

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



ORIENTADOR: PROF. DR. ANTÔNIO CARLOS DELAIBA
ORIENTANDO: BERNANCI PEDROSO DE ALMEIDA

Janeiro 2010

BERNANCI PEDROSO DE ALMEIDA

**COMPORTAMENTO ELÉTRICO, MECÂNICO E
HIDRÁULICO DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO SOB
O ENFOQUE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas de energia elétrica

Banca Examinadora:

Professor Antônio Carlos Delaiba, Dr. (UFU) – Orientador

Professor Danilo Pereira Pinto, Dr. (UFJF)

Professor Sérgio Ferreira de Paula Silva, Dr. (UFU)

Professor Décio Bispo, Dr. (UFU)

Uberlândia, 26 de Janeiro de 2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

A447c Almeida, Bernanci Pedroso de, 1965-
Comportamento elétrico, mecânico e hidráulico de um sistema de
bombeamento sob o enfoque da qualidade de energia elétrica e eficiência
energética [manuscrito] / Bernanci Pedroso de Almeida. - 2010.

160 f. : il.

Orientador: Antônio Carlos Delaiba.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia.

1. Sistemas de energia elétrica - Teses. 2. Energia elétrica - Qualidade - Teses. 3. Sistemas de energia elétrica - Simulação (Computadores) - Teses. I. Delaiba, Antônio Carlos. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDU: 621.311

DEDICATÓRIA

DEDICO ESTE TRABALHO AOS MEUS FILHOS,
PEDRO SANDRO E NIÉLY, MINHA ESPOSA
NELI SANDRA PELA CORAGEM, PELO APOIO
E PACIÊNCIA.

AGRADECIMENTOS

Ao determinado **Doutor Antônio Carlos Delaiba**, pelas orientações durante a realização das experiências, pelo incentivo e observações durante a produção deste trabalho, pela amizade e conselhos.

Ao **Doutor Sérgio Ferreira de Paula Silva** pela leitura, observações e sugestões durante a produção deste trabalho.

Ao **Mestre Ronaldo Guimarães** pela grande contribuição na leitura, observações e correção do texto deste trabalho.

Ao **Doutor Décio Bispo** pela colaboração dispensada e pelo apoio durante os ensaios laboratoriais.

Ao **Doutor Marcelo Lynce R. Chaves**, pela informações importantes a respeito do programa ATP.

Ao **Engenheiro Izaque Nogueira Gondim** pelo grande auxílio na operação da fonte de energia e osciloscópio, sem a qual este trabalho não poderia ser realizado.

Aos demais professores, colegas da pós-graduação e técnicos que deram sua contribuição para a conclusão deste trabalho.

Ao IFMT e ELETROBRÁS pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

1 – Introdução	16
1.1 – Eficiência energética	16
1.2 – Desenvolvimento do trabalho	24
2 - Aspectos relacionados com a operação de sistemas de bombeamento sob o enfoque da eficiência energética e da qualidade da energia elétrica	26
2.1 – Introdução	26
2.2 – Motor de indução	26
2.2.1 – O motor de alto rendimento	27
2.3 – Curvas características	28
2.3.1 – Rendimento x carga	28
2.3.2 – Fator de potência x carga	30
2.4 – Acoplamento motor-carga	31
2.5 – O sistema de bombeamento	33
2.5.1 – Principais componentes de um sistema de bombeamento	34
2.5.2 – Bomba hidráulica	35
2.5.3 – Curvas características ou de desempenho da bomba centrífuga	36
2.6 – As leis de similaridade	39
2.7 – Controle de vazão por estrangulamento de válvula	40
2.8 – Controle de vazão por variação de velocidade da bomba	41
2.9 – Eficiência energética entre os métodos de controle de vazão por estrangulamento de válvula e controle de velocidade	43
2.10 – Oportunidades de melhorar a eficiência em sistema de bombeamento	44
2.11 – Qualidade de energia em sistema de bombeamento	45
2.11.1 – Variação de tensão de longa duração	47
2.11.2 – Variação de tensão de curta duração	47
2.11.3 – Flutuações de tensões	47
2.11.4 – Distorções da forma de onda – harmônicas	47
2.11.4.1 – Distorções harmônicas presentes na tensão de alimentação do motor de indução	51
2.11.5 – Desequilíbrio de tensão	53
2.12 – Considerações finais	57
3 – Ensaaios laboratoriais	59
3.1 – Introdução	59
3.2 – Estação de trabalho utilizada nos ensaios	59
3.2.1 – Características gerais da planta industrial	59
3.2.2 – Características específicas de elementos que forma o sistema de bombeamento	62
3.2.2.1 – Módulo de carga	63
3.2.2.2 – Motor elétrico de indução - alto rendimento	63
3.2.2.3 – A bomba centrífuga	63
3.2.2.4 – O dinamômetro	64
3.2.2.5 – Os sensores e atuadores	64
3.2.3 – O painel de controle	67
3.2.3.1 – Partida direta	68
3.2.3.2 – Partida suave	68

3.2.3.3 – Inversor de frequência	68
3.2.3.4 – Multimetro de grandezas elétricas	69
3.2.3.5 – Controlador lógico programável	71
3.2.4 – O sistema supervisório	71
3.2.5 – Outros equipamentos utilizados nos ensaios	75
3.3 – Caracterização dos ensaios laboratoriais	77
3.4 – Casos ensaiados	83
3.4.1 – Caso 1 – Alimentação do sistema de bombeamento com tensão senoidal equilibrada, controle de vazão por estrangulamento de válvula	83
3.4.2 – Caso 2 – Alimentação do sistema de bombeamento com distorções harmônicas, controle de vazão por estrangulamento de válvula	86
3.4.3 – Caso 3 – Alimentação do sistema de bombeamento com tensões desequilibradas, controle de vazão por estrangulamento de válvula	90
3.4.4 – Caso 4 – Alimentação do sistema de bombeamento com tensão senoidal equilibrada, controle de vazão por variação de velocidade	93
3.4.5 – Caso 5 – Alimentação do sistema de bombeamento com distorções harmônicas de tensão, controle de vazão por variação de velocidade	95
3.4.6 – Caso 6 – Alimentação do sistema de bombeamento com tensões desequilibradas em módulo e ângulo, controle de vazão por variação de velocidade	99
3.4.7 – Caso 7 – Comparação da eficiência energética do sistema no controle de vazão por estrangulamento de válvula e variação de velocidade , alimentação com tensão senoidal equilibrada	102
3.5 – Considerações finais	105
4 – Experimentos computacionais	107
4.1 – Simulação computacional do sistema de bombeamento na plataforma ATP	107
4.2 – Modelo de análise da máquina de indução – dq0	108
4.3 – Configuração do sistema de bombeamento	111
4.3.1 – Determinação dos parâmetros elétricos e mecânicos do motor de indução Trifásico - MIT	111
4.3.2 – Determinação dos parâmetros mecânicos da carga	113
4.4 – Representação do sistema de bombeamento no ATP	116
4.4.1 – Configuração do sistema de bombeamento no programa ATPDraw	117
4.4.2 – Inserção dos parâmetros do motor de indução trifásico	118
4.4.3 – Configuração dos parâmetros de carga	119
4.5 – Simulações computacionais realizadas	120
4.5.1 – Simulação do sistema de bombeamento com carga	120
4.5.1.1 – Alimentação senoidal simétrica e equilibrada, abertura de válvula 100%	120
4.5.1.2 – Alimentação senoidal simétrica e equilibrada, abertura de válvula 85%	125

4.5.1.3 – Alimentação senoidal simétrica e equilibrada, abertura de válvula 60%	129
4.5.1.4 – Alimentação senoidal simétrica e equilibrada, abertura de válvula 32%	129
4.5.1.5 – Alimentação com presença de distorção harmônica simétrica e equilibrada, THDv = 5% , abertura de válvula 100%	130
4.5.1.6 – Alimentação com presença de distorção harmônica simétrica e equilibrada, THDv = 10% , abertura de válvula 100%	134
4.5.1.7 – Alimentação com presença de distorção harmônica simétrica e equilibrada, THDv = 20%, abertura de válvula 100%	136
4.5.1.8 – Alimentação senoidal assimétrica e desequilibrada, K=2%. Condição de carga nominal, abertura de válvula 100%	137
4.5.1.9 – Alimentação senoidal assimétrica e desequilibrada, K=3%. Condição de carga nominal, abertura de válvula 100%	142
4.5.1.10 – Alimentação senoidal assimétrica e desequilibrada, K=5%. Condição de carga nominal, abertura de válvula 100%	143
4.6 – Validação do modelo computacional	144
4.7 – Considerações finais	147
5 – Conclusão	148
5.1 – Trabalhos futuros	151
Referências Bibliográficas	152
Anexo	155

RESUMO

O objetivo desta dissertação é apresentar uma metodologia de comparação do desempenho elétrico, mecânico e hidráulico de um sistema de bombeamento, sob o ponto de vista da eficiência energética, quando alimentado com sinais dos itens de qualidade de energia. A forma utilizada para esse intuito foi à variação de vazão controlada por estrangulamento de válvula ou por variação de velocidade utilizando inversor de frequência. Os parâmetros foram comparados na presença de alimentação com tensão senoidal simétrica equilibrada, tensões com distorções harmônicas e tensões assimétricas desequilibradas. O acionamento do sistema foi realizado pelo motor de indução trifásico de alto rendimento. Está ainda presente neste trabalho, a simulação computacional no domínio do tempo. A plataforma computacional utilizada para esse fim foi ATP (*Alternative Transient Program*). A forma utilizada para validação das modelagens, concentrou-se na comparação dos valores encontrados nos ensaios e os obtidos através das simulações. Os experimentos laboratoriais foram executados no laboratório de eficiência energética da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Palavras Chave: Eficiência energética, Sistemas de bombeamento, Qualidade de Energia, Simulação Computacional.

ABSTRACT

The objective of this thesis is to present a methodology of comparison of the electric, mechanical and hydraulic performance of a pump system, under the point of view of the energy efficiency, when supplied with signals power quality. The form used for this intention was to the variation of controlled outflow for strangulation of valve or variation of frequency applying Adjustable Speed Drive (ASD). The parameters had been compared in the presence of supply with sinusoidal symmetrical voltage balanced, anti-symmetrical unbalanced and voltage with harmonic distortion. The operation of the system was carried through by three phase induction motor of high efficiency. It is still present in this work, the computational simulation in the time domain. The used computational platform for this end was ATP (Alternative Transient Program). The form used for validation of the modeling, concentrated in the comparison of the values found in the assays and the gotten ones through the simulations. The laboratory experiments had been executed in the laboratory of energy efficiency of the Faculty of Electrical Engineering of the Federal University of Uberlândia.

Key word: energy efficiency, pumping system, power quality, simulation.

Lista de figuras

1.1 - Perfil de consumo por tipo de carga na indústria	18
1.2 - Consumo de energia por setores em 2007 (GWh)	18
1.3 - Consumo de eletricidade para vários setores da economia - Twh	19
1.4 - Consumo específico de energia elétrica de alguns setores industriais	20
2.1 - Comportamento do rendimento x carga	29
2.2 - Comportamento do FP x carga	30
2.3 - Diagrama representativo do acoplamento motor-carga	31
2.4 - Sistema de abastecimento de água e seus principais componentes	34
2.5 - Sistema de bombeamento e seus componentes	35
2.6 - Tipos de curva H x Q	38
2.7 - Curva η x Q	38
2.8 - Curva Pm x Q	39
2.9 - Influência da rotação nas curvas características da bomba centrífuga	40
2.10 - Controle de vazão por estrangulamento de válvula	41
2.11 - Curva de trabalho da bomba em função da velocidade	42
2.12 - Economia de energia entre controle de vazão por estrangulamento de válvula e inversor de frequência	43
2.13 - Balanço de energia de um sistema de bombeamento	44
2.14 - Evolução da presença de cargas elétricas com conteúdo eletrônico no Brasil	46
2.15 - Onda deformada e suas componentes harmônicas	48
2.16 - Forma de onda tensão de linha em um barramento de 13,8 kV	52
2.17 - Tensão nos terminais de um motor de indução alimentado por um conversor de frequência do tipo VSI-PWM	52
2.18 - Vetores de tensões, desequilibradas, sequência positiva, negativa e zero	54
2.19 - Efeitos do desequilíbrio de tensão na elevação das perdas em motores de indução trifásicos	55
3.1 - Visão Geral da bancada do sistema de bombeamento	60
3.2 - Rede de comunicação da planta industrial – bomba centrífuga	61
3.3 - Diagrama orientativo da bancada da bomba centrífuga	62
3.4 - Curva vazão x NPSH da bomba modelo 92SHA.	63
3.5 - Fluxograma simplificado sensores, atuadores, transmissores e indicadores do sistema de bombeamento	66
3.6 - Vista interna do painel de proteção e acionamento	67
3.7 - Medidor PM 850	70
3.8 - Tela inicial do sistema supervisório	71
3.9 - Tela da bancada de bomba centrífuga	72
3.10 - Tela de comando	73
3.11 - Janela de grandezas elétricas medidas	73
3.12 - Janela de PID do sistema de bombeamento	74
3.13 - Visão geral da bancada da bomba centrífuga, fonte e equipamentos de medições	76
3.14 - Comportamento do sistema de bombeamento, controle de vazão por estrangulamento de válvula	79
3.15 - Sinal de tensão (fase-neutro) e corrente na entrada do inversor	80
3.16 - Formas de onda de tensão e corrente aplicadas pelo inversor na entrada do motor	81

3.17 - Comportamento dos parâmetros elétricos, mecânicos e hidráulicos, controle de vazão por variação de velocidade	82
3.18 - Variação de potência em relação à variação da pressão de sucção	83
3.19 - Variação potência x estrangulamento de válvula, alimentação ideal	85
3.20 - Variação Q x H, alimentação ideal	86
3.21 - Forma de onda de tensão (fase-fase) e corrente com distorção harmônica de tensão total 20%	87
3.22 - Variação do fator de potência em relação à distorção harmônica	89
3.23 - Variação da potência ativa com alimentação distorcida, controle de vazão por estrangulamento de válvula	89
3.24 - Variação da potência ativa com alimentação desequilibrada, controle de vazão por estrangulamento de válvula	92
3.25 - Potência ativa consumida para controle de vazão por variação de velocidade, alimentação ideal	94
3.26 - Curva Q x H, método de variação de velocidade, alimentação ideal	95
3.27 - Forma de onda da tensão, corrente na entrada do inversor, $THD_V = 20\%$	97
3.28 - Formas de onda da corrente na entrada do inversor, para $THD_V = 10\%$ e $THD_V = 20\%$	97
3.29 - FP x distorção harmônica, alimentação por inversor de frequência	98
3.30 - Variação da potência ativa com alimentação distorcida, controle de vazão por variação de velocidade	99
3.31 - Variação da potência ativa com alimentação desequilibrada, controle de vazão por variação de velocidade	101
3.32 - Potência aparente x desequilíbrio, alimentação via inversor de frequência	102
3.33 - Potência ativa pelos métodos de controle de vazão: estrangulamento de válvula e variação de velocidade	104
3.34 - Potência fornecida ao líquido pelos métodos de controle de vazão: estrangulamento de válvula e variação de velocidade	104
4.1 - Circuito equivalente para o eixo d	109
4.2 - Circuito equivalente para o eixo q	110
4.3 - Analogia eletromecânica utilizada pelo ATP	111
4.4 - Curva TxV do sistema de bombeamento	115
4.5 - Representação do sistema de bombeamento no ATP	117
4.6 - Janela de configuração do motor	118
4.7 - Tela da rotina TACS	119
4.8 - Tensão senoidal de alimentação do motor	121
4.9 - Correntes com motor com carga, abertura de válvula 100%	121
4.10 - Potências aparentes, motor sob carga, válvula aberta 100%	122
4.11 - Torque no eixo do motor sob carga, válvula aberta 100%	123
4.12 - Velocidade do motor, com carga, abertura de válvula 100%	124
4.13 - Potência mecânica no eixo do motor, abertura de válvula 100%	124
4.14 - Correntes com motor a carga, abertura de válvula 85%	125
4.15 - Potências aparentes, motor com carga, abertura de válvula 85%	126
4.16 - Torque no eixo do motor sob carga, abertura de válvula 85%	127
4.17 - Velocidade do motor com carga, abertura de válvula 85%	128
4.18 - Potência mecânica no eixo com carga, abertura de válvula 85%	128
4.19 - Sinais de tensão e corrente capturadas pelo osciloscópio, $THD_V = 5\%$	130
4.20 - Sinais de tensão e corrente sintetizadas no ATP, $THD_V = 5\%$	131
4.21 - Potências aparentes, $THD_V = 5\%$	132

4.22 - Torque no eixo do motor, abertura de válvula 100%, THD _V =5%	132
4.23 - Velocidade, abertura de válvula 100%, THD _V =5%	133
4.24 - Potência mecânica, abertura de válvula 100%, THD _V =5%	134
4.25 - Sinais de tensão e corrente capturadas pelo osciloscópio, THD _V =10%	135
4.26 - Sinais de tensão e corrente sintetizadas no ATP, THD _V =10%	135
4.27 - Sinais de tensão e corrente capturadas pelo osciloscópio, THD _V =20%	136
4.28 - Sinais de tensão e corrente sintetizadas no ATP, THD _V =20%	137
4.29 - Correntes sintetizadas no ATP, alimentação desequilibrada, K=2%	139
4.30 - Potências aparentes, motor com carga, K=2%	139
4.31 - Torque, motor com carga, desequilíbrio de K=2%	140
4.32 - Velocidade, motor com carga, desequilíbrio de K=2%	141
4.33 - Potência mecânica no eixo com carga, K=2%	141
4.34 - Corrente do motor com carga, alimentação desequilibrada, K=3%	142
4.35 - Correntes sintetizadas no ATP. Alimentação desequilibrada, K=5%	143
4.36 - Torque do motor com carga, desequilíbrio de K=5%	144

Lista de tabelas

1.1 - Demanda por classe, previsão -2008	20
2.1 - Índices de conformidade para desequilíbrios de tensão	56
3.1 - Ensaio realizados	77
3.2 - Distorções harmônicas de tensão configuradas na fonte HP	78
3.3 - Tensões desequilibradas aplicadas	78
3.4 - Parâmetros elétricos registrados com alimentação senoidal. Controle de vazão por estrangulamento de válvula	84
3.5 - Parâmetros mecânicos e hidráulicos, alimentação senoidal. Vazão controlada por estrangulamento de válvula	84
3.6 - Parâmetros elétricos registrados com alimentação distorcida. Controle de vazão por estrangulamento de válvula	87
3.7 - Parâmetros mecânicos e hidráulicos, alimentação distorcida. Vazão controlada por estrangulamento de válvula	88
3.8 - Parâmetros elétricos, registrados com alimentação senoidal desequilibrada. Controle de vazão por estrangulamento de válvula	91
3.9 - Parâmetros mecânicos e hidráulicos, alimentação senoidal assimétrica e desequilibrada. Vazão controlada por estrangulamento de válvula	91
3.10 - Parâmetros elétricos registrados com alimentação senoidal. Controle de vazão por variação de velocidade	94
3.11 - Parâmetros mecânicos e hidráulicos, alimentação senoidal. Vazão controlada por variação de velocidade	94
3.12 - Parâmetros elétricos registrados, alimentação com tensão distorcida. Controle de vazão por variação de velocidade	96
3.13 - Grandezas mecânicas e hidráulicas registradas. Tensão com distorção harmônica. Controle de vazão por variação de velocidade	96
3.14 - Parâmetros elétricos coletados para alimentação senoidal, assimétrica, desequilibrada, controle de vazão por variação de velocidade	100
3.15 - Parâmetros mecânicos e hidráulicos registrados com alimentação senoidal, assimétrica, desequilibrada. Controle de vazão por variação de velocidade	100
3.16 - Tabela comparativa de eficiência energética do controle de vazão por estrangulamento e variação de velocidade. Parâmetros elétricos. Alimentação ideal.	103
3.17 - Tabela comparativa de eficiência energética do controle de vazão por estrangulamento de válvula e variação de velocidade. Parâmetros mecânicos e hidráulicos. Alimentação ideal	103
4.1 - Analogia de grandezas eletromecânicas	110
4.2 - Dados do MIT de alto rendimento	111
4.3 - Ensaio a rotor livre	112
4.4 - Ensaio a rotor bloqueado	112
4.5 - Parâmetros do circuito equivalente	112
4.6 - Velocidade x Torque da bomba centrífuga	114
4.7 - Correntes obtidos computacionalmente, alimentação ideal, válvula aberta 100%	122
4.8 - Torques obtidos computacionalmente, alimentação ideal, abertura de válvula 100%	123

4.9 - Parâmetros elétricos e mecânicos simulados na condição de regime, abertura de válvula 100%	125
4.10 - Valores de corrente obtidos através de simulação com alimentação senoidal, abertura de válvula 85%	126
4.11 - Valores de torque obtidos computacionalmente com abertura de válvula 85%	127
4.12 - Parâmetros elétricos e mecânicos, abertura de válvula 85%	129
4.13 - Grandezas elétricas e mecânicas simuladas, abertura de válvula 60%	129
4.14 - Grandezas elétricas e mecânicas simuladas, abertura de válvula 32%	130
4.15 - Valores de tensões e correntes com $THD_V=5\%$	131
4.16 - Parâmetros elétricos e mecânicos em regime permanente, $THD_V=5\%$	134
4.17 - Parâmetros elétricos e mecânicos em regime permanente, $THD_V=10\%$	136
4.18 - Parâmetros elétricos e mecânicos em regime permanente, $THD_V=20\%$	137
4.19 - Parâmetros elétricos e mecânicos em regime permanente, $K=2\%$	142
4.20 - Parâmetros elétricos e mecânicos em regime permanente, $K=3\%$	143
4.21 - Parâmetros elétricos e mecânicos em regime permanente, $K=5\%$	144
4.22 - Grandezas elétricas, mecânicas medidas e simuladas com alimentação senoidal	145
4.23 - Grandezas elétricas, mecânicas medidas e simuladas na presença de distorções harmônicas	146
4.24 - Grandezas elétricas, mecânicas medidas e simuladas na presença de tensões desequilibradas	147

Capítulo 1

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Eficiência energética

A preocupação com a eficiência energética no Brasil não é tão recente, mas não foi dada a devida importância a esse tema uma vez que os grandes mananciais hídricos permitiram que se utilizasse a energia elétrica no Brasil, de forma abusiva por décadas. Alguns programas foram criados, entretanto, tiveram pouco efeito positivo devido a falta de políticas públicas claras para o setor de energia, descontinuidade dos projetos e investimentos para o combate ao desperdício de energia, falta de consciência dos empresários para a necessidade de investimentos nestas ações, devido, principalmente, aos problemas de se ter tarifas subsidiadas para o setor industrial; a tarifa de energia foi, durante muito tempo usada para tentar reduzir a inflação, levando ao desgaste no setor elétrico; o que inviabilizava os investimentos. Uma das iniciativas, que demonstraram maior preocupação com a eficiência energética, foi a criação do Programa de Conservação de Energia Elétrica (Procel) em 1985. Isto veio a culminar com a definição de uma política de combate ao desperdício de energia elétrica no país, através da capacitação de corpo técnico para disseminação da importância do uso eficiente da energia e substituição de equipamentos antigos por outros mais eficientes energeticamente. Um fato a ser lembrado, foi a escassez de recursos nos reservatórios das usinas hidrelétricas ocorrida no ano de 2001. Fato este, que impôs um racionamento, aos consumidores, como meio de buscar a redução do consumo energético, a partir de metas de eficiência definidas por órgãos governamentais.

H. S. Geller, é categórico ao afirmar que “a eficiência energética é, hoje, uma questão crucial para a Humanidade”. Afirma ainda, que “O consumo cada vez maior de combustíveis fósseis causará enorme dano ao meio ambiente, riscos sem precedentes à mudança do clima, e esgotará rapidamente as reservas de petróleo” [1], ou seja, a humanidade usa suas fontes de energia em padrões insustentáveis.

Entretanto, afirma que uma “revolução energética” é possível e desejável, apontando como solução mitigatória, o uso eficiente dos recursos energéticos bem como a utilização de fontes alternativas de energia.

Em 08 de dezembro de 1993 foi instituído, através de decreto presidencial, o Selo Procel de economia de energia, um produto mantido pelas Centrais Elétricas Brasileiras S.A (ELETROBRÁS). O selo tem por objetivo orientar o consumidor no momento da compra, indicando produtos que apresentam os melhores níveis de eficiência energética dentro de cada categoria. Atualmente, existem selos para refrigeradores, freezer, aparelho de ar condicionado, motores de indução trifásicos, lavadoras, lâmpadas, televisores e agora até automóveis.

A lei 10.295 de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a política nacional de conservação e uso racional de energia elétrica, foi regulamentada pelo decreto 4.059 em 19 de dezembro de 2001. Nesta lei o governo brasileiro estabelece níveis máximos de consumo de energia ou mínimos de eficiência energética para máquinas e aparelhos elétricos comercializados no país.

O setor industrial, segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2008, consumiu 192,6 TWh o correspondente a 47% dos 412,3 TWh consumidos no país no mesmo período [2]. Ainda no que se refere ao cenário industrial, no Brasil, os motores elétricos de indução são responsáveis pelo acionamento de cerca de 49% dos sistemas motrizes industriais, chegando a 70% em determinadas regiões [3]. Entende-se por sistemas motrizes, os acionamentos de bombas centrífugas, ventiladores, esteiras rolantes, compressores, elevadores e outras cargas que dependem dos motores elétricos para o seu funcionamento. Nos acionamentos estão presentes perdas, não somente nas partes internas do motor, mas também no tipo de acionamento utilizado e acoplamento. A utilização racional da energia elétrica portanto não depende somente da utilização correta do motor, depende também de de outros fatores como: tecnologia utilizada no acionamento e acoplamento mais eficiente. A Figura 1.1 registra o perfil de consumo por tipo de carga na indústria.

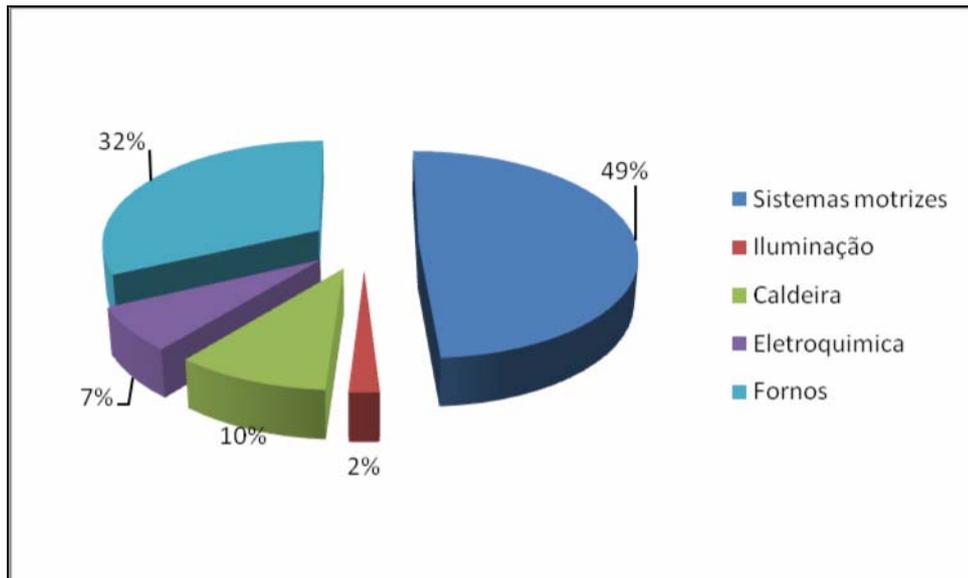


Figura 1.1 - Perfil de consumo por tipo de carga na indústria.

A Figura 1.2, a seguir ilustra o perfil do consumo de energia elétrica no Brasil, no ano de 2007. O maior destaque é para o setor industrial seguido pelo residencial [2].

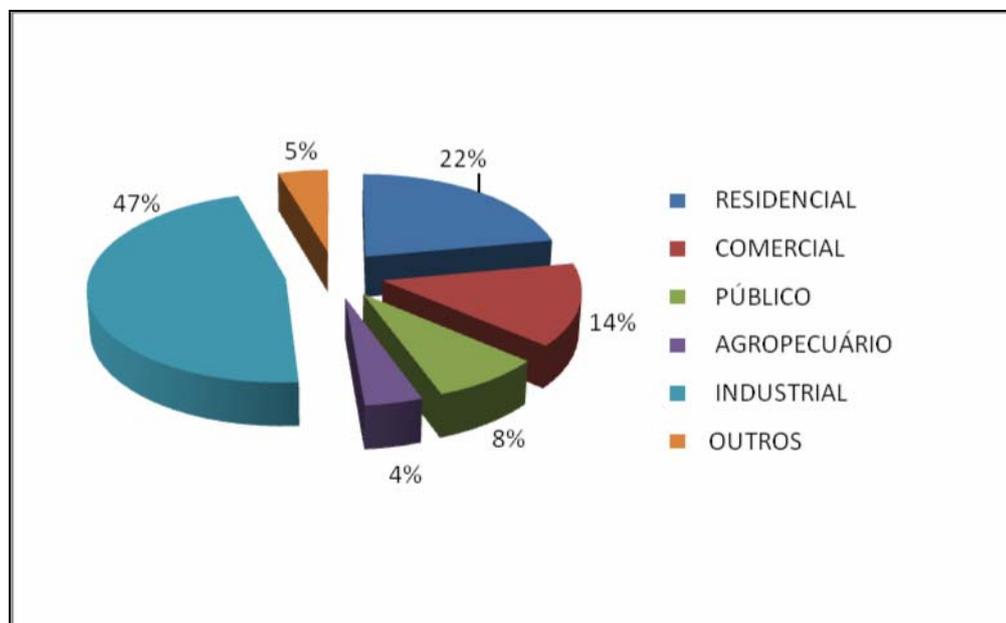


Figura 1.2 - Consumo de energia por setores em 2007 (GWh)

A Figura 1.3, apresenta um histórico de consumo para vários setores da economia de 1971 a 2007 [2]. Neste gráfico, pode-se visualizar a queda de consumo exigida pelo racionamento em 2001. Entretanto, as curvas ao longo do tempo

retomam suas taxas de evolução logo a seguir, demonstrando o mesmo ritmo de crescimento que tinham antes do racionamento, exceção feita ao consumo residencial que sobe, desde então, em ritmo mais lento.

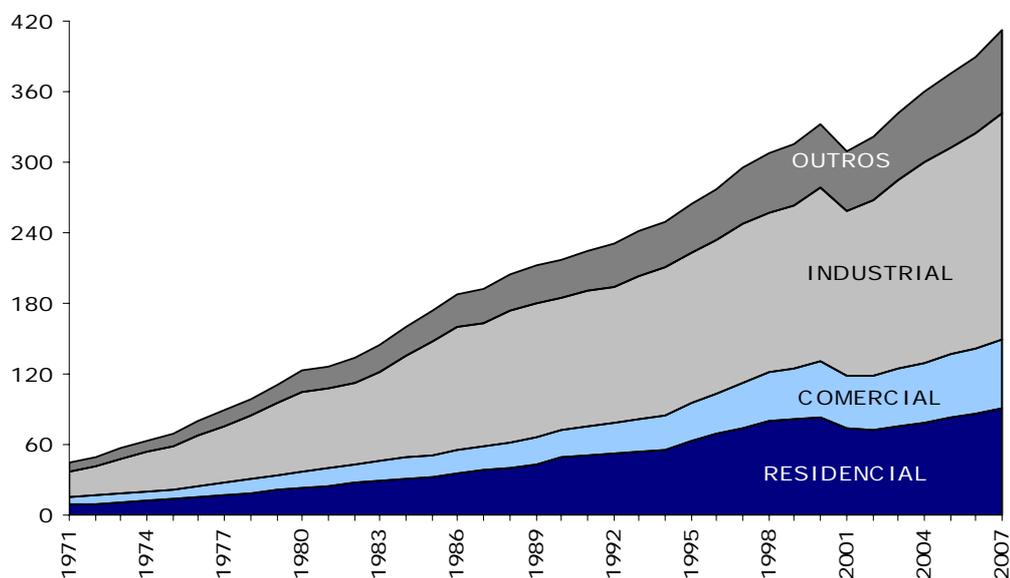


Figura 1.3 - Consumo de eletricidade para vários setores da economia - Twh

Os estudos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) indicaram para o ano de 2007, um crescimento no consumo de energia elétrica (consumo direto na rede somado a autoprodução) de 5,8%, taxa ligeiramente superior ao crescimento da economia de 5,4%, conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [4]. A projeção do consumo total, no horizonte decenal, aponta um crescimento no consumo de eletricidade de 5,5% ao ano, para um crescimento médio do Produto Interno Bruto (PIB) de 5% ao ano, atingindo 706,4 TWh em 2017, dos quais 604,2 TWh (85,5%) significarão demanda à rede (a diferença será atendida por autoprodução). Em 2007 essa proporção era de 91,5%.

Do exposto acima, observa-se que o uso eficiente de energia elétrica é importante para diminuir a demanda. Como exemplo, no mesmo estudo a EPE, informa que nas projeções, o consumo residencial cresce à taxa média de 5,3% ao ano ao longo do horizonte decenal, impulsionado pelo aumento da renda e pela ampliação na universalização do acesso à rede elétrica. Entretanto a maior penetração de equipamentos eletrodomésticos não implicará em aumento substancial na demanda. Esse feito é graças ao uso de equipamentos mais eficientes do ponto de vista energético. O mesmo estudo prevê que o consumo

médio mensal por consumidor residencial chegará a 185 kWh, valor apenas 3% superior ao recorde de 180 kWh observado antes do racionamento de 2001 [5].

A classe industrial, que representava no ano de 2007, 45% do mercado de distribuição total do Sistema Interligado Nacional (SIN), registrou no trimestre janeiro-março de 2008, uma expansão de 4,2% sobre igual período do ano anterior, totalizando um consumo de 42.491 GWh, conforme mostrado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Demanda por classe, previsão - 2008.

Classe	Realizado			Previsto 2008	
	2007	2008	$\Delta\%$	2008	$\Delta\%$
Residencial	22.324	23.296	4,4	23.661	6,0
Industrial	40.794	42.491	4,2	42.451	4,1
Comercial	14.691	15.338	4,4	15.714	7,0
Outras	12.646	13.372	5,7	13.432	6,2
TOTAL	90.456	94.497	4,5	95.257	5,3

A competitividade cada vez maior, a nível mundial entre as indústrias, obriga alguns desses setores a produzir com menor uso possível de energia elétrica. Diversos segmentos industriais experimentaram redução no consumo específico de energia entre os quais se destacaram o setor de cimento, de papel e celulose e de materiais não ferrosos. Como exemplo disso a Figura 1.4 mostra um gráfico dessa tendência.

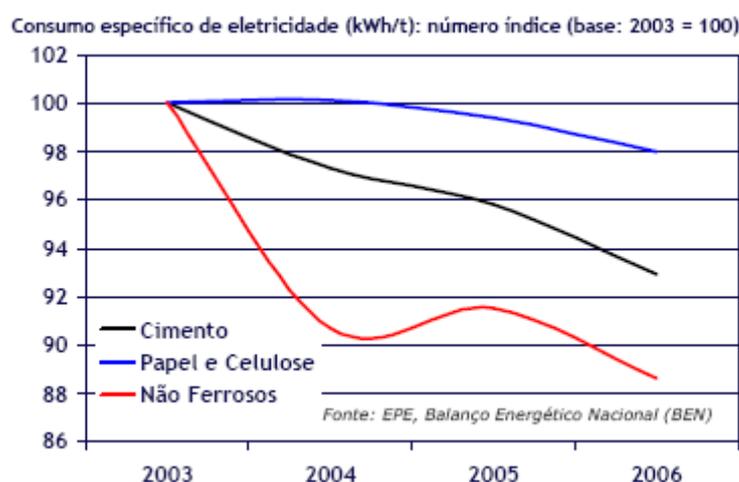


Figura 1.4 – Consumo específico de energia elétrica de alguns setores industriais

O Brasil perde, por ano, R\$ 11 bilhões com ineficiência energética. São desperdiçados 12,6 bilhões de MWh de energia, volume suficiente para abastecer a cidade do Rio de Janeiro por 12 meses, segundo dados da Associação Brasileira das Empresas de Conservação de Energia (ABESCO) [6].

Outra iniciativa de grande impacto sobre os estudos referentes a combate ao desperdício de energia elétrica na indústria, foram os convênios entre o Procel, federações estaduais de indústrias como: FIEMG, FIEMT, FIESP, FIERJ, entre outras e diversas universidades no país, viabilizando a construção de laboratórios de estudos em eficiência energética. Estes convênios levaram ao seio universitário uma problemática que poderia ser debatida em congressos, assim, a indústria, bem como consultores, teria acesso a uma literatura especializada publicada em anais e revistas. Além disso, formação de recursos humanos, capazes de projetar e operar sistemas mais eficientes.

Melhorar as técnicas e utilizar equipamentos mais eficientes é o caminho para o setor industrial aumentar a produtividade, competitividade e reduzir também o impacto do setor energético no clima mundial. Há que se citar também, o convênio assinado entre a ELETROBRÁS/CEPEL e a Confederação Nacional da Indústria/ Instituto Euvaldo Lodi (CNI/IEL) para a promoção da qualidade e eficiência energética de transformadores de distribuição. O objetivo primordial é estabelecer um nível mínimo aceitável de desempenho para transformadores e implantar um programa de premiação por selo e certificação [7]. Esta certificação tem lugar, pois, segundo a mesma referência, as perdas em transformadores, da ordem de 2%, representam quase um terço das perdas totais do sistema elétrico. A utilização racional da energia elétrica constitui-se num bom negócio para as empresas, consumidores residências, comerciais, concessionárias e o meio ambiente, pois, representa uma menor necessidade de demanda de energia e assim relaciona a economia de energia com menor impacto ambiental. Dentre os sistemas utilizados nas indústrias, o sistema de bombeamento figura como um grande potencial para economia no consumo de energia elétrica. Nos sistemas de distribuição e transmissão observa-se comumente a presença de motores de indução, sistemas a tração e uma grande gama de cargas monofásicas com processamento eletrônico da energia elétrica. Tais elementos melhoram bastante a qualidade de acionamentos das máquinas e o controle dos processos produtivos, contudo são geradores de desequilíbrios de tensão na rede elétrica e conseqüentemente depreciam a qualidade da energia, pois proporciona condições não ideais de funcionamento. Neste sentido, e de um modo geral, esses efeitos são traduzidos na forma de estresse térmico, dielétrico e operação irregular de equipamentos. Da mesma forma pequenas variações na rotação da bomba centrífuga pouco interfere na sua curva de

rendimento, porém, grandes variações podem fazer diminuir o seu rendimento. A automação dos sistemas de bombeamento aliada à utilização de controladores lógicos programáveis e inversores de frequência, permite que o conjunto motor-bomba trabalhe próximo do ponto de melhor rendimento da bomba.

Dentro deste enfoque, a referência [8], apresenta uma metodologia de cálculo que permite estimar o valor do momento de inércia de cargas centrífugas, em plantas industriais em funcionamento. Estudo fundamental, quando se pretende substituir um motor em uso por outro melhor especificado. Como também, é passível de nota a referência [9], onde se propõe a utilização da automação como agente para o aumento da eficiência energética em sistemas motrizes industriais. Em outra abordagem, em [10] é apresentado um estudo de caso onde se recomendou a implementação de motores de alto rendimento em uma indústria alimentícia e comprovou o quanto pode ser atrativo tal medida.

Abordando mais especificamente sistemas de bombeamento como se propõe esta dissertação, porém, com vistas à eficiência e não à qualidade da energia associada, a referência [11] apresenta um estudo que tem como objetivos o uso racional da energia elétrica em motores de indução, o aumento de confiabilidade do conjunto e a minimização dos gastos com manutenção. Ou ainda como trabalhado em [12], onde se buscou quantificar a redução da potência ativa requerida pelo elemento acionador de uma bomba centrífuga que opta pela variação de velocidade como forma de controlar a vazão. Na mesma linha a referência [13], que teve como objetivo mostrar uma metodologia de comparação do desempenho de sistemas de bombeamento controlados por válvulas de estrangulamento e a utilização de inversores de frequência no controle da vazão.

Deve-se salientar ainda, que à medida que os benefícios da energia elétrica se tornaram corriqueiros, a qualidade da energia, como produto comercializável passou a ser questionada. Inicialmente, as preocupações eram ligadas a não-interrupção do fornecimento, pois isto implicaria em grandes transtornos. No entanto, a questão da qualidade da energia, sem que ocorram interrupções, para o grande público só era percebida através de falhas de funcionamento em alguns equipamentos. O grande efeito sempre se mostrou mais evidente, no setor industrial, à medida que a tecnologia eletro-eletrônica alcançou as fábricas com seu avanço na área dos semicondutores.

As cargas elétricas, baseadas em processos de chaveamento eletrônico, possuem como principal característica a não-linearidade, ou seja, não necessitam de corrente elétrica de modo continuado. Dependendo da topologia do equipamento utilizado, demandará corrente da rede apenas em determinado período ou ângulo da oscilação. Este requerimento descontínuo de potência acaba por distorcer a forma de onda de tensão e/ou corrente na rede elétrica. Em contrapartida, é importante afirmar que estas mesmas cargas eletro/eletrônicas, responsáveis pelas distorções da rede, também tem a sua operação alterada em função da qualidade não ideal desta energia elétrica. Sob essa ótica, em [14] é estudado o efeito da proliferação de dispositivos de eletrônica de potência que, entre outras consequências, acarreta o aumento das distorções harmônicas nas redes elétricas, degradando a qualidade da energia, citando esta situação é particularmente complexa para o caso de cargas monofásicas em redes de distribuição. Uma análise de impactos térmicos e econômicos da qualidade da energia em motores de indução trifásicos pode, ainda, ser vista na referência [15], enquanto em [16] é apresentada uma simulação computacional com o intuito de prever o comportamento do motor de indução frente a distúrbios presentes na rede elétrica.

Os comentários supracitados permitem conceituar problemas de qualidade da energia elétrica como: “qualquer distúrbio ou ocorrência manifestada nos níveis de tensão, corrente ou nas variações de frequência que possam resultar em insuficiência, má operação, falha ou defeito em equipamentos de um sistema” [17].

Dentro deste enfoque, encontram-se várias referências na literatura técnica envolvendo sistemas de bombeamento e eficiência energética. No entanto, a maioria dos trabalhos publicados é aplicada a um sistema de bombeamento quando o mesmo está submetido a uma fonte ideal de suprimento, ou seja, um sistema trifásico senoidal e equilibrado.

Desta forma, esta dissertação segue na direção de estudar e analisar o comportamento elétrico, mecânico e hidráulico de um sistema de bombeamento sob o enfoque da qualidade da energia elétrica e da eficiência energética, ou seja, não apenas alimentado por um sistema trifásico equilibrado, mas, com sinais de tensão com distorções harmônicas ou com tensões desequilibradas em módulo e ângulo.

1.2 – Desenvolvimento do trabalho

Esta dissertação é composta por cinco capítulos. Além desta introdução, este trabalho possui outros quatro capítulos descritos a seguir:

Capítulo 2 – Aspectos relacionados com a operação de sistemas de bombeamento sob o enfoque da eficiência energética e da qualidade da energia elétrica

O objetivo deste capítulo é apresentar os aspectos relacionados à teoria que envolve o estudo da efficientização energética, aplicados em sistemas de bombeamento, quando submetidos a uma tensão de alimentação não ideal, ou seja, desequilíbrios ou harmônicos. Complementando os aspectos anteriores, este capítulo está voltado ao controle de vazão de um sistema de bombeamento. Na primeira situação a vazão será controlada por válvulas de estrangulamento. Posteriormente, através da utilização de inversores de frequência, a vazão será controlada através da variação da velocidade do conjunto motor-bomba. Finalmente, apresenta-se uma síntese dos principais itens relacionados com o tema “qualidade da energia elétrica” destacando-se os harmônicos e desequilíbrios.

Capítulo 3 – Ensaio laboratoriais

Este capítulo tem por objetivo mostrar os aspectos relativos aos ensaios experimentais realizados na bancada do sistema de bombeamento instalado no laboratório Lamotriz da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). O sistema de bombeamento foi submetido a várias condições operacionais. Inicialmente, os ensaios foram executados com alimentação trifásica senoidal em 220 V, 60 Hz. Esta condição operacional de suprimento considerada ideal serviu como base para a comparação com os ensaios realizados com alimentação não ideal, ou seja: harmônicos e desequilíbrios. Posteriormente, o conjunto motor-bomba recebeu a alimentação de sinais que compõem os itens de qualidade de energia elétrica, já citados. Para todas essas situações, configurou-se a vazão do sistema para quatro condições operacionais, utilizando-se dois métodos, quais sejam: o método de estrangulamento de válvula e o da variação de velocidade de bomba, através de inversores de frequência. As informações sobre as grandezas elétricas, mecânicas e hidráulicas foram coletadas com o intuito de analisar o

comportamento operacional do sistema motriz sob o enfoque da qualidade de energia elétrica e eficiência energética.

Capítulo 4 – Simulações Computacionais

Este capítulo tem por objetivo apresentar e analisar diversas simulações, utilizando a técnica no domínio do tempo aplicada ao sistema de bombeamento. A plataforma computacional utilizada foi o *Alternative Transient Program (ATP)*. Estão presentes simulações para as condições de alimentação: ideal, distorções harmônicas e desequilíbrios. Complementando os aspectos anteriores, este capítulo está direcionado para a validação da modelagem computacional proposta. Esta validação é realizada através da comparação dos valores encontrados nas simulações com os obtidos durante os ensaios laboratoriais.

Capítulo 5 – Conclusão

As principais constatações sobre o comportamento elétrico, mecânico e hidráulico do sistema de bombeamento quando alimentado em condições adversas sob a ótica da qualidade de energia elétrica e eficiência energética estão aqui relatados, outras situações encontradas estão comentadas.

Capítulo 2

2 - ASPECTOS RELACIONADOS COM A OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO SOB O ENFOQUE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

2.1 – Introdução

O objetivo deste capítulo é apresentar os aspectos relacionados à teoria que envolve o estudo da efficientização energética, aplicados em sistemas de bombeamento, quando submetidos a uma tensão de alimentação não ideal, ou seja, desequilíbrios ou harmônicos. Complementando os aspectos anteriores, este capítulo está voltado ao controle de vazão de um sistema de bombeamento. Na primeira situação a vazão será controlada por válvulas de estrangulamento. Posteriormente, através da utilização de inversores de frequência, a vazão será controlada através da variação da velocidade do conjunto motor-bomba. Finalmente, apresenta-se uma síntese dos principais itens relacionados com o tema “qualidade da energia elétrica” destacando-se os harmônicos e desequilíbrios.

2.2 - O motor de indução

O motor de indução foi inventado por Nikola Tesla no período de 1882 a 1887, desde então, os motores sofreram uma série de desenvolvimentos tecnológicos. Um exemplo disso é a relação peso-potência que em 1891 era da ordem de 88 kg/kW e que nos dias atuais passou para 5,7 kg/kW. Essa redução se deve principalmente aos avanços nas técnicas de isolamento e na redução da seção dos condutores, extraindo-se, contudo, uma mesma potência [5].

No Brasil, a partir de 1993, iniciou-se um trabalho com o objetivo de melhorar os rendimentos nominais dos motores elétricos no âmbito do Programa Brasileiro de

Etiquetagem (PBE). Os fabricantes nacionais de motores, além do Instituto Nacional de Metrologia (INMETRO), Procel e Ministério de Minas e Energia (MME) estabelecem, por consenso, metas de melhoria dos rendimentos. Em 2002, com a regulamentação da Lei de Eficiência Energética (Lei no 10.295/2001 – BRASIL, 2001) para motores elétricos de indução trifásicos, foram estabelecidas tabelas de rendimentos mínimos de motores de linha padrão e alto rendimento.

O grande problema dos motores de indução são as elevadas correntes de partida, entretanto o mercado oferece possibilidades para amenizar os efeitos desta corrente, como, por exemplo, as antigas chaves estrela-triângulo e, atualmente, os dispositivos de partida suave, conhecidos também como *soft-starter*, os inversores de frequência. Estes dispositivos utilizam componentes eletrônicos para controlar a tensão aplicada no estator do motor. A partida pode ser programada de forma suave, assim como a parada, reduzindo conseqüentemente, o pico da corrente de partida. O resultado é a diminuição do estresse térmico e mecânico. A tendência é a vida útil do motor, equipamentos acoplados, aumentar devido à eliminação de estresses mecânicos durante a partida.

