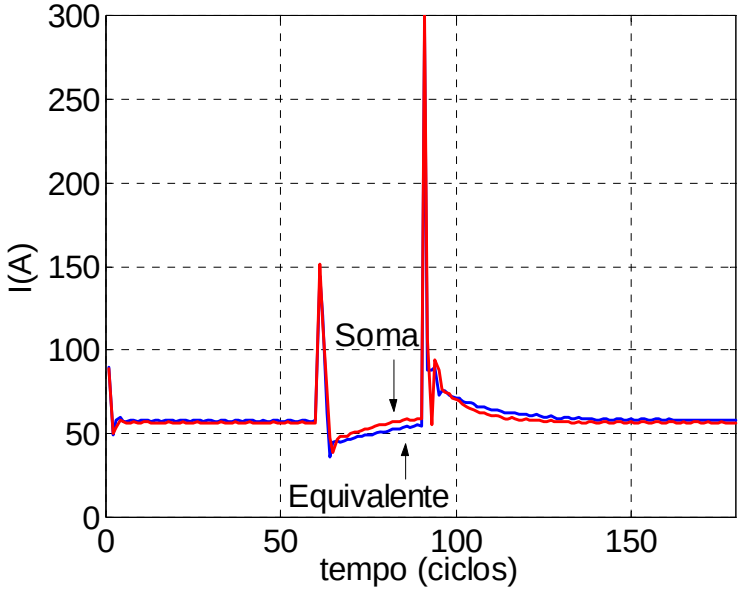


Figura A5 – Corrente durante o afundamento de tensão

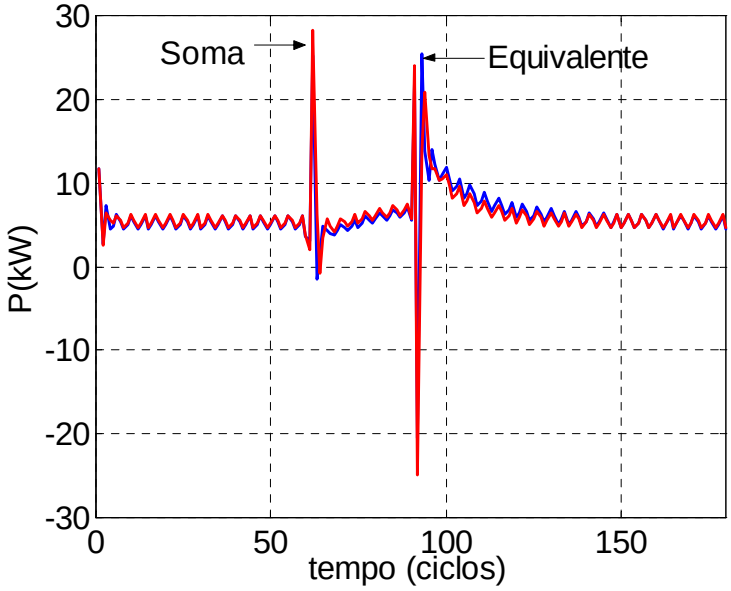


Figura A6 – Potência ativa durante o afundamento de tensão

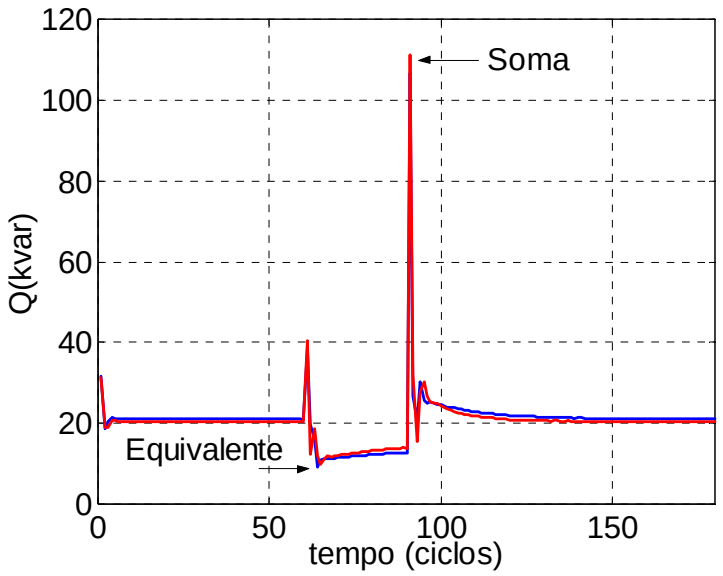


Figura A7 – Potência reativa durante o afundamento de tensão.