Convém observar que a operação correta do motor e em condições ideais é que trará benefícios para o usuário. O percentual de perdas internas do motor pode ser elevado, se o mesmo estiver trabalhando em condições fora das especificações. O funcionamento desta máquina fora dos padrões de alimentação, em local de funcionamento não adequado, superdimensionamento, acoplamento incorreto ou desalinhado, podem, inclusive, anular os benefícios da utilização de um motor de alto rendimento.

2.2.1 - O motor de alto-rendimento

Os motores de alto rendimento são motores projetados para fornecer a mesma potência na ponta do eixo que outros tipos de motores, porém consumindo menos energia elétrica [18].

Para atingir esse objetivo, os fabricantes fizeram as seguintes melhorias:

- chapas metálicas de melhor qualidade, que utilizam ligas de ferro silício;
- maiores volumes de cobre utilizados, reduzindo conseqüentemente a temperatura de operação;
- A utilização de enrolamentos especiais, tendo por objetivo reduzir perdas estatóricas;

- Maior preenchimento das ranhuras, provendo a melhor dissipação do calor gerado internamente;
- anéis de curto circuito dimensionados para reduzir as perdas por efeito joule;
- Melhorias no entreferro, cabeça de bobinas, na ventilação e nos mancais.

O projeto do motor também proporciona melhorias, porém, este deve ser fruto de um detalhado balanço dos vários tipos de perdas presentes no motor. Uma vez, que todas essas perdas se inter-relacionam, um aumento no número de lâminas, por exemplo, na busca por redução nas perdas por correntes parasitas, exigirá um aumento no comprimento dos condutores o que provocará aumento nas perdas joule.

Os motores de alto rendimento têm seu projeto modificado, em relação aos motores da linha padrão, objetivando a diminuição da sua perda global. Normalmente as perdas por efeito joule estatístico do motor de alto rendimento é maior que as mesmas perdas no motor da linha padrão. Enquanto que com as perdas suplementares acontece o contrário.

As características dos motores das linhas padrão e alto-rendimento são técnica, elétrica e mecanicamente similares e atendem ao acionamento da carga sem que sejam necessárias adequações. A aquisição de um motor de alto rendimento deve levar em conta o custo de aquisição, em média 30% mais alto que o motor da linha padrão, e o menor custo operacional ao longo da sua vida útil, devido a sua maior eficiência. A substituição, todavia, requer uma avaliação técnico-econômica, de modo a verificar se a economia de energia obtida é suficiente para pagar a diferença de preço em tempo razoável [3].

2.3 – Curvas características

2.3.1 – Rendimento x Carga

O motor é constituído de diversas partes e de diferentes tipos de materiais que apresentam diferentes tolerâncias quanto as suas características dimensionais e/ou físicas. O rendimento máximo é determinado pelos materiais utilizados na fabricação e pelas dimensões da máquina. Muitos motores apresentam rendimento máximo quando acionam cargas entre 75% e 100% da nominal. Motores com potência nominal abaixo de 10 CV tem uma redução acentuada do seu rendimento para carregamento inferior a 60% [5]. A Figura 2.1 mostra a influência que a carga

tem sobre o rendimento. O rendimento indicado na placa do motor representa o rendimento nominal médio de uma grande quantidade de motores de um mesmo projeto.

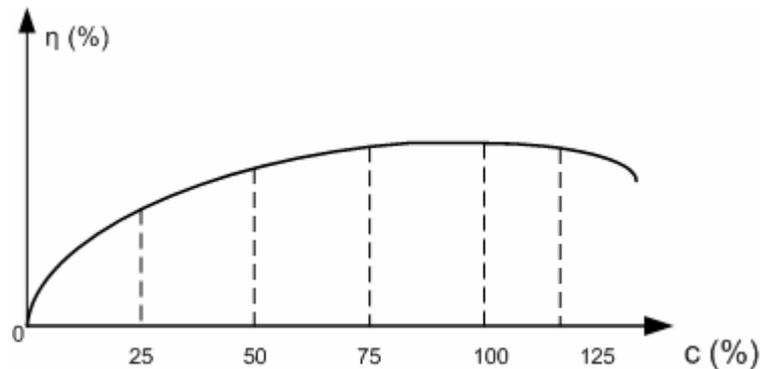


Figura 2.1 – Comportamento do rendimento x carga

Segundo a NBR 7094/1996, não há limite de tolerância do rendimento para valores acima do indicado no motor. Para valores inferiores, os limites de tolerância para motores da linha padrão e da linha de alto rendimento devem obedecer ao seguinte critério.

- Para rendimentos marcados de $\eta \geq 0,851$, o limite inferior de tolerância é dado por $0,2 \times (1 - \eta)$;
- Para rendimentos marcados de $\eta < 0,851$, o limite inferior de tolerância é dado por $0,15 \times (1 - \eta)$;

O rendimento utilizando o método direto pode se determinado pela equação (2.1):

$$\eta(\%) = \frac{P_m}{P_e} \times 100 \quad (2.1)$$

onde:

P_m – Potência mecânica no eixo do motor

P_e – Potência elétrica ativa na entrada do motor

η (%) – rendimento em porcentagem

Deve-se ressaltar que a obtenção da potência mecânica no eixo do motor nunca é direta, mas o produto de torque e velocidade.

O cálculo de rendimento pelo método indireto leva em conta as perdas, logo para essa condição, a indicação do rendimento é expressa pela equação (2.2):

$$\eta(\%) = \frac{P_m}{P_e + \text{perdas}} \times 100 \quad (2.2)$$

Onde:

perdas – perdas por atrito e ventilação, perdas no núcleo magnético e perdas por atrito e ventilação.

O método preferencial da NBR 5383, revisado em 2000, sugere a medição de perdas utilizando dinamômetro. A medição de resistência do estator deve ser realizada em condição ambiente. A temperatura deve ter seu valor corrigido para a temperatura de trabalho do motor. São ainda necessários testes auxiliares para os cálculos das perdas por atrito e ventilação, perdas no núcleo magnético e perdas suplementares [19].

2.3.2 - Fator de Potência x Carga

A curva de comportamento mostrada na Figura 2.2, demonstra que o motor de indução apresenta melhor fator de potência dentro da faixa entre 75% e 100% de carga nominal. Portanto deve-se evitar que o motor trabalhe com carregamento leve. O baixo fator de potência, principalmente nos parques industriais, além de sobrecarregar os transformadores, pode sujeitar o consumidor a pagar multa por baixo fator de potência. A resolução 456 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) imputa ao consumidor industrial multa por baixo fator de potência, conhecida como faturamento de excedente de reativos.

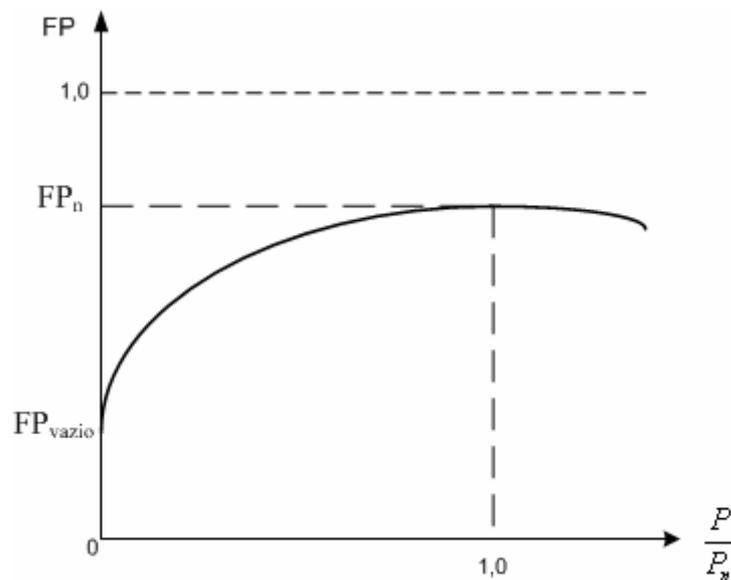


Figura 2.2 – Comportamento do FP x carga

2.4 - Acoplamento motor-carga

Na maioria das aplicações envolvendo acionamentos necessita-se acoplar o motor com a carga. A transferência de potência do motor para a carga é realizada por intermédio de sistemas de transmissão de potência mecânica, ou acoplamentos mecânicos, que podem ser de vários tipos, como citados a seguir:

- Acoplamento direto, também conhecido como acoplamento rígido;
- Acoplamento por correias;
- Acoplamento por correntes;
- Acoplamento hidráulico;
- Caixas de engrenagens.

A Figura 2.3 apresenta um diagrama onde estão representados conjugados, momentos de inércia, velocidades e redutores que compõem o acoplamento motor-carga.

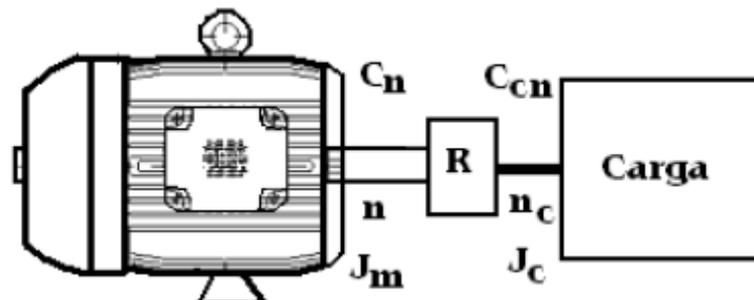


Figura 2.3 – Diagrama representativo do acoplamento motor-carga

Onde:

- R - relação de acoplamento;
- Cn - conjugado nominal;
- Ccn - conjugado nominal da carga;
- Jm - momento de inércia do motor;
- Jc - momento de inércia da carga.
- n – velocidade no eixo do motor.
- nc – velocidade no eixo da carga

a) Acoplamento direto

O acoplamento direto é usado apenas em casos particulares, onde o alinhamento entre os eixos é realizado com perfeição ou então quando não existem mancais intermediários entre as máquinas [20]. As perdas podem ser consideradas nulas. A utilização do acoplamento direto é limitada a máquinas ou equipamentos que possam trabalhar na mesma velocidade ou próximo à velocidade do motor. O rendimento do acoplamento direto é considerado como 100%. Esse é o acoplamento utilizado no sistema de bombeamento do laboratório Lamotriz da Universidade Federal de Uberlândia.

b) Acoplamento por correias

A transmissão por correias é o mais utilizado na transmissão de potência ao longo do tempo. Isto ocorre em virtude da facilidade desse tipo de acoplamento adaptar-se aos vários tipos de máquinas. A correia dependendo da geometria ajuda a diminuir vibrações no conjunto motor-carga, além disso, podem ser fabricadas com materiais sintéticos, capazes de conduzir elevadas potências em transmissões compactas. As perdas médias de energia desse tipo de acoplamento são aproximadamente de 5%.

c) Acoplamento por correntes

Entre as características básicas da transmissão por correntes, incluem-se relação de velocidade constante, não apresentam deslizamento e nem estiramento, capacidade de transmissão de torque mais elevado que as correias, grande durabilidade e possibilidade de acionar vários equipamentos a partir de uma única fonte de potência. Apresenta rendimento em torno de 90%.

d) Acoplamento por caixas redutoras e acoplamento hidráulico

A transmissão por caixas redutoras ou acoplamentos hidráulicos, tem os seus campos de aplicação, normalmente associados a grandes potências, conjugados elevados de partida, variação de velocidade, etc. A eficiência destes tipos de acoplamento é elevada, gira em torno de 95%.

2.5 - O sistema de bombeamento

O conhecimento de um sistema de bombeamento genérico, com seus componentes básicos e as respectivas condições operacionais, pode facilitar a caracterização de um sistema real [21]. A Figura 2.4 representa um sistema típico de bombeamento de água, com seus principais componentes. A definição sintetizada dos componentes que formam o sistema está relacionada a seguir.

Sistema de captação – Pode ser o leito de um rio, um reservatório artificial ou não, ou um poço artesiano. Normalmente não consome energia, mas, dependendo da posição em que se encontrar e de suas características, pode afetar o consumo do sistema.

Sistema de bombeamento – Pode ser composto por uma bomba ou um conjunto de bombas. Esse é o componente do sistema responsável pelo maior consumo de energia elétrica do conjunto.

Sistema de tratamento – É o local onde a água bruta é tratada, tornando-a adequada para o consumo. Nele estão localizados sistemas de mistura, limpeza, laboratórios e instalações administrativas que possuem equipamentos de consumo de energia. Além desses equipamentos as bombas de água tratada podem estar localizadas nesse sistema.

Sistema de armazenagem – Consiste em reservatórios usados para regularizar o Abastecimento de água. Conforme seu dimensionamento auxilia na redução do consumo de energia em horários cujo consumo seja mais caro (horário de ponta); isto é, reduz o custo total da energia.

Sistema de distribuição – Formado por adutoras que interligam os sistemas de captação. São formadas por tubos, válvulas, conexões e outros acessórios, não envolve consumo de energia, mas seu acabamento interno, posicionamento, comprimento, diâmetro e obstruções presentes influem decisivamente no dimensionamento dos sistemas de bombeamento.

Uso final – Representa o conjunto de equipamentos consumidores de água: torneiras, tanques, chuveiros, bacias sanitárias, lavadores. A sua demanda por água é que determina o dimensionamento de todo o sistema de abastecimento e o consumo de energia.

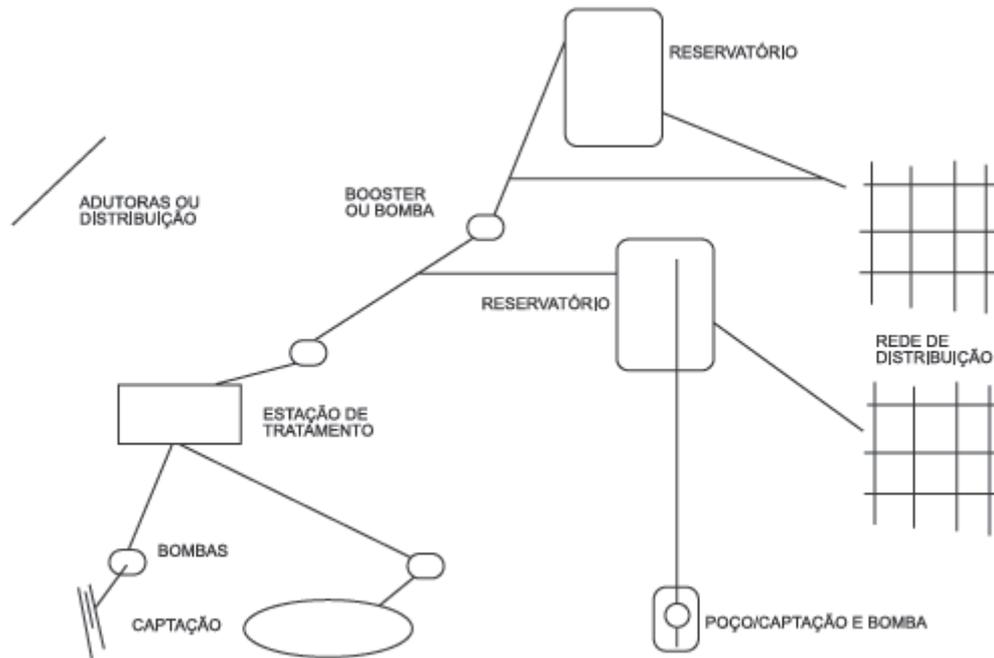


Figura 2.4 – Sistema de abastecimento de água e seus principais componentes

2.5.1 - Principais componentes de um sistema de bombeamento

O sistema de bombeamento é o principal consumidor de energia elétrica de um sistema de abastecimento de água. O seu perfeito funcionamento irá influenciar na eficiência energética do conjunto. A Figura 2.5 mostra um sistema de bombeamento e seus principais componentes.

Onde:

- 1- Casa de Bombas;
- M – Motor de acionamento;
- B – Bomba;
- 2 – Poço (fonte);
- VPC - Válvula de pé com crivo;
- CL - Curva de 90°;
- 3 – Linha de Sucção;
- RE - Redução Excêntrica;
- VR - Válvula de retenção;
- R – Registro;
- C – Joelhos;
- 4 - Linha de Recalque;
- 5 – Reservatório.

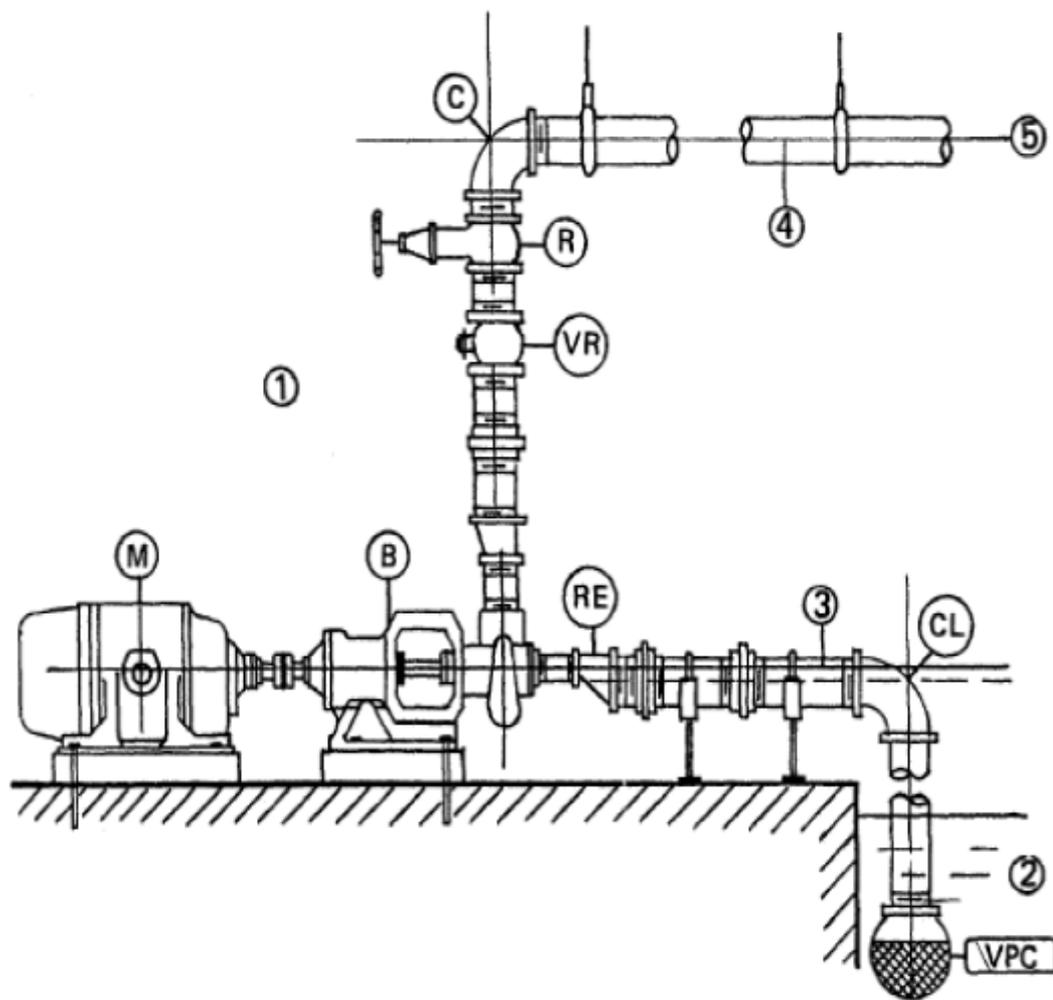


Figura 2.5 – Sistema de bombeamento e seus componentes

2.5.2 - Bomba hidráulica

O bombeamento pode ser definido como o efeito de adicionar energia a um fluido a fim movê-la de um ponto, a outro. Como energia é a capacidade de produzir trabalho, adicioná-la a um fluido permite que o mesmo execute um trabalho, ou seja, fluindo através de uma tubulação ou atingindo um ponto com a cota mais elevada [22].

As bombas centrífugas são as mais utilizadas nos sistemas industriais. Elas podem ser classificadas das seguintes formas:

i) De acordo com o posicionamento do eixo

a) Bomba de eixo horizontal: é a mais versátil e utilizada nas mais diversas utilidades.

b) Bomba de eixo vertical: utilizadas, onde o espaço para instalação é reduzido, por exemplo, em poços subterrâneos profundos.

ii) Quanto à trajetória do fluido

- a) Bombas radiais ou centrífugas: trabalham com pequenas vazões a grandes alturas, com predominância de força centrífuga, são as mais utilizadas atualmente;
- b) Bombas axiais: trabalham com grandes vazões a pequenas alturas;
- c) Bombas diagonais ou de fluxo misto: é uma combinação das duas anteriores, caracterizam-se por trabalhar com médias vazões a médias alturas.

iii) Quanto à posição do eixo da bomba em relação ao nível da água

- a) Bomba de sucção positiva: quando o eixo da bomba situa-se acima do nível do reservatório.
- b) Bomba de sucção negativa ("afogada"): quando o eixo da bomba situa-se abaixo do nível do reservatório.

2.5.3 - Curvas características ou de desempenho da bomba centrífuga

As bombas centrífugas operando a uma determinada velocidade (rotação) constante têm a capacidade de produzir vazões, desde zero, até um valor máximo, tendo como dependência o projeto da bomba, suas dimensões e condições de sucção. A capacidade total ("Head" H) desenvolvida pela bomba, a potência requerida para acioná-la (P) e o rendimento resultante (η) variam em função da capacidade. As relações entre P, Q, H e η são conhecidas como curvas características das bombas. Essas curvas são levantadas em laboratório e disponibilizadas geralmente através de catálogos.

As curvas tradicionais fornecidas pelos fabricantes são três: curva de carga x vazão, curva de potência absorvida x vazão e curva de rendimento x vazão. A carga da bomba (H) é a energia por unidade de peso que a bomba é capaz de fornecer ao líquido bombeado. A sua unidade geralmente é o metro de coluna de água. A vazão é o volume de líquido bombeado por unidade de tempo. Em termos de potência, devem ser considerados dois tipos: a potência cedida ao líquido e a potência mecânica absorvida pela bomba centrífuga.

a) Potência cedida ao líquido (Pc)

A potência cedida ao líquido é determinada tomando-se como base a equação:

$$P_c \text{ (cv)} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{75} \quad (2.3)$$

Onde:

P_c – Potência cedida ao líquido, unidade cavalo vapor (cv)

H – carga da bomba, unidade metro (mca)

Q – Vazão, unidade metro cúbico por segundo (m^3/s)

γ - Peso específico do líquido, quilograma-força por metro cúbico (kgf/m^3)

b) Potência mecânica absorvida pela bomba (P_m)

A potência mecânica absorvida pela bomba centrífuga é calculada pela expressão (2.4).

$$P_m = \frac{\sqrt{3}.I.V.\cos\phi.\eta_m}{736} \text{ (cv)} \quad (2.4)$$

Onde:

P_m – Potência mecânica, unidade cavalo vapor (cv)

V – tensão de linha, unidade volt (V)

I – corrente elétrica de linha, unidade ampere (A)

$\cos\phi$ – fator de potência

η_m – rendimento do motor elétrico.

c) Curva carga (H) versus vazão (Q)

Para representar a curva $H = f(Q)$ a equação geral da bomba centrífuga (2.5) é utilizada. As curvas obtidas apresentam vários comportamentos e, recebem denominações em função de suas inclinações. Assim encontram-se curva inclinada, curva ascendente-descendente, curva altamente descendente e curva plana.

A equação geral da bomba centrífuga pode ser demonstrada através da equação (2.5):

$$H = An^2 + BnQ + CQ^2 \quad (2.5)$$

Onde:

Q - vazão [m^3/h];

H - carga hidráulica de pressão [m];

n – rotação da bomba

A, B e C - constantes equacionais.

A Figura 2.6 mostra os vários tipos de curva ($H \times Q$).

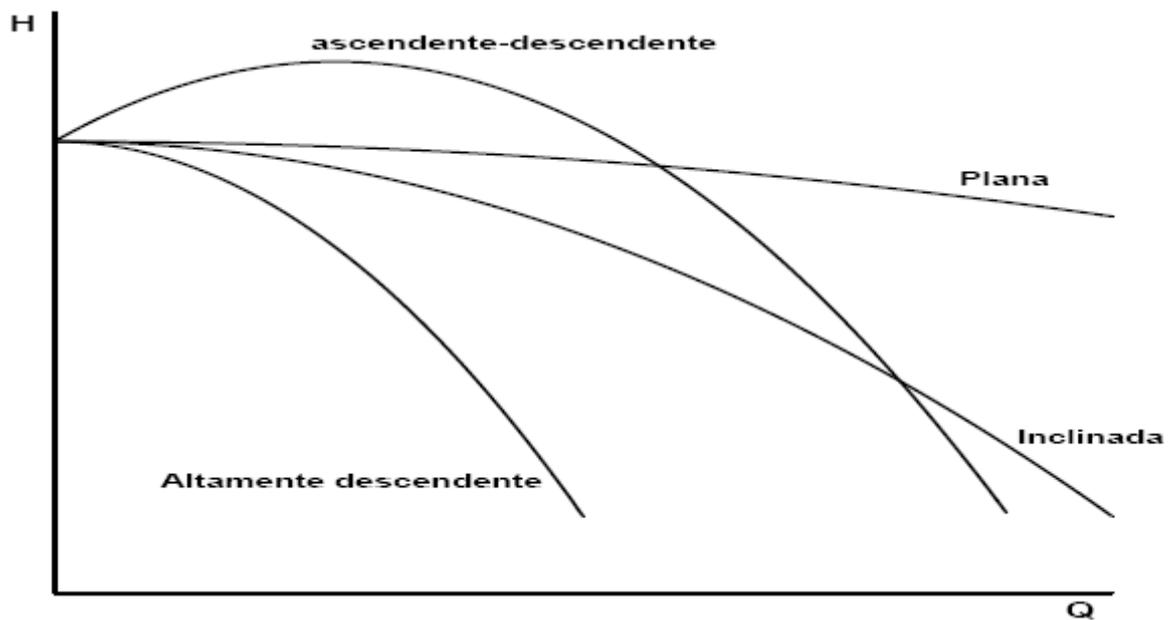


Figura 2.6 – Tipos de curva H x Q

d) Curva rendimento (η) versus vazão (Q)

O rendimento da bomba é por definição a razão entre a potência útil cedida ao líquido e a potência absorvida pela bomba. As bombas centrífugas de pequena potência apresentam rendimento máximo da ordem de 68%. Entretanto bombas centrífugas com rotações específicas maiores e vazões maiores chegam a atingir rendimento de 90% [5]. Para cada bomba existe uma vazão para qual o rendimento é máximo. A Figura 2.7 mostra as características da curva η x Q.

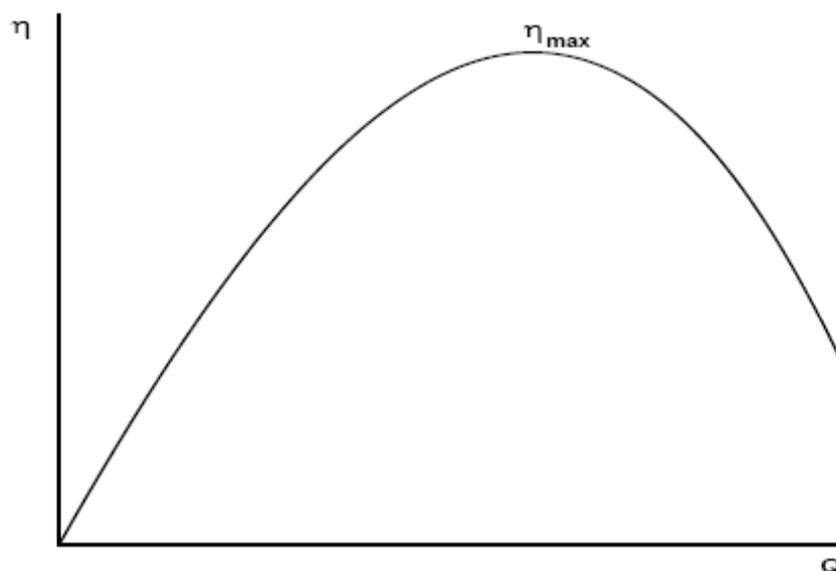


Figura 2.7 – Curva η x Q

e) Curva potência mecânica (P_m) versus vazão (Q)

Para uma vazão nula, a potência hidráulica aplicada ao fluido é zero, sendo assim uma potência mínima é necessária para manter a rotação da bomba. Portanto é a condição de menor exigência de potência do motor elétrico. Essa situação é obtida com a válvula fechada na saída da bomba. Essa operação reduz o tempo de duração da corrente de partida do motor, conseqüentemente aumenta a sua vida útil. Entretanto a energia fornecida pelo motor ao fluido é transformada em calor. O funcionamento por longo tempo com vazão zero (válvula fechada) pode causar sobreaquecimento do fluido e provocar problemas na bomba. A Figura 2.8 representa a potência mecânica (P_m) em função da vazão (Q).

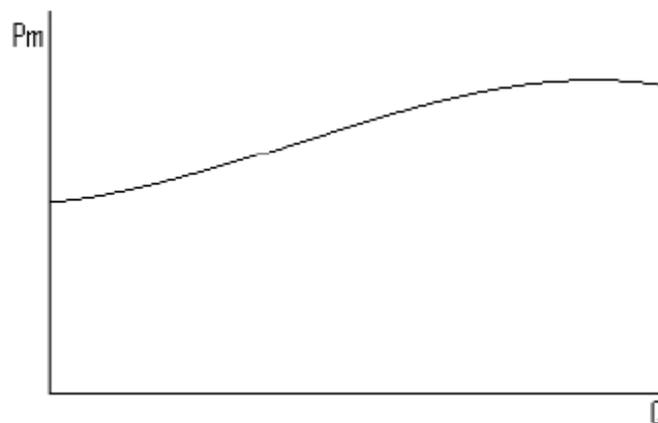


Figura 2.8 – Curva $P_m \times Q$

2.6 - As leis de similaridade

Curvas em função da velocidade não são fornecidas pela maioria dos fabricantes de bombas centrífugas. Entretanto, com o tempo, essas curvas se tornarão de suma importância, uma vez que o uso de inversores de frequência como forma de controlar a vazão tende a se solidificar nos segmentos ou instalações onde uma variação de vazão se faz necessária [3].

Nota-se que pela análise da equação (2.5) que a curva ($H \times Q$) será uma parábola quando “n” for constante, assim como ($H \times n$) também o será, quando “Q” for constante. A variação da vazão (Q), altura total de elevação ou curva de carga (H), potência presente no eixo do motor (P) de uma bomba de fluxo, em função da rotação (n) se relacionam através das equações chamadas de leis de similaridade ou afinidade, indicado pela expressão (2.6). Essa equação é válida para pontos

homólogos (de mesmo rendimento). A Figura 2.9 mostra o gráfico de altura total de elevação, rendimento e potência presente no eixo da bomba em função da vazão para a variação da rotação. A figura mostra que os pontos de operação de A_1 para A_2 , B_1 para B_2 , C_1 para C_2 , ao longo das curvas $H_1 \times Q$ e $H_2 \times Q$ possuem o mesmo rendimento. A potência no eixo, entretanto, sofre variação devido à variação da velocidade da bomba.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1}; \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2; \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \quad (2.6)$$

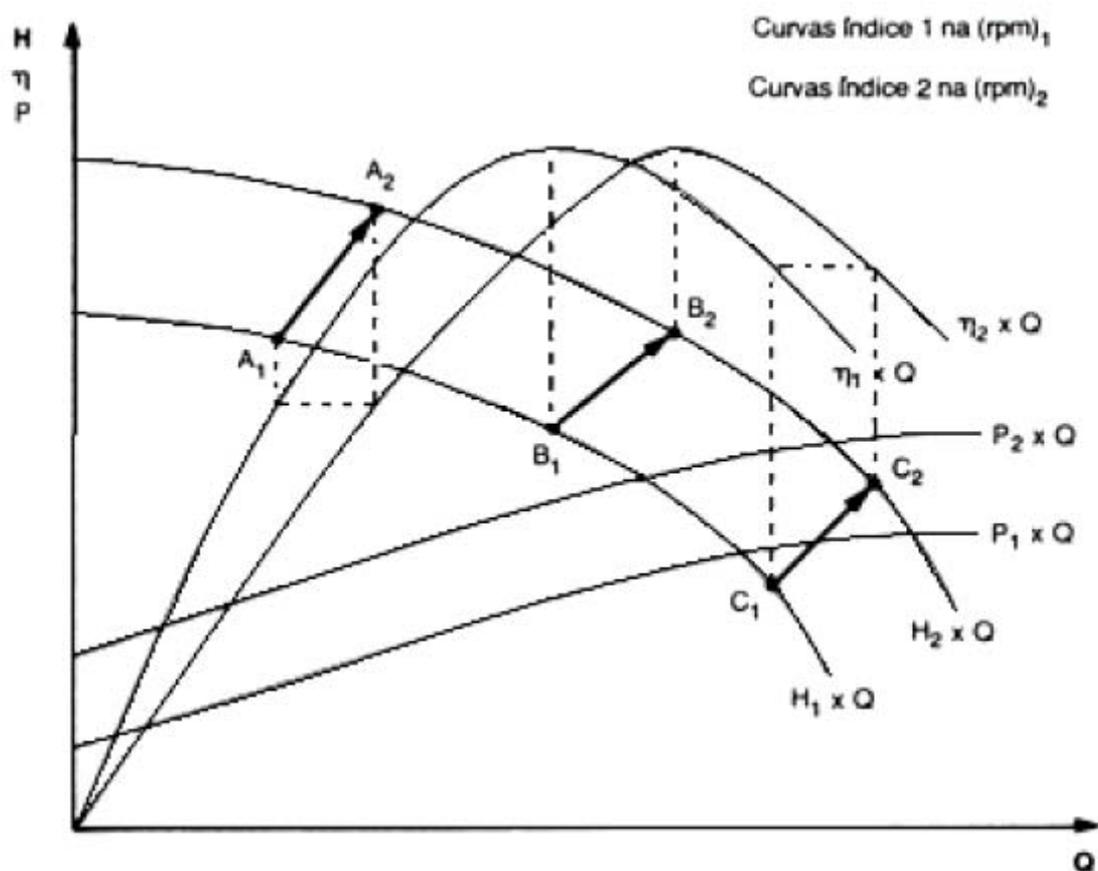


Figura 2.9 – Influência da rotação nas curvas características da bomba centrífuga.

2.7 – Controle de vazão por estrangulamento de válvula

O método da inserção de válvulas de estrangulamento ao longo da tubulação utiliza o conceito de perda de carga, uma vez que o fechamento da válvula provoca o aumento dessa perda à medida que a válvula é fechada. Portanto, a vazão requerida é atingida com a mudança da curva característica do sistema. Este

controle é possível em bombas centrífugas porque estas possuem um limite inerente de maior pressão na descarga, portanto a bomba pode sofrer estrangulamentos na descarga sem sofrer danos. A Figura 2.10 mostra esse comportamento, os pontos A e B indicam os pontos de operações da bomba. A potência elétrica requerida da rede para esse tipo de controle sofre pequena alteração, como aponta a equação (2.7), pois H e Q fazem parte do numerador e o comportamento de um é inversamente proporcional ao do outro.

$$Pe = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta_b \cdot \eta_m \cdot \eta_{ac}} \quad (2.7)$$

onde:

γ - peso específico (kgf/m³)

Q - Vazão (m³/s)

H - pressão (mca)

η_b - rendimento da bomba

η_m - rendimento do motor elétrico

η_{ac} - rendimento do acoplamento (acoplamento direto = 1)

Pe – potência elétrica exigida pela bomba (cv)

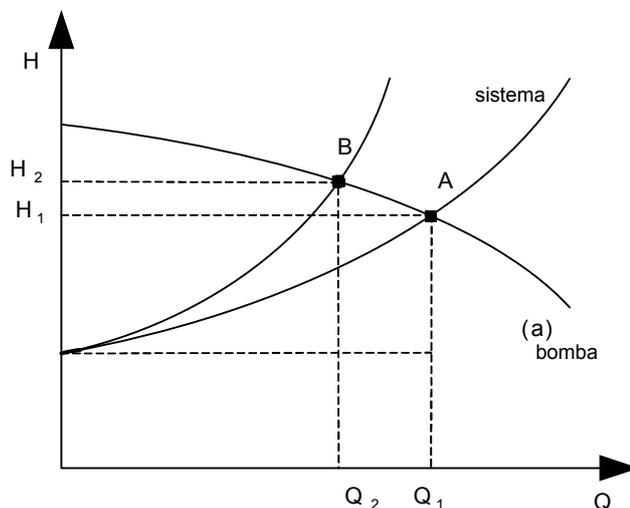


Figura 2.10 – Controle de vazão por estrangulamento de válvula.

2.8 – Controle de vazão por variação de velocidade da bomba

Num sistema de bombeamento, o ponto de funcionamento da bomba pode variar ao longo do dia, conforme solicitações de pressão e vazão do sistema. A

maior eficiência energética pode ser buscada mantendo-se o rendimento mais próximo do Ponto de Maior Rendimento (PMR), isso é possível variando-se a curva de performance da bomba, através da variação de sua rotação para compensar as solicitações do sistema. Para atingir esse objetivo faz-se uso da lei de similaridade (2.6). A utilização da equação (2.8) permite prever a variação de HxQ em relação à rotação da bomba. A Figura 2.11 mostra as curvas da bomba para diferentes velocidades. Rotações variadas da bomba são obtidas através da utilização de inversores de frequência.

$$H = A \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 + B \left(\frac{n_2}{n_1} \right) Q + CQ^2 \quad (2.8)$$

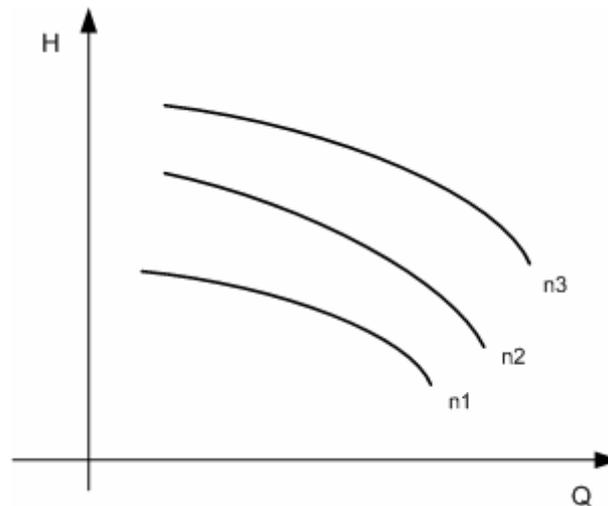


Figura 2.11 – Curva de trabalho da bomba em função da velocidade

Das relações do motor elétrico, frequência (f) e rotação (n) se relacionam através da expressão (2.9):

$$n = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (2.9)$$

onde:

f – frequência em hertz (Hz)

P – números de pólos

n – velocidade em rotações por minuto (rpm).

Normalmente o número de pólos do motor acoplado na bomba não muda, portanto, a equação (2.9) é uma relação de rotação em função da frequência. A frequência normalizada no Brasil é de 60 Hz. A relação (2.8) combinada com a (2.9) pode ser reescrita com base na equação (2.10)

$$H = A\left(\frac{f}{60}\right)^2 + B\left(\frac{f}{60}\right)Q + CQ^2 \quad (2.10)$$

2.9 – Eficiência energética entre os métodos de controle de vazão por estrangulamento de válvula e controle de velocidade.

O controle de vazão por estrangulamento de válvula atua na tubulação do sistema, diminuindo a área disponível para a passagem do líquido. Essa operação diminui a vazão e aumenta a pressão, é uma relação inversamente proporcional, conforme visto na Figura 2.12a. Observando a equação (2.7), verifica-se que nesse método a potência elétrica sofre pouca variação. O método de controle da vazão pela variação da velocidade diminui a pressão e vazão conjuntamente. A área formada pelo cruzamento das linhas que passam por Q_2 , H_{2e} e os eixos Q e H representa a potência exigida do motor no controle de vazão por estrangulamento de válvula. A área formada pelo cruzamento das linhas que passam por Q_2 , H_2 e os eixos Q e H representa a potência exigida do motor no controle de vazão por variação de velocidade. A potência hidráulica requerida pela bomba é proporcional ao produto da vazão pela pressão, ou seja, é proporcional a área dos retângulos, indicado na Figura 2.12b. Quanto maior for essa diferença de área, maior será a economia de energia [23]. Do enunciado conclui-se que há economia de energia no controle de vazão do sistema por variação de velocidade, comparado com o método por estrangulamento de válvula.

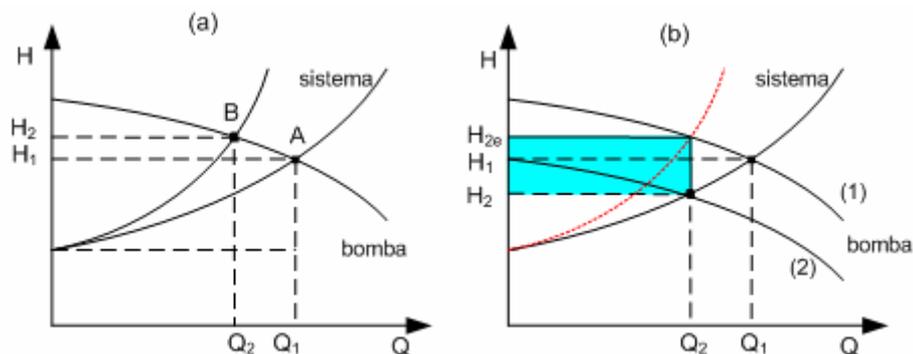


Figura 2.12 – Economia de energia entre controle de vazão por estrangulamento de válvula (a) e inversor de frequência (b)

2.10 – Oportunidades de melhorar a eficiência energética em sistemas de bombeamento

O balanço de energia num sistema de bombeamento pode ser dividido em três partes: energia elétrica entregue pela rede ao sistema motor-bomba; distribuição de água; e uso final. A Figura 2.13 mostra um balanço energético com suas perdas.

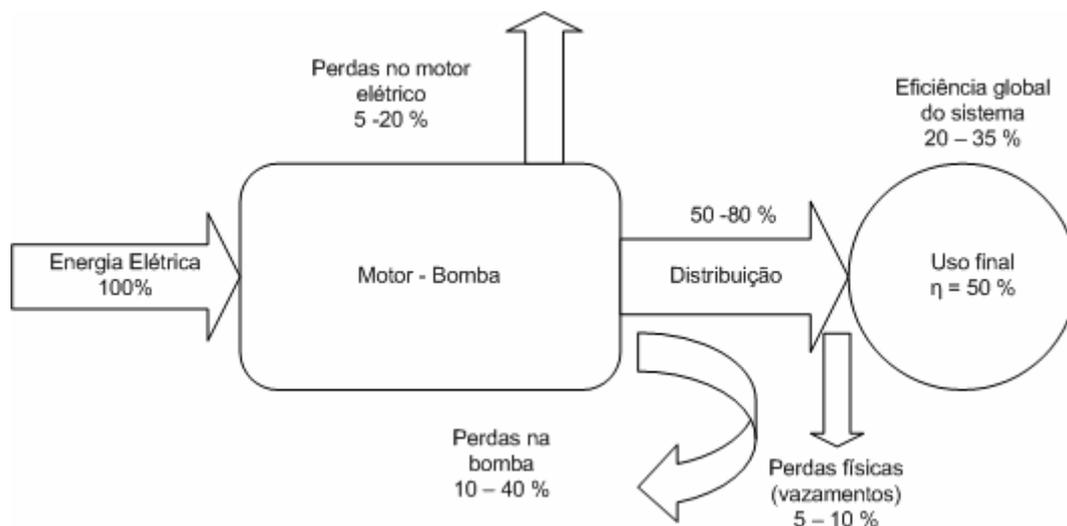


Figura 2.13 – Balanço de energia de um sistema de bombeamento

A referência [21] relaciona algumas oportunidades de melhoria da eficiência energética na operação de um sistema de bombeamento, das quais estão listadas abaixo:

- Melhoria no rendimento da bomba através da seleção adequada do ponto de funcionamento e ajuste para a faixa de maior rendimento.
- Utilização de motores de alto rendimento.
- Construção de reservatórios por zona de pressão.
- Utilização de inversores de frequência para acionamento do sistema.
- Eliminar o problema de cavitação.
- Promover a automação do sistema, utilizando controladores lógicos programáveis (CLP).

A equação (2.7) relaciona os principais parâmetros que compõem a potência fornecida pela rede elétrica à bomba. A energia elétrica é paga em forma de kWh. A equação (2.11) determina a energia consumida:

$$E = \frac{P.t}{1000} \quad (2.11)$$

Onde:

E – energia utilizada, unidade (kWh).

P – potência elétrica exigida da rede pela bomba, unidade watt (W).

t – tempo em horas (h).

Observa-se pela equação (2.7) que uma das formas de melhorar a eficiência energética do sistema é atuar na variação do peso específico do líquido bombeado, ou seja, utilizar um sistema para trabalhar com água bruta e outro para bombear água tratada. A densidade da água bruta não difere significativamente da água tratada, portanto a atuação nessa opção é pouco viável do ponto de vista da eficiência energética. No numerador resta ainda atuar na vazão bombeada e na altura manométrica, que pode ser entendida como pressão de bombeamento. Esta opção é a mais viável, desde que não haja impedimentos em relação à pressão tanto em locais próximos da estação de bombeamento como no final da rede hidráulica. No denominador a forma de melhorar a eficiência do sistema, é atuar no rendimento do motor através da utilização de motores de alto rendimento, ou no rendimento da bomba, colocando o sistema motor-bomba para funcionar no PMR (ponto de maior rendimento da bomba). Por último procurar utilizar sempre que possível acoplamento direto entre o motor e a bomba, já que este apresenta rendimento 100%. Outro fator que influi também na eficiência energética do sistema é a qualidade de energia elétrica fornecida para o motor. Na maioria das vezes essa variável não é levada em conta para avaliação da eficiência energética de um sistema de bombeamento.

2.11 – Qualidade de energia elétrica em sistema de bombeamento.

A qualidade da energia elétrica está relacionada com a grande quantidade de máquinas, eletrodomésticos e acionamentos industriais, que possuem dispositivos eletrônicos e estão conectados à rede. Os equipamentos elétricos atuais são produzidos em série e em grande quantidade. A Figura 2.14 ilustra a evolução do crescimento no Brasil, de cargas com algum conteúdo eletrônico em relação ao total de cargas elétricas instaladas. Em 2005, em torno de 70% da carga instalada no

Brasil já continha componentes eletrônicos como fontes chaveadas, fontes ininterruptas, conversores, no-breaks, *soft-starter*, inversores, etc. Esses equipamentos além de causarem distúrbios na rede, por outro lado, são muito sensíveis a estes fenômenos [24].

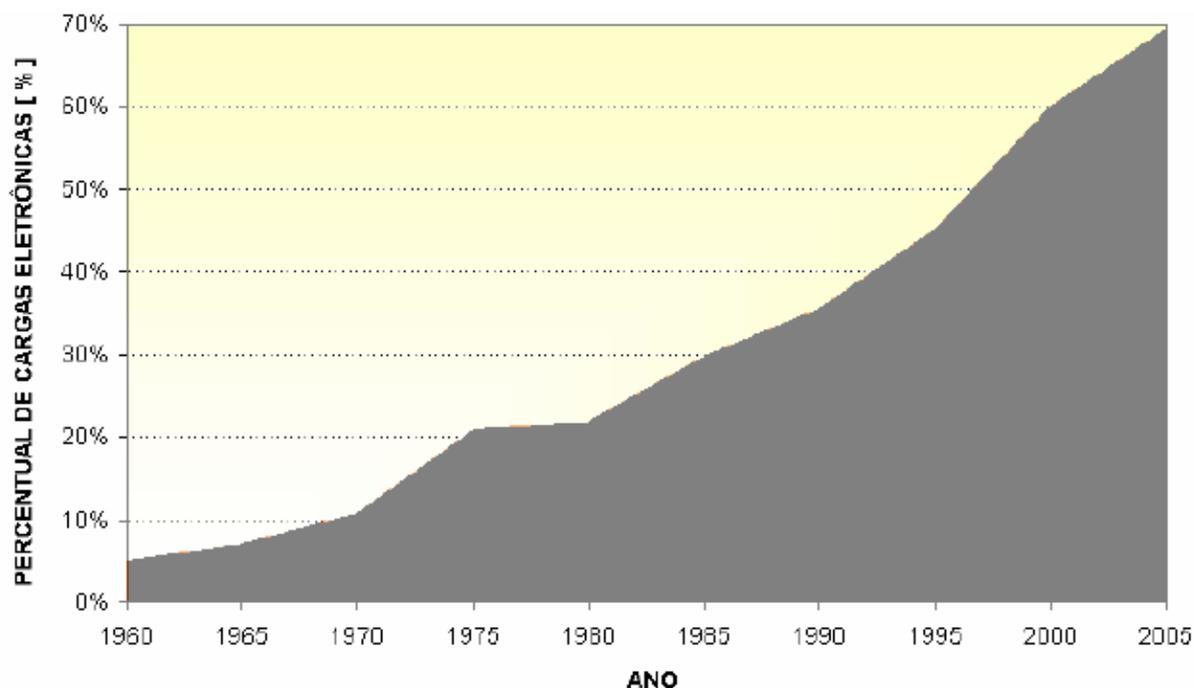


Figura 2.14 – Evolução da presença de cargas elétricas com conteúdo eletrônico no Brasil.

Os principais problemas relacionados com a qualidade de energia elétrica podem ser divididos da seguinte forma:

- Variações da tensão de longa e de curta duração (interrupções, afundamentos e elevações de tensão);
- Distorções da forma de onda (harmônicos, interharmônicos, ruídos, offset, DC, *Notching*);
- Flutuações de tensão (comumente denominado de Efeito *Flicker*);
- Desequilíbrios da tensão;
- Transitórios eletromagnéticos.

Os sistemas de bombeamento em sua enorme maioria são acionados por motores assíncronos. A operação eficiente dos motores de indução trifásicos depende, entre outras coisas da qualidade de energia elétrica fornecida pela rede de alimentação [17]. Além dos motores os parques industriais em geral, empresas de saneamento, indústrias químicas, indústrias petroleiras utilizam *soft-starter* e

inversores de frequência para acionamento dos motores. Alguns problemas relacionados à qualidade de energia elétrica não serão contemplados neste trabalho. O enfoque desta dissertação está direcionado a operação de um sistema de bombeamento submetido a dois itens de qualidade da energia elétrica, quais sejam: harmônicos e desequilíbrios de tensão.

2.11.1 – Variação de tensão de longa duração

São variações que ocorrem no valor eficaz de tensão, com duração superior a 1 minuto. Podem ser resultantes de má operação de bancos reguladores ou de capacitores [17].

2.11.2 – Variação de tensão de curta duração

São variações que ocorrem no valor eficaz de tensão, com duração de tempo compreendida entre 0,5 a 1 minuto, podem ser um estado de sobre tensão ou de sub-tensão [17].

2.11.3 – Flutuações de tensão

As flutuações de tensão, também conhecidas por efeito “Flicker”, consistem em pequenas flutuações de tensões que não afetam de modo perceptível as cargas industriais. Em cargas residenciais, à medida que essas variações se tornam mais freqüentes, podem provocar irritações ao ser humano. Isto ocorre porque essas variações possuem frequência de variações menores que a frequência da rede elétrica. O olho do ser humano é sensível a essas variações, principalmente quando aplicadas em lâmpadas incandescentes [17].

2.11.4 – Distorções da forma de onda – Harmônicos

Uma tensão ou corrente harmônica é um sinal cuja frequência é múltipla inteira da frequência fundamental. A forma de onda distorcida pode ser decomposta em um soma de senóides perfeitas de amplitudes e frequências diferentes (a fundamental e as harmônicas). A Figura 2.15 mostra essa onda deformada e suas componentes harmônicas.

As distorções harmônicas são produzidas por equipamentos que operam de maneira não linear nos sistemas elétricos de transmissão e distribuição. Esses equipamentos geram correntes não senoidais que ao circularem pelo sistema

causam quedas de tensões em várias ordens harmônicas. Portanto as tensões nos pontos de acoplamento comum, também estarão distorcidas. Como exemplo desses equipamentos, citamos: conversores de frequência, reatores controlados a tiristores, reguladores de tensão, transformadores saturados, etc. A operação de dispositivos elétricos não lineares dentro das indústrias, também, provoca degradação da forma de onda de tensão.

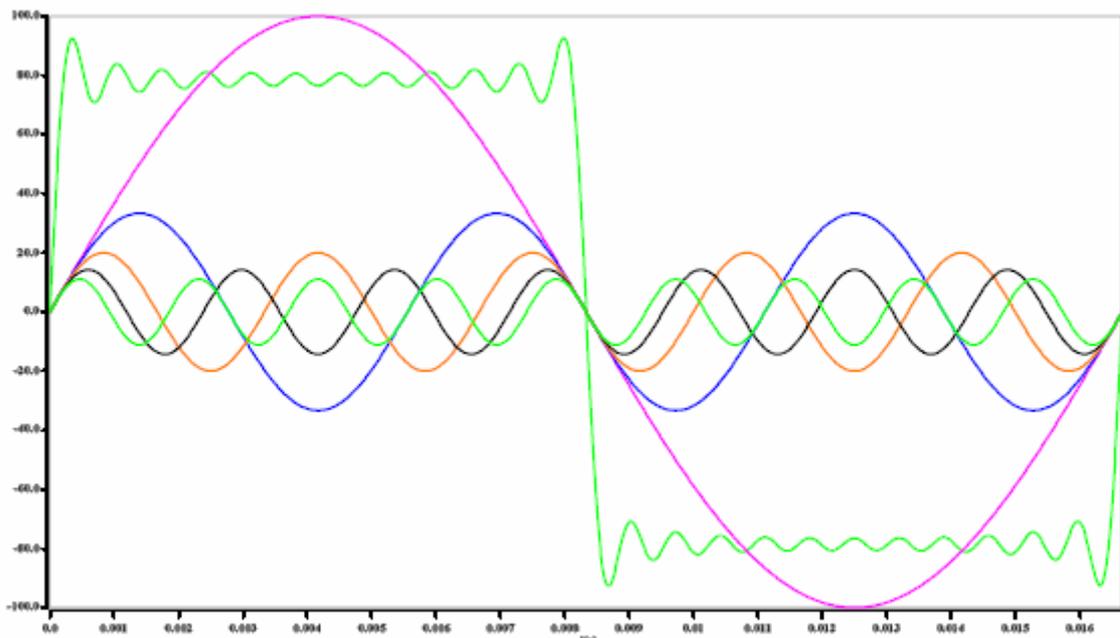


Figura 2.15 – Onda deformada e suas componentes harmônicas.

Em 1981 foi lançado o padrão 519 da ANSI (*American Nacional Standards Intitute*)/IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Atualmente a forma mais difundida para conceituar matematicamente os conteúdos harmônicos é mostrada na norma IEEE-519-1992 [25]. O documento revisado apresenta uma forma de quantificar a *Total Harmonic Distorcion* (THD).

- Distorção Harmônica Total de Tensão (THD_V)

A distorção total de tensão pode ser determinada pela expressão (2.12)

$$THD_V = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_1^2}} \cdot 100\% \quad (2.12)$$

Onde:

V_1 – amplitude da tensão na frequência fundamental.

V_n – amplitude da tensão nas frequências de ordem “n”, sendo “n” número inteiro positivo.

- Distorção Harmônica Total de Corrente (THD_I)

A distorção total de corrente é obtida através da fórmula (2.13)

$$\text{THD}_I = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} \cdot 100\% \quad (2.13)$$

Onde:

I_1 – amplitude da corrente na frequência fundamental.

I_n – amplitude da corrente nas frequências de ordem “n”, sendo “n” número inteiro positivo.

Os motores elétricos podem sofrer impactos significativos quando, sujeitos a conteúdos harmônicos na alimentação. Distorções harmônicas de tensão inserem fluxos harmônicos dentro do motor, estes não influenciam significativamente no torque do motor, porém, induzem correntes de alta frequência no rotor. O fluxo adicional é pequeno, mas suficiente para produzir perdas adicionais. As indicações, mais comuns, de distorção harmônica de tensão na alimentação do motor são, entre outros, estresses térmicos, mecânico e dielétrico, causando uma redução de eficiência, aquecimento adicional, vibrações e presença de ruídos [26].

Cada componente harmônico apresenta uma característica própria em relação a sequência de fase da componente fundamental (no Brasil, 60Hz), ou seja, sequência positiva, negativa ou zero, tal como nos estudos de sistemas elétricos desequilibrados. De forma geral:

$n = 3k+1 \Rightarrow$ sequência positiva

$n = 3k+2 \Rightarrow$ sequência negativa

$n = 3k+3 \Rightarrow$ sequência zero

sendo:

$n =$ ordem harmônica

$k \geq 0$

A importância de se conhecer a sequência de fase de cada ordem harmônica se deve ao fato de se poder avaliar o efeito das correntes na produção da força magnetomotriz resultante no entreferro da máquina. A corrente de sequência positiva possui o mesmo sentido de rotação da fundamental, contribuindo para o

conjugado do motor, enquanto as correntes de sequência negativa geram forças magnetomotriz de mesma rotação, porém, em sentido contrário, resultando em um conjugado negativo no eixo. As correntes de sequência zero não produzem força magnetomotriz resultante no entreferro, não contribuindo assim, para o conjugado [26]. Um outro exemplo sobre o efeito de harmônicos nas máquinas elétricas está descrito nas referências [18] e [27].

Na presença de harmônicos a potência aparente (S) não é somente composta de potência ativa (P) e potência reativa (Q), está presente também uma potência de distorção (D) cuja unidade é também o Volt-Ampere distorcido. A expressão (2.14) é utilizada para quantificar essa potência.

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2) + D^2} \quad (2.14)$$

A representação da potência aparente em função de valores RMS, da tensão e da corrente podem ser descritas pelas fórmulas (2.15) (2.16) ou (2.17):

$$S = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \quad (2.15)$$

$$S = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_{h.RMS}^2 \cdot I_{h.RMS}^2} \quad (2.16)$$

$$S = V_{1.RMS} \cdot I_{1.RMS} \cdot \sqrt{1 + THD_V^2} \cdot \sqrt{1 + THD_i^2} \quad (2.17)$$

O fator de potência na presença de harmônicos pode ser calculado tomando-se como base a equação (2.18):

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD_V^2} \cdot \sqrt{1 + THD_i^2}} = fp_{disp} \cdot fp_{dist} \quad (2.18)$$

Onde:

$$fp_{disp} = \frac{P}{S_1} \text{ - fator de potência de deslocamento.}$$

fp_{dist} – fator de potência de distorção.

Percebe-se pela equação (2.18) que há uma queda no fator de potência do motor ou equipamento quando alimentado com sinais que apresentam distorção harmônica, em relação à alimentação com sinal ideal.

No módulo 8 do Procedimento de Distribuição de Energia elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) estão apresentadas as expressões para cálculo da

Distorção Individual de Tensão - $DIT_h\%$ (2.19) e Distorções Total de Tensão - $DTT\%$ (2.20).

$$DIT_h \% = \frac{V_h}{V_1} .100 \quad (2.19)$$

Onde:

DIT_h - Distorção harmônica individual de tensão de ordem h

V_h - Tensão harmônica de ordem h

V_1 - Tensão fundamental medida V_1

$$DTT = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{h_{m\acute{a}x}} V_h^2}{V_1^2}} .100 \quad (2.20)$$

Onde:

DTT - Distorção harmônica total de tensão

V_h - Tensão harmônica de ordem h

V_1 - Tensão fundamental medida V_1

$h_{m\acute{a}x}$ - Ordem harmônica máxima

O espectro harmônico a ser considerado para fins do cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25ª ordem harmônica.

2.11.4.1 – Distorções harmônicas presentes na tensão de alimentação do motor de indução

Em geral, as distorções harmônicas presentes nas tensões de alimentação de motores de indução trifásicos, são provenientes de duas causas principais:

i) Operação de equipamentos não lineares presentes nos sistemas elétricos em nível de transmissão e distribuição, cuja operação resulta em geração de correntes distorcidas. Também, concorrem para a geração de harmônicos, dispositivos eletrônicos presentes nos sistemas industriais, os quais em operação normal também são responsáveis pela degradação dos sinais de tensão nos barramentos internos da instalação. Em geral, os níveis de distorção harmônica encontrados são baixos, nos barramentos externos, da ordem de 5%. Ao se adentrar nas instalações industriais, pode-se detectar distorções próximas de 10%. A Figura 2.16 mostra o oscilograma da tensão de linha medida em um barramento ao nível de 13,8 kV. O THD de tensão obtida para a forma de onda é da ordem de 5,3%. [26].

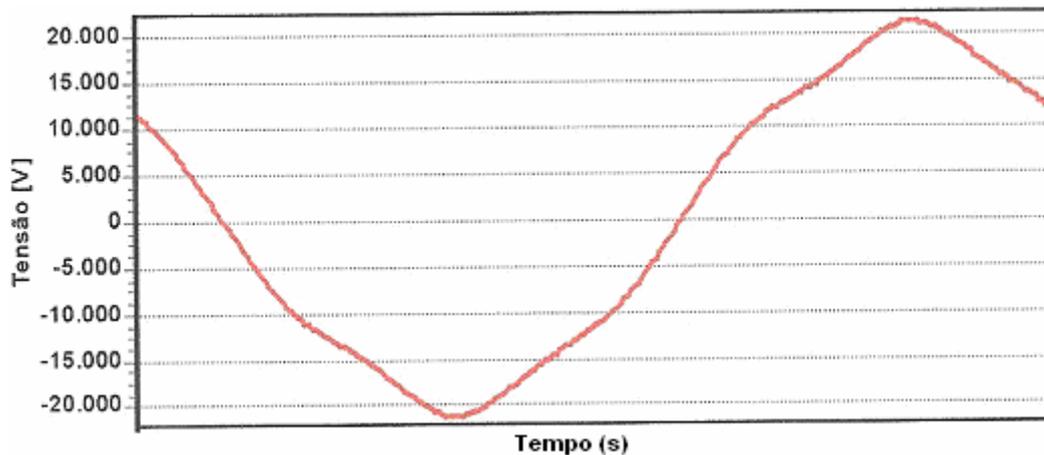


Figura 2.16 - Forma de onda tensão de linha em um barramento de 13,8 kV

ii) Outra condição operacional que tem se tornado freqüente em instalações industriais consiste na utilização de dispositivos eletrônicos com o objetivo de controlar a velocidade, conjugado e/ou correntes de partida dos motores. Estes equipamentos, conectados à entrada de alimentação das máquinas injeta um conteúdo harmônico significativo, particularmente, em frequências elevadas. Um exemplo típico deste comentário está utilização de inversores de frequência com o objetivo de controlar a velocidade de um sistema motriz. A Figura 2.17 ilustra a forma de onda, obtida em laboratório, da tensão nos terminais de um motor de indução de potência nominal de 100 CV, tensão 440 V, alimentado por um inversor tipo *Voltage Source Inverters (VSI) - Pulse Width Modulation (PMW)* [27].

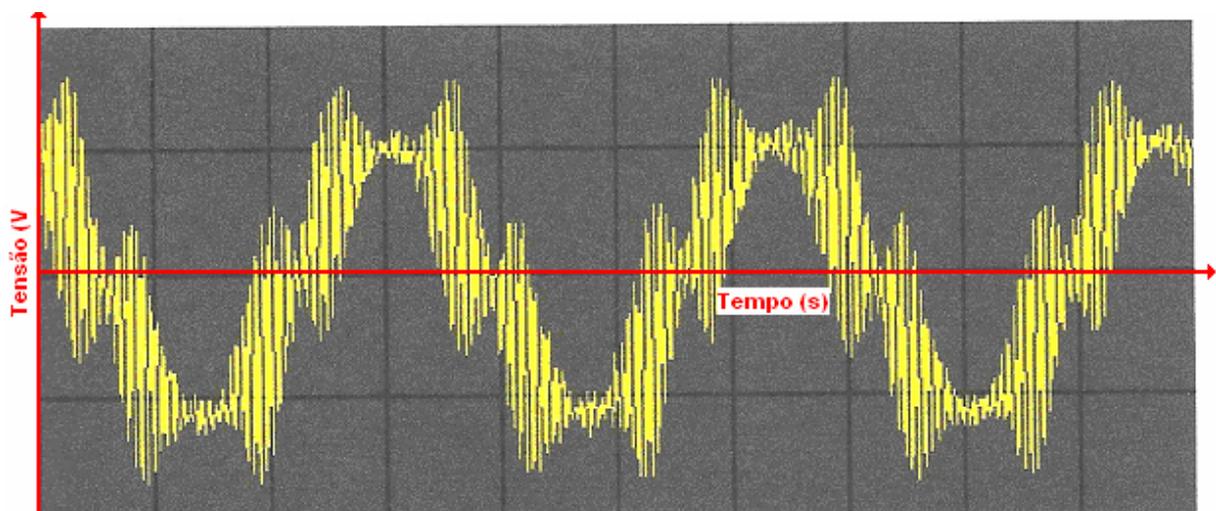


Figura 2.17 – Tensão nos terminais de um motor de indução alimentado por um conversor de frequência do tipo VSI-PWM

As tensões, decompostas em sua série de “Fourier”, não serão apresentadas nesta dissertação, uma vez que são de amplo conhecimento e podem ser observadas em detalhes na referencia [28].

2.11. 5 – Desequilíbrio de tensão

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno associado a alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição. Podendo dizer que ele existe quando há uma diferença entre módulos dos fasores (corrente ou tensão) e/ou não estão mais defasadas de 120 graus. O desequilíbrio é oriundo de várias causas:

- cargas desbalanceadas, entre as quais, forno a arco, tração elétrica.
- cargas desbalanceadas, entre as quais, forno a arco, tração elétrica.
- cargas monofásicas mal distribuídas nas três fases.
- máquinas de solda elétrica
- abertura de uma única fase.
- aparelhos de raio-X
- linhas aérea assimétricas, sem transposição.

A metodologia utilizada para o estudo do desequilíbrio está baseado na análise das componentes simétricas. De acordo com o *teorema de Fortescue*, três fasores assimétricos, de um sistema trifásico, podem ser substituídos por três fasores simétricos e equilibrados. Esses componentes são denominados de sequência positiva, negativa e zero.

Representando as componentes desequilibradas em relação à tensão temos:

- componente de sequência positiva: consiste de 3 fasores iguais em módulo, defasados de 120°, tendo mesma sequência de fase dos fasores desequilibrados.
- componente de sequência negativa: consiste de 3 fasores iguais em módulo, defasados de 120°, tendo sequência de fase oposta aos fasores desequilibrados.
- componente de sequência zero: constituído de 3 fasores iguais em módulo e ângulo.

As componentes de sequência positiva, negativa, zero e as tensões de fase se relacionam através da equação (2.21):

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a+} \\ \dot{V}_{a-} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Onde:

a - operador , $a = 1 \angle 120^\circ$

\dot{V}_{a0} - componente de sequência zero da tensão de fase A;

\dot{V}_{a+} - componente de sequência positiva da tensão de fase A;

\dot{V}_{a-} - componente de sequência negativa da tensão de fase A;

\dot{V}_a - valor eficaz da tensão na fase A;

\dot{V}_b - valor eficaz da tensão de fase B;

\dot{V}_c - valor eficaz da tensão de fase C;

A Figura 2.18 mostra essa representação. Está também representado o sentido de rotação que cada sequência impõe a um motor de indução trifásico.

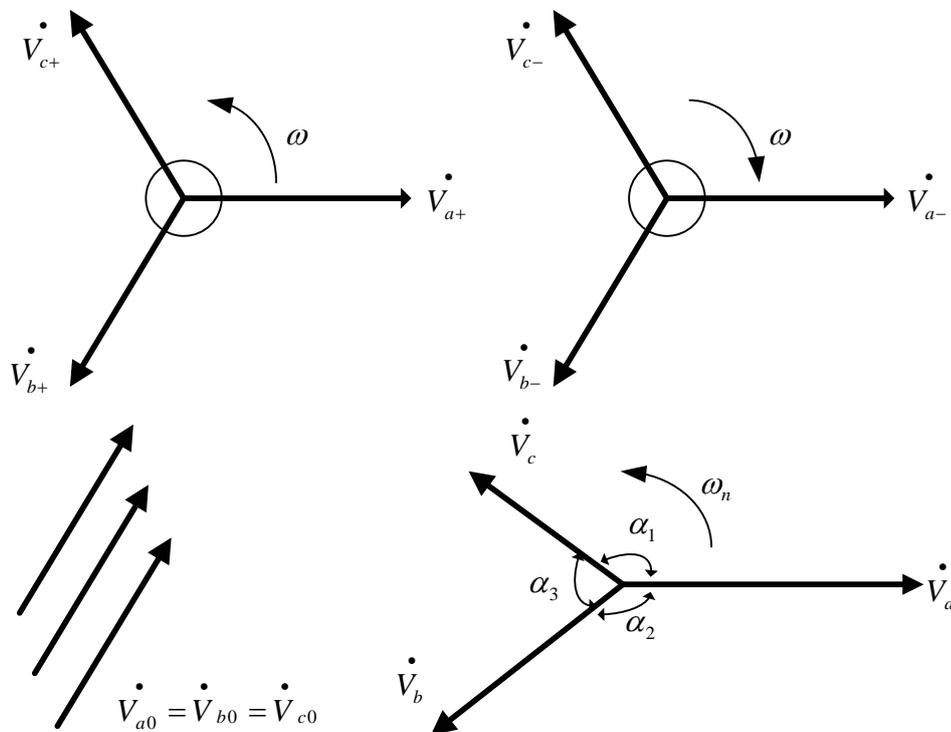


Figura 2.18 – Vetores de tensões desequilibradas, sequência positiva, negativa e zero.

O efeito da alimentação desequilibrada nos motores de indução trifásicos é equivalente à superposição de um conjunto de tensões de sequência negativa na sequência positiva. A sequência zero não produz nenhum efeito nos motores de indução, em virtude dos mesmos, normalmente estarem conectados em triângulo ou estrela isolado.

Os motores operando com tensões desbalanceadas ficam submetidos a dois torques: o torque normal devido á tensão de sequência positiva e um torque em sentido oposto, devido a tensão de sequência negativa. Essas tensões levam o motor a solicitar da rede correntes desequilibradas, eventualmente, acima da corrente nominal do motor. Isso provoca sobrecarga e aquecimento superior ao normalmente esperado. Em consequência, a vida útil do motor fica reduzida. As perdas aumentam devido às altas correntes, acarretando diminuição do rendimento e uma pequena redução do fator de potência. As cargas acopladas ao motor também podem sofrer danos, pois, a operação com tensões desequilibradas, provoca vibrações no eixo do motor. A Figura 2.19 mostra os efeitos do desbalanceamento da tensão nas perdas do motor de indução trifásico [24].

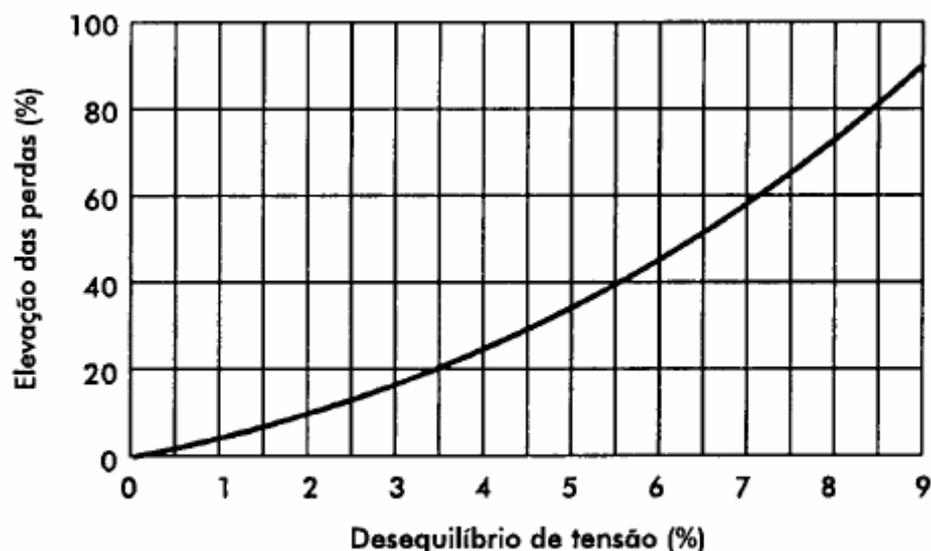


Figura 2.19 – Efeitos do desequilíbrio de tensão na elevação das perdas em motores de indução trifásicos.

Outra carga afetada pelo desbalanceamento da tensão é o inversor de frequência. Alimentado com tensão senoidal balanceada um inversor de 6 pulsos injeta na rede, correntes com ordem harmônica 5, 7, 11, 13. Por outro lado se for alimentado com tensões desequilibradas, eles poderão gerar, além das ordens

harmônicas já relacionadas, outras harmônicas de ordem ímpar e até de ordem par. Isto poderá levar o mesmo a instabilidade [24].

Existem várias fórmulas propostas por normas internacionais para calcular o grau de desequilíbrio de uma rede elétrica. As entidades normalizadoras quantificam alguns valores limites a serem seguidos pelos operadores e consumidores do sistema elétrico. A Tabela 2.1 quantifica alguns desses limites.

Tabela 2.1 – Índices de conformidade para desequilíbrios de tensão.

Recomendação/norma	Limite - (%)
EN 50160	2
ANSI C84.1	3
NRS 048	2
IEC	2
ONS	2

Onde:

- EN 50160 – Norma DIN (*Deustches Institut Für Normung*).
- ANSI (*American Nacional Standards Intitute*).
- NRS 048 – Norma NER/NRS (*Standards South Africa*).
- IEC (*International Electrotechnical Commission*).
- ONS (Operador Nacional do Sistema)

A normalização da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), através do módulo 8, estabelece a terminologia e expressão a ser utilizada para determinação e caracterização de desequilíbrio de tensão no Brasil.

A expressão (2.22) é utilizada para o cálculo do desequilíbrio.

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \quad (2.22)$$

Onde:

FD – fator de desequilíbrio.

V_- - Magnitude da tensão de sequência negativa (rms)

V_+ - magnitude da tensão de sequência positiva (rms)

A mesma recomendação ainda estabelece que, alternativamente, poderá ser utilizada as fórmulas (2.23) e (2.24).

$$FD\% = \frac{\sqrt{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}}{\sqrt{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (2.23)$$

Sendo β definido por:

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (2.24)$$

Onde:

V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} - magnitudes das tensões trifásicas de linha (rms).

O valor de referência para desequilíbrio nos barramentos do sistema de distribuição, com exceção da baixa tensão (BT), definido pelo “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional” (PRODIST), deve ser igual ou inferior a 2%.

De modo geral, podem-se apontar duas causas primordiais para a origem de tensões de suprimento desequilibradas: uma ligada a assimetria da rede elétrica nos níveis transmissão e distribuição; outra, ligada a características operacionais do próprio consumidor. O primeiro caso aponta para um desequilíbrio constante ao longo do tempo, pois, é estrutural e, pode estar ligado, por exemplo, ao sistema construtivo do transformador ou de qualquer outro componente presente na rede. No segundo caso, o desequilíbrio é função da carga e da disposição dos consumidores, ora trifásicos, ora monofásicos, exigindo correntes diferentes de cada fase, provocando grandes desequilíbrios de tensão. Este tipo de desbalanço tem origem funcional e apresenta característica aleatória. [28]

2.12 – Considerações finais

No decorrer deste capítulo foram apresentados aspectos importantes sobre motores de indução, bomba centrífuga, métodos de controle de vazão, qualidade de energia, entre outros. O objetivo foi apresentar a influência de cada um desses itens na eficiência energética de um sistema de bombeamento, desta forma, destacou-se os seguintes aspectos:

Mostrou-se o comportamento do fator de potência e do rendimento em função do carregamento imposto ao motor de indução.

O desempenho da bomba centrífuga foi analisado através de suas curvas características. A eficiência do sistema de bombeamento foi estudada através de

dois métodos, quais sejam: controle da vazão através da utilização da válvula de estrangulamento e variação de velocidade da bomba utilizando inversores de frequência.

A influência da qualidade do sinal de tensão aplicado na entrada do motor no que tange a eficiência energética e comportamento geral do sistema de bombeamento recebeu tratamento especial. Foi dada maior ênfase aos itens de qualidade de energia, ou seja: distorção harmônica e desequilíbrio. A razão disso se deve ao fato que esses itens serão bastante explorados no decorrer deste trabalho.

Capítulo 3

3 – ENSAIOS LABORATORIAIS

3.1 – Introdução

Este capítulo tem por objetivo mostrar os aspectos relativos aos ensaios experimentais realizados na bancada do sistema de bombeamento instalado no laboratório Lamotriz da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia. O sistema de bombeamento foi submetido a várias condições operacionais. Inicialmente, os ensaios foram executados com alimentação trifásica senoidal em 220 V, 60 HZ. Esta condição operacional de suprimento considerada ideal serviu como base para a comparação com os ensaios realizados com alimentação não ideal, ou seja: harmônicos e desequilíbrios. Para todas essas situações, configurou-se a vazão do sistema para quatro condições operacionais, utilizando-se dois métodos, quais sejam: o método de estrangulamento de válvula e o da variação de velocidade de bomba, através de inversores de frequência. As informações sobre os parâmetros elétricos, mecânicos e hidráulicos foram coletados com o intuito de analisar o comportamento operacional do sistema motriz sob o enfoque da qualidade de energia elétrica e eficiência energética.

3.2 – Estação de trabalho utilizada nos ensaios

Os principais elementos que compõem a planta industrial da bomba centrífuga estão descritas no decorrer deste capítulo.

3.2.1 - Características gerais da planta industrial

A estação de trabalho da bomba centrífuga utilizada nos ensaios é composta de um sistema completo de controle e acionamentos, instalado em um painel, contendo três formas distintas e autônomas de partida: partida direta, *soft-starter* e inversor de frequência.

A carga pode ser acionada através de um motor de alto rendimento ou de um motor da linha padrão, utilizando-se para isso de um sistema de trilhos, que permite a troca de forma simples dos mesmos. A Figura 3.1, mostra através de fotografia a disposição geral dos componentes que compõem a planta industrial do sistema LAMOTRIZ.

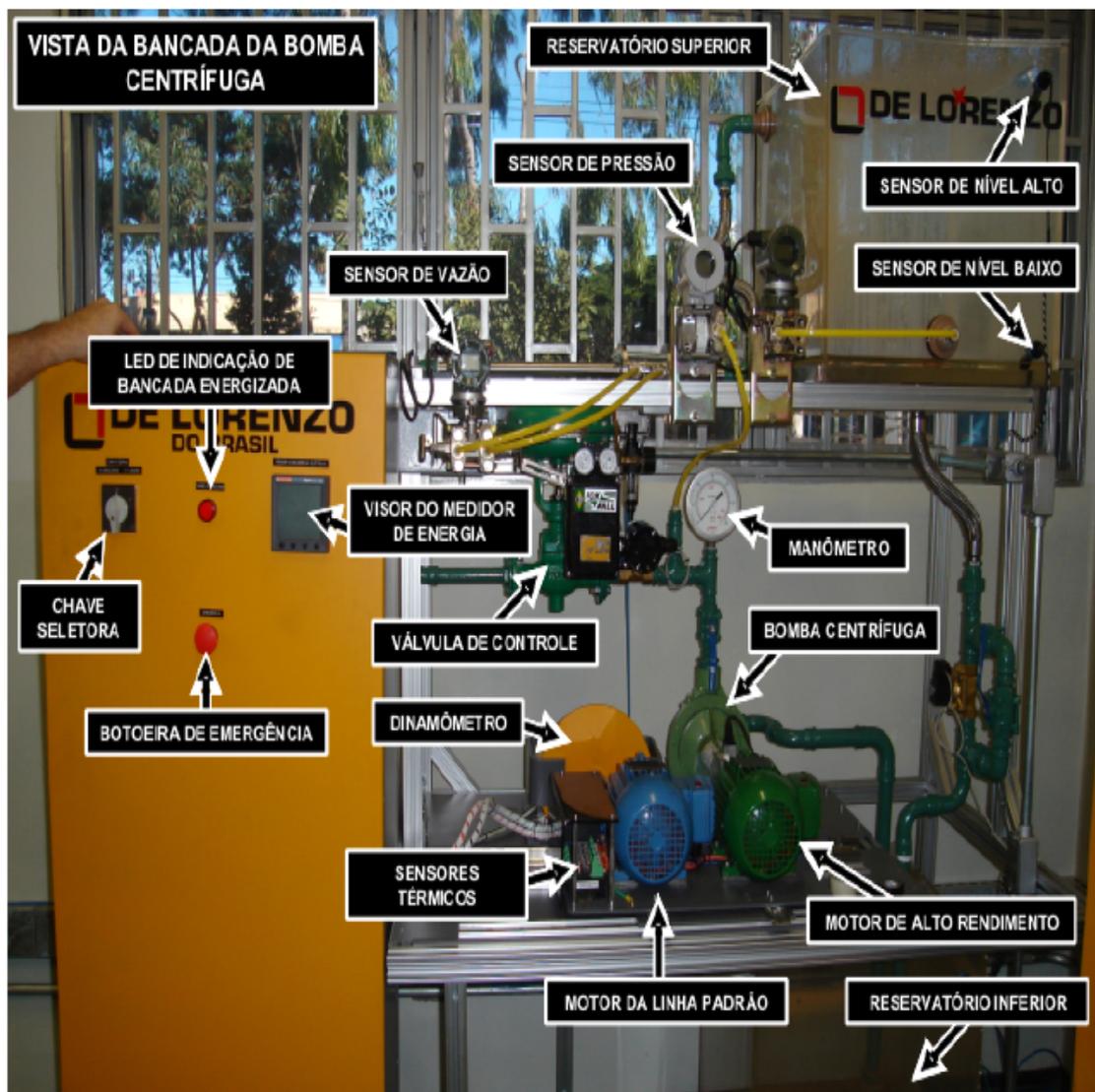


Figura 3.1 – Visão Geral da bancada do sistema de bombeamento

O monitoramento e controle da bancada é realizado através de um microcomputador onde está instalado um supervisor, utilizando-se do *software indusoft 6.1 SP2*. A carga é composta de uma bomba centrífuga, dois reservatórios de água, assim como dispositivos atuadores e sensores. No painel de controle estão instalados o controlador lógico programável (CLP), inversor de frequência, *soft-starter*, sistema para partida direta, medidor de grandezas elétricas, elementos de

acionamento e proteção, como contadores, disjuntores, fusíveis, além de outros elementos auxiliares, como fontes, conversores de protocolo, amplificadores de sinais. O combinação desses elementos formam uma planta industrial capaz de controlar automaticamente a execução, a coleta de dados e emissão de relatório de parâmetros elétricos, mecânicos, hidráulicos e térmicos do sistema de bombeamento.

A comunicação interna entre o CLP, os acionamentos (partida suave, inversor de frequência e partida direta) e o medidor de grandezas elétricas é realizada através do protocolo modbus RTU, com velocidade de 19200 bits/seg, 8 bits de dados, 1 bit de stop, sem paridade. A comunicação do CLP com o *switch* e este com a estação de trabalho, é realizado através do protocolo *Ethernet TCP/IP*. A rede de comunicação da planta industrial está representada através da Figura 3.2.

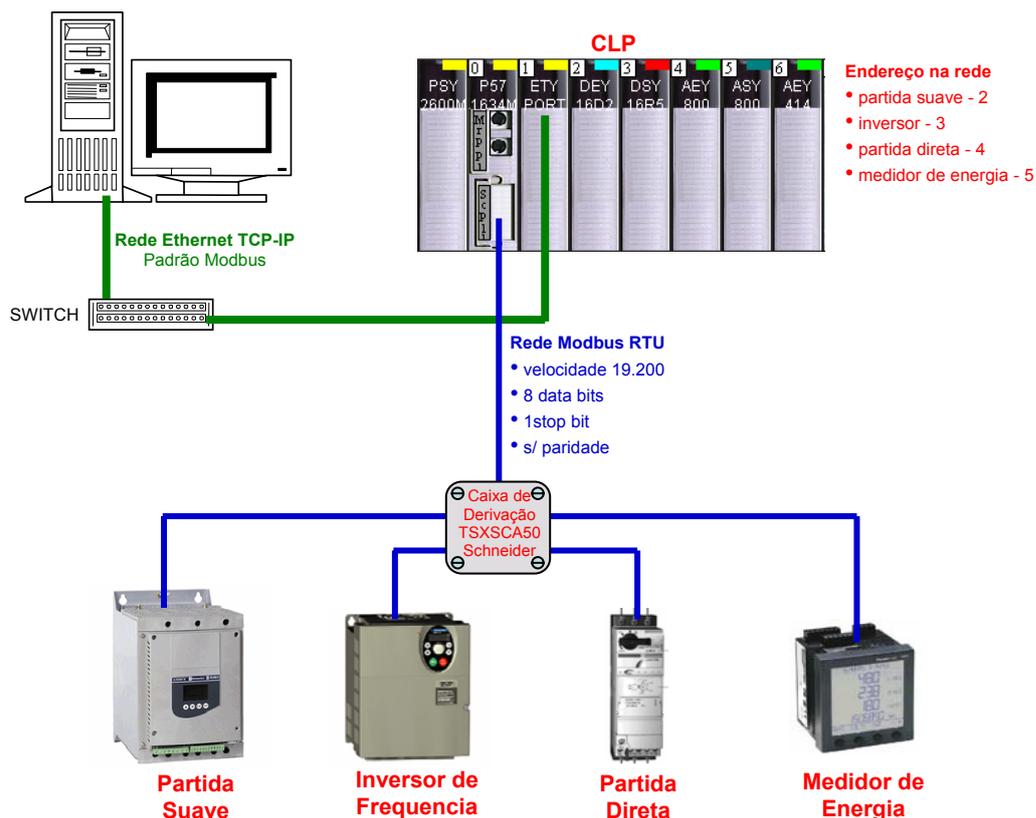


Figura 3.2 – Rede de comunicação da planta industrial – bomba centrífuga

3.2.2 - Características específicas de elementos que formam o sistema de bombeamento

Este item retrata a característica específica de alguns elementos que compõem a estação de trabalho. Além da bomba centrífuga a bancada é composta por um dinamômetro, tipo freio de Foucault. O modo de fixação dos motores permite que os mesmos possam ser conectados em qualquer uma das cargas, ou seja: bomba centrífuga ou dinamômetro.

O diagrama orientativo mostrado na Figura 3.3 permite uma visualização das características obtidas. Convém ressaltar que no diagrama não estão presentes todos os instrumentos que compõem a planta industrial.

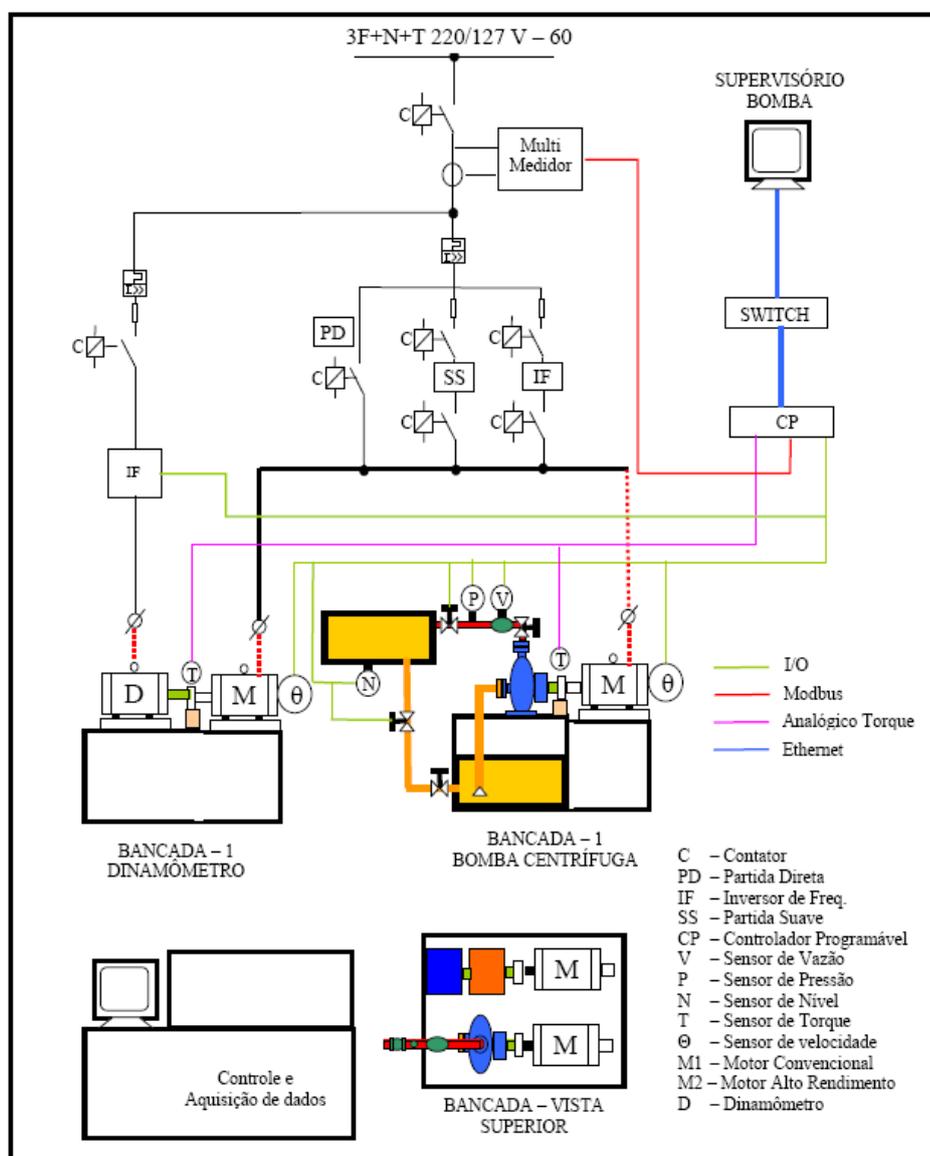


Figura 3.3 – Diagrama orientativo da bancada da bomba centrífuga

3.2.2.1 – Módulo de carga

O módulo de carga é composto por dois reservatórios com capacidade de 100 litros cada, esses reservatórios dispõem de transmissores de níveis e tem seus indicativos de mínimo e máximo monitorado e mostrado no sistema supervisorio. A vazão mínima ao longo da tubulação, registrado pelo medidor de vazão é de 0,5 m³/h. Na interligação entre a bomba centrífuga e o reservatório mais elevado, está instalado uma válvula de retenção, uma válvula eletropneumática utilizada para realizar o estrangulamento de válvula e transmissores de pressão e vazão.

3.2.2.2 – Motor elétrico de indução - alto rendimento

O motor utilizado para o acionamento da bomba centrífuga é do fabricante WEG, modelo G192961; Potência nominal: 1,5 CV/1,1 kW; tensões 220/380 V; correntes 4,02/2,33 A; frequência 60 Hz; rotação 3390 rpm; Ip/In: 7,5; categoria N; Fator de serviço:1,15; Grau de proteção:IP55; Isolação:F; Regime:S1; Rendimento: 82,5%; Cos φ: 0,87.

3.2.2.3 – A bomba centrífuga

A bomba centrífuga instalada no laboratório LAMOTRIZ e utilizada nos ensaios é do fabricante *Schneider Motorbombas*, série BC, modelo 92 SHA, 3450 rpm. Para o bom funcionamento da bomba o fabricante recomenda a seguinte situação [29].

$$\text{NPSHd} > \text{NPSHr} + 0,6$$

Onde:

NPSHd – NPSH disponível no sistema de bombeamento;

NPSHr – NPSH requerido pela carga.

A curva de vazão versus NPSH para a bomba centrífuga modelo 92 SHA, pode ser vista na Figura 3.4.



Figura 3.4 – Curva vazão x NPSH da bomba modelo 92SHA.

3.2.2.4 – O dinamômetro

O dinamômetro instalado na bancada da bomba centrífuga, é do tipo freio de Foucault, ou seja, o efeito da frenagem eletromagnética para simular cargas mecânicas no eixo do motor até 200% da sua condição nominal.

O equipamento presente tem as seguintes características:

- Tipo: disco de Foucault;
- Alimentação: 220 V_{CA} / 60 Hz;
- Tensão nas bobinas: 0 a 190 V_{CC}, regulável por potenciômetro (conversor incorporado);
- Força de frenagem: 7,0 Nm;
- Sensor de força: célula de carga.

3.2.2.5 – Os sensores e atuadores.

A bancada possui vários sensores e atuadores instalados ao longo da tubulação, módulo de carga, acoplamento motor-carga e motor:

a) Chave de nível tipo bóia magnética

LSL-01,02 e LSH-01,02 - As chaves de nível para instalação lateral são utilizadas para evitar o transbordamento do líquido na caixa superior e inferior, assim como, evitar que a bomba trabalhe a vazio na caixa inferior. Seu funcionamento se baseia na abertura ou fechamento de um contato ativado por bóia de acordo com o nível do líquido a ser monitorado.

b) Transmissor e indicador de nível

LIT-01 – Na caixa superior está instalado um transmissor e indicador de nível por pressão diferencial, tipo capacitivo, sinal de saída 4 a 20 mA a 2 fios, alimentação de 12 a 45 V_{CC}, característica linear, faixa de 0 a 1000 mmH₂O, indicador local, conexão processo ½”, suporte 2” e dreno.

b) Transmissor e indicador de pressão

PIT-01 - Na tubulação está instalado um transmissor e indicador de pressão diferencial, capacitivo, sinal de saída de 4 a 20 mA a 2 fios, alimentação de 12 a 45

Vcc, característica linear, faixa de 0 a 1000 mmH₂O, com indicação local. O modelo utilizado na bancada é o EJA 110 A de fabricação da *Yokogawa*[30].

c) Transmissor e indicador vazão

FIT-01 - O transmissor e indicador de vazão utilizado é do tipo diferencial, capacitivo, sinal de saída de 4 a 20 mA a 2 fios, alimentação de 12 a 45 Vcc, característica linear. Esse transmissor permite a medição de pressão diferencial, absoluta, manométrica, nível e vazão. O modelo utilizado na bancada é o LD301, de fabricação da *Smar* [31].

d) Válvulas solenóides

XV-01 e XV-02 - Estão presentes na instalação duas válvulas solenóides, duas vias, tipo diafragma, alimentação 24 Vcc, bobina classe F.

e) Válvula de controle

FV-01 - Válvula de controle, duas vias, tipo globo, linear, normalmente aberta, atuador eletro pneumático, alimentação 24 V_{cc}, sinal de controle 4 a 20 mA. O modelo utilizado é o C52-3/4-150-RF-WCB-N-TF-SI-3/4-316/D33/602F, de fabricação *Fox Wall* [32]. Esta válvula tem no sistema de bombeamento, a função de realizar a variação da vazão do sistema através do estrangulamento de válvula.

f) A placa de orifício

FE-01 - A placa de orifício tem à função auxiliar de provocar diferença de pressão antes e depois da válvula, esses sinais são coletados pelo medidor transmissor e indicador de vazão, tratados e enviados para a válvula de controle ou inversor de frequência a fim de controlar a vazão do sistema.

g) O manômetro petroquímico

PI - O Manômetro petroquímico é utilizado no sistema de bombeamento para indicar a pressão manométrica na saída da bomba. O princípio de funcionamento desse tipo de manômetro se baseia na pressão exercida por um líquido num lado de um tubo, o outro lado é submetido geralmente à pressão atmosférica.

h) Transmissor de velocidade

ST-01 - O transmissor de velocidade está fixado na bancada de tal forma que não há necessidade de locomover o mesmo quando da troca dos motores. Esse dispositivo permite a medição de velocidade e ângulo de rotação (360 pulsos por giro). Os pulsos enviados são compatíveis com a entrada do controlador lógico programável.

i) O torquímetro

WT-01 – O transmissor de torque instalado entre a bomba centrífuga e o motor elétrico é o MKDQ 150-MKCT03, possuindo a relação para transmissão do sinal de torque: 2,516mV/150N.m.

O fluxograma da Figura 3.5 mostra de forma simplificada os pontos de instalação desses sensores.

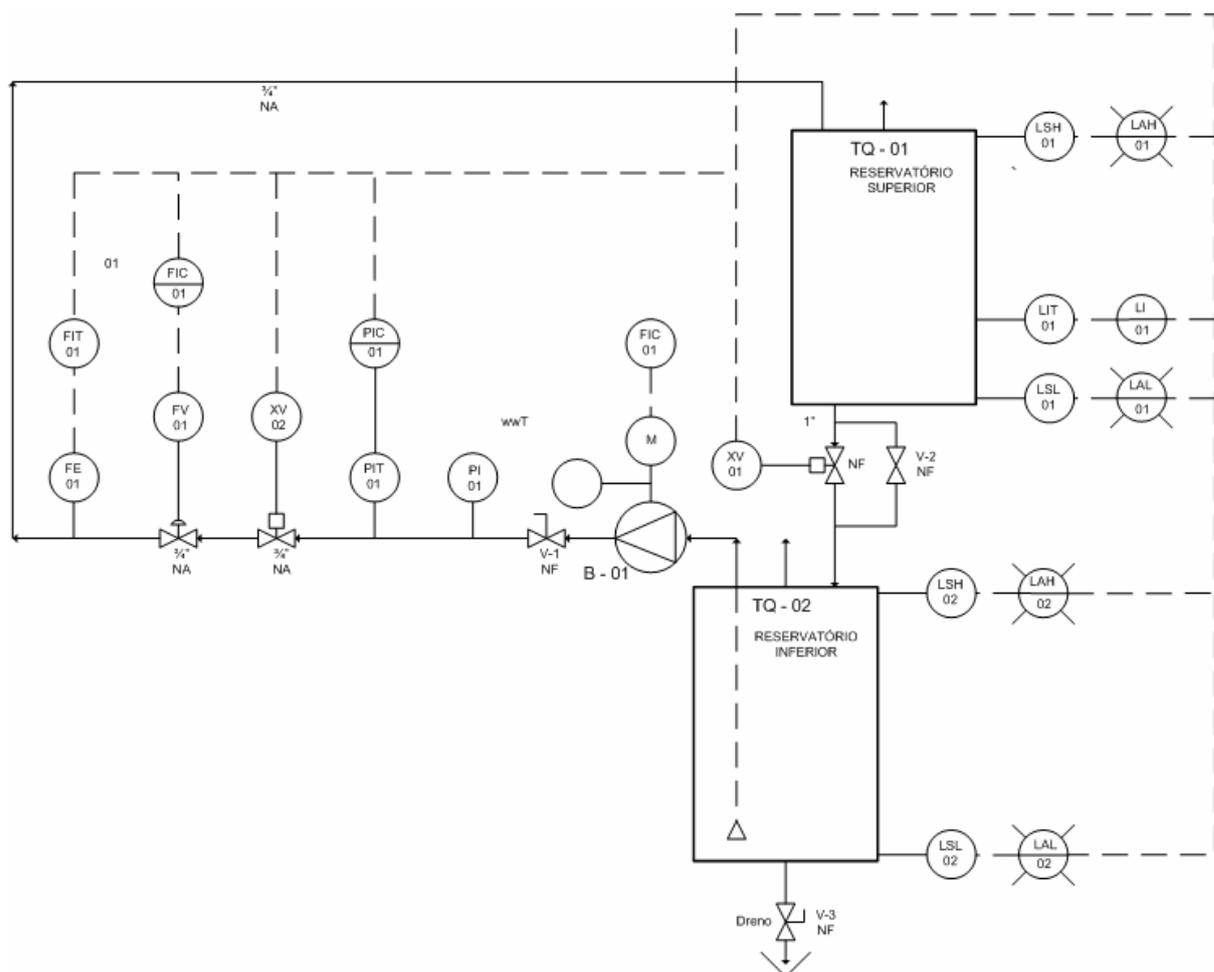


Figura 3.5 – Fluxograma simplificado sensores, atuadores, transmissores e indicadores do sistema de bombeamento.

3.2.3 – O painel de controle

O painel de controle é composto externamente por uma chave geral liga/desliga, botoeira de emergência e a IHM (interface homem-máquina) do medidor de grandezas elétricas PM 850. Internamente possui todo o sistema de proteção e acionamento dos motores composto de: disjuntores, fusíveis, contadores, relés, sistema de partida direta, *soft-starter*, inversor de frequência, entre outros. A estrutura interna do painel é visualizada através da Figura 3.6 que mostra uma fotografia da parte interna do painel.

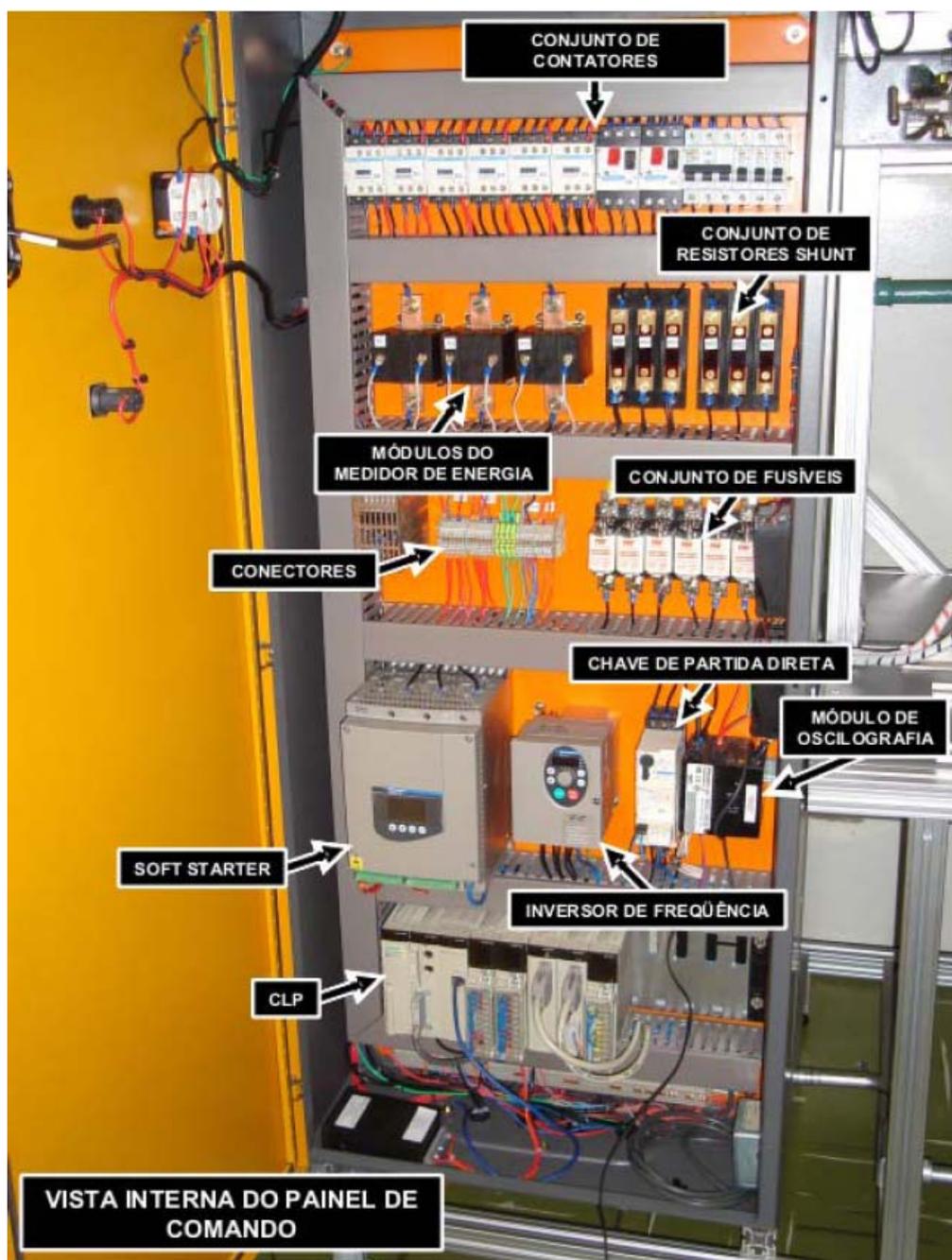


Figura 3.6 – Vista interna do painel de proteção e acionamento

3.2.3.1 – Partida direta

O dispositivo de comando utilizado para acionar o motor de forma direta foi a chave de partida integrada TeSys modelo U da fabricante Telemecanique. O modelo utilizado é constituído de componentes intercambiáveis e encaixáveis. É composto por uma base de potência, unidade de controle e por módulo de comunicação [33].

3.2.3.2 – Partida suave

Para o acionamento do motor nos ensaios contemplando o controle de vazão por estrangulamento de válvula, frente à presença de desequilíbrio de tensão, foi utilizado o equipamento denominado *soft-starter*. Durante os ensaios houve essa necessidade, devido a limitações da fonte HP em termos de corrente e também pela impossibilidade de partir o motor com tensão reduzida para essa situação. O dispositivo de partida suave utilizado é um equipamento possui a versatilidade no controle da corrente de partida do motor. Ao utilizar o controle do ângulo de disparo por chaves estáticas tiristorizadas proporciona uma partida suave ao motor [34]. Dentre as principais características e vantagens do *soft-starter*, também conhecido por chave de partida suave pode-se citar:

- Ajuste da tensão de partida por um tempo pré-definido;
- Pulso de tensão na partida para cargas com alto conjugado de partida;
- Redução rápida de tensão a um nível ajustável, (redução de choques hidráulicos em sistemas de bombeamento);
- Proteção contra falta de fase, sobre-corrente e subcorrente, entre outros.

A chave *soft-starter* utilizada no painel do sistema de bombeamento é o *Altistart 48 – ATS 48D17Q*, para ser utilizada no controle de dispositivos com potência até 4 kW.

3.2.3.3 – Inversor de frequência

O acionamento do motor envolvendo o controle de vazão por variação de velocidade da bomba foi realizado pelo inversor de frequência. O modelo utilizado na bancada é o *Altivar 31 - ATV 31HU11M3XA*, equipamento do fabricante Telemecanique [35]. As principais características desse equipamento estão relacionadas a seguir:

Alimentação de entrada

- Tensão de entrada: 200 / 240 [V], trifásico;
- Potência de entrada: 1,1 / 1,5 [kW / HP];
- Corrente máxima de linha: 8,5 / 7,4 [A];
- Corrente de curto-circuito máxima presumida: 5 [kA];
- Potência aparente: 3 [kVA];
- Corrente de chamada máxima: 10 [A].

Inversor

- Corrente nominal: 6,9 [A];
- Corrente transitória máxima: 10,4 [A];
- Potência dissipada com carga nominal: 71 [W].

Esse equipamento utiliza no controle de disparo dos tiristores, a técnica de controle vetorial de fluxo, produzindo na saída trifásica tensão e frequência controlada de forma independente.

3.2.3.4 – Multimetro de grandezas elétricas

O equipamento usado para realizar as medições das variáveis elétricas do sistema de bombeamento foi o multimetro *Power Logic Meter PM 850*, do fabricante Schneider Electric, a central de medida é fornecida com a interface RS-485 para sua integração com qualquer sistema de controle e supervisão de potência. Além disso, a central é fornecida com o software *System Manager™ Software (SMS)* da POWERLOGIC, concebido para controlar e supervisionar sistemas, é também indicado para funções avançadas do medidor [36].

As principais facilidades de leitura desse medidor estão relacionadas a seguir:

• Corrente

Por fase: de 0 a 32767 A;

De neutro: de 0 a 32767 A;

Média trifásica: de 0 a 32767 A;

% desequilíbrio: de 0 a 100,0%.

• Tensão

Fase / fase (por fase): de 0 a 1200 kV;

Fase / fase (média trifásica): de 0 a 1200 kV;

Fase / neutro (por fase): de 0 a 1200 kV;

Fase / neutro (media trifásica): de 0 a 1200 kV;

% desequilíbrio: de 0 a 100,0%.

• **Potência ativa**

Por fase: de 0 a $\pm 3276,70$ MW;

Total trifásico: de 0 a $\pm 3276,70$ MW.

• **Potência reativa**

Por fase: de 0 a $\pm 3276,70$ MVAR;

Total trifásico: de 0 a $\pm 3276,70$ MVAR.

• **Potência aparente**

Por fase: de 0 a $\pm 3276,70$ MVA;

Total trifásico: de 0 a $\pm 3276,70$ MVA.

• **Fator de potência (real)**

Por fase: de $-0,002$ a $1,000$ a $+0,002$;

Total trifásico: de $-0,002$ a $1,000$ a $+0,002$.

• **Frequência**

45 – 65 Hz: de 23 a 67 Hz;

350 – 450 Hz: de 350 a 450 Hz.

A Figura 3.7 mostra a vista frontal do medidor.



Figura 3.7 – Medidor PM 850

3.2.3.5 – Controlador lógico programável

O Controlador lógico programável (CLP) utilizado na bancada é o Premium TSX P57. Os processadores do equipamento controlam uma estação autônoma completa formada por módulos de entradas/saídas digitais, analógicas e módulos de funções especiais. A CPU executa a leitura dos status (condições ou estados) dos dispositivos de entrada por meio dos módulos de I/O, esses status são armazenados na memória (RAM) para serem processados pelo Programa de Aplicação desenvolvido pelo usuário e armazenado em memória RAM, EPROM ou EEPROM no CLP. A linguagem utilizada na programação foi o Ladder. Após a execução do Programa de Aplicação, o processador atualiza os dispositivos de saída por meio dos Módulos de entrada e saída [37].

3.2.4 – O sistema supervisório

O sistema supervisório responsável pelos comandos e acionamentos utilizado no LAMOTRIZ – Laboratório de Sistemas motrizes da Universidade Federal de Uberlândia - UFU é o InduSoft Web Studio 6.1 SP2. Sua configuração visa à realização do controle de todo o processo e a apresentação dos dados de monitoramento em tempo real através da rede de dados *Modbus Ethernet*. Ao acessar o sistema supervisório, é apresentada a tela indicada pela Figura 3.8.

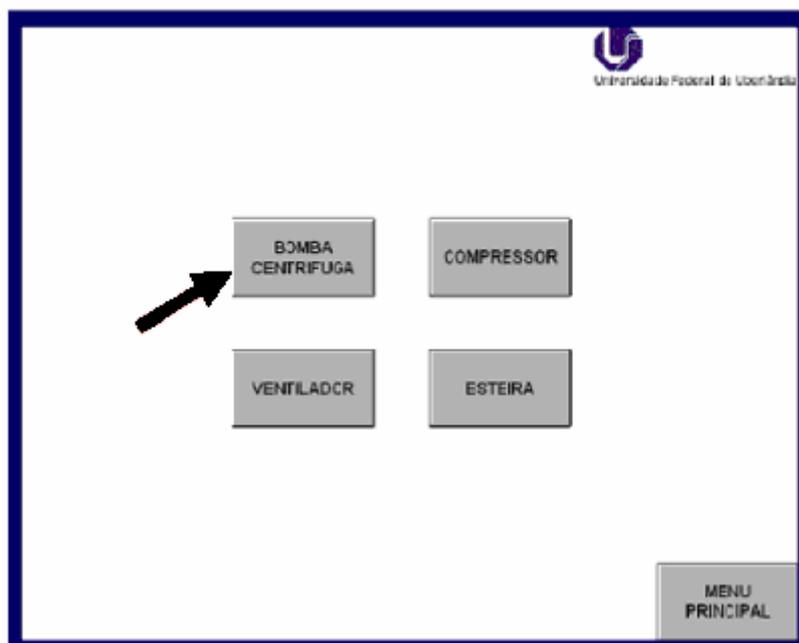


Figura 3.8 – Tela inicial do sistema supervisório.

A partir da tela inicial, tem-se acesso a uma tela principal para cada bancada, o desenho esquemático da Figura 3.9 mostra a tela de apresentação da bancada da bomba centrífuga. Cada elemento constituinte da bancada (multimedidor, acionamento, carga) é acessível através um atalho para abertura das telas de monitoração, ou seja: comando, temperatura, gráficos, medições e banco de dados. A tela fornece, também, informações específicas de cada bancada como, por exemplo, torque, velocidade, pressão, vazão.

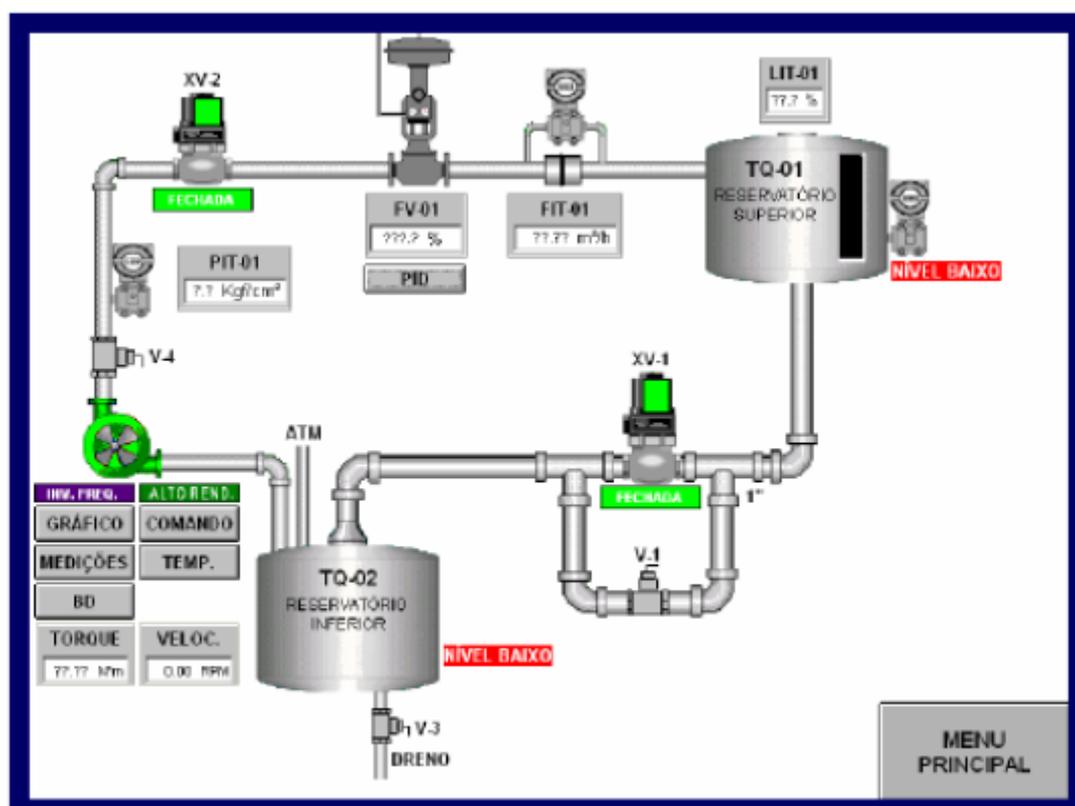


Figura 3.9 – Tela da bancada de bomba centrífuga.

A Figura 3.10 apresenta a tela de comando da bomba. Através dela é possível escolher o tipo de acionamento: partida direta, suave e por inversor de frequência. Esta tem seus parâmetros determinados pelo supervisor. Desta forma, o tempo de rampa de subida e descida, a velocidade e demais parâmetros referentes a cada tipo de acionamento deverão ser configurados através desta tela.



Figura 3.10 – Tela de comando

Através da tela da bomba centrífuga é possível acessar alguns dados de medição do PM 850. Isto é possível via janela de medições. As grandezas indicadas estão em tempo real, conforme pode se ver na Figura 3.11. Esta tela trabalha exclusivamente com grandezas elétricas, como por exemplo, tensão, corrente, potência, fator de potência.



Figura 3.11 – Janela de grandezas elétricas medidas

Além das informações apresentadas diretamente na tela (medições), o sistema também oferece dados numéricos via banco de dados pelo atalho *BD*, na

tela principal da bancada. Outra grande facilidade do sistema supervisorio é geração de um arquivo texto contendo todas as grandezas medidas. Os dados armazenados nesse arquivo podem ser transferidos para planilha Excel, oferecendo a facilidade de tratamento de dados, para geração de tabelas, gráficos entre outros. Nesses arquivos estão contidas informações como: data, horário, valores de variáveis elétricas, mecânicas, hidráulicas e térmicas do sistema de bombeamento.

A escolha da vazão a ser imposta ao sistema é realizada através de um controle Proporcional, Integral, Derivativo (PID) presente na tela do supervisorio. A janela permite escolher a vazão por válvula de estrangulamento ou pelo inversor de frequência, modo automático ou manual e os graus de controle proporcional, integral e derivativo.

Sendo:

P – controle proporcional (de 0 a 1000000)

I – controle integral (de 0 a 10000)

D – controle derivativo (de 0 a 10000)

SP – set point (valor desejado em m^3/h)

PV – Variável de processo (valor da vazão medida em m^3/h)

MV – Variável Manipulada (abertura da válvula de controle em %)

A Figura 3.12 mostra a tela de PID. Nela é possível escolher a forma de controle, se por válvula de estrangulamento ou do inversor de frequência, ou ainda, se controle automático ou manual. Essa janela permite configurar a vazão a ser mantida pelo sistema de bombeamento. Isso é realizado ajustando os valores dos itens: Set Point (SP) e Variável Manipulada (MV). O termo identificado como Variável do Processo (PV) mostra os valores registrados pelo medidor de vazão.



Figura 3.12 – Janela de PID do sistema de bombeamento

Na tela do supervisor ainda existe uma janela que permite observar a temperatura dos enrolamentos, das fases A, B, C e carcaça do motor que está sendo monitorado.

3.2.5 – Outros equipamentos utilizados nos ensaios

Além da estrutura laboratorial citada, também foi necessário utilizar outros equipamentos para realização dos testes, principalmente aqueles associados com a qualidade de energia elétrica. Entre esses equipamentos, pode-se citar:

a) Fonte programável

A fonte utilizada para gerar os fenômenos relacionados à qualidade de energia é uma fonte trifásica modelo HP6834A com potência nominal de 4500 VA da fabricante HP-USA. O equipamento possui as seguintes facilidades de programação:

- Programação de tensão CA, frequência, fase e limite de corrente.
- Geração de onda senoidal, quadrada e outras. Todas definidas pelo usuário.
- Controle da taxa de crescimento/decrescimento de frequência e tensão.
- Possibilidade de gerar transitórios como surtos, VTCDs, Flicker, entre outros distúrbios de rede.
- Capacidade de analisar e gerar harmônicos de tensão e corrente até a 50ª ordem, fornecendo amplitude e ângulo de fase.
- Capacidade de gerar desequilíbrios de tensão em valores de amplitude e ângulo.
- Medição de valores eficazes CA, CC, tanto de tensão como de corrente; valores de pico; potência ativa, reativa e aparente; corrente no neutro no modo trifásico.
- Programação no próprio painel frontal via teclado ou por microcomputador.

b) Osciloscópio

O osciloscópio utilizado para capturar as formas de ondas geradas pela fonte programável é o modelo THS 120P da fabricante Tektronix. Este instrumento permite capturar as formas de onda de tensão e corrente em tempo real, além de fornecer um relatório com informações detalhadas como: porcentagem de distorção harmônica presente no sinal, potência, fator de potência; utilizando-se para isso do *software* WaveStar.

c) Analisadores de energia

Com o intuito de confirmar os valores registrados pelo multimetror de energia elétrica, durante os ensaios foram utilizados dois analisadores de energia elétrica. Os modelos conectados ao sistema de bombeamento em situações distintas foram:

- Analisador de energia elétrica da fabricante Embrasul, modelo RE-6000.
- Analisador de energia elétrica da fabricante RMS, modelo MARH-21.

A título de ilustração, a Figura 3.13 mostra uma visão geral da estação de trabalho do sistema de bombeamento, utilizados nos ensaios, destacando-se o painel, sistema supervisório, fonte geradora dos itens de qualidade de energia, osciloscópio, analisador de energia, bancada da bomba centrífuga com painel, supervisório, fonte, osciloscópio, analisador de energia elétrica, entre outros.



Figura 3.13 – Visão geral da bancada da bomba centrífuga, fonte e equipamentos de medições.

3.3 – Caracterização dos ensaios laboratoriais

a) Considerações iniciais

Os ensaios foram realizados utilizando o motor de alto rendimento para acionar a bomba centrífuga. Os distúrbios relacionados à qualidade de energia e já discutidos no capítulo anterior foram aplicados utilizando-se da fonte HP6834A/4500 VA Trifásica. A norma utilizada como base para a configuração dos distúrbios foi o PRODIST, Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica.

Os ensaios laboratoriais desenvolvidos foram realizados aplicando-se, primeiramente, tensão senoidal trifásica equilibrada, posteriormente, distorções harmônicas de tensão e por último o sistema foi alimentado com tensões desequilibradas em módulo e ângulo. A forma utilizada para verificar o comportamento do sistema de bombeamento do ponto de vista de eficiência energética frente aos itens mencionados de qualidade de energia, foi o controle de vazão. Este controle foi realizado por dois métodos, ou seja: estrangulamento de válvula e variação de velocidade. O primeiro método foi realizado com a ajuda da válvula pneumática, tipo globo, visto anteriormente. O processo de controle de vazão pelo método da variação de velocidade da bomba foi efetuado através da utilização do inversor de frequência, com fornecimento de tensão e frequência controlada para o motor.

A Tabela 3.1 mostra a relação dos ensaios realizados, distribuídos sob a forma de casos.

Tabela 3.1 – Ensaios realizados

caso	tensão aplicada							controle de vazão	
	senoidal equilibrada	dist. harmônicas			desequilíbrios			estrang. de válvula	variação de velocidade
		5%	10%	20%	2%	3%	5%		
1	x							x	
2		x	x	x				x	
3					x	x	x	x	
4	x								x
5		x	x	x					x
6					x	x	x		x
7	x							x	x

Na alimentação com tensão senoidal, a fonte HP foi programada inicialmente para aplicar tensão senoidal equilibrada, simétrica, 220V entre fases, 60HZ.

Para caracterização de alimentação através de sinais de tensão com distorção harmônica, a fonte foi programada para quatro distorções individuais, mas com porcentagens de distorções distintas de acordo com um THD_V total pré-definido. O THD_V total gerado representa um valor aproximado. A Tabela 3.2 mostra as distorções configuradas, a fim de verificar o comportamento do sistema frente a esse tipo de distúrbio.

Tabela 3.2 – Distorções harmônicas de tensão configuradas na fonte HP

componentes harmônicas individuais %				THD _V total %
5 ^a	7 ^a	11 ^a	13 ^a	
3,60	3,10	1,20	1,00	5
7,50	6,00	2,60	1,20	10
15,00	11,00	6,00	4,50	20

No tocante aos testes com tensões trifásicas desequilibradas, a equação (2.21), juntamente com a (2.22) foram utilizadas para calcular as amplitudes e ângulos da tensão de suprimento na situação de desequilíbrio. Neste sentido os fatores de desequilíbrios foram designadas pela letra K e indicados na Tabela 3.3. A fonte HP6834A foi programada para os valores de tensão (amplitude e ângulo) calculados anteriormente. Os desequilíbrios de tensão aplicados foram escolhidos e calculados, levando-se em consideração à recomendação PRODIST, utilizando-se o método das componentes simétricas. Semelhante às distorções harmônicas, o fator K apresentado é um valor aproximado.

Tabela 3.3 – Tensões desequilibradas aplicadas

Fator K	Tensões de fase					
	V _{AN}		V _{BN}		V _{CN}	
	módulo	ângulo	módulo	ângulo	módulo	ângulo
2%	129,50	0°	125,80	121°	125,80	239°
3%	130,83	0°	125,15	122°	125,15	238°
5%	133,37	0°	123,96	122°	123,96	237°

b) Controle de vazão utilizando válvula de estrangulamento

O controle de vazão do sistema de bombeamento pode ser realizado, utilizando-se das técnicas on-off, realimentação, estrangulamento de válvula e controle de velocidade da bomba. Cada uma das técnicas possui vantagens e desvantagens.

O controle de vazão utilizando estrangulamento de válvula é um dos métodos mais utilizados pela indústria, quer seja pela sua fácil implementação como pelo seu baixo custo. Para caracterizar esse tipo de controle, a estação de trabalho foi alimentada com tensão senoidal equilibrada, simétrica, 60 Hz, 220 V, tensão entre fases. A abertura da válvula foi variada de 0 a 100%, taxa de variação 5%. As grandezas elétricas, mecânicas e hidráulicas foram coletadas. O comportamento, em regime permanente, de potência ativa, vazão, pressão, torque, velocidade foram registrados e podem ser vistos na Figura 3.14.

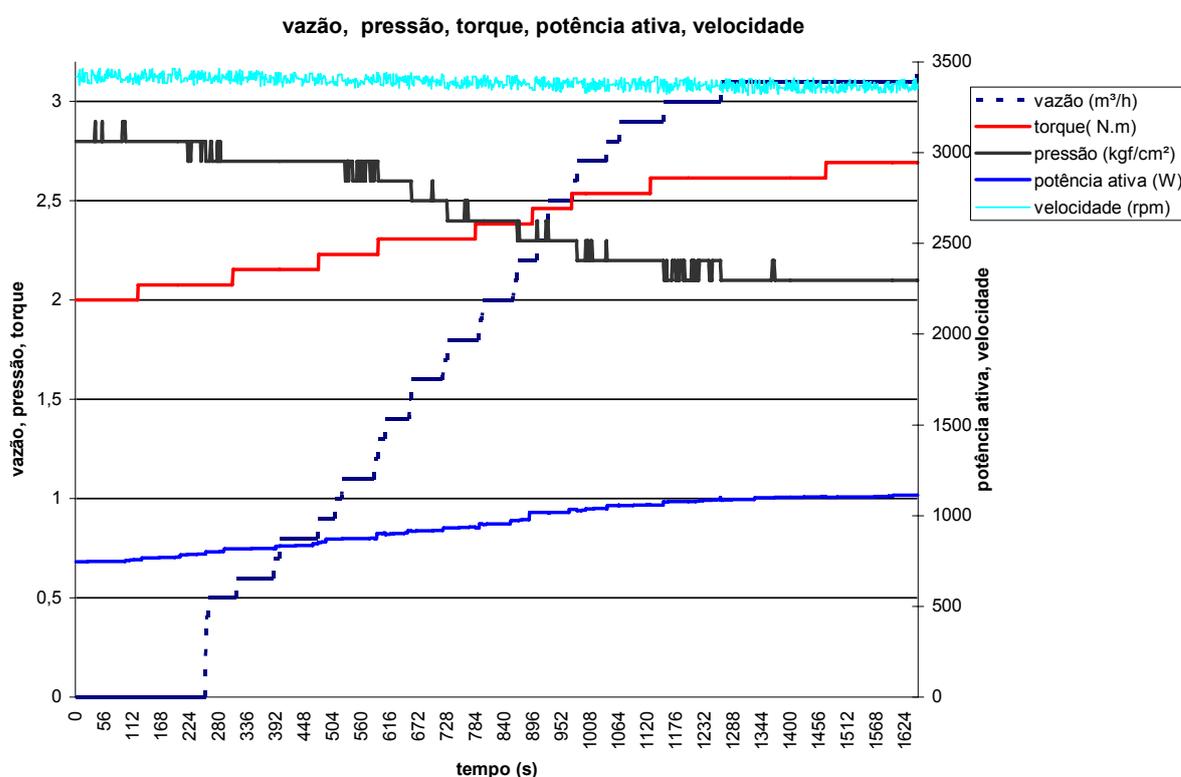


Figura 3.14 – Comportamento do sistema de bombeamento, controle de vazão por estrangulamento de válvula.

Analisando a figura percebe-se uma variação linear, de baixa inclinação, da potência elétrica mesmo quando se tem uma grande modificação da vazão. A pressão em função da vazão tem comportamento inversamente proporcional, ou seja, o aumento de vazão é acompanhado da diminuição da pressão. O torque mecânico apresenta uma variação praticamente linear, quando avaliado a partir da variação da potência mecânica. A velocidade no eixo do motor permanece praticamente constante, sofrendo apenas o efeito do escorregamento causado pelo seu carregamento, à

medida que a vazão é alterada. Todas essas informações estão coerentes com o comportamento elétrico, mecânico e hidráulico do motor e da bomba.

c) controle de vazão utilizando o inversor de frequência

O controle de vazão pela técnica da variação de velocidade da bomba é realizado utilizando-se do inversor de frequência. Nessa técnica o controle da vazão, pressão, torque no eixo do motor, velocidade da bomba pode ser realizado de maneira mais precisa. Aliado a este fato o inversor de frequência pode proporcionar uma partida com estresse térmico e mecânico, bem menores que as partidas tradicionais. Em contrapartida o inversor possui um preço elevado quando comparado com o preço da válvula e do motor. Outra desvantagem dos inversores de frequência reside no fato de que são dispositivos geradores de harmônicos de corrente nos sistemas elétricos de potência, conforme citado no capítulo anterior.

Para caracterizar esse tipo de controle, o inversor foi alimentado com tensão senoidal equilibrada, simétrica, 60Hz, 220V entre fases. A forma de onda na entrada do inversor é visualizada na Figura 3.15, a qual mostra os sinais de tensão e corrente, característicos do inversor de seis pulsos. Desta forma a saída deste inversor alimenta o motor com tensões e frequências variáveis, utilizando-se da técnica PWM. Como resultado tem-se potência, torque e velocidade variável no eixo do motor.

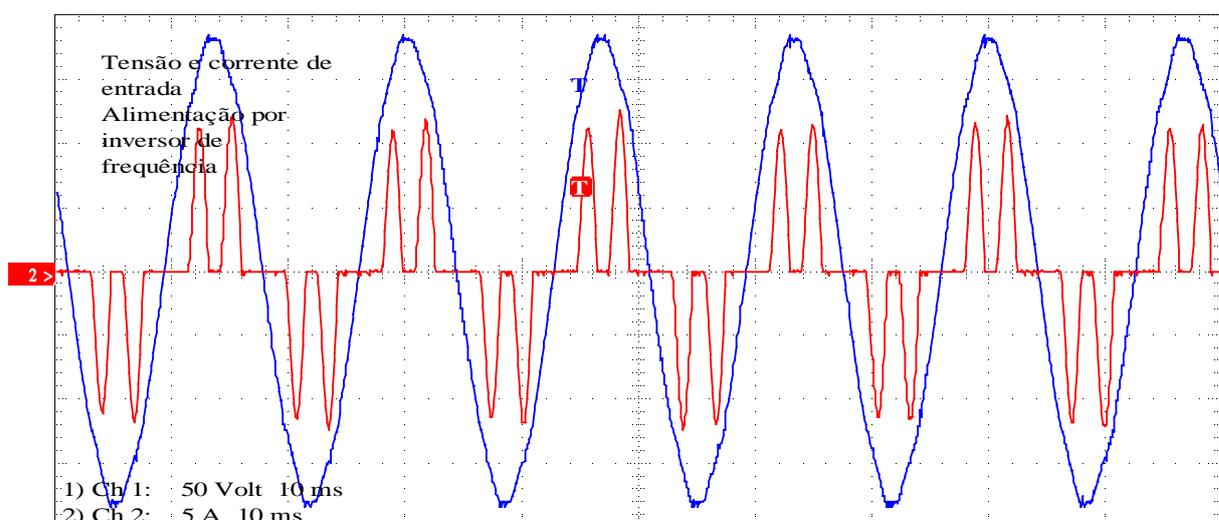


Figura 3.15 – Sinal de tensão (fase-neutro) e corrente na entrada do inversor

A Figura 3.16 apresenta a forma de onda capturada pelo osciloscópio THS 120P e que foi aplicado pelo inversor na entrada do motor.

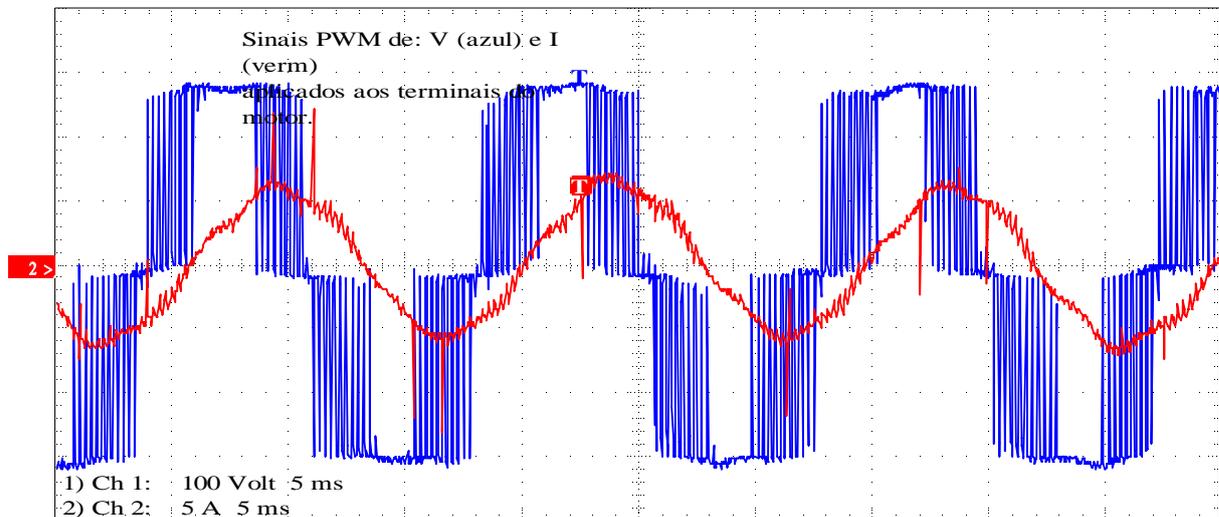


Figura 3.16 – Formas de onda de tensão e corrente aplicadas pelo inversor na entrada do motor

A Figura 3.17 mostra a variação das grandezas elétricas, em regime permanente, na entrada do inversor, os parâmetros mecânicos e hidráulicos registrados pelos sensores e medidores da bancada. Percebe-se que a potência não possui mais uma variação linear e sim cúbica em relação à velocidade. O valor da potência exigida para vazões menores é inferior quando comparada com o controle de vazão por estrangulamento de válvula. A vazão em relação à pressão possui uma variação quadrática. A velocidade no eixo do motor diminui em função da redução das vazões.

Deve-se salientar que, todas as medições realizadas durante os ensaios foram efetuadas somente após o motor atingir o equilíbrio térmico. A condição térmica de equilíbrio foi monitorada no supervisão através de sinais enviados por sensores térmicos, instalados nos enrolamentos do motor de alto rendimento.

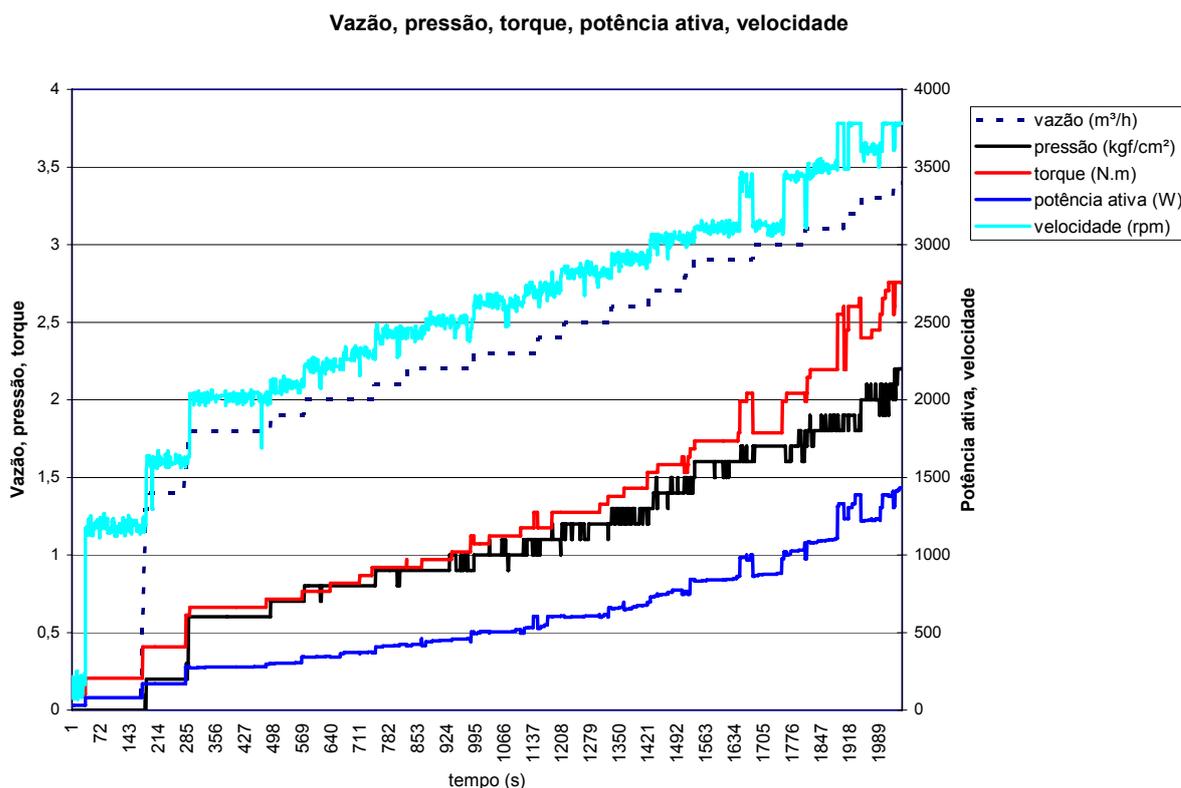


Figura 3.17 – Comportamento dos parâmetros elétricos, mecânicos e hidráulicos, controle de vazão por variação de velocidade.

d) Influência da temperatura e pressão de sucção nas medidas.

A pressão de sucção, assim como a variação de temperaturas durante os ensaios podem fazer com que as medidas dos parâmetros elétricos, mecânicos e hidráulicos apresentem variações. Devido às características construtivas da bancada de bombeamento, a pressão na sucção do sistema sofre variação à medida que a caixa inferior é esvaziada, com isso os valores dos parâmetros elétricos, mecânicos sofrem variações no decorrer do ensaio, mesmo programando a vazão do sistema para um valor fixo. Os valores relacionados nas tabelas são valores médios, os valores reais na prática podem estar um pouco abaixo do mostrados. A título de exemplificação mostra-se na Figura 3.18 a variação da potência e vazão no decorrer do tempo para alimentação com tensão senoidal ideal, neste exemplo a vazão foi configurada para 3,1 m³/h. Em todas as situações de ensaio do sistema motor-bomba, procurou-se realizar as medições somente após o motor atingir o equilíbrio térmico. O laboratório Lamotriz não foi projetado para manter um controle de temperatura interno, em virtude disso variação da temperatura ambiente e outros fatores como: abertura de porta, quantidade de pessoas presentes no recinto onde

foram realizadas as experiências, entre outros, podem fazer com que o ponto de equilíbrio térmico sofra pequena variação, essas variações de temperatura têm pequena influência no valor dos parâmetros registrados, principalmente na potência ativa.

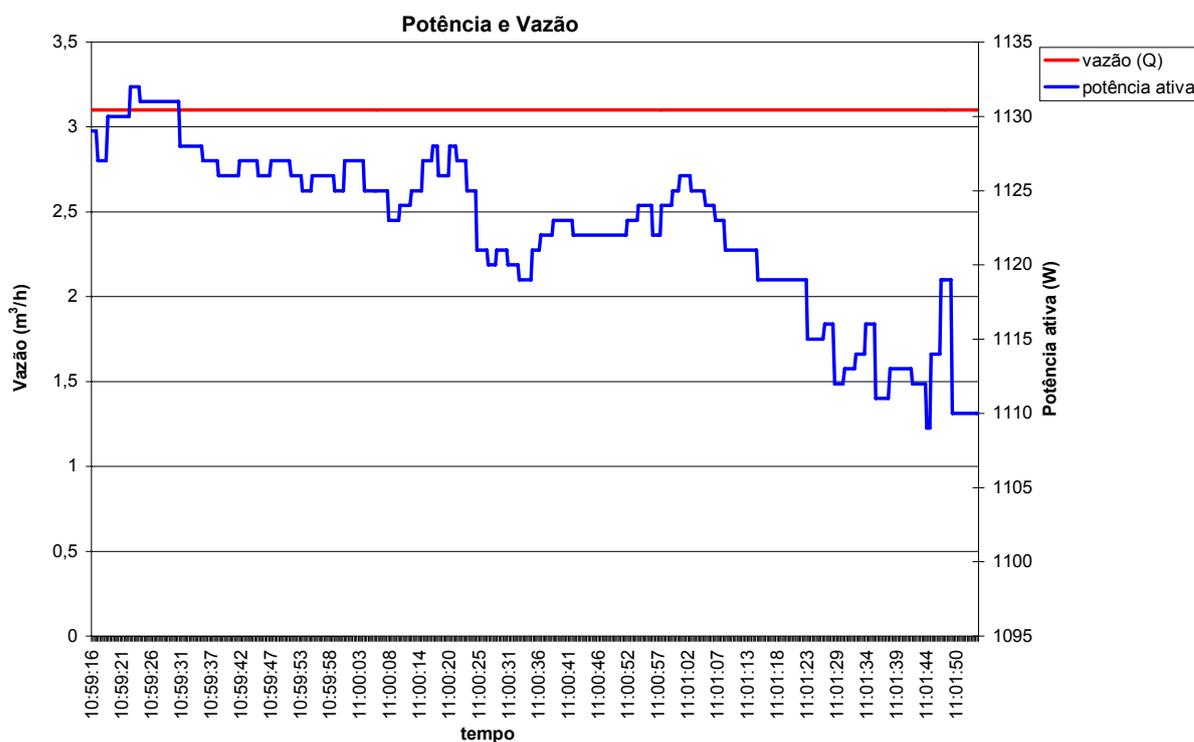


Figura 3.18 - Variação de potência em relação à variação da pressão de sucção

3.4 – Casos ensaiados

As análises do comportamento do sistema de bombeamento no controle de vazão e condições de alimentação em que foram realizados os ensaios estão relacionadas em forma de casos, conforme já informado na Tabela 3.1.

3.4.1 - Caso 1 – Alimentação do sistema de bombeamento com tensão senoidal equilibrada, controle de vazão por estrangulamento de válvula.

- Caracterização dos Ensaios

A bancada do sistema foi alimentada através da fonte HP, com tensão simétrica e equilibrada, 220 V entre fases, 60 Hz. A alteração da carga mecânica

imposta ao motor elétrico foi obtida através da variação da vazão. O controle por estrangulamento de válvula foi programado manualmente no sistema supervisor, para quatro valores de abertura, ou seja: 100%, 85%, 60% e 32%, correspondendo respectivamente a quatro vazões, sejam elas 3,10 m³/h, 2,60 m³/h, 1,60 m³/h e 0,50 m³/h. As medições foram efetuadas após o motor entrar em equilíbrio térmico. Esta condição térmica foi monitorada pelas indicações dos valores das temperaturas indicadas nos sensores térmicos instalados nos enrolamentos da máquina elétrica.

- Resultados

Os dados de parâmetros elétricos registrados pelos equipamentos de medição estão relacionados na Tabela 3.4. A mesma tabela mostra a potência mecânica no eixo do motor, fator de potência e energia consumida para funcionamento de 7.000 horas anuais, essas últimas obtidas através de cálculos.

Tabela 3.4 – Parâmetros elétricos registrados com alimentação senoidal. Controle de vazão por estrangulamento de válvula

sinal/abert. válvula (%)		medidos				calculados		
		V _{méd} (V)	I _{méd} (A)	P (W)	S (VA)	Peixo (W)	FP	E (KWh)
senoidal	100	220,00	3,50	1122,42	1339,78	943,37	0,838	7857
	85	220,00	3,40	1072,50	1293,55	918,91	0,829	7508
	60	220,05	3,10	953,85	1191,23	843,36	0,801	6677
	32	220,07	2,80	832,65	1084,62	764,60	0,768	5829

Os parâmetros mecânicos e hidráulicos, registrados para a mesma situação estão relacionados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Parâmetros mecânicos e hidráulicos, alimentação senoidal. Vazão controlada por estrangulamento de válvula

sinal/abert. válvula (%)		medidos			
		H (Kgf/cm ²)	Q (m ³ /h)	T (N.m)	vel.(rpm)
senoidal	100	2,00	3,10	2,692	3348
	85	2,20	2,60	2,615	3357
	60	2,50	1,60	2,385	3379
	32	2,60	0,50	2,154	3392

- Comentários

Mostra-se nas Tabelas 3.4 e 3.5, comportamento coerente das grandezas elétricas, mecânicas e hidráulicas em função da variação da vazão. Em relação aos aspectos elétricos, tanto a potência elétrica, quanto a corrente elétrica

experimentaram decréscimo à medida que a válvula foi estrangulada. A Figura 3.19, permite comprovar o comportamento da potência elétrica, no gráfico é possível observar que a variação da potência em relação à abertura de válvula é praticamente linear. Convém observar que esses valores são médios.

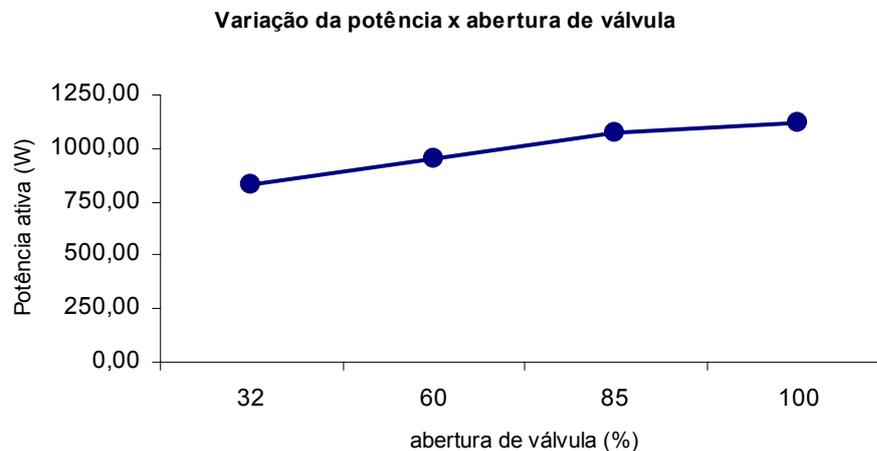


Figura 3.19 – Variação potência x estrangulamento de válvula, alimentação ideal

O fator de potência sofre uma redução à medida que há uma diminuição da carga no eixo do motor. Em relação à eficiência energética, a última coluna da tabela mostra o consumo de energia para um total de 7.000 horas anuais, a energia elétrica consumida diminui coerentemente à diminuição da vazão do sistema. No que tange à qualidade de energia elétrica, praticamente não há desequilíbrio na tensão e, conseqüentemente, as correntes são equilibradas, assim, a referida tabela apresenta apenas os valores médios de tensão e corrente.

A Tabela 3.5 apresenta um aumento da pressão, em face à diminuição da vazão; esse comportamento é esperado, e pode ser visualizado na Figura 3.20. Deve-se salientar que esta figura representa a curva da bomba. Observa-se na mesma tabela que ocorreu pouca variação na velocidade de rotação do motor. Esse comportamento reside no fato de o controle de vazão por estrangulamento de válvula atuar na tubulação do sistema e não no comportamento da bomba, o que implica em pouca variação da velocidade do conjunto motor-bomba. O torque apresenta leve diminuição com o decréscimo da vazão, em virtude do torque ser proporcional à potência mecânica e à velocidade de rotação do motor.

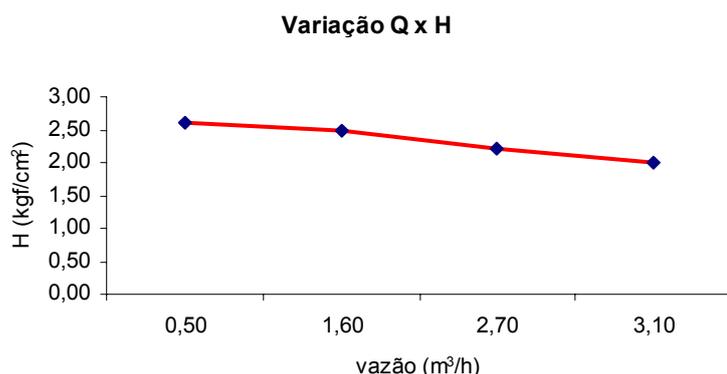


Figura 3.20 – Variação Q x H (curva da bomba), alimentação ideal

3.4.2 - Caso 2 – Alimentação do sistema de bombeamento com distorções harmônicas, controle de vazão por estrangulamento de válvula.

- Caracterização dos Ensaios

A bancada, do sistema para essa situação, foi alimentada através da fonte HP com tensão trifásica não senoidal e equilibrada. As distorções harmônicas de tensões totais (THD_V) aplicadas foram próximas de 5%, 10% e 20%. As distorções harmônicas individuais configuradas foram às relacionadas na Tabela 3.2. A tensão (rms) na frequência fundamental para os três casos, foi ajustada na fonte para o valor próximo de 220V. O controle de vazão por estrangulamento de válvula foi programado manualmente no sistema supervisor. As porcentagens de abertura de válvula utilizadas foram às mesmas já descritas no Caso1.

Durante os ensaios foi utilizado o osciloscópio THS 120P para capturar algumas formas de onda aplicadas pela fonte HP à bancada. A título de ilustração, a forma de onda de tensão e corrente presente nos terminais de entrada do motor com distorção harmônica de tensão total 20% é visto na Figura 3.21.

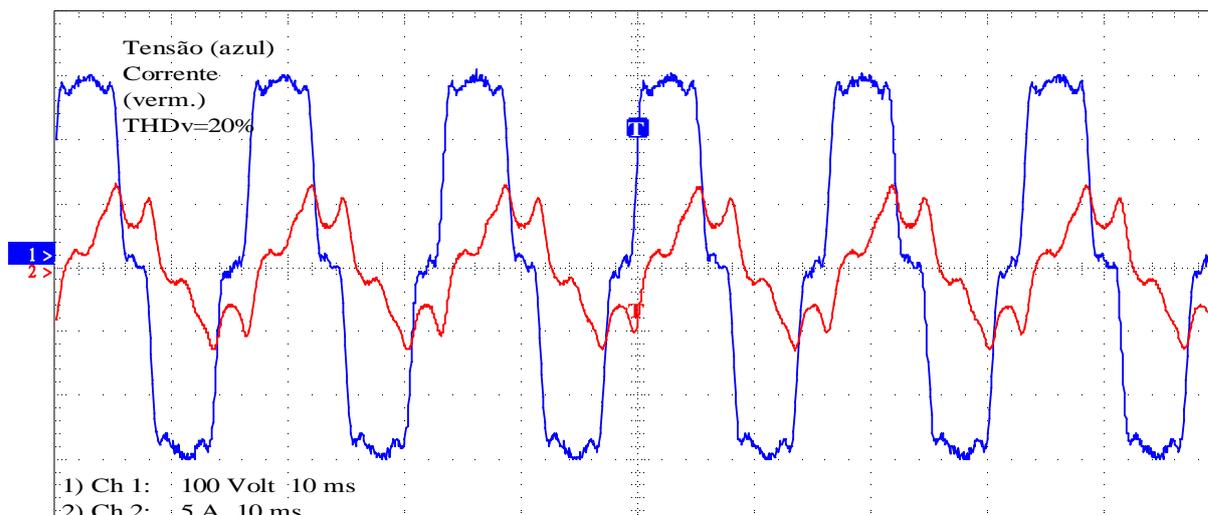


Figura 3.21 – Forma de onda de tensão (fase-fase) e corrente com distorção harmônica de tensão total 20%.

- Resultados

Os dados elétricos registrados pelo medidor de grandezas estão relacionados na Tabela 3.6. Observa-se na tabela a inserção dos valores de parâmetros obtidos com aplicação de tensões senoidal equilibrada conforme vista no Caso 1. O objetivo de se incluir tais medições e cálculos é ter parâmetros de comparação entre os efeitos causados pela presença de distorções harmônicas e a situação ideal, ou seja, alimentação com tensão senoidal trifásica simétrica e equilibrada.

Tabela 3.6 – Parâmetros elétricos registrados com alimentação distorcida. Controle de vazão por estrangulamento de válvula.

sinal/abert.		medidos				calculados		
		V _{méd} (V)	I _{méd} (A)	P (W)	S (VA)	Peixo (W)	FP	E (KWh)
sen.	100%	220,00	3,50	1122,42	1339,78	943,37	0,838	7857
har5		222,00	3,50	1105,56	1348,33	944,18	0,820	7739
har10		223,47	3,50	1108,96	1361,21	946,34	0,815	7763
har20		226,88	3,60	1118,13	1420,80	973,44	0,787	7827
sen.	85%	220,00	3,40	1072,50	1293,55	918,91	0,829	7508
har5		222,00	3,40	1054,79	1300,14	920,39	0,811	7384
har10		223,47	3,40	1064,79	1320,43	921,27	0,806	7454
har20		226,92	3,50	1072,74	1378,39	948,71	0,778	7509
sen.	60%	220,05	3,10	953,85	1191,23	843,36	0,801	6677
har5		222,10	3,10	934,72	1189,04	843,54	0,786	6543
har10		223,47	3,10	943,66	1210,92	844,65	0,779	6606
har20		226,96	3,20	949,82	1266,53	872,05	0,750	6649
sen.	32%	220,07	2,80	832,65	1084,62	764,60	0,768	5829
har5		222,10	2,80	815,68	1083,15	765,86	0,753	5710
har10		223,47	2,90	824,86	1107,72	794,32	0,745	5774
har20		226,97	3,00	832,32	1163,74	822,03	0,715	5826

Os parâmetros mecânicos e hidráulicos estão relacionados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Parâmetros mecânicos e hidráulicos, alimentação distorcida. Vazão controlada por estrangulamento de válvula.

sinal/abert.		medidos			
		H (Kgf/cm ²)	Q (m ³ /h)	T (N.m)	vel.(rpm)
sen.	100%	2,00	3,10	2,692	3348
har5		2,30	3,10	2,692	3354
har10		2,30	3,10	2,692	3359
har20		2,30	3,10	2,769	3359
sen.	85%	2,20	2,60	2,615	3357
har5		2,40	2,70	2,615	3366
har10		2,40	2,70	2,615	3366
har20		2,40	2,70	2,692	3367
sen.	60%	2,50	1,60	2,385	3379
har5		2,70	1,56	2,385	3380
har10		2,70	1,60	2,385	3384
har20		2,71	1,58	2,462	3385
sen.	32%	2,60	0,50	2,154	3392
har5		2,90	0,50	2,154	3401
har10		2,90	0,50	2,231	3402
har20		2,90	0,50	2,308	3403

- Comentários

Analisando a Tabela 3.6, nota-se uma elevação da tensão média à medida que houve aumento da distorção harmônica. Isso ocorreu porque o módulo da tensão fundamental foi programado para manter-se próximo de 1 pu em todos os graus de distorção. A corrente média apresentou um leve aumento para um THDv de 20%, isto se deve ao valor da tensão rms, que nesse nível de distorção chegou a 226,88 V, tomando como base abertura de válvula 100%. Observa-se a queda da potência ativa na distorção de 5%, 10% e 20% em relação à alimentação com tensão senoidal. As informações presentes na tabela revelam, que à medida que a distorção harmônica aumenta, há majoração da potência aparente. Nesse fato reside o maior problema da presença de distorção harmônica de tensão na entrada do motor. O aumento da potência aparente de maneira geral sobrecarrega cabos, transformadores e os mesmos terão menos condições de transportar energia ativa (que realiza trabalho útil). Convém observar que o aumento de corrente com a elevação taxa de distorção, foi pouco percebido devido à baixa potência do motor utilizado no sistema motor-bomba e a arredondamentos de valores de corrente, gravados no arquivo de texto. O fator de potência experimenta decréscimo, com o

aumento da distorção, conforme já comentado no capítulo anterior, através de análise da equação (2.18). A Figura 3.22 mostra a variação do fator de potência à medida que há elevação da distorção harmônica de tensão.

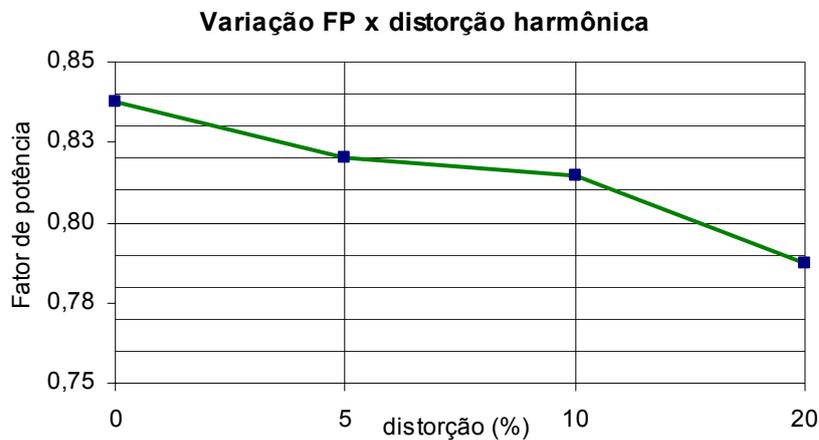


Figura 3.22 – Variação do fator de potência em relação à distorção harmônica.

A potência ativa pouco variou com a presença de distorção, conforme mostra o gráfico da Figura 3.23. A energia consumida em 7.000 kWh ao ano depende da potência ativa. Em função disso o valor da energia consumida em todos os ensaios com distorções harmônicas esteve de maneira geral próximo do valor de energia consumida na situação de alimentação ideal, acompanhando o comportamento da potência ativa.

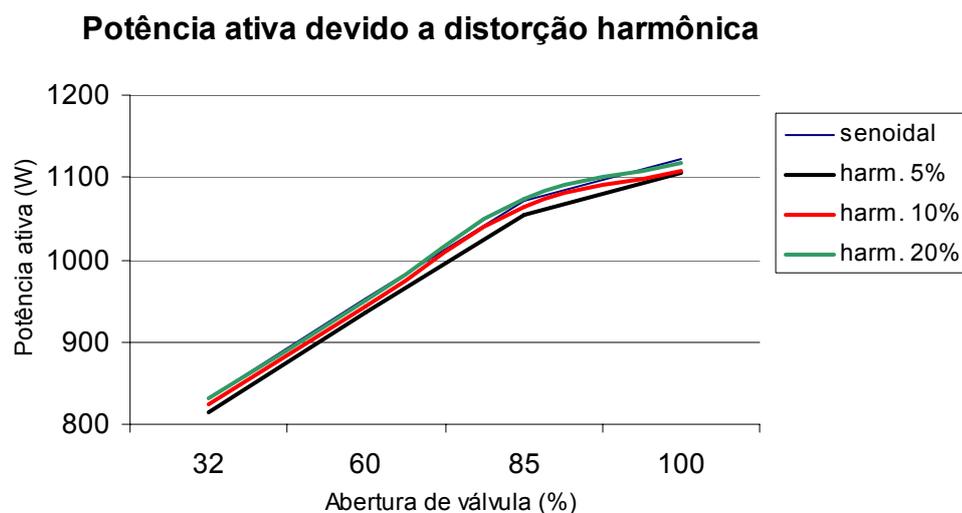


Figura 3.23 - Variação da potência ativa com alimentação distorcida, controle de vazão por estrangulamento de válvula.

O torque de forma geral só apresentou um valor mais elevado para a distorção de 20%, denotando que o torque médio do motor não sofre variação perceptível frente à presença de distorção harmônica comparado com a forma de alimentação direta do motor. A potência mecânica no eixo do motor depende da relação torque e velocidade, como ambas apresentaram ligeira majoração, a potência no eixo do motor experimentou elevação em relação à variação da distorção. A Tabela 3.7 mostra um pequeno aumento da pressão no sistema quando há aplicação de distorção de tensão em relação à alimentação com tensão senoidal simétrica e equilibrada. A pressão apresentou valores ligeiramente maiores na presença de distorções harmônicas, quando comparada com a alimentação ideal. A análise da expressão (2.3) permite explicar o fato, como Q se manteve constante e a potência no eixo aumentou, só resta a H aumentar para manter a relação.

3.4.3 - Caso 3 – Alimentação do sistema de bombeamento com tensões desequilibradas, controle de vazão por estrangulamento de válvula.

- Caracterização dos Ensaios

A bancada foi alimentada utilizando-se da fonte HP. O sistema de bombeamento foi submetido à alimentação com tensões senoidais assimétricas e desequilibradas. Os fatores K impostos foram próximos de 2%, 3% e 5%, conforme relacionado na Tabela 3.3. No decorrer dos ensaios os fatores de desequilíbrios foram confirmados através de indicação na Interface Homem Máquina (IHM) do multimedidor de energia. As vazões programadas no supervisor foram às já anteriormente definidas no Caso 1. Não foi possível alimentar de forma direta o motor aumentando gradativamente a amplitude da tensão aplicada com desequilíbrio, devido a presença de elevados valores de corrente, isto provocou a atuação da proteção da fonte HP. A opção encontrada foi alimentar o motor através do soft-starter, tendo por vantagem o controle da corrente e partida suave do motor. As tensões aplicadas foram às relacionadas na Tabela 3.3.

- Resultados

Os valores oriundos de medições elétricas estão relacionados na Tabelas 3.8. Os resultados obtidos com alimentação senoidal simétrica e equilibrada estão presentes na tabela e servem como parâmetros de comparação.

Tabela 3.8 – Parâmetros elétricos, registrados com alimentação senoidal desequilibrada. Controle de vazão por estrangulamento de válvula

sinal/abert.		medidos							calculados		
		V _{AB} (V)	V _{BC} (V)	V _{CA} (V)	I _A (A)	I _B (A)	I _C (A)	P (W)	S (VA)	FP	E (KWh)
sen.	100%	220,10	220,02	219,90	3,10	3,00	3,26	958,47	1186,64	0,808	6709
des.2		221,91	215,71	222,13	4,70	4,10	3,80	1388,01	1591,55	0,872	9716
des.3		223,52	213,60	222,80	4,90	4,20	3,50	1389,50	1595,96	0,871	9726
des.5		224,57	209,40	226,10	5,50	4,10	3,31	1401,74	1614,22	0,868	9812
sen.	85%	220,10	220,00	219,90	3,10	2,92	3,10	923,27	1151,76	0,802	6463
des.2		221,96	215,79	222,18	4,50	4,00	3,60	1328,18	1531,82	0,867	9297
des.3		223,55	213,60	222,80	4,80	4,00	3,40	1334,28	1540,68	0,866	9340
des.5		224,60	209,40	226,10	5,30	3,90	3,20	1339,39	1552,23	0,863	9376
sen.	60%	220,10	220,08	219,96	2,90	2,80	2,90	848,16	1091,55	0,777	5937
des.2		222,00	215,80	222,20	4,10	3,50	3,20	1152,67	1362,11	0,846	8069
des.3		223,60	213,65	222,80	4,40	3,70	3,10	1197,44	1408,00	0,850	8382
des.5		224,60	209,50	226,18	4,80	3,41	2,85	1165,33	1384,76	0,842	8157
sen.	32%	220,10	220,10	220,00	2,80	2,90	2,90	832,65	1084,62	0,768	5829
des.2		222,00	215,80	222,20	3,60	3,00	2,80	970,53	1192,68	0,814	6794
des.3		223,60	213,70	222,90	3,85	3,10	2,60	975,24	1200,82	0,812	6827
des.5		224,70	209,50	226,20	4,40	3,00	2,50	984,77	1217,72	0,809	6893

A Tabela 3.9 relaciona os parâmetros mecânicos, hidráulicos registrados pelos medidores e sensores.

Tabela 3.9 – Parâmetros mecânicos e hidráulicos, alimentação senoidal assimétrica desequilibrada. Vazão controlada por estrangulamento de válvula

sinal/abert.		medidos			
		H (Kgf/cm ²)	Q (m ³ /h)	T (N.m)	vel.(rpm)
sen.	100%	2,38	2,30	2,385	3387
des.2		1,30	2,30	-	3309
des.3		1,30	2,30	-	3314
des.5		1,31	2,28	-	3309
sen.	85%	2,40	2,00	2,308	3393
des.2		1,50	2,00	-	3319
des.3		1,50	2,00	-	3314
des.5		1,50	1,99	-	3321
sen.	60%	2,59	1,30	2,231	3405
des.2		1,80	1,30	-	3349
des.3		1,79	1,40	-	3339
des.5		1,80	1,30	-	3343
sen.	32%	2,60	0,50	2,154	3392
des.2		2,10	0,00	-	3371
des.3		2,10	0,00	-	3488
des.5		2,10	0,00	-	3372

- Comentários

Na Tabela 3.8 estão presentes dados numéricos que indicam as variações dos parâmetros elétricos em face da presença de desequilíbrio de tensão na

alimentação do motor. Apesar da programação manual no supervisório para vazões relacionada conforme Caso 1, as vazões registradas foram menores. Neste sentido foi necessário inserir nas Tabelas 3.8 e 3.9 linhas com valores dos parâmetros elétricos, mecânicos e hidráulicos para vazões de 2,3 m³/h, 2,0 m³/h, 1,3 m³/h na condição de alimentação ideal para efeito de comparação. Um grande desequilíbrio nas correntes de fase pode ser observado. Em algumas situações, este desequilíbrio produziram correntes superiores ao valor nominal para uma das fases, o que leva à elevações de temperatura inadmissíveis e conseqüentemente redução da vida útil do motor. A título de exemplificação, o desequilíbrio de corrente para desequilíbrios de tensão K=2%, K=3% e K=5% considerando abertura de válvula 100%, foram respectivamente de 11,9%, 16,7% e 27,9%. Os valores de desequilíbrio de corrente encontrados estão bem próximo dos indicadores ilustrados na referência [45]. A energia consumida por conseqüente teve elevação, principalmente por acréscimo nas perdas joules internas ao motor. As potências ativas registradas frente a presença de desequilíbrios foram bem mais elevadas, em relação a alimentação ideal. O gráfico da Figura 3.24, mostra a variação da potência ativa diante do desequilíbrio de tensão. O fator de potência inicialmente apresentou melhora em relação a alimentação ideal, mas a medida do aumento do desequilíbrio, voltou a sofrer leve queda. A potência aparente apesar de não ser indicada no gráfico, também apresentou elevação com o aumento do fator de desequilíbrio.

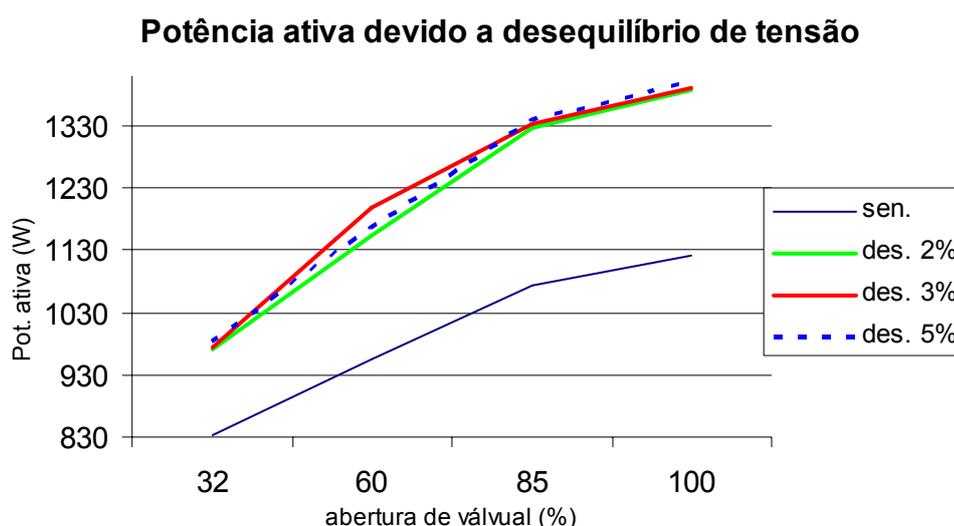


Figura 3.24 – Variação da potência ativa com alimentação desequilibrada, controle de vazão por estrangulamento de válvula.

Os valores programados de vazão foram idênticos ao Caso 1, porém nesta situação as grandezas registradas de vazão e pressão foram significativamente menores, chegando em algumas situações ao não registro das vazões, conforme mostrado na Tabela 3.9. Durante a execução dos ensaios experimentais observou-se uma intensa vibração no sistema de bombeamento, o que poderia ocasionar danos na bomba e no motor de alto rendimento. Neste sentido, acredita-se que este tenha sido o motivo para o torquímetro não enviar os valores de suas medições para o sistema supervisor. Esta situação é muito desfavorável para o funcionamento do sistema de bombeamento tanto em termos de eficiência energética, assim como em termos de comportamento, térmico, mecânico e hidráulico.

3.4.4 - Caso 4 – Alimentação do sistema de bombeamento com tensão senoidal equilibrada, controle de vazão por variação de velocidade da bomba.

- Caracterização dos Ensaio

Neste ensaio o inversor de frequência foi alimentado com tensão senoidal equilibrada 220 V entre fases a uma frequência de 60 Hz. O motor recebeu alimentação através do inversor. As formas de onda aplicada na entrada do inversor e presente na entrada do motor foram as mostradas nas Figuras 3.15 e 3.16. O controle de vazão por variação de velocidade da bomba foi programado manualmente na estação de trabalho. Os valores da variável manipulada (MV), para o controle do inversor foram setados em 80%, 70%, 45% e 25% e, os valores PV obtidos correspondem, respectivamente, às vazões de 3,10 m³/h, 2,60m³/h, 1,60 m³/h e 0,50 m³/h.

- Resultados

Os dados de medições elétricas, na entrada do inversor de frequência, estão relacionados na Tabela 3.10. Os registros de grandezas mecânicas e hidráulicas estão indicados na Tabela 3.11.

Tabela 3.10 – Parâmetros elétricos registrados com alimentação senoidal. Controle de vazão por variação de velocidade

sinal	medidos				calculados		
	V _{méd} (V)	I _{méd} (A)	P (W)	S (VA)	Peixo (W)	FP	E (KWh)
Senoidal	219,99	4,10	1041,20	1563,88	705,14	0,666	7288
	220,05	3,00	734,17	1149,39	451,18	0,639	5139
	220,13	1,10	241,28	432,14	105,83	0,558	1689
	220,16	0,40	81,21	166,30	20,98	0,488	568

Tabela 3.11 – Parâmetros mecânicos e hidráulicos, alimentação senoidal. Vazão controlada por variação de velocidade

sinal	medidos			
	H (Kgf/cm ²)	Q (m ³ /h)	T (N.m)	vel.(rpm)
Senoidal	2,00	3,10	2,092	3221
	1,50	2,70	1,531	2817
	0,60	1,60	0,561	1802
	-	0,60	0,204	982

- Comentários

Os valores dos parâmetros elétricos relacionados na Tabela 3.10, denotam queda acentuada na corrente média, potência ativa, potência aparente, potência no eixo e energia consumida à medida que a velocidade da bomba diminui. A corrente registrada para uma vazão programada de 3,1 m³/h, se revela superior ao Caso 1, considerando que foram medidas para a mesma vazão. Esse fato se justifica pois esta ai incluída uma parcela de corrente utilizada para alimentação do inversor. O equipamento utiliza-se para prover a sua alimentação de duas fases que alimentam o motor. A menor necessidade de potência ativa para manter a mesma vazão quando comparada com o método de estrangulamento de valvula é a grande vantagem do método de controle de vazão por variação de velocidade. A Figura 3.25 mostra a potência ativa exigida da rede para as quatro situações de vazões setadas no supervisório.

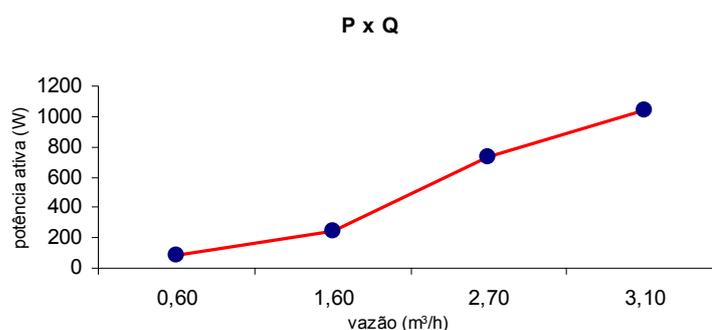


Figura 3.25 – Potência ativa consumida para controle de vazão por variação de velocidade, alimentação ideal

As informações da Tabela 3.11 mostram em dados numéricos a variação da pressão em relação a vazão. Tal comportamento está de acordo com a lei de afinidade mostrada na equação (2.6) e pode ser observado na Figura 3.26. A curva de tendência em tracejado ajuda a mostrar tal comportamento, indicando que a variação é quadrática. O potência mecânica disponível no eixo do motor para vazões menores diminuiu, como essa potência é resultado do produto do torque pela velocidade, é de se esperar a diminuição tanto do torque, como da velocidade para vazões menores. Por todas essas razões, o método de controle de vazão por variação de velocidade é bastante eficiente energeticamente.

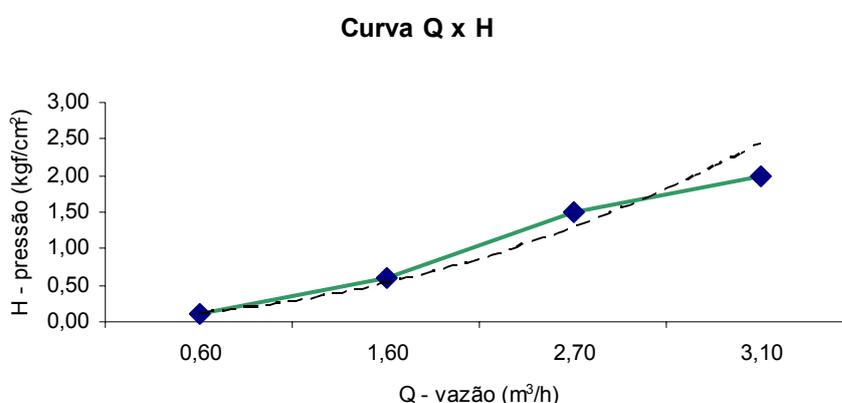


Figura 3.26 – Curva Q x H, método de variação de velocidade, alimentação ideal

3.4.5 - Caso 5 – Alimentação do sistema de bombeamento com distorções harmônicas de tensão, controle de vazão por variação de velocidade.

- Caracterização dos ensaios

O inversor de frequência, para este caso, foi alimentado através da fonte HP, com tensão trifásica não senoidal e equilibrada. Os THD_V de tensão aplicados foram os mencionados no caso 2. As vazões foram programadas manualmente através da tela mostrada na Figura 3.12 com a inserção de porcentagens 80%, 70%, 45% e 25% na janela MV. Semelhante ao Caso 4, esta preparação para o ensaio fez com que o medidor de vazão registrasse valores de: 3,1 m³/h; 2,7 m³/h; 1,6 m³/h e 0,6 m³/h respectivamente em relação aos valores de variável manipulada configurada previamente.

- Resultados

Os dados dos parâmetros elétricos estão presentes na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Parâmetros elétricos registrados, alimentação com tensão distorcida. Controle de vazão por variação de velocidade

sinal/MV		medidos				calculados		
		V _{méd} (V)	I _{méd} (A)	P (W)	S (VA)	Peixo (W)	FP	E (KWh)
sen.	80%	219,99	4,10	1041,20	1563,88	705,14	0,666	7288
har5		221,72	4,30	1047,65	1643,38	737,31	0,637	7334
har10		226,93	4,00	1005,34	1573,90	687,18	0,639	7037
har20		230,39	3,40	1001,52	1341,16	583,68	0,747	7011
sen.	70%	220,05	3,00	734,17	1149,39	451,18	0,639	5139
har5		221,77	3,20	737,87	1215,95	480,88	0,607	5165
har10		226,95	3,00	730,14	1191,07	451,75	0,613	5111
har20		230,44	2,40	694,54	943,35	360,97	0,736	4862
sen.	45%	220,13	1,10	241,28	432,14	105,83	0,558	1689
har5		221,86	1,21	245,98	470,24	116,43	0,523	1722
har10		227,05	1,10	238,32	450,14	106,09	0,529	1668
har20		230,53	0,90	232,79	344,42	86,40	0,676	1630
sen.	25%	220,16	0,40	81,21	166,30	20,98	0,488	568
har5		221,89	0,40	77,19	171,91	20,84	0,449	540
har10		227,09	0,40	76,97	168,68	22,97	0,456	539
har20		230,54	0,40	77,34	149,35	21,13	0,518	541

Os registros dos parâmetros mecânicos e hidráulicos estão na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 – Grandezas mecânicas e hidráulicas registradas. Tensão com distorção harmônica. Controle de vazão por variação de velocidade.

sinal/MV		medidos			
		H (Kgf/cm ²)	Q (m ³ /h)	T (N.m)	vel.(rpm)
sen.	80%	2,00	3,10	2,092	3221
har5		2,00	3,10	2,194	3211
har10		2,00	3,10	2,041	3217
har20		1,97	3,10	1,735	3215
sen.	70%	1,50	2,70	1,531	2817
har5		1,60	2,70	1,633	2814
har10		1,60	2,70	1,531	2820
har20		1,50	2,70	1,224	2817
sen.	45%	0,60	1,60	0,561	1802
har5		0,70	1,60	0,618	1800
har10		0,70	1,60	0,561	1806
har20		0,60	1,60	0,459	1798
sen.	25%	0,00	0,60	0,204	982
har5		0,08	0,60	0,204	976
har10		0,00	0,60	0,204	1076
har20		0,00	0,60	0,204	990

- Comentários

A título de ilustração a Figura 3.27 mostra as formas de onda de tensão e corrente para $THD_v = 20\%$, sinais estes aplicados na entrada do inversor.

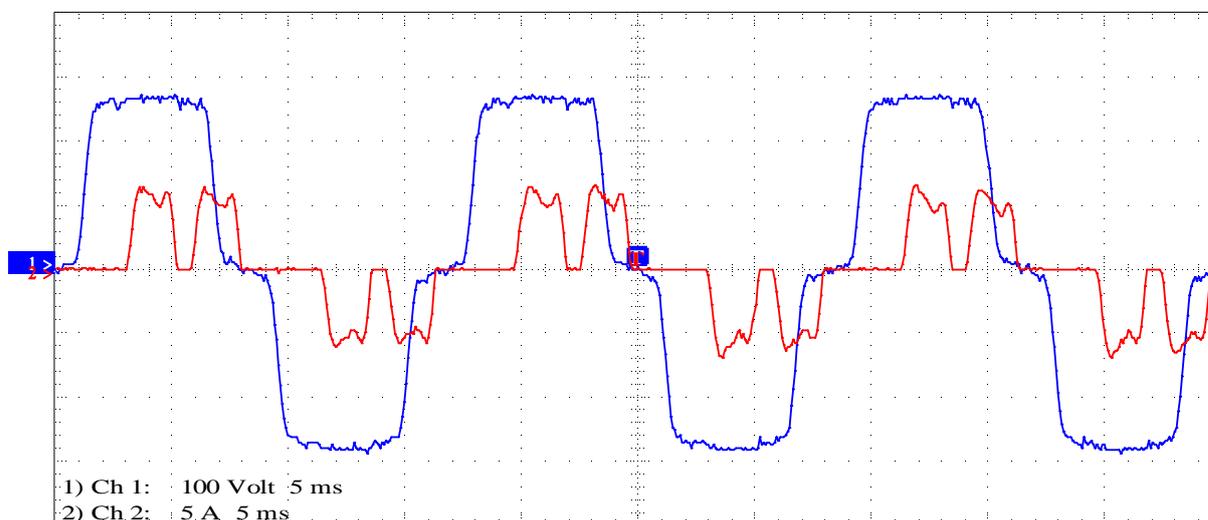


Figura 3.27 – Forma de onda da tensão, corrente na entrada do inversor, $THD_v = 20\%$.

As formas de onda de corrente capturadas pelo osciloscópio na condição de alimentação do sistema motor-bomba com distorções harmônicas de tensão, THD_v totais de 10% e 20 %, são vistas na Figura 3.28.

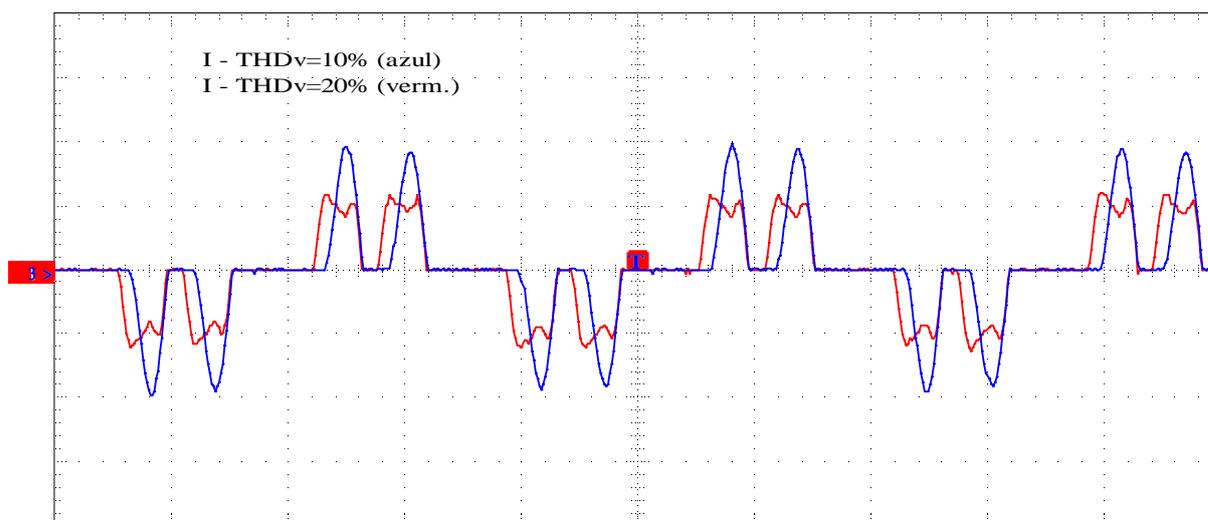


Figura 3.28 – Formas de onda da corrente na entrada do inversor, para $THD_v = 10\%$ e $THD_v = 20\%$.

Em análise à Tabela 3.12, vê-se que o valor da corrente média para distorção

harmônica de 5% experimentou um moderado acréscimo em relação à alimentação com tensão senoidal e nas seguintes distorções apresentou decréscimo. A potência ativa, potência aparente e potência mecânica disponível no eixo do motor acompanharam o comportamento da corrente com a elevação do nível de distorção. Acredita-se que o circuito intermediário do inversor tem predominância capacitiva. A energia armazenada no elo CC do inversor e fornecida para a carga é quantificada através da expressão:

$$E_{CC} = \frac{C \cdot V_{pico}}{2} \quad (3.1)$$

A energia E_{CC} depende da capacitância indicada por C , da tensão de pico que o capacitor carrega indicado na expressão por V_{pico} . A Figura 3.27 indica que a onda de tensão para distorção harmônica sofreu achatamento, portanto o capacitor permanece carregado por um tempo maior quando comparado com alimentação ideal. Pode-se definir a energia como o produto da potência pelo tempo, ou seja, a potência registrada pelo multimedidor de energia elétrica, depende diretamente da tensão de pico e inversamente do tempo de carga do capacitor. A corrente para circuito com característica predominantemente capacitiva é definida pela derivada da tensão em relação ao tempo. A Figura 3.28 indica que para distorções harmônicas de taxas mais elevadas o capacitor permanece carregado por muito mais tempo, logo a corrente medida pelo multimedidor apresentará decréscimo com o aumento da taxa de distorção. O fator de potência como esperado sofreu melhora, devido à queda da potência aparente conforme aumento da taxa de distorção harmônica. A Figura 3.29 mostra o comportamento do fator de potência em relação à taxa de distorção.

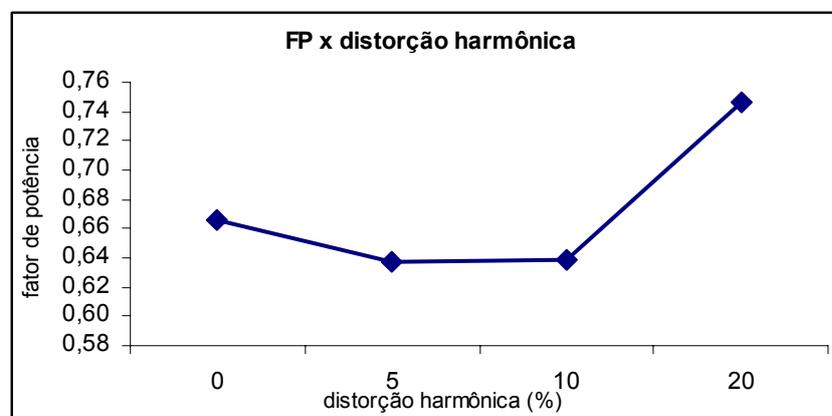


Figura 3.29 – FP x distorção harmônica, alimentação por inversor de frequência.

A potência ativa na presença de distorção harmônica registrada apresentou diminuição gradativa no seu valor com o aumento da taxa de distorção, quando comparado com a alimentação ideal, acompanhando o decréscimo da corrente, representado na Figura 3.30.

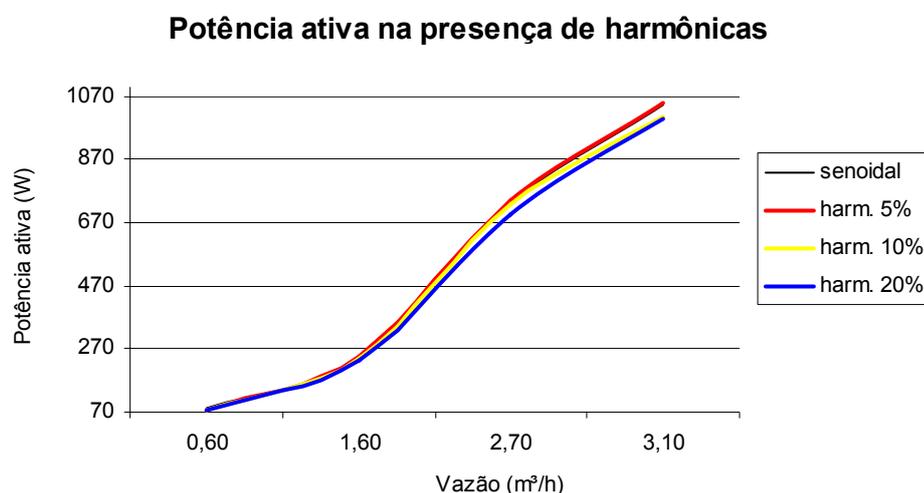


Figura 3.30 - Variação da potência ativa com alimentação distorcida, controle de vazão por variação de velocidade.

A velocidade apresentou pouca variação em relação às variações das distorções. O torque apresentou decréscimo com a elevação da taxa de distorção. A pressão para $THD_V = 20\%$ teve pequena queda em relação às distorções menores, esse comportamento ocorreu para todas as vazões configuradas, reflexo da queda do produto velocidade pelo torque.

3.4.6 - Caso 6 – Alimentação do sistema de bombeamento com tensões desequilibradas em módulo e ângulo, controle de vazão por variação de velocidade da bomba.

- Caracterização dos Ensaios

Nesta situação, tensões senoidais assimétricas e desequilibradas foram impostas na entrada do inversor. Os fatores K aplicados estão relacionados na Tabela 3.3. Procurou-se neste ensaio configurar os valores de MV iguais aos relatados no Caso 4. Convém observar que os valores de MV inseridos no supervisor foram rigorosamente iguais ao já informados no Caso 4.

- Resultados

Os valores das grandezas elétricas obtidas estão na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Parâmetros elétricos coletados para alimentação senoidal, assimétrica, desequilibrada, controle de vazão por variação de velocidade

sinal/MV		medidos							calculados		
		V _{AB} (V)	V _{BC} (V)	V _{CA} (V)	I _A (A)	I _B (A)	I _C (A)	P (W)	S (VA)	FP	E (KWh)
sen.	80%	220,00	220,10	219,88	4,01	4,19	4,10	1041,20	1563,88	0,666	7288
des.2		222,26	215,94	221,84	5,10	3,00	4,40	983,94	1580,14	0,623	6888
des.3		222,93	213,82	223,40	5,51	2,49	5,00	973,33	1651,41	0,589	6813
des.5		225,25	209,57	225,56	5,80	2,40	5,29	984,14	1714,46	0,574	6889
sen.	70%	220,04	220,15	219,97	2,96	3,08	3,01	734,17	1149,39	0,639	5139
des.2		222,31	216,00	221,93	3,90	2,10	3,36	684,61	1190,42	0,575	4792
des.3		222,96	213,82	223,61	3,69	1,51	3,37	586,99	1092,44	0,537	4109
des.5		225,34	209,47	225,91	3,61	1,50	3,30	574,78	1067,86	0,538	4023
sen.	45%	220,13	220,23	220,03	1,10	1,19	1,12	241,28	432,14	0,558	1689
des.2		222,35	215,90	222,23	1,60	0,90	1,30	233,86	480,16	0,487	1637
des.3		223,02	213,70	223,89	1,60	0,60	1,50	224,36	469,71	0,478	1570
des.5		225,35	209,38	226,15	1,60	0,60	1,41	224,81	468,21	0,480	1574
sen.	25%	220,14	220,29	220,05	0,40	0,50	0,40	81,21	166,30	0,488	568
des.2		222,38	215,85	222,34	0,60	0,40	0,50	79,10	185,44	0,427	554
des.3		223,03	213,65	224,03	0,60	0,20	0,60	75,64	183,15	0,413	529
des.5		225,36	209,29	226,30	0,60	0,20	0,60	75,76	181,94	0,416	530

Os dados coletados de variáveis mecânicas, hidráulicas estão na Tabela 3.15.

Tabela 3.15 - Parâmetros mecânicos e hidráulicos registrados com alimentação senoidal, assimétrica, desequilibrada. Controle de vazão por variação de velocidade

sinal/MV		medidos			
		H (Kgf/cm ²)	Q (m ³ /h)	T (N.m)	vel. (rpm)
sen.	80%	2,00	3,10	2,092	3221
des. 2		1,99	3,10	2,108	3237
des. 3		1,89	3,13	2,194	3235
des. 5		1,90	3,20	2,296	3241
sen.	70%	1,50	2,70	1,531	2817
des. 2		1,50	2,70	1,585	2833
des. 3		1,14	2,41	1,462	2834
des. 5		1,13	2,40	1,432	2833
sen.	45%	0,60	1,60	0,561	1802
des. 2		0,60	1,60	0,663	1812
des. 3		0,50	1,60	0,612	1809
des. 5		0,50	1,60	0,612	1805
sen.	25%	-	0,60	0,204	982
des. 2		-	0,60	0,255	987
des. 3		-	0,60	0,255	987
des. 5		-	0,60	0,255	982

- Comentários

Os dados da Tabela 3.14 mostram que as tensões e correntes trifásicas na entrada do inversor se apresentam desequilibradas. Diferente dos resultados obtidos no Caso 3, a potência ativa apresentou leve redução com o aumento do fator de desequilíbrio, mas manteve-se próximo dos valores obtidos com alimentação ideal, que pode ser visto na Figura 3.31. A energia consumida em 7.000 horas anuais acompanhando o comportamento da potência ativa manteve-se bem próximas para as três situações de desequilíbrio da tensão elétrica. Isto vem a comprovar que o inversor além de ser mais eficiente no controle de vazão, consegue amenizar os efeitos nocivos provocados pelo desequilíbrio de tensão.

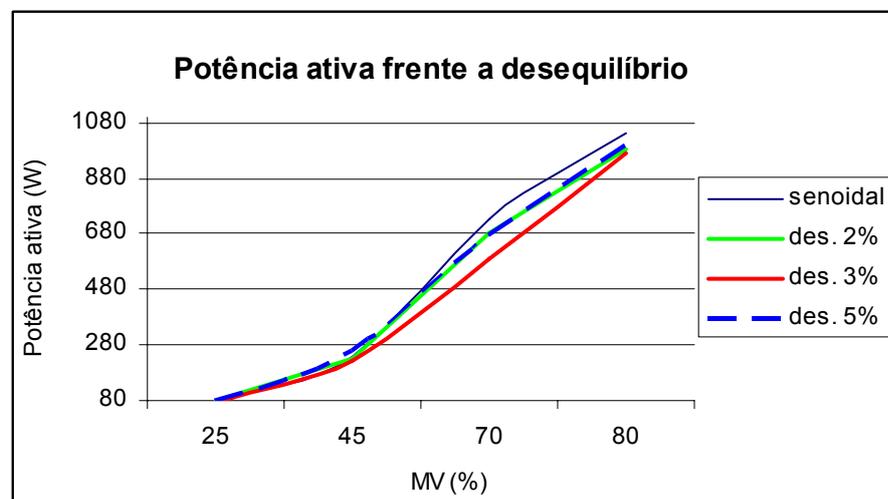


Figura 3.31 - Variação da potência ativa com alimentação desequilibrada, controle de vazão por variação de velocidade

A potência aparente pelo contrário teve o seu valor majorado, acarretando redução do fator de potência, variação esta parecida com o observado no Caso 3. Este comportamento pode ser visualizado na Figura 3.32.

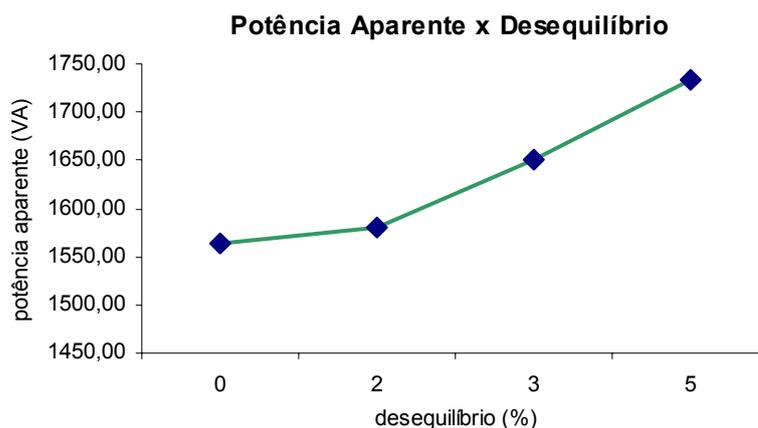


Figura 3.32 – Potência aparente x desequilíbrio, alimentação via inversor de frequência.

A observação da Tabela 3.15 permite verificar o torquímetro envia valores para o supervisor, reforçando que o inversor consegue amenizar os efeitos nocivos causados, no sistema pelo desequilíbrio de tensão. Este fato também é comprovado pelos valores medidos de vazão, os quais são próximos dos valores programados, diferentemente do ocorrido no Caso 3. A pressão para o caso de vazão programada de 0,6 m³/h não foi registrada pelo medidor de pressão.

3.4.7 - Caso 7 – Comparação da eficiência energética do sistema no controle de vazão por estrangulamento de válvula e variação de velocidade da bomba, alimentação com tensão senoidal equilibrada.

- Caracterização dos ensaios

Neste caso, foi realizada uma comparação dos parâmetros obtidos através do controle de vazão por estrangulamento e válvula e variação de velocidade.

- Resultados

Os resultados obtidos nos ensaios do Caso 1 e Caso 4 foram inseridos em uma única planilha. Estes dados foram subdivididos em colunas referentes ao controle de vazão por estrangulamento de válvula e controle de vazão por variação de velocidade. O objetivo é verificar o consumo de energia consumido por um e por outro método de controle da vazão. A Tabela 3.16 apresenta os parâmetros elétricos utilizados para a comparação.

Tabela 3.16 – Tabela comparativa de eficiência energética do controle de vazão por estrangulamento e variação de velocidade. Parâmetros elétricos. Alimentação ideal

Cont. de vazão	medidos				calculados		
	V _{méd} (V)	I _{méd} (A)	P (W)	S (VA)	Peixo (W)	FP	E (KWh)
Est. de válvula	220,10	3,50	1122,42	1339,78	943,37	0,838	7857
	220,10	3,40	1072,50	1293,55	918,91	0,829	7508
	220,10	3,10	953,85	1191,23	843,36	0,801	6677
	220,10	2,80	832,65	1084,62	764,60	0,768	5829
Var. de velocidade	220,00	4,10	1041,20	1563,88	705,14	0,666	7288
	220,04	3,00	734,17	1149,39	451,18	0,639	5139
	220,13	1,10	241,28	432,14	105,83	0,558	1689
	220,14	0,40	81,21	166,30	20,98	0,488	568

Na Tabela 3.17 estão distribuídos os valores dos parâmetros mecânicos e hidráulicos.

Tabela 3.17 – Tabela comparativa de eficiência energética do controle de vazão por estrangulamento de válvula e variação de velocidade. Parâmetros mecânicos e hidráulicos. Alimentação ideal

Cont. de vazão	medidos			
	H (Kgf/cm ²)	Q (m ³ /h)	T (N.m)	vel. (rpm)
Est. de válvula	2,00	3,10	2,692	3348
	2,20	2,70	2,615	3357
	2,50	1,60	2,385	3379
	2,60	0,50	2,154	3392
Var. de velocidade	2,00	3,10	2,092	3221
	1,50	2,70	1,531	2817
	0,60	1,60	0,561	1802
	-	0,60	0,204	982

- Comentários

Os dados numéricos da tabela mostram uma menor necessidade de potência ativa para controlar a vazão utilizando o método de variação de velocidade em comparação com o método de estrangulamento de válvula, conseqüentemente maior eficiência energética. O gráfico da Figura 3.33 mostra a relação entre potência ativa consumida para os dois métodos. A porcentagem de economia de energia elétrica registrada quando se utiliza o inversor em comparação com o estrangulamento de válvula, para controlar a vazão foram 6,47%; 35,58%; 75,10%; 90,49% para as respectivas vazões de 3,1 m³/h; 2,7 m³/h; 1,6 m³/h e 0,6 m³/h. Isto vem reforçar a vantagem de utilizar o inversor de frequência, principalmente em sistemas de bombeamento que trabalham com larga faixa de variação de vazão. A potência ativa registrada para capacidade nominal da bomba centrífuga, ou seja,

3,10 m³/h pelo método de variação de velocidade foi 6,47% menor em relação ao método de estrangulamento de válvula. Isto denota que mesmo para capacidade nominal da bomba o método de controle de vazão por variação de velocidade é mais vantajoso em termos da eficiência energética.

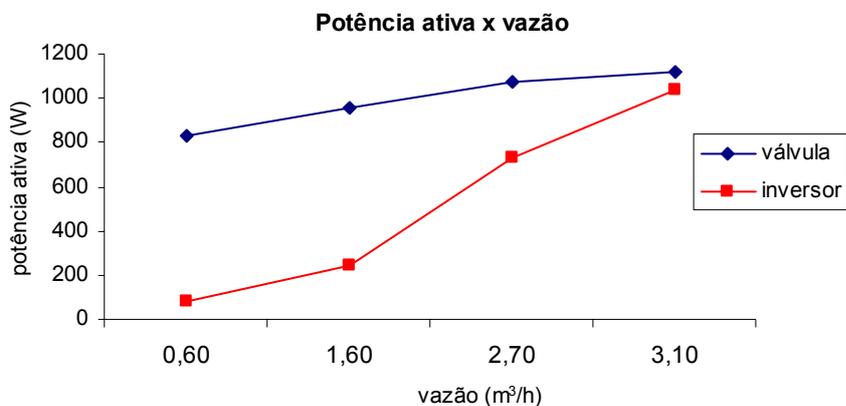


Figura 3.33 – Potência ativa pelos métodos de controle de vazão: estrangulamento de válvula e variação de velocidade

A maior eficiência do método de controle da vazão variação de velocidade em relação ao método de estrangulamento de válvula, pode também ser observado na Figura 3.34, que mostra a variação de Q e H pelos dois métodos. Na referida figura é fácil observar que o método de variação de velocidade fornece menos energia ao líquido no controle da vazão.

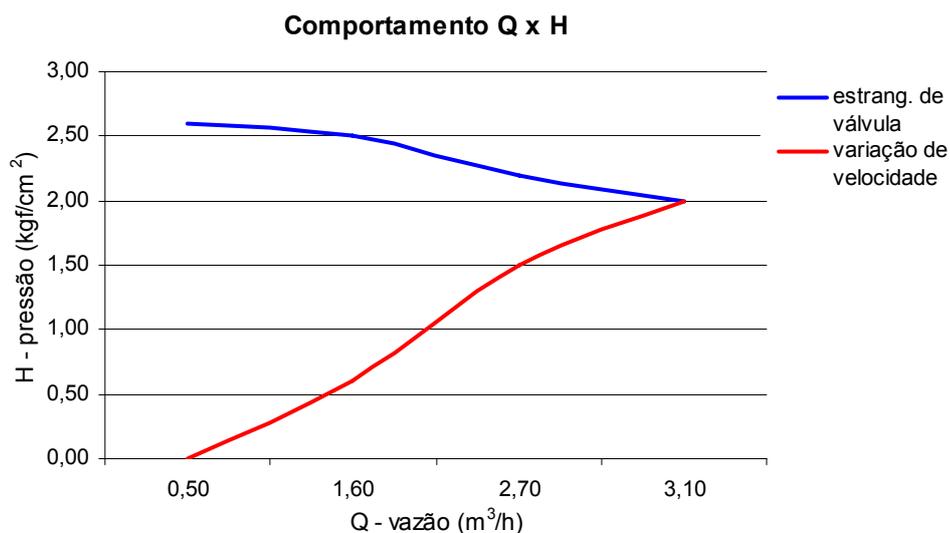


Figura 3.34 – Potência fornecida ao líquido pelos métodos de controle de vazão: estrangulamento de válvula e variação de velocidade

Observa-se na Tabela 3.17 que a velocidade do conjunto motor-bomba, para as situações de maior vazão no método que emprega inversor de frequência é menor que no método de estrangulamento de válvula. Isso mostra que para o método de estrangulamento de válvula, a bomba não está trabalhando no ponto de maior rendimento (PMR). O controle de vazão por variação de velocidade é a melhor opção, desde que o sistema de bombeamento permita diminuição da pressão na linha, isto porque a queda de potência é acompanhada de diminuição da pressão.

3.5 – Considerações finais

Este capítulo mostrou e analisou os dados numéricos de parâmetros elétricos, mecânicos e hidráulicos do sistema de bombeamento do laboratório LAMOTRIZ. O sistema foi submetido a sinais relacionados à qualidade de energia elétrica, sejam eles, alimentação com tensão ideal, tensões com distorções harmônicas, tensões desequilibradas em módulo e ângulo. O parâmetro utilizado para comparação foi a vazão, variada através do método de estrangulamento de válvula ou variação da velocidade da bomba, neste último realizado através do inversor de frequência.

As principais constatações encontradas durante os ensaios foram:

- A potência elétrica ativa pouco decresceu à medida que a vazão foi variada para menor no método de estrangulamento de válvula.
- A potência elétrica medida para carga nominal da bomba pelo método do controle de vazão por variação de velocidade foi 6,47 % menor em relação ao estrangulamento de válvula.
- A potência ativa para distorções harmônicas crescentes apresentou queda em relação à alimentação ideal, quando o motor foi acionado através do inversor.
- No acionamento do motor diretamente com tensões desequilibradas o sistema de bombeamento apresentou maior vibração, com o aumento do fator de desequilíbrio.
- As perdas aumentaram com o aumento do desequilíbrio quando comparado com a alimentação do motor com tensão ideal.
- O inversor de frequência consegue amenizar os efeitos nocivos provocados pela alimentação do sistema com desequilíbrio.

- A economia de energia elétrica registradas para as quatro vazões ensaiadas foram 6,47%; 35,58%; 75,10%; 90,49%, quando se utiliza o método de controle de vazão por variação de velocidade.
- De forma geral a presença de distorções harmônicas e desequilíbrio de tensão na alimentação do sistema de bombeamento pioram a eficiência quando o controle de vazão é realizado pelo método de estrangulamento de válvula. Vale observar que não deve ser levado em conta apenas a potência ativa, mas também, a potência aparente, fator de potência, elevação de temperatura, aumento de vibração do conjunto.
- A presença de distorções harmônicas e desequilíbrio de tensão na alimentação do sistema de bombeamento quando o controle de vazão é realizado pelo inversor de frequência, em termos de eficiência energética apresentaram uma pequena queda. O inversor de frequência consegue amenizar bastante os efeitos nocivos provocados pela presença de distorções harmônicas e desequilíbrio na alimentação do sistema de bombeamento. O principal fator negativo a ser considerado é o baixo fator de potência apresentado pelo sistema devido a presença do inversor de frequência.

Capítulo 4

4 – EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

4.1 – Simulação computacional do sistema de bombeamento na plataforma ATP

A modelagem e simulação computacional são técnicas utilizadas pelas várias áreas do conhecimento científico para representar um sistema. Estas técnicas permitem representar, num ambiente computacional, as características de funcionamento de um arranjo físico real, obtendo dados para análise e identificação de problemas antes mesmo de sua ocorrência. Além disso, na maioria das vezes apresenta um custo baixo em relação a situação real. Os dados obtidos em simulações permitem comparar e identificar, entre as soluções possíveis, as mais indicadas e viáveis de aplicação em uma determinada configuração.

Geralmente no ramo da engenharia elétrica são utilizadas duas técnicas para análise do funcionamento de um sistema: o domínio da frequência e o domínio do tempo. O estudo no domínio da frequência é baseado na superposição dos efeitos e, é utilizado principalmente para análises de operação quando em regime permanente. A técnica no domínio do tempo é indicada quando se deseja observar variações que ocorrem em regime transitório. Existem no mercado várias plataformas disponíveis para esse estudo, sendo algumas gratuitas, dentre as quais se destacam: ATP, SABER, MATLAB, PSPICE, EWB, entre outras. O programa EMTP foi o escolhido para este trabalho por ser bastante utilizado na área científica e oferecido de forma gratuita.

O desenvolvimento do programa EMTP (*Eletromagnetic Transient Program*) iniciou-se a partir da década de 60, com o passar dos anos, o programa foi sofrendo alterações de diversos colaboradores do mundo todo, tornando-se uma ferramenta poderosa em estudos de transitórios em sistemas elétricos. Em 1984 foi criada uma

nova versão do EMTP, denominada ATP - *Alternative Transient Program*, que constitui a continuação das versões anteriores do programa [38].

O ATP, sempre se mostrou um programa de difícil manejo, entretanto, durante os últimos anos foram desenvolvidos vários programas de apoio que têm facilitado a sua utilização para qualquer tipo de usuário. Entre as facilidades mais recentes podem ser citadas as novas versões do pré-processador gráfico ATPDraw, o programa de suporte LCC e o programa gráfico PLOTXY, além das diferentes opções de versões para o próprio ATP [39]. O software utiliza a transformação dq0 para representar uma máquina trifásica simétrica.

Este capítulo tem por objetivo apresentar a simulação computacional no domínio do tempo, utilizando o software ATP, de um sistema de bombeamento, acionado por um motor de indução trifásico, alto rendimento, de 1,5 CV, 2 pólos. Os resultados registrados nas medições e informações disponibilizados pelo fabricante do motor serão utilizados como base para comparação com valores fornecidos obtidos computacionalmente. O objetivo de validar o modelo computacional proposto e justificar o seu uso no estudo do sistema de bombeamento instalado no laboratório de Sistemas Motrizes (Lamotriz) da Universidade Federal de Uberlândia. Esse modelo poderá ser aplicado em outro laboratório com características semelhantes.

4.2 – Modelo de análise da máquina de indução – dq0.

A máquina de indução trifásica com barras do rotor curto-circuitado apresenta estruturas magnéticas cilíndricas tanto do estator como no rotor. Os enrolamentos do estator são iguais entre si e igualmente defasados. Normalmente o número de fases do rotor tipo gaiola é superior a três. O estudo da máquina simétrica trifásica pode ser empregado para qualquer número de fases, conseqüentemente pode ser empregado para máquina com rotor curto-circuitado sem perda de generalidade. As equações obtidas são não lineares e de difícil solução. Em razão disso foram desenvolvidas técnicas baseadas em transformações lineares, com o objetivo de estabelecer modelos mais simples.

Para representar matematicamente a máquina de indução trifásica há a necessidade de algumas hipóteses simplificadoras, sem as quais a formulação, se não se tornasse impossível, tornar-se-ia extremamente complexa [40].

a) os três enrolamentos do estator são iguais entre si.

- b) os três enrolamentos do rotor são iguais entre si.
- c) os ângulos elétricos entre os enrolamentos são iguais, tanto no estator quanto no rotor.
- d) o entreferro é considerado constante.
- e) o circuito magnético é considerado ideal. A saturação não é considerada.
- f) a distribuição da densidade de fluxo magnético no entreferro é radial e senoidal
- g) a máquina será considerada bipolar
- h) não serão consideradas as perdas magnéticas.

Uma das formas para análise da máquina de indução é a transformação dq0. De forma física a operação transforma a máquina simétrica trifásica numa máquina simétrica bifásica imaginária, com mesma potência mecânica, torque, velocidade e números de pólos. A alimentação pode ser não-simétrica e não senoidal, desde que a máquina seja simétrica.

Com o objetivo de simplificar ainda mais a representação da máquina trifásica simétrica, utiliza-se uma nova operação que transforma a máquina bifásica com enrolamentos estatóricos fixos e enrolamentos rotóricos girantes, em enrolamentos estatóricos fixos e rotóricos pseudo-estacionários.

Os parâmetros elétricos necessários para representar o circuito do motor podem ser obtidos através de ensaios clássicos, a vazio e a rotor bloqueado.

No pacote computacional utilizado para as simulações, o modelo de máquina de indução é baseado nos equacionamentos do motor de indução com variáveis dq0. O modelo calcula tensões e correntes e apresenta na saída grandezas elétricas por fase. As Figuras 4.1 e 4.2 mostram os circuitos equivalentes para o ramo d e q.

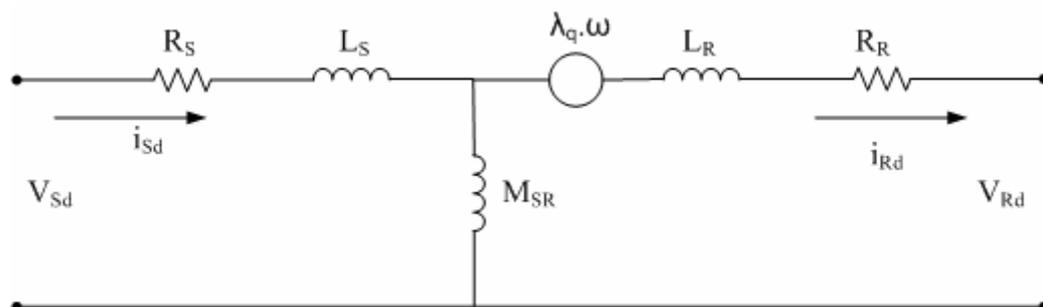


Figura 4.1 - Circuito equivalente para o eixo d

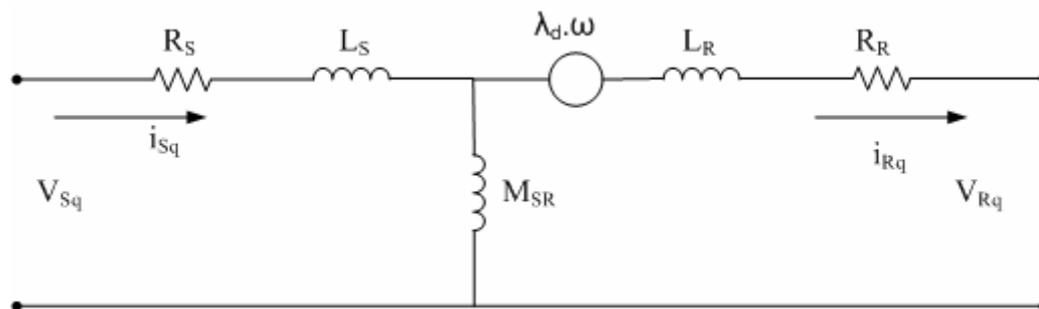


Figura 4.2 - Circuito equivalente para o eixo q.

Onde:

R_S, R_R – Resistências do estator e do rotor;

L_S, L_R – Indutância do estator e do rotor;

M_{SR} – Indutância mutua entre estator e rotor (indutância de magnetização);

$\lambda_q \cdot \omega, \lambda_d \cdot \omega$ – tensões de velocidade no eixo direto e em quadratura, respectivamente;

$V_{Sd}, V_{Rd}, V_{Sq}, V_{Rq}$ – Tensões de estator e rotor no eixo direto e quadratura.

$i_{Sd}, i_{Rd}, i_{Sq}, i_{Rq}$ – Correntes de estator e rotor no direto e quadratura.

Para representação das variáveis elétricas e mecânicas, o programa ATP utiliza algumas analogias eletromecânicas. O circuito representativo do sistema de bombeamento deve ser construído de acordo com a analogia ilustrada na Tabela 4.1. Algumas dessas representações serão bastante utilizadas neste capítulo. O torque no eixo do motor é representado por uma corrente no sentido da terra de referência para o motor, a unidade é o N.m. A velocidade angular é representada pela tensão nos terminais de saída do motor, unidade rad/s. O momento de inércia do motor é indicado por uma capacitância para a terra de referência, unidade kg.m^2 . O amortecimento viscoso representa as perdas, indicadas por resistência, ligado entre a terra de referência e os terminais de saída do motor, unidade W.

Tabela 4.1 – Analogia de grandezas eletromecânicas

Grandeza mecânica	Grandeza elétrica
T (torque)	I (corrente no nó)
ω (velocidade angular)	V (tensão no nó)
θ (ângulo)	q (carga do capacitor)
J (momento de inércia)	C (capacitância para a terra)
K (constante de mola)	$1/L$ (inverso de indutância)
D (amortecimento viscoso)	$1/\Omega$ (condutância)

A Figura 4.3 mostra a mesma relação, assim como as equações representativas de cada analogia.

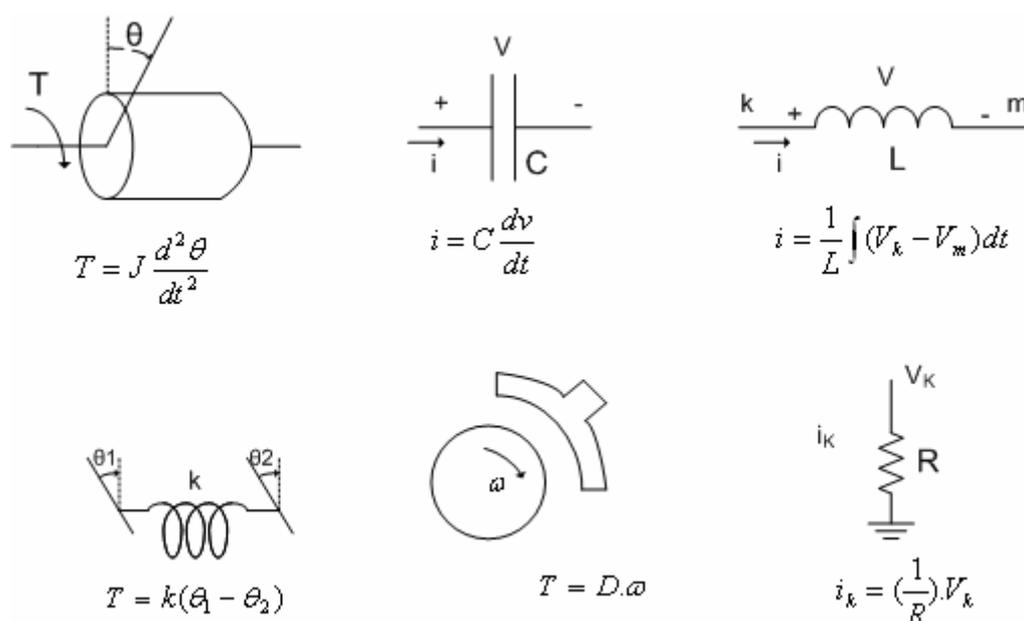


Figura 4.3 – Analogia eletromecânica utilizada pelo ATP

4.3 – Configuração do sistema de bombeamento.

4.3.1 – Determinação dos parâmetros elétricos e mecânicos do motor de indução Trifásico – MIT

Os parâmetros utilizados para configuração do motor de indução no software ATP foram obtidos de dados de placa, através de consulta a catálogos técnicos do fabricante, medição de resistência do estator, ensaio com o rotor livre e ensaio com o rotor bloqueado com tensão reduzida. O motor utilizado como fonte é um motor de indução trifásico de alto rendimento, marca WEG. Algumas informações da máquina girante foram retiradas do *site* do fabricante [41].

As principais informações do motor de indução da linha de alto rendimento estão relacionadas na Tabela 4.2. A metodologia utilizada para cálculo dos parâmetros do circuito equivalente, não estão detalhados neste trabalho, mas podem ser encontrados, por exemplo, nas referências [42,43].

Tabela 4.2 - Dados do MIT de alto rendimento.

P(cv)	n(rpm)	V(V)	In(A)	Ip/In	Cn(Nm)	Cp/Cn	Cmáx/Cn	J (Kg.m ²)	η(%)	FP
1,5	3390	220	4,02	7,5	3,09	3,1	3	0,00096	82,5	0,87

Os valores de grandezas elétricas encontradas durante os ensaios com rotor livre e rotor bloqueado estão relacionados nas Tabelas 4.3 e 4.4.

Tabela 4.3 – Ensaio com o rotor livre.

Tensão (V)			Corrente (A)			Potência ativa (W)				Potência aparente (VA)			
AB	BC	CA	A	B	C	A	B	C	total	A	B	C	total
220,3	220,0	220,1	1,7	1,7	1,7	32,0	37,0	28,0	97,0	206,0	215,0	213,0	634,0

Tabela 4.4 – Ensaio com o rotor bloqueado.

Tensão (V)			Corrente (A)			Potência ativa (W)				Potência aparente (VA)			
AB	BC	CA	A	B	C	A	B	C	total	A	B	C	total
46,3	45,6	45,4	4,0	4,1	4,0	64,0	71,0	63,0	198,0	103,0	112,0	106,0	321,0

Os parâmetros utilizados para configurar o circuito equivalente do motor de alto rendimento no programa ATP, estão indicados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Parâmetros do circuito equivalente.

Rs (Ω)	Ls (H)	Rr (Ω)	Lr (H)	Lm (H)
4,35	0,0181	6,23	0,0259	0,577

A diferença entre a potência ativa de entrada e as perdas por efeito joule na bobina do estator no ensaio com o rotor livre, corresponde às perdas em vazio. Essas estão relacionadas às perdas por atrito e ventilação (perdas mecânicas) e no núcleo (histerese e correntes parasitas). As equações (4.1) e (4.2) permitem estimar essas perdas.

$$W_{\text{vaz}} = P_0 - W_0 \quad (4.1)$$

$$W_{\text{vaz}} = P_0 - 3 \times R_s \times I_0^2 \quad (4.2)$$

Onde:

W_{vaz} – perdas a vazio

P_0 – potência ativa total de entrada a rotor livre (Tabela 4.3).

W_0 - perdas por efeito joule no estator.

R_s - resistência do enrolamento do estator

I_0 – corrente de linha média a rotor livre (Tabela 4.3)

Substituindo os valores de variáveis elétricas medidas e obtidas através de ensaios pode-se calcular as perdas a vazio: $W_{\text{vaz}} = 97,00 - 3 \times 4,35 \times 1,7^2 = 59,29 \text{ W}$.

Segundo a referência [45], o conjugado com o motor a rotor livre pode ser calculado em função da potência e da velocidade síncrona. O torque do motor a rotor livre é calculado utilizando-se da equação (4.3).

$$T_0 = \frac{W_{vaz}}{\omega_0} \quad (4.3)$$

Onde:

T_0 - Torque resistente a vazio do motor.

ω_0 – velocidade síncrona do motor em rad/seg.

W_{vaz} – potência referente a perdas a vazio.

$$T_0 = \frac{W_{vaz}}{\omega_0} = \frac{59,29}{376,99} = 0,157 \text{ N.m}$$

Para representar as perdas a vazio no aplicativo ATPDraw, seguindo a analogia mostrada na Tabela 4.1, basta inserir uma resistência ligada ao terra de referência. A resistência utilizada foi calculada através da expressão (4.4).

$$R_0 = \frac{\omega\omega}{T_0} \quad (4.4)$$

Onde:

R_0 – resistência representando perdas a rotor livre.

$$R_0 = \frac{\omega\omega}{T_0} = \frac{376,99}{0,157} = 2401,22 \Omega.$$

4.3.2 – Determinação dos parâmetros mecânicos da carga

No sistema de bombeamento a carga ligada ao eixo do motor é uma bomba centrífuga. Uma das formas de representar essa carga no programa ATP é através de uma função matemática. Neste trabalho optou-se por representar essa carga através de uma rotina *Transient Analysis of Control Systems* (TACS). Uma maneira de obter essa função é levantar a curva torque versus velocidade. A metodologia utilizada para levantar os dados, foi variar a vazão do sistema desde zero até a vazão de 3,1 m³/h. O acionamento foi realizado pelo inversor de frequência. As informações de velocidade e torque foram registradas pelo torquímetro e medidor de velocidade, respectivamente, e enviados para o supervisor. Os dados foram tratados e corrigidos para a condição de acionamento direto do motor. A Tabela 4.6

mostra os valores de torque e velocidade levantados através de ensaios na bomba centrífuga instalada no laboratório Lamotriz da Universidade Federal de Uberlândia.

Tabela 4.6 – Velocidade x Torque da bomba centrífuga

ω (rad/seg)	torque (N.m)	ω (rad/seg)	torque (N.m)
350,602	2,692	270,588	1,327
349,161	2,678	269,339	1,276
347,720	2,602	263,576	1,173
345,799	2,551	255,315	1,122
345,319	2,539	252,337	1,071
344,838	2,449	242,059	1,020
342,725	2,398	244,076	0,969
336,385	2,194	236,488	0,918
334,945	2,143	224,289	0,867
330,430	2,041	223,809	0,816
325,627	1,990	218,141	0,765
302,574	1,786	204,886	0,714
298,540	1,735	195,953	0,663
292,200	1,684	157,338	0,612
289,126	1,633	154,361	0,408
291,336	1,582	119,973	0,204
282,114	1,531	19,883	0,102
279,425	1,429	9,317	0,102
277,696	1,378	6,916	0,102

Um gráfico representando a velocidade no eixo x e o torque no eixo y pode ser visto na Figura 4.4.

Os dados da Tabela 4.6 foram interpolados no programa Matlab, para obtenção da função da carga resistente (bomba centrífuga). A função encontrada permite simular a carga no programa ATP, ora representado pela expressão (4.5).

$$T = 0,00002969\omega^2 - 0,003686\omega + 0,1793 \quad (4.5)$$

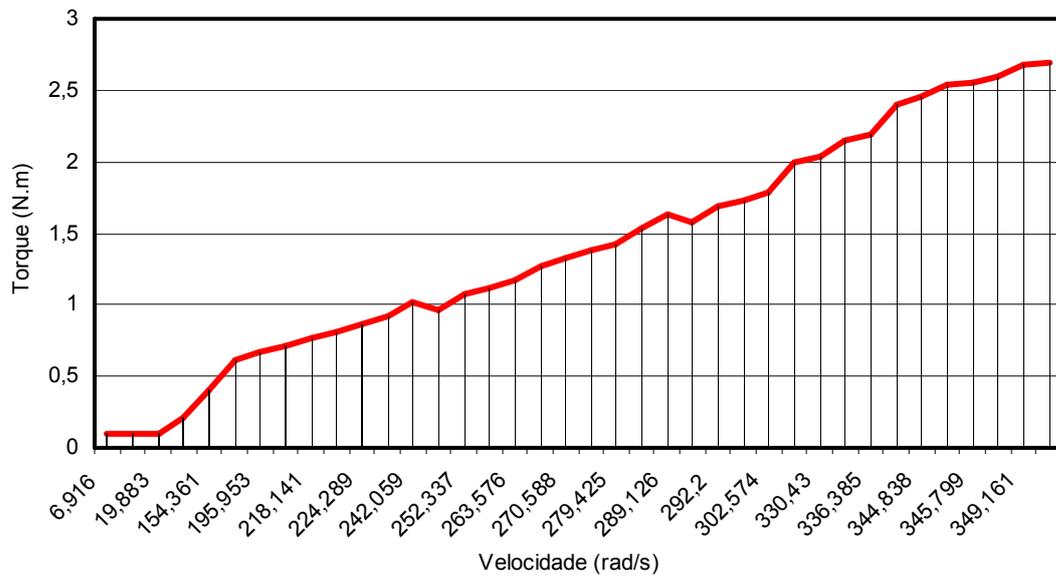


Figura 4.4 – Curva TxV do sistema de bombeamento

Segundo a referência [18], para verificar se um motor consegue acionar uma carga, para dimensionar o equipamento de partida e sistema de proteção, é necessário conhecer o tempo de aceleração do motor.

O tempo de aceleração do motor pode ser determinado de maneira aproximada pelo conjugado médio de aceleração. A expressão (4.6) permite calcular esse tempo.

$$t_a = \frac{2 \cdot \pi \cdot rps \cdot (J_m + J_c)}{C_{m\text{méd}} - C_{c\text{méd}}} \quad (4.6)$$

Onde:

t_a - tempo de partida do motor em segundos.

rps – rotação do motor em rotações por segundo.

J_m – momento de inércia do motor em kgm^2

J_c – momento de inércia da carga referida ao eixo do motor em kgm^2

$C_{m\text{méd}}$ – Conjugado médio do motor em N.m.

$C_{c\text{méd}}$ – Conjugado médio da carga em N.m

O valor do conjugado médio do motor durante a aceleração com tensão plena pode ser estimado pelas relações [3]:

a) Motores de categoria N:

$$C_{m\text{méd}} = 0,5 (C_p + C_{m\text{máx}})$$

b) Motores de categoria N:

$$C_{m\text{méd}} = 0,4 (C_p + C_{m\text{máx}})$$

b) Motores de categoria N:

$$C_{m\text{méd}} = 0,6 (C_p + C_{m\text{máx}})$$

A Tabela 4.2 fornece os valores de conjugado nominal (C_n), conjugado de partida (C_p), conjugado máximo ($C_{m\text{máx}}$) e momento de inércia do motor. De posse desses valores chega-se ao valor de $C_{m\text{méd}}$.

$$C_{m\text{méd}} = 0,5(3,0 + 3,1) \times 3,09$$

$$C_{m\text{méd}} = 9,42 \text{ N.m.}$$

O valor de $C_{c\text{méd}}$ pode ser facilmente determinado, através das médias dos valores de torque relacionado na Tabela 4.4.

$$C_{c\text{méd}} = 1,4 \text{ N.m}$$

A maior dificuldade para determinar o tempo de partida do motor, é o conhecimento do valor do momento de inércia da carga. O tempo de partida do motor foi estimado através de medições realizadas com o analisador de energia Embrasul. Considerando um tempo de partida de $5\text{s} \pm 1\text{s}$, e aplicando os parâmetros já conhecidos na expressão 4.5, determina-se o momento de inércia da carga.

$$J_c = 0,11273 \text{ kgm}^2.$$

Como o motor na partida tem que vencer a inércia da carga e do próprio motor, o momento de inércia a ser vencido na partida é de $J_t = 0,11369 \text{ kgm}^2$. O valor do capacitor para representar o momento de inércia do motor-carga no ATP, deverá ser de $C = 113690 \mu\text{F}$.

4.4 – Representação do sistema de bombeamento no ATP

A configuração do sistema de bombeamento no software ATP se faz através da interface ATPDraw. A interface possui vários componentes, tais como: fonte, máquinas, chaves, transformadores, medidores, entre outros. Essa grande gama de componentes permite representar vários elementos presentes no sistema elétrico.

4.4.1 – Configuração do sistema de bombeamento no programa ATPDraw.

A configuração do circuito utilizado para representar o sistema de bombeamento do Lamotriz instalado na Universidade Federal de Uberlândia, sob carga, pode ser vista na Figura 4.5. O circuito pode ser adaptado para simular o sistema de bombeamento na condição de rotor livre, rotor bloqueado e sob carga. As fontes de alimentações também podem ser substituídas facilmente, com o objetivo de verificar o comportamento do sistema motor-bomba nas condições de alimentação com tensão senoidal simétrica e equilibrada, distorção harmônica equilibrada ou não, alimentação com tensão senoidal desequilibrada em módulo e ângulo.

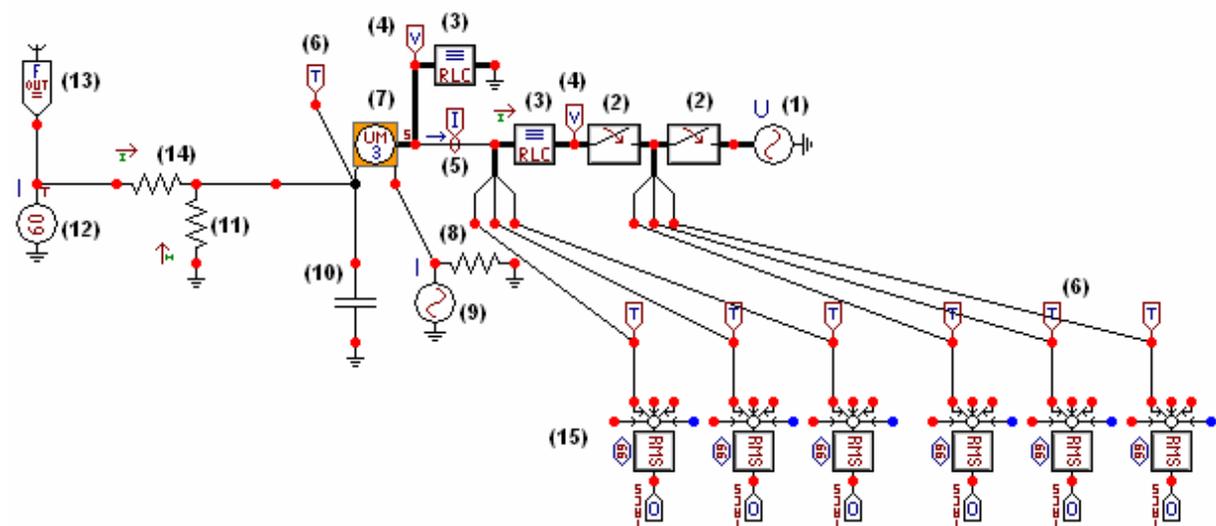


Figura 4.5 – Representação do sistema de bombeamento no ATP

Os componentes utilizados para configurar o circuito do sistema de bombeamento foram:

- (1) fonte trifásica *sources-Ac3ph, type 14*;
- (2) chave trifásica *Switch time 3-ph (SWIT_3XT)*;
- (3) componente *Branch Linear – RLC3-ph*;
- (4) componente voltímetro trifásico *probe volt*;
- (5) componente amperímetro trifásico *prob Curr*;
- (6) componente *probe TACS - EMTP_OUT*;
- (7) motor trifásico de indução *Machines – UM3-indution*;
- (8) componente *Branch linear – resistor* ; resistância elevada.
- (9) componente fonte monofásica *sources-Ac1ph, type 14* utilizada para inicialização e magnetização prévia, valor pequeno (-1×10^{-5} A);

- (10) componente *Branch linear – capacitor*, representando a inércia do sistema;
- (11) componente *resistor.sup*, representado as perdas por atrito e ventilação.
- (12) componente *Tacssour.sup*, fonte de corrente representando a carga.
- (13) componente *TACS - FORTRAN1*, utilizado para reproduzir a função quadrática, característica da bomba centrífuga;
- (14) componente *Branch linear – resistor* ; resistência baixa.
- (15) componente *TACS – DEVICE66*, utilizado para converter valor de sinal instantâneo em valor de sinal RMS.

4.4.2 – Inserção dos parâmetros do motor de indução trifásico

A entrada dos parâmetros do motor de indução se faz através do acesso ao componente UM_3.sup. São necessários preencher os dados das abas: *General*, *Magnet*, *Stator*, *Rotor* e *Init*. As informações são inseridas para o eixo direto e em quadratura (d e q). Uma das telas desse componente pode ser visto na Figura 4.6.

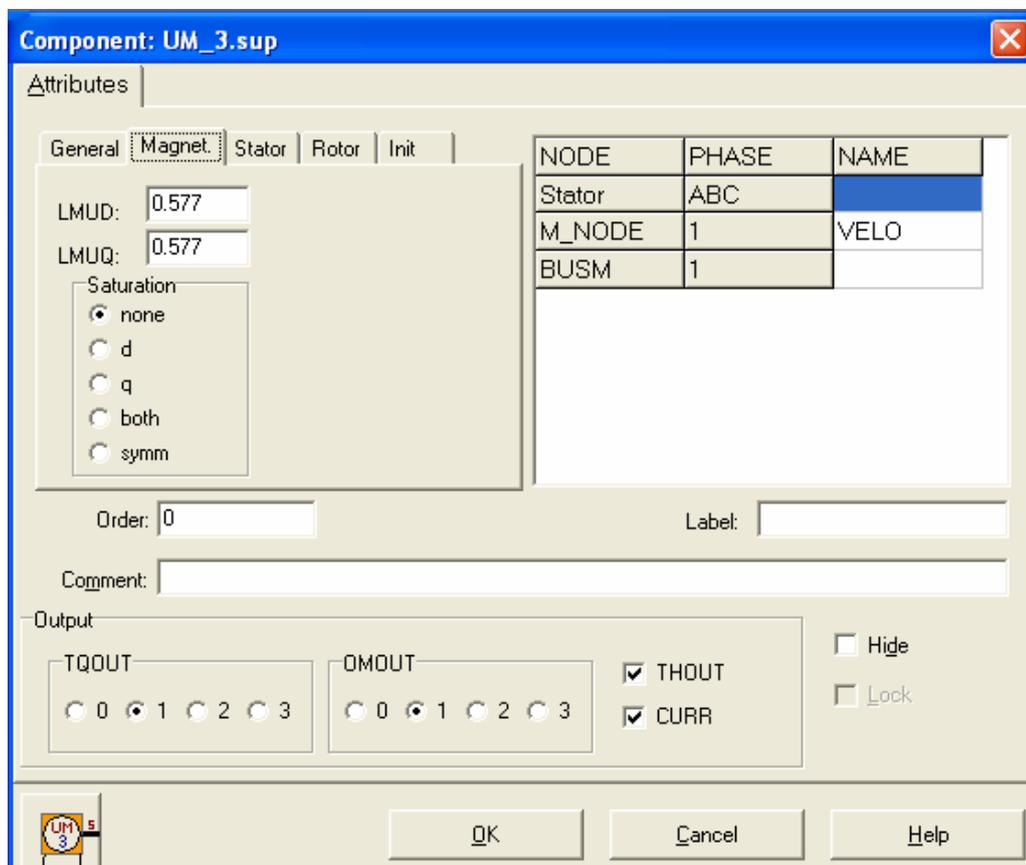


Figura 4.6 – Janela de configuração do motor

4.4.3 – Configuração dos parâmetros de carga.

Para esta simulação o circuito utilizado para representar o sistema de bombeamento, está mostrado na Figura 4.5. A resistência utilizada para representar as perdas por atrito e ventilação foi calculada através da expressão (4.4). A representação do momento de inércia motor-carga foi configurada, com o valor de $C = 113690 \mu\text{F}$. A carga foi configurada através da rotina TACS (item 13 – Figura 4.5) cuja expressão foi determinada na seção 4.3.2. Para inserir a perda de carga devido ao estrangulamento de válvula é inserido na rotina um valor R para cada taxa de estrangulamento. A expressão (4.5) foi modificada para representar o estrangulamento. A fórmula (4.7) permite representar a carga para situação de controle de vazão por estrangulamento de válvula.

$$T = (0,00002969\omega^2 - 0,003686\omega + 0,1793) - R \quad (4.7)$$

A Figura 4.7 traz uma cópia da tela utilizada para inserção da expressão. A expressão matemática para perda de carga deve ser setado, com sinal invertido, isto porque, no ATP a simulação de carga é representada através de corrente fluindo no sentido do terra de referência para o motor.

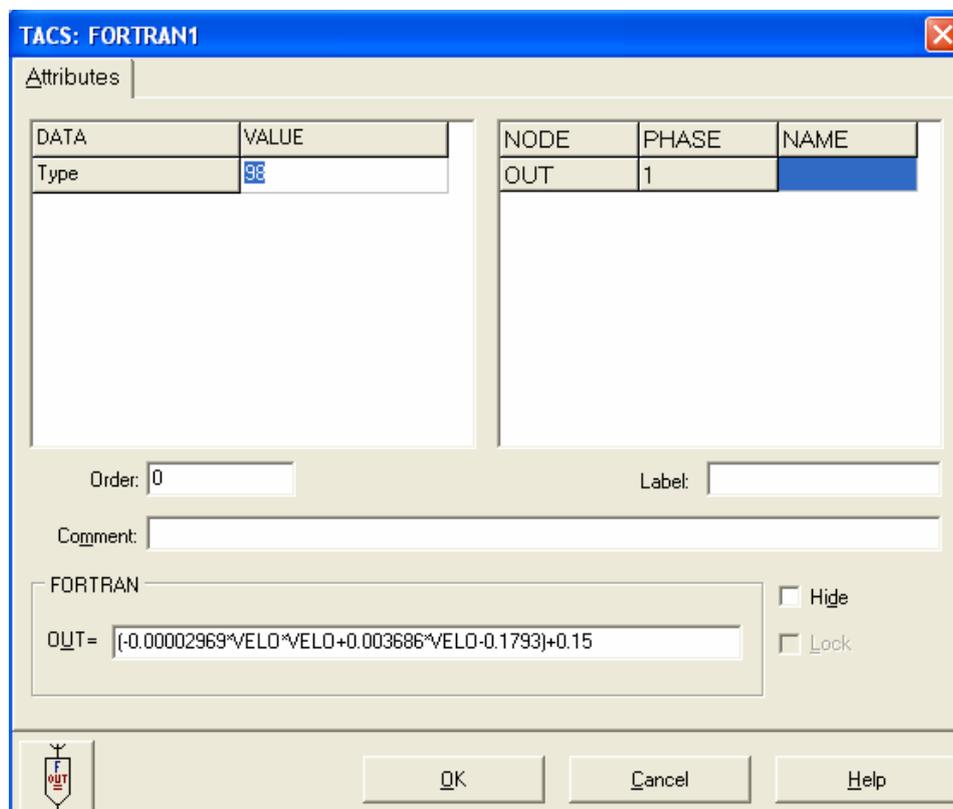


Figura 4.7 – Tela da rotina TACS.

Os valores de R utilizados para representar o estrangulamento foram:

- R = 0 - válvula aberta 100%;
- R = 0,15 - válvula aberta 85%;
- R = 0,40 - válvula aberta 60%;
- R = 0,68 - válvula aberta 32%.

4.5 – Simulações computacionais realizadas

O objetivo desta seção é obter valores de variáveis, elétricas e mecânicas do motor através de simulações computacionais, para posterior comparação e validação com valores encontrados durante ensaios laboratoriais.

4.5.1 – Simulação do sistema de bombeamento com carga.

A bomba centrífuga ligada ao eixo do motor representa uma carga mecânica menor que a carga nominal do motor, em razão disso os parâmetros elétricos e mecânicos, utilizados para comparação foi a registrada durante os ensaios laboratoriais. As simulações foram realizadas com aplicação na entrada do motor de tensão senoidal trifásica simétrica, equilibrada, tensões com distorções harmônicas e tensões desequilibradas, assimétrica em módulo e ângulo. A forma de variação da vazão foi realizada utilizando a técnica de estrangulamento de válvula. As aberturas de válvulas simuladas foram de 100%, 85%, 60% e 32%, para isso fez-se uso da rotina TACS.

4.5.1.1 – Alimentação senoidal simétrica e equilibrada, abertura de válvula 100%.

A tensão aplicada na entrada do motor está representada na Figura 4.8. Convém observar que nas outras aberturas de válvula a tensão fornecida ao motor foi a mesma vista nesta figura. As formas de onda se referem à tensão entre fases em função do tempo. Para configuração da tensão de alimentação no ATP, é necessário entrar com a tensão de pico entre fase e neutro.

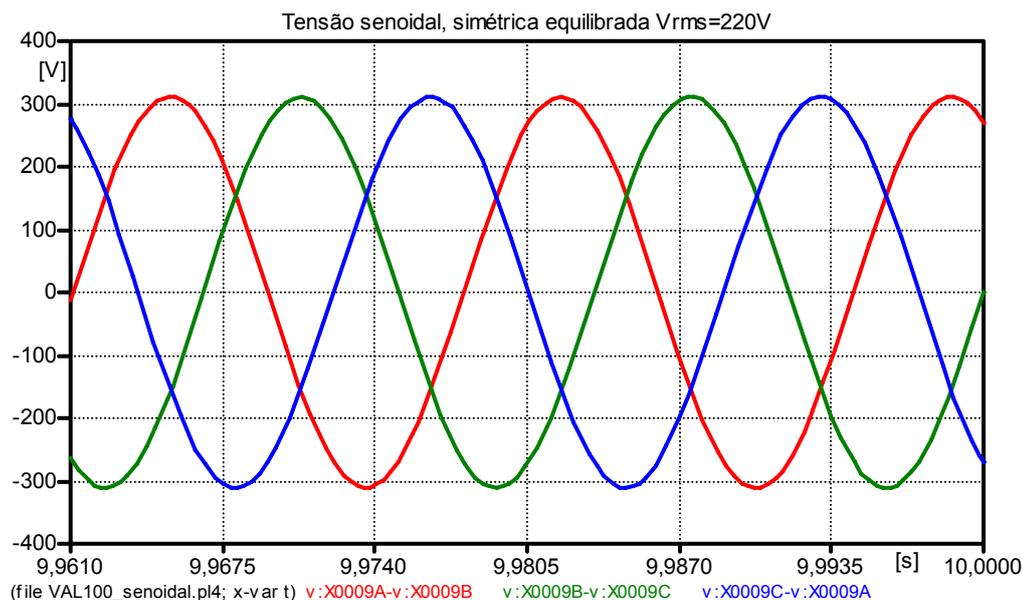


Figura 4.8 – Tensão senoidal de alimentação do motor.

A corrente desde a partida até o regime está presente na Figura 4.9. A corrente nominal que consta nos dados de placa é de 4,01 A, a relação I_p/I_n é de 7,5. A corrente de partida segundo projeto do fabricante é de 30 A.

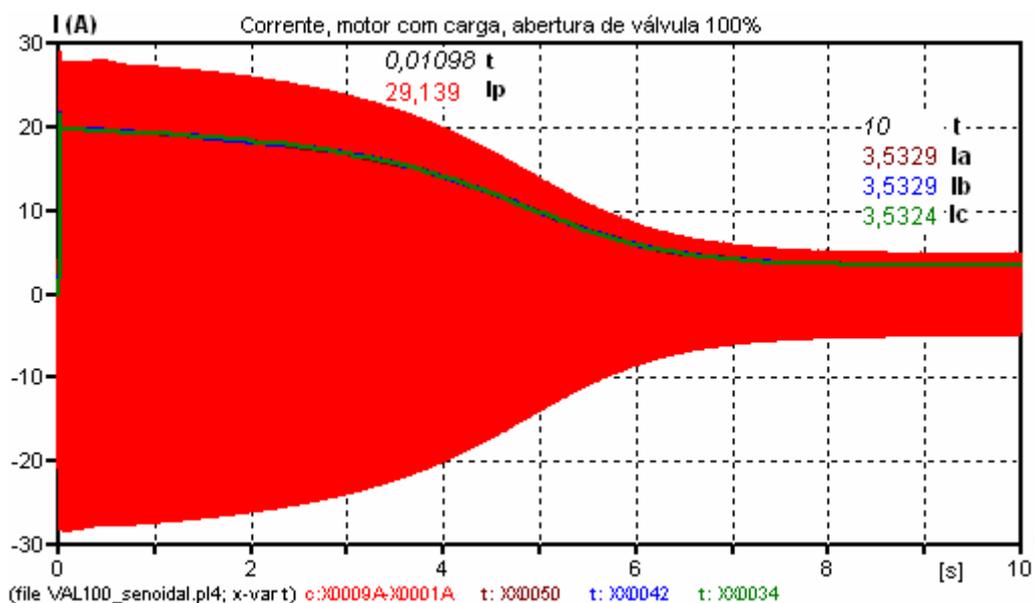


Figura 4.9 – Correntes do motor com carga, abertura de válvula 100%.

Observa-se na forma de onda gerada durante a simulação, que a corrente de partida registrada foi de 29,14 A. A corrente de partida obtido na simulação aproximou-se do valor de projeto do fabricante. A corrente em regime se mostrou próximo do valor registrado durante ensaios laboratoriais. O tempo desde a partida

até o motor atingir o regime foi de aproximadamente 8 segundos. O tempo estimado segundo ensaios realizados foi de 5 ± 1 segundo. A Tabela 4.7 relaciona os valores de correntes de pico, partida e regime obtidos na simulação.

Tabela 4.7 – Correntes obtidos computacionalmente, alimentação ideal, válvula aberta 100%.

Ip (pico)	Ireg (pico)	Ireg (rms)
29,14 A	4,99 A	3,53 A

A Figura 4.10 mostra a potência fornecida ao sistema de bombeamento. Os valores mostrados na figura foram obtidos do produto $V_F(\text{rms}) \times I_L(\text{rms})$. A soma dos valores por fase, somados fornecem a potência aparente total fornecida ao motor. O valor de 1346,08 VA simulado, esta próximo do registrado pelo medidor de grandeza elétrica durante os ensaios laboratoriais, ou seja, 1339,78 VA.

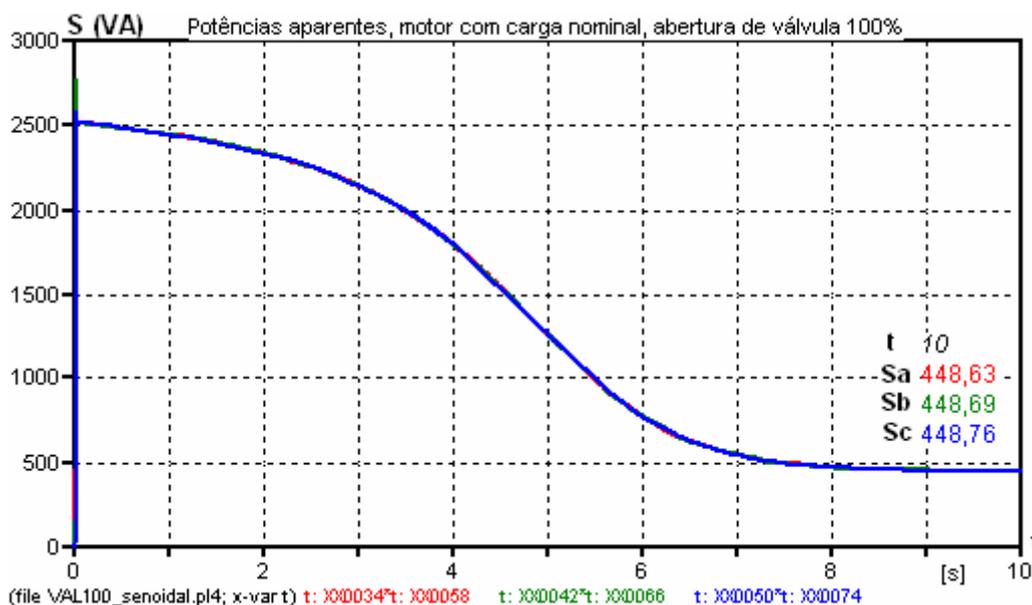


Figura 4.10 – Potências aparentes, motor sob carga, válvula aberta 100%

O torque mecânico em função do tempo, durante a operação da bomba com válvula totalmente aberta, está registrado na Figura 4.11. O torque de partida e o torque máximo estiveram próximo da condição nominal. O torque em regime e o tempo de partida sofreram alterações em virtude da carga acoplada ao eixo.

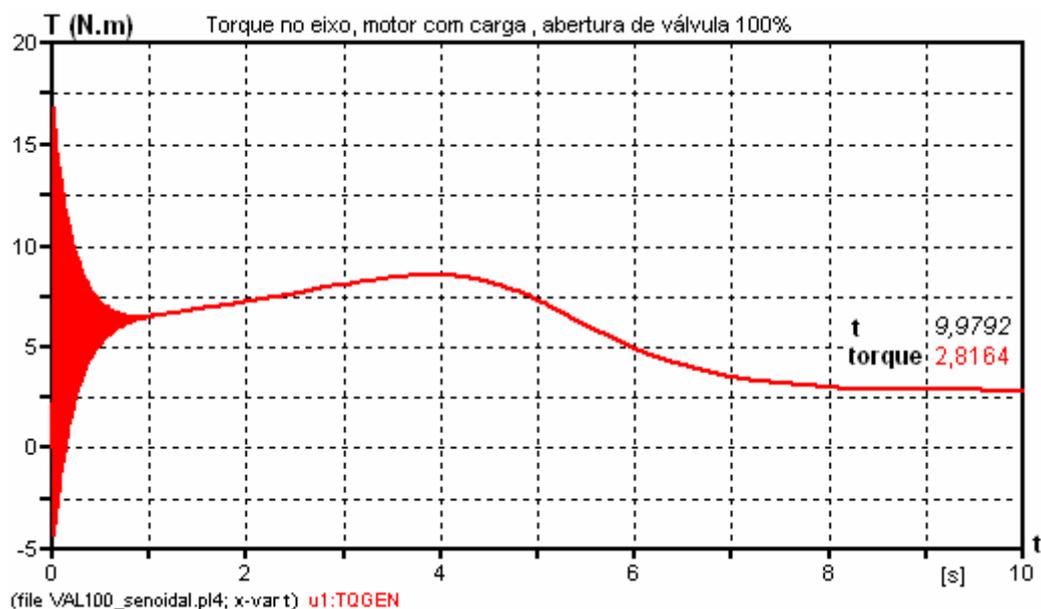


Figura 4.11 – Torque no eixo do motor sob carga, abertura de válvula 100%

A Tabela 4.8, relaciona os torques de partida, máximo e em regime observado no sinal. O valor de torque em regime obtido computacionalmente 2,816 N.m, se aproxima com boa precisão do valor encontrado em laboratório 2,692 N.m. O valor registrado em laboratório, assim como o encontrado no ATP é menor que o valor de torque nominal do motor, isto se deve ao fato da carga acoplada ao eixo necessitar de potência mecânica inferior a potência mecânica nominal do motor.

Tabela 4.8 – Torques obtidos computacionalmente, alimentação ideal, abertura de válvula 100%

Cp (N.m)	Cmáx (N.m)	Creg (N.m)
11,87	8,59	2,82

O gráfico da Figura 4.12, apresenta a variação da velocidade no tempo desde a partida até a situação de regime. No laboratório a velocidade medida foi de 3348 rpm, inferior a velocidade nominal do motor de 3390 rpm. Na simulação computacional, o valor encontrado de 357,1 rad/s, ou seja, 3410 rpm. A comparação dos valores computacionais e laboratoriais denota que o modelo de carga utilizado no ATP está próximo da presente no laboratório Lamotriz da Universidade Federal de Uberlândia.

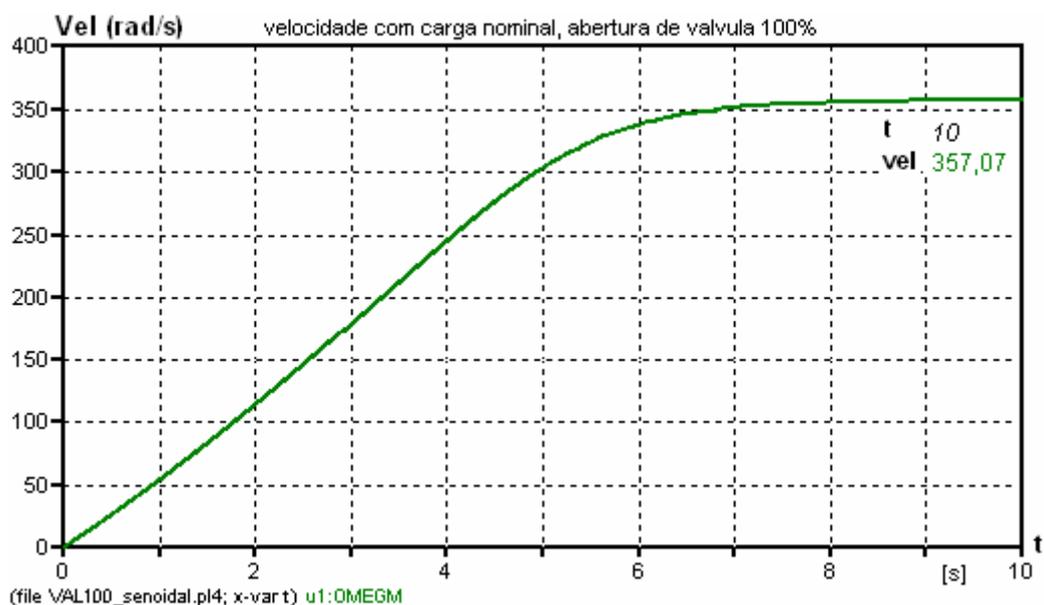


Figura 4.12 – Velocidade do motor com carga, abertura de válvula 100%.

A potência mecânica no eixo do motor, gerada através do produto do torque pela velocidade está mostrada na Figura 4.13. O valor obtido através de cálculo em laboratório foi de 943,37 W. O valor de saída gerado pela simulação em situação de regime, apresentou-se em 1005,3 W. O valor está 6,56 % acima do valor calculado, valor esse aceitável, em virtude que na situação computacional não estão incluídas todas as perdas internas do motor.

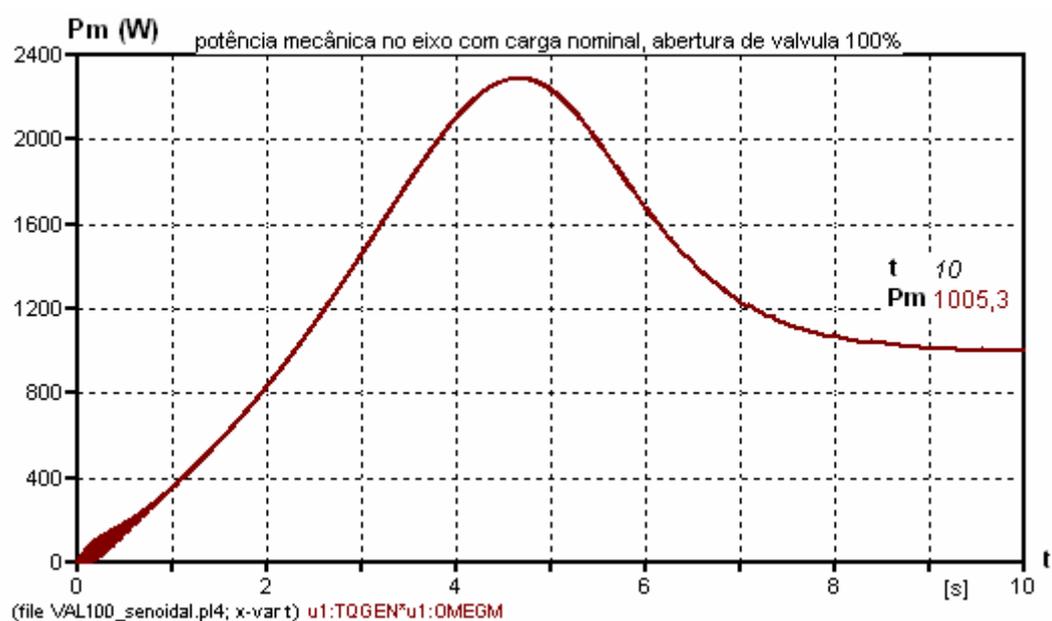


Figura 4.13 – Potência mecânica no eixo do motor, abertura de válvula 100%.

A Tabela 4.9, traz um resumo dos principais parâmetros elétricos e mecânicos obtidos por simulação na condição de regime, com válvula aberta 100%. Esses dados servem como base comparação com os valores obtidos em laboratórios e são úteis para validar a simulação.

Tabela 4.9 - Parâmetros elétricos e mecânicos simulados na condição de regime, abertura de válvula 100%.

I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	P (W)	S (VA)	T (N.m)	vel.(rad/s)	P_{eixo} (W)
3,533	3,533	3,532	1115,80	1346,08	2,816	357,07	1005,30

4.5.1.2 Alimentação senoidal simétrica e equilibrada, abertura de válvula 85%.

Na simulação do sistema de bombeamento nesta condição de carga, a rotina TACS foi configurada conforme vista na Figura 4.7. A tensão aplicada na entrada do motor foi a apresentada através da Figura 4.8.

A Figura 4.14 apresenta a corrente fornecida pela fonte ao motor para a abertura de válvula 85%. A corrente de partida praticamente não sofreu alteração. A corrente média em regime de 3,39 A gravada no gráfico, está bem próximo no obtido nos ensaios laboratoriais, seja 3,40 A.

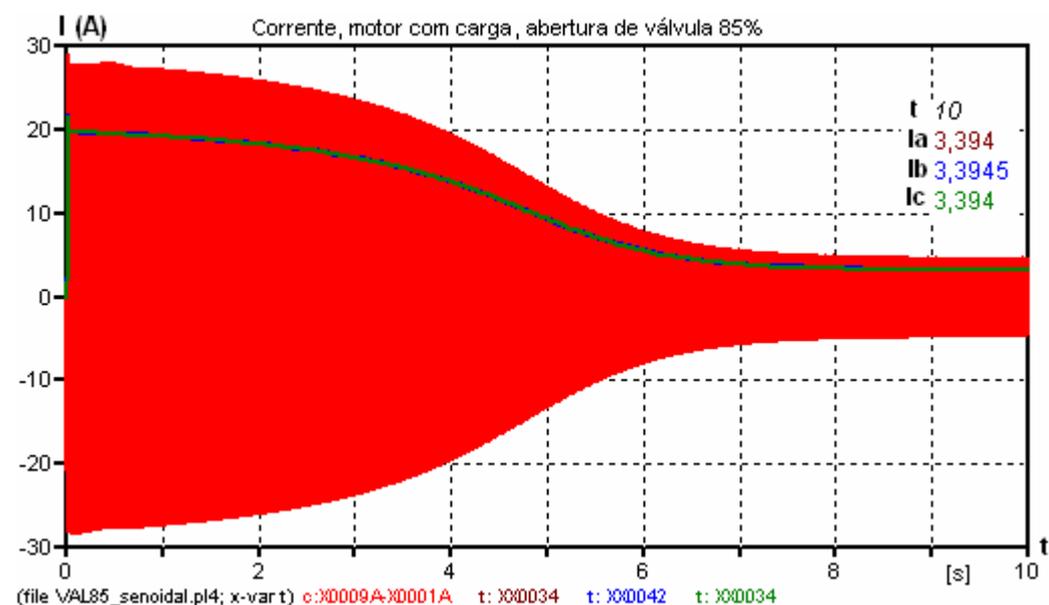


Figura 4.14 – Correntes do motor com carga, abertura de válvula 85%.

O tempo necessário para a corrente assumir o valor de regime apresentou um leve decréscimo, razão da diminuição de carga no eixo. Isso se explica porque o estrangulamento da válvula provoca perda de carga no sistema de bombeamento e isso se reflete através de pequena queda na potência exigida do motor pela bomba centrífuga e conseqüentemente diminuição de corrente de entrada e menor tempo necessário para o motor atingir a situação de regime. A Tabela 4.10 relaciona os valores de corrente obtidas através da simulação com abertura de válvula 85%.

Tabela 4.10 – Valores de corrente obtidos através de simulação com alimentação senoidal, abertura de válvula 85%

Ip (pico)	Ireg (pico)	Ireg (rms)
29,13 A	4,79 A	3,39 A

A potência aparente gerada pela simulação com abertura de válvula a 85% esta presente na Figura 4.15. A perda de carga causada pela diminuição da seção da tubulação a jusante da bomba centrífuga exige do sistema motor-bomba menor potência elétrica. O medidor de grandezas elétricas registrou durante ensaios laboratoriais 1293,55 VA de potência aparente total, as simulações mostraram potência aparente total de 1293,33 VA.

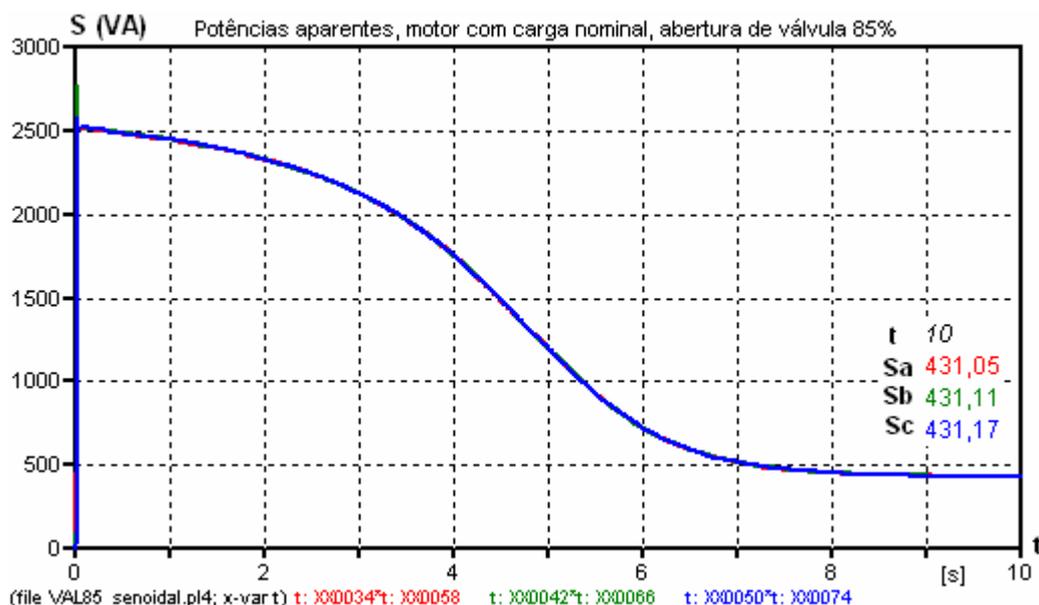


Figura 4.15 – Potências aparentes, motor com carga, abertura de válvula 85%.

O torque mecânico em função do tempo, durante a operação da bomba com válvula aberta a 85%, está registrado na Figura 4.16. O torque registrado na

situação de regime e o tempo de partida sofreram alterações em virtude da carga acoplada ao eixo.

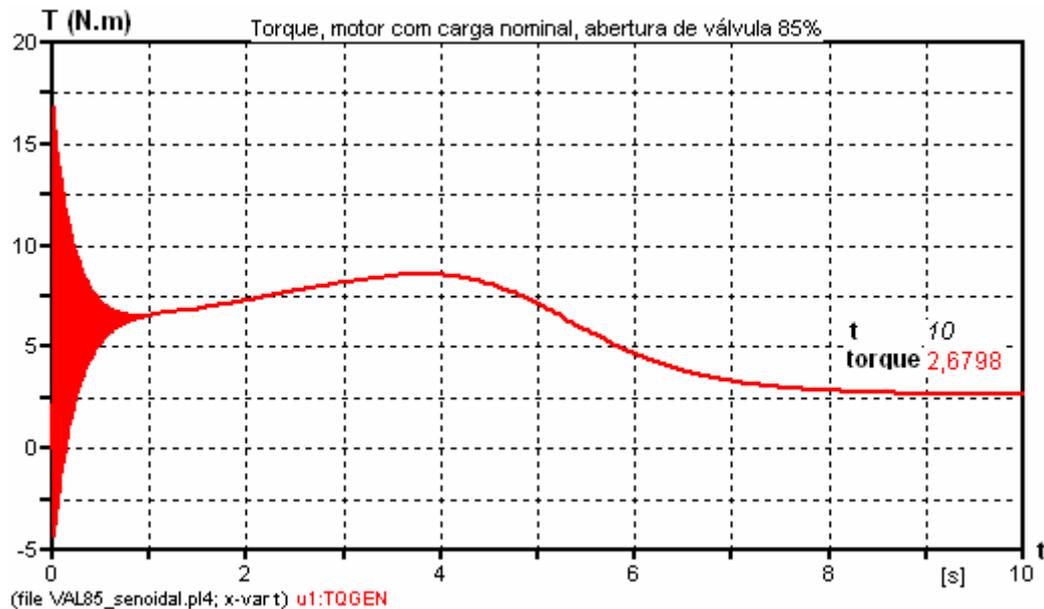


Figura 4.16 – Torque no eixo do motor sob carga, abertura de válvula 85%

Os valores numéricos do torque de partida, máximo e em regime fornecidos pelo ATP estão relacionados na Tabela 4.11. Como já esperado o valor do torque resultante da simulação em regime 2,680 N.m está bem próximo do medido em laboratório, que foi de 2,615. O controle de vazão por estrangulamento de válvula diminui a seção útil disponível para a passagem do líquido, isso por um lado diminui a vazão, mas por outro lado aumenta a pressão. Isso acarreta uma pequena diminuição na energia necessária para a bomba impelir o líquido trazendo como consequência, queda do torque.

Tabela 4.11 – Valores de torque obtidos computacionalmente com abertura de válvula 85%

Cp (N.m)	Cmáx (N.m)	Creg (N.m)
11,69	8,59	2,68

A velocidade no eixo do conjunto motor-bomba apresentou um leve aumento, conforme pode se ver na Figura 4.17. A curva do sistema se desloca para ajustar a nova vazão, a potência mecânica para manter essa vazão é menor e isto faz com que a velocidade tenha elevação. Em ensaios na bancada do sistema de

bombeamento a velocidade registrada com válvula 85% aberta foi de 3357 rpm, já na simulação computacional, esse valor esteve em 358,13 rad/s, ou seja, 3420 rpm.

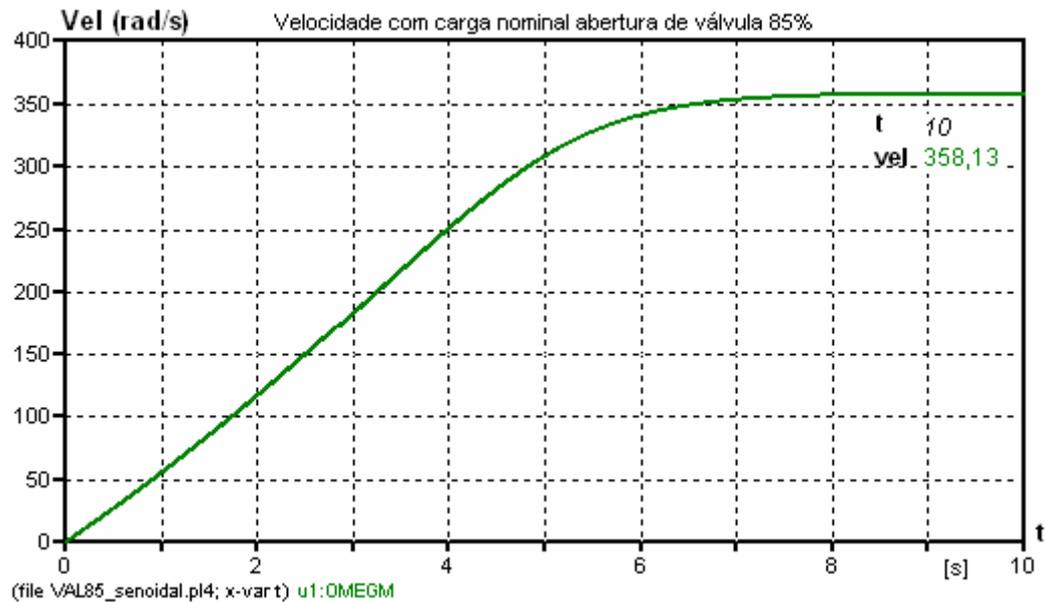


Figura 4.17 – Velocidade do motor com carga, abertura de válvula 85%

A Figura 4.18 apresenta a potência mecânica no eixo do motor, como já esperado houve uma diminuição desta motivada pelo menor torque gerado pelo motor com abertura de válvula 85%.

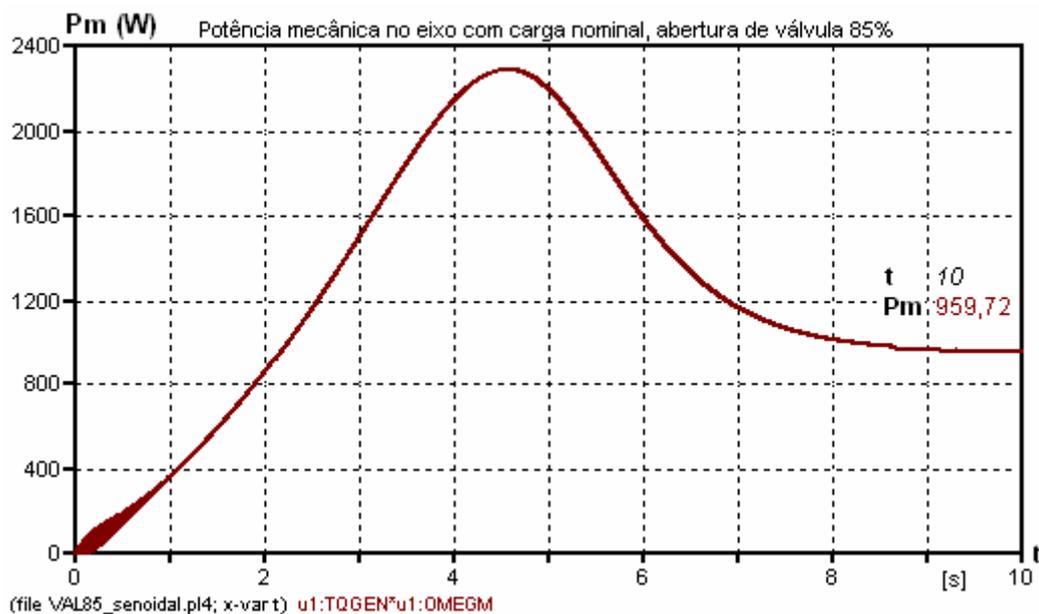


Figura 4.18 – Potência mecânica no eixo com carga, abertura de válvula 85%

A simulação forneceu na saída na condição de regime, através do produto do torque pela velocidade, 959,72 W. O valor da potência em laboratório, obtido utilizando-se cálculos foi de 918,91 W. O resultado obtido em simulação apresenta um valor a maior, em relação ao fornecidos através de dados laboratoriais. Isso se explica porque a simulação não considera todas as perdas do motor.

A Tabela 4.12 relaciona os valores de parâmetros principais do sistema de bombeamento em regime sob a condição de válvula aberta a 85% da sua capacidade de vazão.

Tabela 4.12 – Parâmetros elétricos e mecânicos, abertura de válvula 85%.

I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	P (W)	S (VA)	T (N.m)	vel.(rad/s)	P_{eixo} (W)
3,39	3,39	3,39	1060,80	1293,33	2,683	358,13	959,72

4.5.1.3 Alimentação senoidal simétrica e equilibrada, abertura de válvula 60%.

A simulação com abertura de válvula 60% foi configurada inserindo na rotina que representa a carga acoplada ao eixo. Utilizou-se para esse fim a expressão matemática (4.5), considerando o valor de $R=0,4$. Os parâmetros elétricos e mecânicos que independem da carga: corrente de partida, torque de partida, torque máximo; não apresentaram variação em relação às seus respectivos valores já mostrados em aberturas de válvulas anteriores. Os valores das grandezas elétricas e mecânicas geradas pelo ATP em situação de regime, para válvula aberta a 60% estão relacionados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Grandezas elétricas e mecânicas simuladas, abertura de válvula 60%.

I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	P (W)	S (VA)	T (N.m)	vel.(rad/s)	P_{eixo} (W)
3,17	3,17	3,17	971,00	1209,68	2,459	359,82	884,90

4.5.1.4 Alimentação senoidal simétrica e equilibrada, abertura de válvula 32%.

O valor de R configurados na rotina TACS para simular essa situação de estrangulamento foi de 0,68. Os parâmetros elétricos e mecânicos que não dependem da carga, como já esperado, não sofreram mudanças em seus valores, comparados as suas respectivas magnitudes nas faixas de estrangulamento

anteriores. A Tabela 4.14 traz as grandezas elétricas e mecânicas fornecidas pelo software, na situação de abertura de válvula 32%. Todos os valores foram coletados na condição de regime permanente do motor.

Tabela 4.14 – Grandezas elétricas e mecânicas simuladas, abertura de válvula 32%.

I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	P (W)	S (VA)	T (N.m)	vel.(rad/s)	P_{eixo} (W)
2,930	2,93	2,93	868,30	1117,46	2,205	361,71	764,62

4.5.1.5 Alimentação com presença de distorção harmônica simétrica e equilibrada, $THD_V = 5\%$, abertura de válvula 100%.

Nesta simulação o sistema de bombeamento foi alimentado com distorção harmônica equilibrada e simétrica. As distorções individuais utilizadas para configurar a fonte de tensão do ATPDraw foram as relacionadas na Tabela 3.2, representando um $THD_V = 5\%$.

A Figura 4.19 mostra os sinais de tensão e corrente capturados pelo osciloscópio e aplicados na entrada do motor. Esse sinal foi gerado pela fonte HP para condição de alimentação do sistema de bombeamento com distorção harmônica de tensão $THD_V = 5\%$.

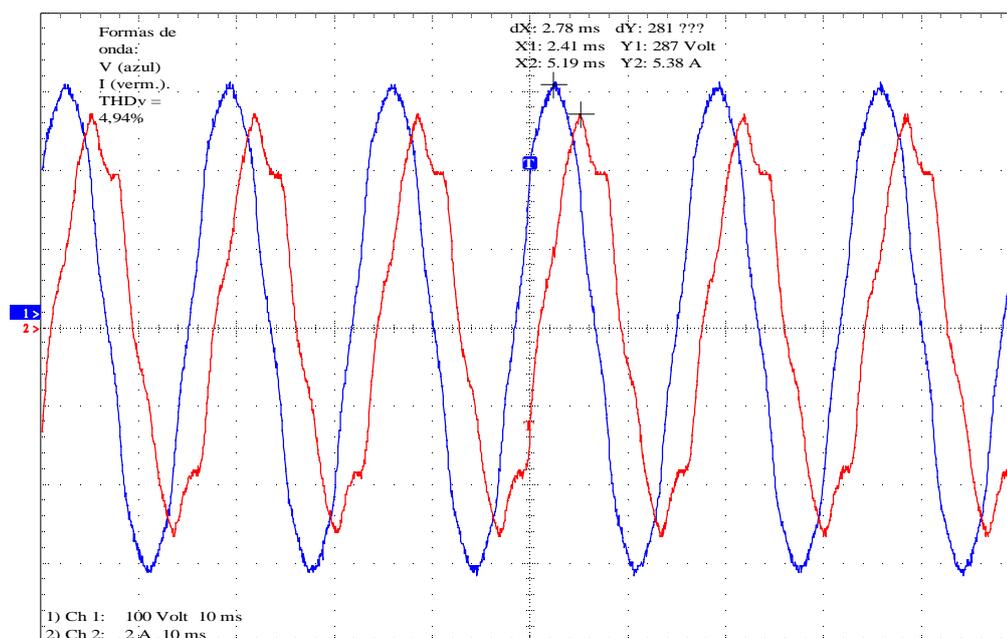


Figura 4.19 – Sinais de tensão e corrente capturadas, $THD_V = 5\%$.

Os sinais de tensão e corrente sintetizados no ATP para $THD_V=5\%$ estão evidenciados na Figura 4.20, esses sinais possuem formatos bastante próximos da situação real.

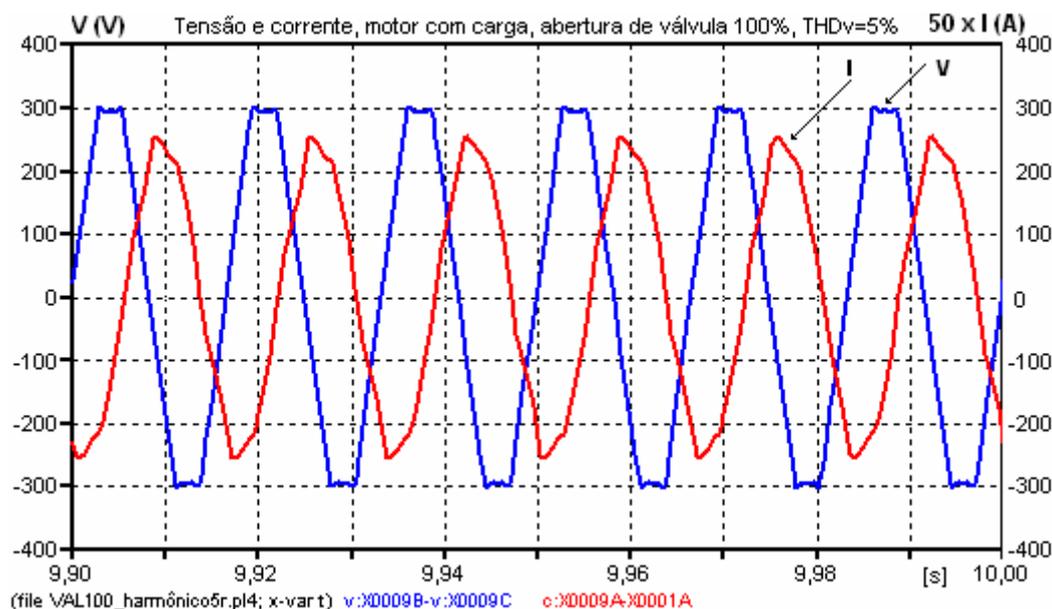


Figura 4.20 - Sinais de tensão e corrente sintetizadas no ATP, $THD_V=5\%$.

Na Tabela 4.15 estão informações numéricas das formas de ondas aplicadas pelo programa computacional na entrada do motor.

Tabela 4.15 – Valores de tensões e correntes com $THD_V=5\%$

Vpico (V)	V1rms (V)	Ipico (A)	Irms (A)
300,93	219,8	4,97	3,52

As potências aparentes resultantes da simulação com THD_V de 5%, tendo a válvula em estado de abertura 100% estão visualizadas na Figura 4.21. Os valores tiveram pequena elevação, comparado com alimentação senoidal. Esta constatação está de acordo com a expressão (2.18). Os dados obtidos nos ensaios laboratoriais também serviram para confirmar o comportamento da potência aparente na presença de distorção harmônica. A potência aparente total registrado nos ensaios laboratoriais foi de 1348,33 VA e obtidos computacionalmente foi de 1342,29 VA.

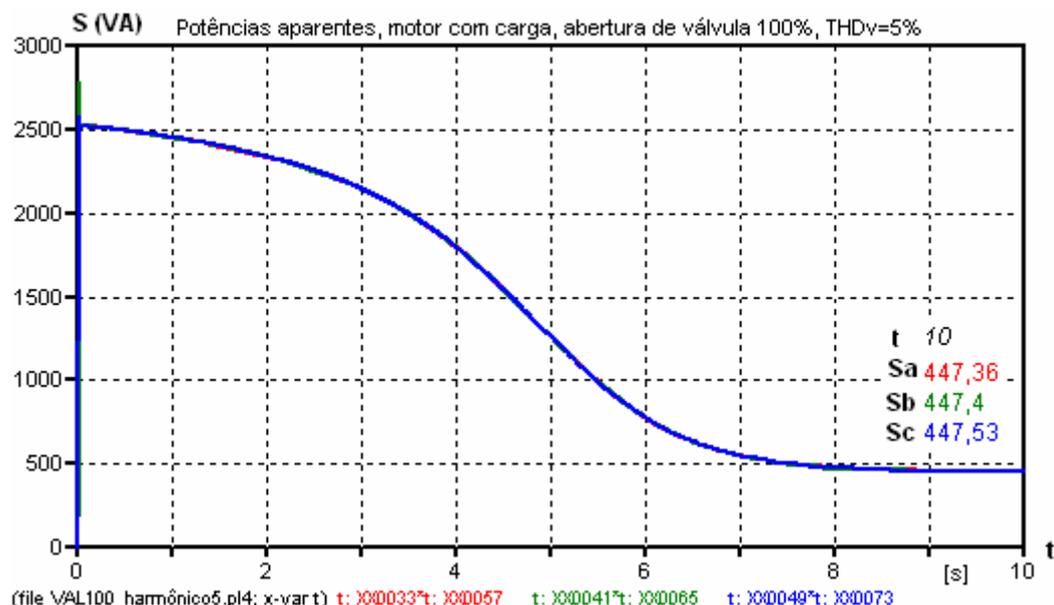


Figura 4.21 – Potências aparentes, $THD_V = 5\%$.

A Figura 4.22 mostra o torque presente no eixo do motor para a presente distorção analisada. Observa-se um torque pulsante na situação de regime permanente do motor. Os valores de torque pulsante variaram de 2,55 N.m a 3,05 N.m, enquanto que o torque resultante médio foi de 2,796 N.m. Isto vem a confirmar em simulação que a presença de distorções harmônicas na alimentação provoca vibrações no eixo do motor. Durante os ensaios laboratoriais essa vibração não foi percebida, nem foi registrada. Acredita-se devido a pouca sensibilidade do torquímetro utilizado.

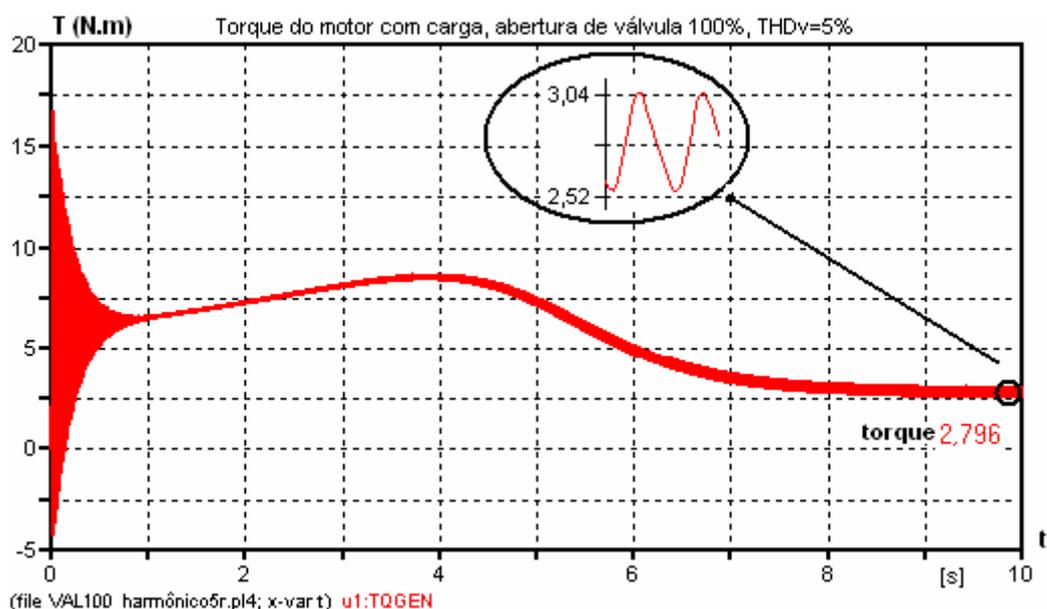


Figura 4.22 – Torque no eixo do motor, abertura de válvula 100%, $THD_V = 5\%$.

A velocidade média do motor em regime apresentou uma pequena queda, consequência da maior vibração do motor. A velocidade registrada para taxa de distorção harmônica de 5% foi de 357,21 rad/s, que convertido representa 3411 rpm. A Figura 4.23 mostra a variação de velocidade do motor desde a partida até o regime permanente.

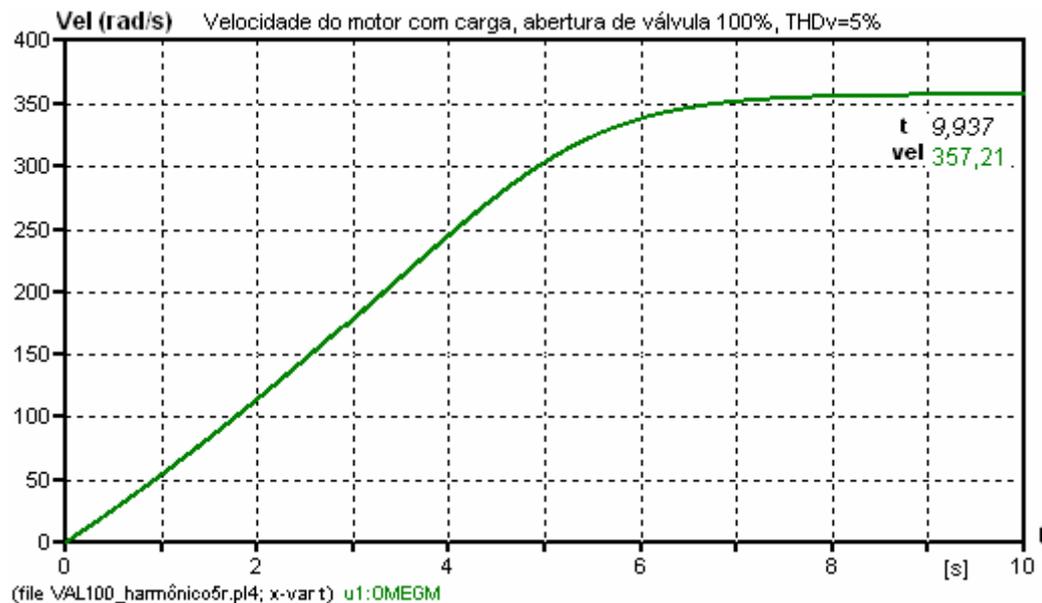


Figura 4.23 – Velocidade, abertura de válvula 100%, THD_v=5%.

A potência mecânica, produto do torque pela velocidade do motor em situação de regime permanente, experimentou variações na presença de distorções harmônicas na alimentação de entrada. Na Figura 4.24 têm-se uma oscilografia desse comportamento. O valor médio encontrado foi de 999 W, este valor está 5,79% acima do valor de potência mecânica aferido em laboratório, ou seja, 944,31 W. É de conhecimento já bastante difundido que as perdas diante da alimentação do motor com distorções harmônicas aumentam.

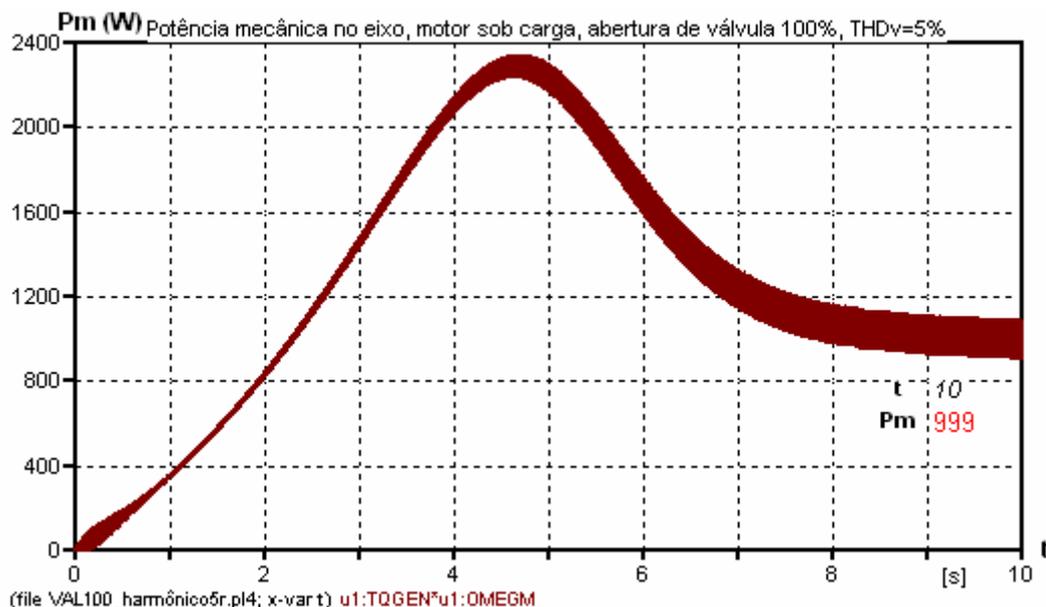


Figura 4.24 – Potência mecânica, abertura de válvula 100%, THD_v=5%.

A Tabela 4.20 relaciona parâmetros elétricos e mecânicos do sistema de bombeamento na condição de operação do motor em regime permanente.

Tabela 4.16 – Parâmetros elétricos e mecânicos em regime permanente, THD_v=5%.

I _A (A)	I _B (A)	I _C (A)	P (W)	S (VA)	T (N.m)	vel.(rad/s)	P _{eixo} (W)
3,52	3,52	3,519	1109,10	1342,29	2,796	357,21	999

4.5.1.6 Alimentação com presença de distorção harmônica simétrica e equilibrada, THD_v = 10% , abertura de válvula 100%.

A configuração da fonte no ATP para simular o sinal de tensão com distorção harmônica de 10% tomou como referência os valores das distorções individuais relacionadas na Tabela 3.2, o que se traduz em uma distorção harmônica de tensão total de 10%.

Os sinais de tensão e corrente capturado pelo osciloscópio com distorção harmônica total de tensão 10% podem ser visualizados na Figura 4.25.

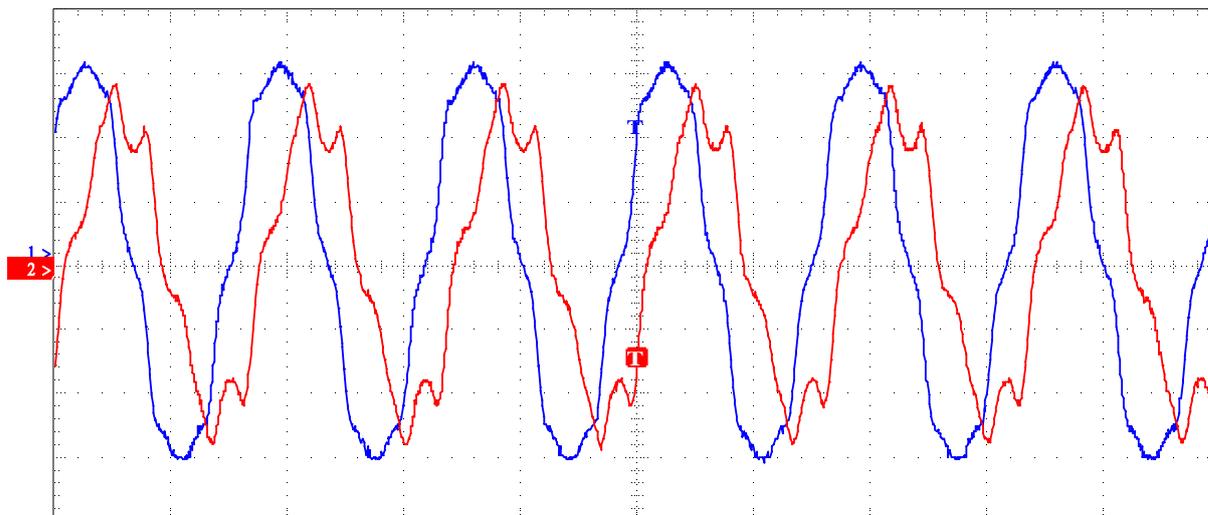


Figura 4.25 – Sinais de tensão e corrente capturadas pelo osciloscópio, $THD_V=10\%$.

O sinal sintetizado no ATP está presente na figura 4.26. Os dois sinais possuem formas e valores bem próximos. Portanto o sinal de tensão utilizado para simular o sistema de bombeamento com $THD_V=10\%$ é válido.

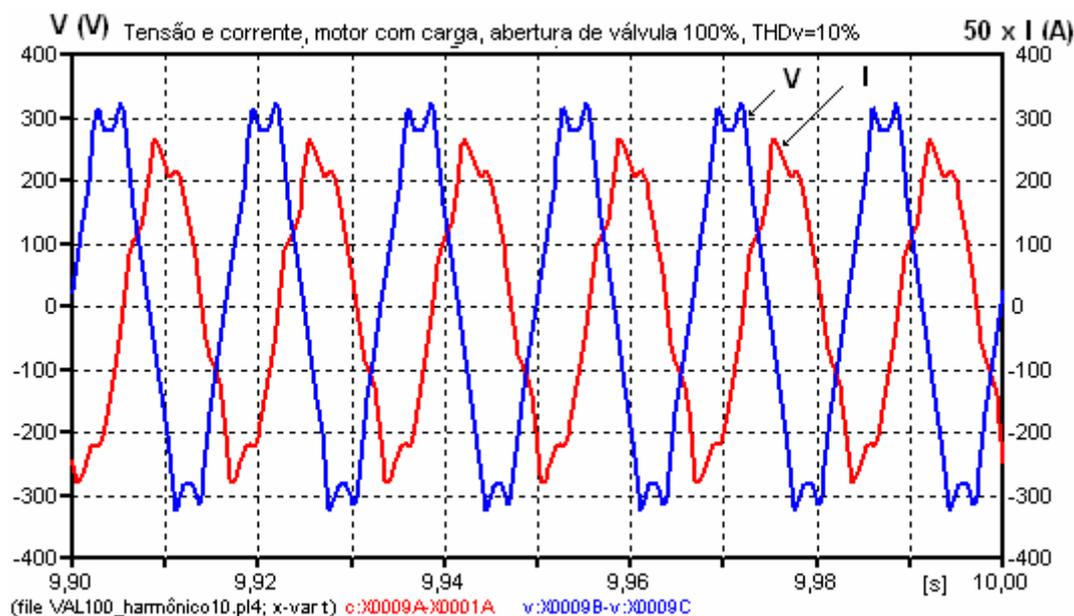


Figura 4.26 - Sinais de tensão e corrente sintetizadas no ATP, $THD_V=10\%$.

A Tabela 4.22 relaciona as medidas de parâmetros elétricos e mecânicos do motor obtido na faixa de funcionamento em regime permanente. A carga aplicada no motor foi a que representa a bomba centrífuga com válvula 100% aberta.

Tabela 4.17 - Parâmetros elétricos e mecânicos em regime permanente, $THD_V=10\%$.

I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	P (W)	S (VA)	T (N.m)	vel.(rad/s)	P_{eixo} (W)
3,55	3,55	3,55	1118,50	1365,06	2,818	357,30	1007,00

4.5.1.7 Alimentação com presença de distorção harmônica simétrica e equilibrada, $THD_V = 20\%$, abertura de válvula 100%.

Com o objetivo de complementar a simulação para distorção harmônica de tensão. A fonte de tensão do ATP foi configurada para um $THD_V = 20\%$. A base para configuração das distorções individuais, está relacionada na Tabela 3.2.

As formas de onda da tensão e da corrente obtidas pelo osciloscópio para distorção harmônica total de tensão de 20% estão representadas na Figura 4.27.

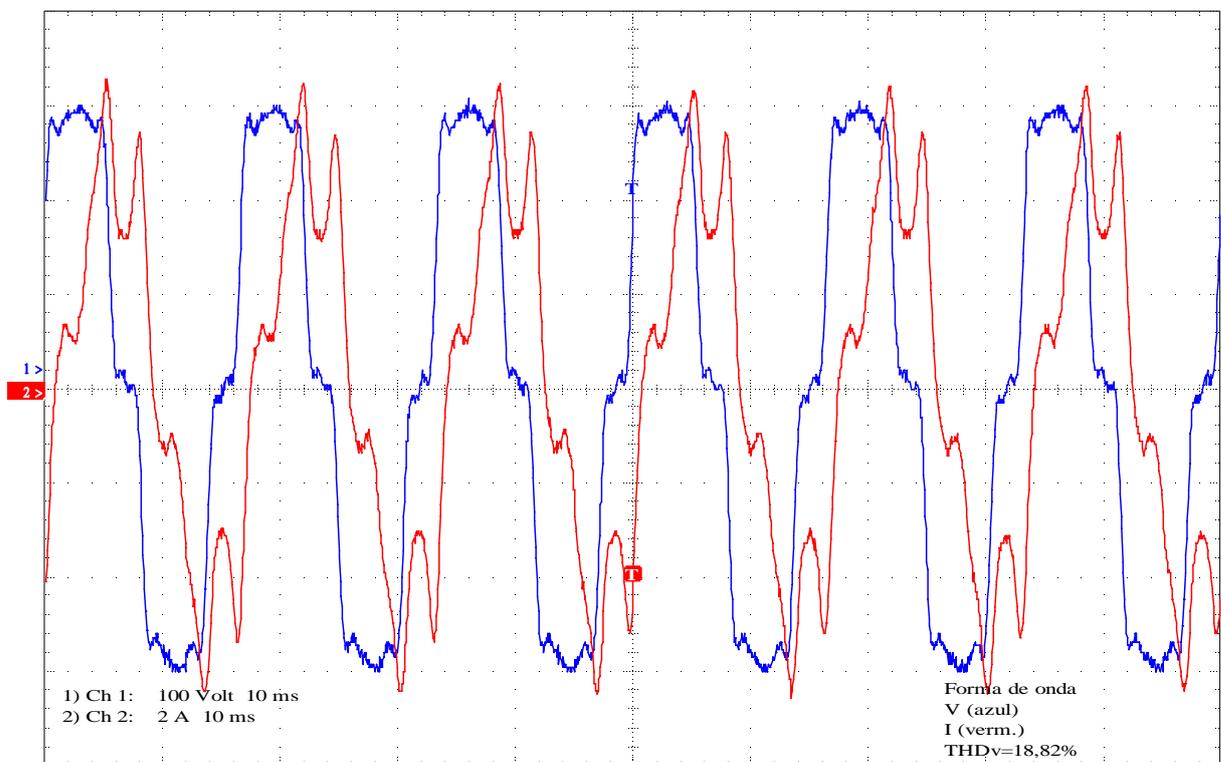


Figura 4.27 – Sinais de tensão e corrente capturadas pelo osciloscópio, $THD_V=20\%$.

O sinal sintetizado no ATP está visualizado na Figura 4.28. A forma de tensão na crista da onda apresenta uma diferença em relação à tensão capturada pelo osciloscópio. A razão da diferença se reside no fato do modelo de fonte utilizada para fornecer o sinal de tensão harmônica, não permite a configuração de ângulos para as harmônicas individuais.

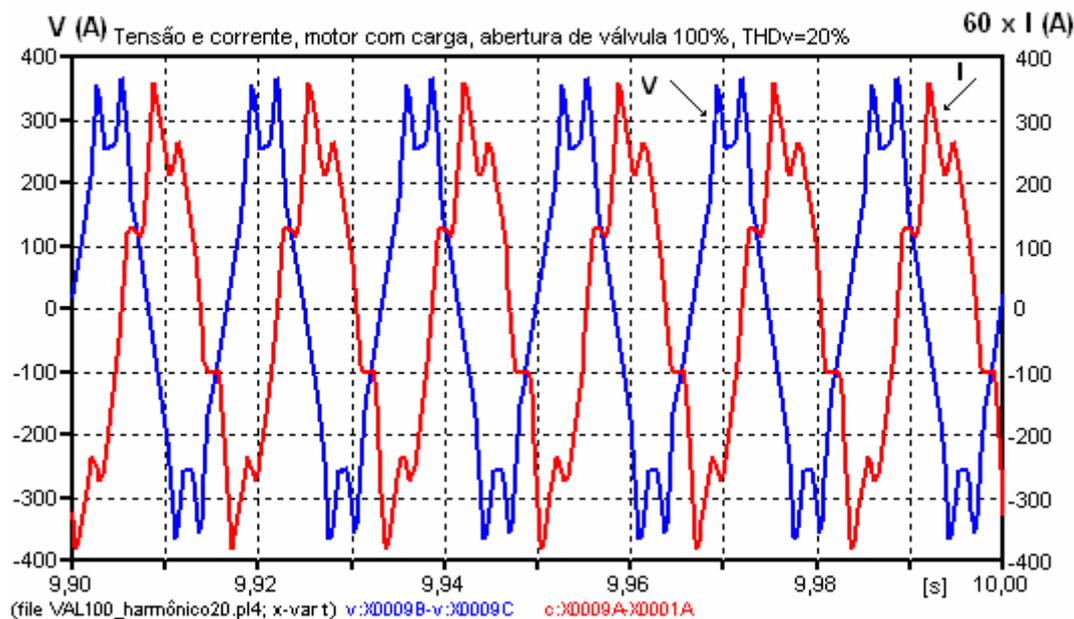


Figura 4.28 - Sinais de tensão e corrente sintetizadas no ATP, $THD_V=20\%$.

A Tabela 4.18 relaciona as medidas de parâmetros elétricos e mecânicos com o motor no modo de funcionamento em regime permanente. A carga aplicada no motor foi a nominal da bomba centrífuga com válvula 100% aberta.

Tabela 4.18 - Parâmetros elétricos e mecânicos em regime permanente, $THD_V=20\%$.

I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	P (W)	S (VA)	T (N.m)	vel.(rad/s)	P_{eixo} (W)
3,610	3,610	3,610	1123,10	1406,59	2,816	357,30	1006,00

4.5.1.8 Alimentação senoidal assimétrica e desequilibrada, $K = 2\%$. Motor com carga, abertura de válvula 100%.

A simulação do comportamento do sistema de bombeamento frente à taxa de desequilíbrio de tensão $K=2$ foi configurada conforme Tabela 3.3. A fonte de alimentação do ATP foi ajustada com tensões desequilibradas em módulo e ângulo.

O programa ATP desacopla o estator do rotor; considera ainda que o campo presente no entreferro têm variação senoidal. As considerações levam o *software* a não prever todas as perdas advindas de uma alimentação distorcida ou desequilibrada. Portanto para alimentação senoidal desequilibrada em módulo e ângulo foi necessário inserir uma resistência em paralelo com a resistência que representa as perdas por atrito e ventilação do motor. Esse elemento tem por objetivo representar o aumento das perdas internas do motor devido à alimentação não ideal.

A potência utilizada para representar as perdas diante de alimentação desequilibrada, foi determinada pela seguinte fórmula:

$$\Delta P = P_{\text{deseq}} - P_{\text{eq}} \quad (4.6)$$

Onde:

ΔP – potência referente as perdas no motor devido a alimentação desequilibrada.

P_{deseq} – Potência ativa total medida durante os ensaios na condição de alimentação com tensão assimétrica e desequilibrada.

P_{eq} – potência ativa total simulada com alimentação senoidal simétrica e equilibrada.

Para representar essas perdas tomou-se como base o valor de potência ativa registrada para $K=3\%$. A potência ativa registrada durante os ensaios com tensão desequilibrada, para a taxa de desequilíbrio base foi de 1389,50 W, valor este relacionado na Tabela 3.8. A potência ativa total obtida através de ensaio com tensão ideal foi de 1115,80 W, conforme visto na Tabela 3.8. Então potência a ser utilizada para representar as perdas devido a alimentação desequilibrada é obtida da diferença entre ambas, ou seja, 273,7 W. A resistência a ser utilizada para representar as perdas será calculada pela fórmula:

$$R_{\text{des}} = \frac{\omega^2}{\Delta P} \quad (4.7)$$

Onde:

R_{des} – resistência utilizada para representar às perdas devidas alimentação desequilibrada.

ω – velocidade do motor medido em laboratório para condição de alimentação desequilibrada (em rad/s).

A velocidade média no eixo do motor registrada em ensaios laboratoriais para condição de alimentação desequilibrada, esteve em 3309 rpm, ou seja, 346,52 rad/s.

A resistência ligada em paralelo com a resistência representativa das perdas por atrito e ventilação, então será de aproximadamente 400 Ω . A título de informação, a resistência deverá ser inserida no esquema mostrado na Figura 4.5.

A Figura 4.29 mostra a figura da corrente liberada pelo ATP para a condição de desequilíbrio $K=2\%$. Na figura está gravado o valor das correntes em regime permanente. Os valores rms obtidos foram 4,71 A; 4,42 A; e 3,98 A para as fases A, B e C respectivamente, os valores estão próximos dos medidos nos ensaios, ou seja, 4,70 A; 4,10 A e 3,80 A.

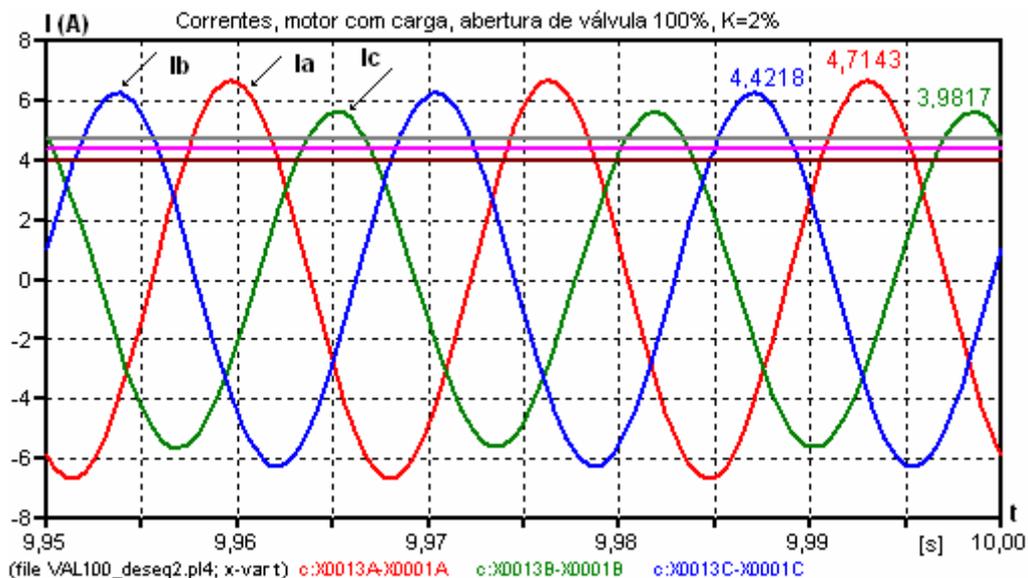


Figura 4.29 – Correntes sintetizadas no ATP, alimentação desequilibrada, K=2%.

A variação da potência aparente desde a partida, até o regime permanente, está mostrada na Figura 4.30. O valor de potência total encontrado foi 1667,83 VA, durante os ensaios laboratoriais o multimetror de energia elétrica registrou uma potência aparente total de 1591,4 VA. O valor encontrado durante a simulação está 4,80% acima do valor ensaiado, o que demonstra que a inserção da resistência para compensar as perdas no circuito do rotor e estator, permite simular o sistema de bombeamento perante a alimentação com tensão desequilibrada.

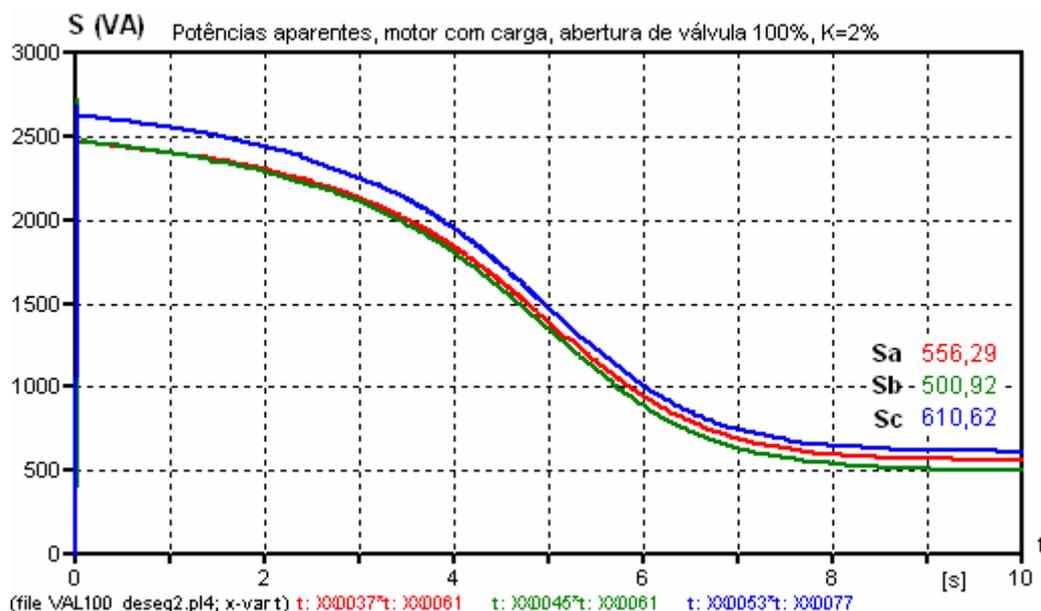


Figura 4.30 – Potências aparentes, motor com carga, K=2%.

A variação em amplitude e o comportamento do torque devido à presença de alimentação com tensão senoidal assimétrica e desequilibrada pode ser visto na Figura 4.31. Percebe-se um comportamento oscilatório no torque em regime permanente. Durante os ensaios laboratoriais observaram-se fortes vibrações no sistema de bombeamento. O torque médio fornecido pelo ATP foi de 3,583 N.m. A figura mostra a variação do torque em regime permanente, ficando o mesmo entre 3,24 N.m e 3,95 N.m. Em laboratório acredita-se, por causa da vibração, o torque não foi medido pelo torquímetro.

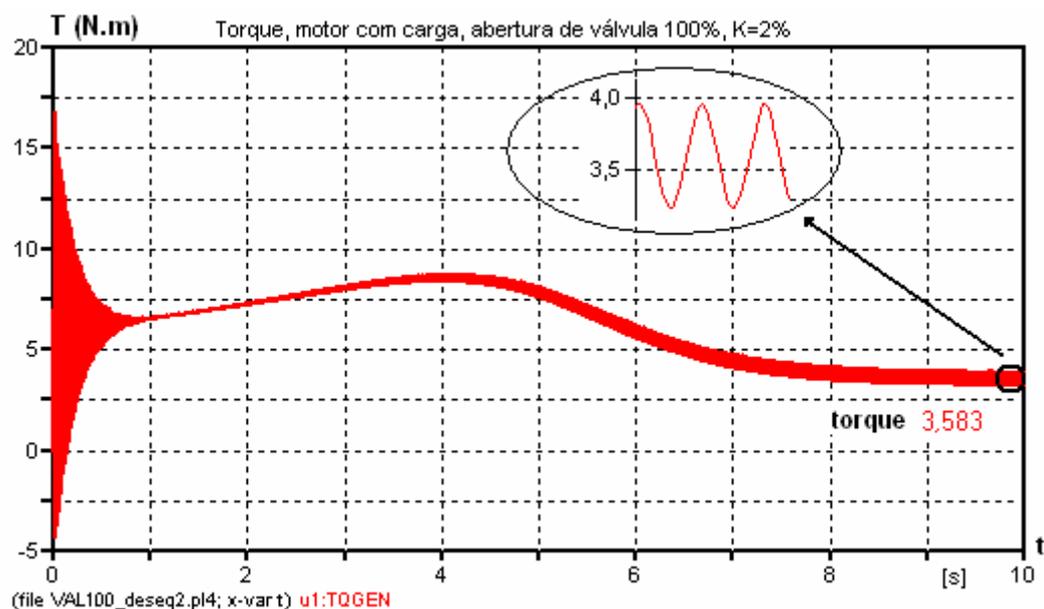


Figura 4.31 – Torque, motor com carga, desequilíbrio de K=2%

A velocidade desenvolvida pelo motor na condição de alimentação com tensão senoidal desequilibrada está presente na Figura 4.32. Na mesma é possível observar uma queda substancial da velocidade em relação à mesma condição de carregamento, mas, com alimentação senoidal simétrica e equilibrada. O valor da velocidade registrado nos ensaios foi de 3310 rpm, o valor liberado pelo ATP em regime permanente esteve em 350,81 rad/s, ou seja, 3350 rpm. Os valores simulados e ensaiados estão bastante próximos denotando que o ATP fornece o valor de velocidade coerente para a velocidade na situação de alimentação com tensão desequilibrada.

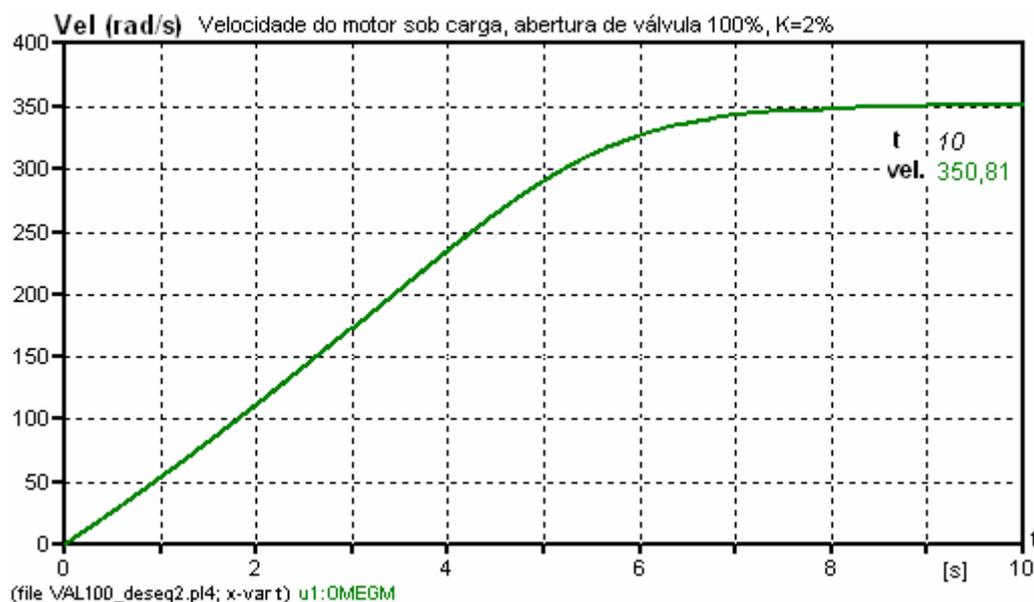


Figura 4.32 – Velocidade, motor com carga, desequilíbrio de K=2%.

A potência mecânica presente no eixo do motor perante o desequilíbrio está representada na Figura 4.33. A expressiva variação em regime permanente indica a presença de vibração no eixo. Não foi possível calcular a potência mecânica utilizando dados laboratoriais devido à falta de informação do torque desenvolvido pelo motor. A potência mecânica fornecida pelo ATP, produto do torque pela velocidade registrou 1257 W, entendermos ser esse valor irreal. Isto devido ao fato do mesmo levar em conta o torque liberado pelo ATP, valor este que não condiz com o comportamento do sistema de bombeamento, observado durante ensaios.



Figura 4.33 – Potência mecânica no eixo com carga, K=2%.

A Tabela 4.19 relaciona os valores gerados pelo ATP de parâmetros elétricos e mecânicos. Estes valores se referem à situação de funcionamento em regime permanente.

Tabela 4.19 – Parâmetros elétricos e mecânicos em regime permanente, K=2%.

I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	P (W)	S (VA)	T (N.m)	vel. (rad/s)	P_{eixo} (W)
4,42	3,98	4,71	1435,20	1667,81	3,583	350,80	1257,00

4.5.1.9 Alimentação senoidal assimétrica e desequilibrada, K = 3%. Condição de carga nominal, abertura de válvula 100%.

Na simulação para condição de alimentação com taxa de desequilíbrio de tensão de 3%, a carga colocada para simular as perdas foi a mesma utilizada para o grau menor de desequilíbrio. O motivo para esse procedimento é que as perdas para K=3% variaram pouco em relação à distorção anterior. O módulo e grau de defasamento configurados no ATP são aqueles indicados na Tabela 3.3. A taxa de desequilíbrio aplicada foi confirmada em laboratório, através de indicação do multimedidor de energia elétrica. A Figura 4.34 mostra as correntes em valores rms, fornecidas pelo *software* para alimentação do sistema de bombeamento com tensão de grau de desequilíbrio K=3%.

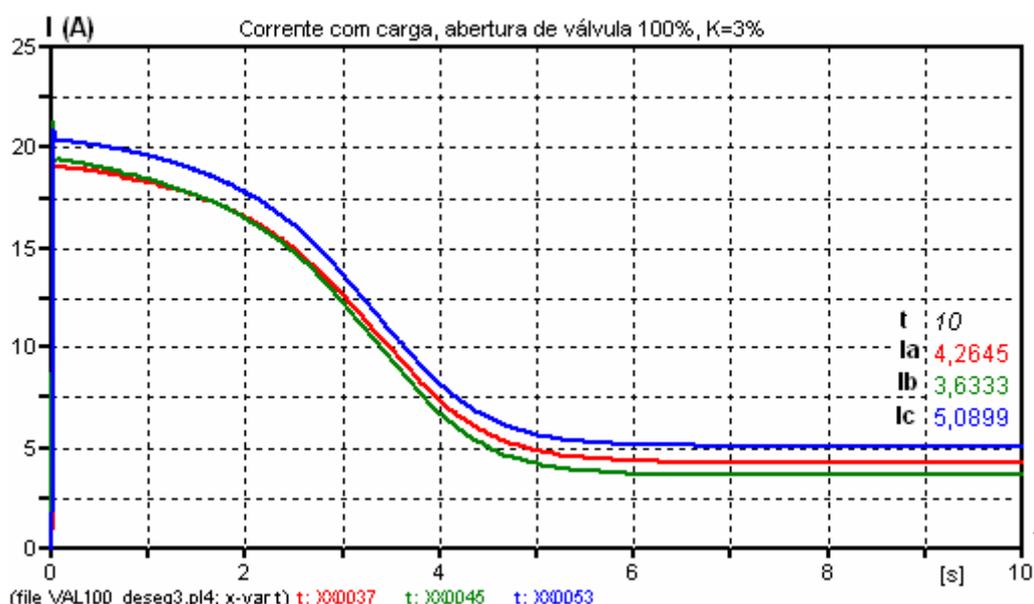


Figura 4.34 – Corrente do motor com carga, alimentação desequilibrada, K=3%

A Tabela 4.20, relaciona os principais parâmetros elétricos e mecânicos liberados pelo ATP em condição de regime permanente.

Tabela 4.20 – Parâmetros elétricos e mecânicos em regime permanente, K=3%.

I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	P (W)	S (VA)	T (N.m)	vel.(rad/s)	P_{eixo} (W)
4,27	3,63	5,09	1398,50	1638,97	3,477	351,10	1221,00

4.5.1.10 Alimentação Alimentação senoidal assimétrica e desequilibrada, K = 5%. Condição de carga nominal, abertura de válvula 100%.

As condições de configuração da fonte de tensão para taxa de desequilíbrio 5% tomou como base o roteiro dos desequilíbrios anteriores. O módulo e defasagem configurados foram determinados seguindo os dados fornecidos na Tabela 3.3. A Figura 4.35 apresenta as correntes eficazes em regime permanente para a condição de desequilíbrio K=5%.

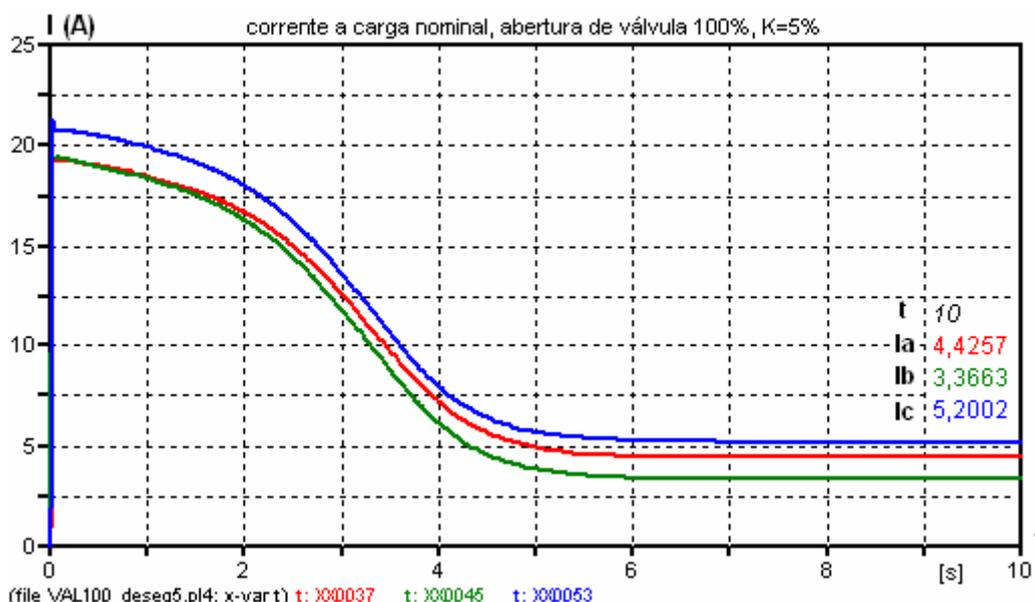


Figura 4.35 - Correntes sintetizadas no ATP. Alimentação desequilibrada, K=5%.

O torque obtido para a taxa de desequilíbrio está mostrado na Figura 4.36. Um campo ampliado desse torque em regime permanente, mostra que o mesmo varia entre 2,58 N.m e 4,4 N.m. Isto vem a demonstrar que à medida que a taxa de desequilíbrio aumenta, a vibração no eixo do motor se torna mais intenso, levando na maioria dos casos à danificação do motor em poucos minutos.

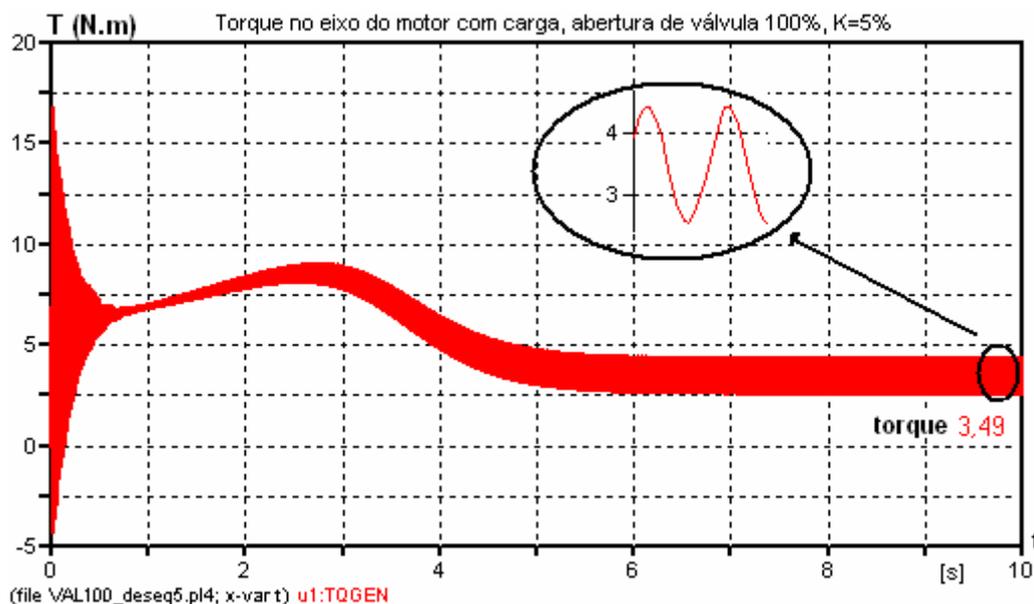


Figura 4.36 – Torque do motor com carga, desequilíbrio de K=5%

A Tabela 4.21 relaciona os valores gerados pelo ATP de parâmetros elétricos e mecânicos. Estes valores se referem à situação de funcionamento em regime permanente.

Tabela 4.21 – Parâmetros elétricos e mecânicos em regime permanente, K=5%

I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	P (W)	S (VA)	T (N.m)	vel.(rad/s)	P_{eixo} (W)
4,426	3,366	5,200	1406,20	1660,11	3,490	351,50	1227,00

4.6 – Validação do modelo computacional

Tendo por objetivo validar o modelo computacional do sistema de bombeamento, representado no programa ATP, através da Figura 4.5, foram formatadas tabelas comparativas de situações de operação do motor em:

- motor sob carga, alimentação ideal;
- motor sob carga, alimentação com distorções harmônicas;
- motor sob carga, alimentação desequilibrada em módulo ângulo;

Nas tabelas estão inclusas linhas informando a variação dos valores ensaiados em relação aos simulados, indicado por Δ (%). Em virtude da carga presente no sistema de bombeamento estar abaixo da capacidade nominal do motor, as simulações também são referentes à carga inferior à carga nominal do

motor. A potência mecânica presente na tabela referente aos ensaios, foi obtida indiretamente através da multiplicação entre velocidade e o conjugado, levando em conta o fator de correção necessário. A potência mecânica simulada foi gerada pela multiplicação do torque e velocidade angular liberada na saída do motor pelo software. O ATP fornece a velocidade em rad/s, os valores de velocidade das tabelas foram convertidos para rpm. Os valores da tabela referem-se à situação de carga. Para exigência de carga abaixo da máxima solicitação da bomba os valores estiveram próximos, tanto em relação ao obtido em laboratório, como os gerados através de simulações computacionais.

Na condição de alimentação ideal, ou seja, tensão senoidal simétrica e equilibrada, 220 V, 60 Hz, a Tabela 4.22, relaciona os valores dos parâmetros elétricos e mecânicos para a situação de carga. A abertura de válvula considerada foram 100%, 85%, 60% e 32%. Os valores encontrados computacionalmente estiveram próximos dos valores obtidos nos ensaios laboratoriais. As maiores diferenças encontradas em todos os casos, foram da potência mecânica no eixo do motor. A potência ativa obtida nos ensaios são valores médios, os valores reais podem estar próximos dos indicados na tabela. A Figura 3.18 mostra que a potência ativa para abertura de válvula 100%, ou seja, vazão de 3,1 m³/h variou de 1109 W a 1132 W, portanto o valor real pode estar dentro dessa faixa.

Em razão do ATP não considerar todas as perdas internas do motor e também devido à diferença de valor do torque medido e simulado, assim como velocidade, a ultima coluna da Tabela 4.22 apresentou diferença mais expressivas. Apesar disso o modelo para esta situação se mostrou eficiente.

Tabela 4.22 – Grandezas elétricas, mecânicas, medidas e simuladas com alimentação senoidal.

Abert. válvula		$I_{\text{méd}}$ (A)	P (W)	S (VA)	T (N.m)	vel.(rpm)	P_{eixo} (W)
100%	ensaiado	3,50	1122,42	1339,78	2,692	3348	943,37
	simulado	3,53	1115,80	1346,08	2,816	3410	1005,30
	Δ %	0,86	-0,59	0,47	4,61	1,84	6,56
85%	ensaiado	3,40	1072,50	1293,75	2,615	3357	918,91
	simulado	3,39	1060,80	1293,33	2,680	3420	959,72
	Δ %	-0,29	-1,11	-0,02	2,48	1,87	4,44
60%	ensaiado	3,10	953,85	1191,23	2,385	3379	843,36
	simulado	3,17	971,00	1209,68	2,459	3436	884,90
	Δ %	2,26	1,80	1,55	3,10	1,68	4,93
32%	ensaiado	2,80	832,65	1084,62	2,154	3392	764,60
	simulado	2,93	868,80	1117,46	2,205	3454	797,70
	Δ %	4,64	4,34	3,03	2,37	1,84	4,33

A comparação considerando a alimentação do sistema de bombeamento com presença de distorção harmônica na tensão está presente na tabela 4.23. A mesma traz os valores medidos para carga nominal, abertura de válvula 100%. Os THD_v programados na fonte HP foram 5%, 10% e 20%. Essas taxas de distorções foram programadas e simuladas no programa computacional. A simulação utilizando o ATP conseguiu reproduzir com boa precisão os parâmetros de entrada do motor. Novamente os parâmetros mecânicos simulados não estiveram tão próximos dos mesmos obtidos em laboratório em virtude da simulação computacional não prever todas as perdas internas do motor. A simulação para condição de alimentação com distorções harmônicas se mostrou menos precisa. O importante a frisar é que tanto nos ensaios como nas simulações, a potência ativa apresentou variação crescente à medida que a taxa total de distorção da tensão foi aumentada.

Tabela 4.23 – Grandezas elétricas, mecânicas medidas e simuladas na presença de distorções harmônicas.

val. 100%	$I_{méd}$ (A)	P (W)	S (VA)	T (N.m)	vel.(rpm)	Peixo (W)	
har5	ensaiado	3,50	1105,56	1348,33	2,692	3354	944,18
	simulado	3,52	1109,10	1342,29	2,796	3411	999,00
	Δ %	0,46	0,32	-0,45	3,72	1,67	5,41
har10	ensaiado	3,50	1108,96	1361,21	2,692	3359	946,34
	simulado	3,55	1118,50	1365,06	2,818	3412	1007,00
	Δ %	1,41	0,85	0,28	4,47	1,55	6,02
har20	ensaiado	3,60	1118,13	1420,80	2,769	3359	973,44
	simulado	3,61	1123,10	1406,59	2,816	3412	1006,00
	Δ %	0,28	0,44	-1,01	1,67	1,55	3,24

A Tabela 4.24 traz a comparação dos valores ensaiados e simulados para a condição de alimentação desequilibrada. Nesta comparação não foi possível comparar os parâmetros mecânicos em razão do torquímetro não enviar para o supervisor informações sobre o torque. Os parâmetros elétricos registrados nos ensaios, como os liberados pelo software estiveram bastante próximos. Em razão dos valores de vazão e pressão obtidos nos ensaios com tensão desequilibrada chega-se a conclusão que o valor de torque obtido na simulação não condiz com a situação real. Os resultados dos parâmetros mecânicos menos precisos, reside no fato do programa computacional não prever todas as perdas internas do motor e também pelo valor do torque fornecido. Volta-se a frisar que para representar as perdas internas que são maiores para esta situação de alimentação, foi necessário

inserir uma resistência em paralelo com uma outra que representava as perdas por atrito e ventilação.

Tabela 4.24 – Grandezas elétricas, mecânicas medidas e simuladas na presença tensões desequilibradas.

val. 100%		I_A (A)	I_B (A)	I_C (A)	P (W)	S (VA)	T (N.m)	vel.(rpm)	Peixo (W)
des. 2	ensaiado	4,70	4,10	3,80	1388,01	1591,55	-	3309	-
	simulado	4,71	4,42	3,98	1435,20	1667,81	3,583	3350	1257,00
	Δ %	0,30	7,23	4,57	3,29	4,57	-	1,21	-
des. 3	ensaiado	4,90	4,20	3,50	1389,50	1595,96	-	3314	-
	simulado	5,09	4,27	3,63	1398,50	1638,97	3,477	3353	1221,00
	Δ %	3,73	1,64	3,58	0,64	2,62	-	1,15	-
des. 5	ensaiado	5,50	4,10	3,31	1401,74	1614,22	-	3309	-
	simulado	5,20	4,43	3,37	1406,20	1660,11	3,490	3357	1227,00
	Δ %	-5,77	7,45	1,92	0,32	2,76	-	1,42	-

4.7 – Considerações finais

O modelo utilizado para representar o sistema de bombeamento apresenta valores próximos do real para a situação de alimentação ideal. A modelagem dos parâmetros da máquina e da carga refletiu a situação encontrada no sistema motor-carga do Laboratório de Sistemas Motrizes da Universidade Federal de Uberlândia.

Das simulações utilizando alimentação distorcida ou desequilibrada as seguintes conclusões podem ser extraídas:

- Os parâmetros elétricos na entrada do motor, obtidos durante as simulações estiveram próximos do real.
- Os parâmetros mecânicos não apresentaram boa precisão, em virtude do software não prever todas as perdas internas do motor, ocasionadas por alimentação não ideal.
- O modelo da máquina de indução presente no ATPDraw, não reflete com boa fidelidade os parâmetros mecânicos do sistema de bombeamento, quando é alimentado com sinais de tensões que fazem parte dos chamados itens de qualidade de energia elétrica.

Capítulo 5

CONCLUSÃO

No decorrer do desenvolvimento desta dissertação, foram mostrados de forma simples, os conceitos relacionados à eficiência energética e qualidade da energia, aplicadas ao sistema motriz (bombeamento). As características e possibilidades de ensaios, no sistema de bombeamento de água do Laboratório de Sistemas Motrizes da Universidade Federal de Uberlândia foram relatadas de forma detalhada. Várias condições de alimentação foram aplicadas ao sistema visando verificar o comportamento elétrico, mecânico e hidráulico. Resumidamente a presente dissertação apresentou as seguintes conclusões:

- ✓ No capítulo 2 foram relacionados conceitos teóricos importantes em relação a motores elétricos de indução, acoplamentos, bombas, formas de variação de vazão, itens principais da qualidade da energia elétrica, Chegou-se à conclusão que a técnica utilizada no controle da vazão e a presença de itens da qualidade de energia influenciam na eficiência energética final do sistema de bombeamento.
- No capítulo 3, os ensaios realizados no sistema de bombeamento, revelaram o comportamento importante dos parâmetros elétricos, mecânicos e hidráulicos. Os ensaios laboratoriais permitiram as seguintes ponderações:
 - ✓ No controle de vazão por estrangulamento de válvula a potência elétrica pouco diminui, denotando ser essa técnica pouco eficiente no controle de vazão sob a visão da eficiência energética.
 - ✓ No controle de vazão por variação por velocidade da bomba, utilizando-se de inversor de frequência a economia observada foi bem maior, chegando a uma economia de energia elétrica de 6,47%, 35,58%, 75,10% e 90,49%. Nas respectivas vazões de 3,10 m³/h, 2,60m³/h, 1,60 m³/h e 0,50 m³/h, quando comparada com o método de estrangulamento de válvula.

- ✓ Na alimentação do motor com distorções harmônicas a potência elétrica, quando comparada com alimentação senoidal simétrica e equilibrada, apresentou um decréscimo e após pequena elevação à medida que o fator de distorção total foi variado para maior. Houve aumento do torque somente para a distorção mais elevada. O fator de potência experimentou queda com o aumento da distorção. A potência aparente elevou-se com a distorção. Os parâmetros hidráulicos praticamente se mantiveram invariáveis dentro das específicas faixas de vazão.
- ✓ Durante a operação do inversor de frequência, a injeção de distorção de harmônica na rede de alimentação por parte do inversor quando alimentado com tensões desequilibradas foi pouco percebida. Isto vem demonstrar que os modernos inversores pouco injetam harmônicos na rede. O inversor permaneceu estável, mesmo com aplicação de tensões com $THD_V=20\%$. O que nos leva a concluir que os inversores fabricados atualmente conseguem funcionar perfeitamente, mesmo com presença de distorções harmônicas de tensão na entrada de alimentação.
- ✓ O comportamento do sistema com alimentação do motor com tensão assimétrica e desequilibrada em comparação com alimentação senoidal simétrica, equilibrada, apresentou aumento da potência ativa, potência aparente em decorrência da elevação das perdas no motor causadas por esse tipo de distúrbio. Conseqüentemente a energia consumida foi cada vez maior à medida que o fator de desequilíbrio foi majorado. Desequilíbrios de corrente nas fases foram observados, chegando em, alguns casos a superar o valor nominal de corrente para as fases do motor. Notou-se forte presença de vibração no sistema de bombeamento, durante a realização desse ensaio. Em decorrência disso acredita-se, o torque não foi registrado pelo torquímetro. Vazão e pressão apresentaram valores menores, quando comparado com alimentação ideal.
- ✓ No caso de acionamento do sistema com inversor de frequência e aplicando tensão senoidal simétrica, equilibrada. A potência exigida da rede foi menor comparada com a alimentação aplicada diretamente no motor. As velocidades para as faixas de vazões programadas, foram menores, o que denota que a curvas de trabalhos em que a bomba atuou foram diferentes do funcionamento com alimentação de forma direta. A lei de afinidade demonstra

que é possível trabalhar em um outro ponto e com melhor rendimento da bomba. O fator de potência presente, nesta situação, mostrou-se bem abaixo, quando comparado com a alimentação direta.

- ✓ O registro da potência elétrica na entrada do inversor frente à presença de distorção harmônica no sinal apresentou queda à medida que a taxa de distorção experimentou elevação. Fato esse devido ao achatamento do sinal de tensão na presença de distorção. O fator de potência apresentou queda e posterior elevação para $THD_v=20\%$. A corrente registrada pelo medidor é a corrente exigida pelo inversor e não a realmente fornecida ao motor, está presente no valor de corrente uma pequena parcela relativa ao consumo próprio do dispositivo. O torque apresentou queda com a elevação da distorção, conseqüentemente potência ativa e energia apresentaram queda com o aumento da distorção. Vazões e pressões não apresentaram variações significativas quando comparadas com alimentação do sistema com tensão senoidal, simétrica e equilibrada.
- ✓ Na alimentação com tensão assimétrica e desequilibrada, o inversor amenizou os efeitos nocivos ao conjunto motor-bomba apresentado quando da alimentação direta do motor com tensão desequilibrada. As correntes na entrada do inversor apresentaram-se desequilibradas. As potências registradas e o fator de potência e energia consumida apresentaram diminuição com o aumento do grau de desequilíbrio. A potência aparente sofreu diminuição com a elevação da taxa de desequilíbrio. Os parâmetros hidráulicos praticamente não sofreram mudanças dentro de suas faixas de vazões. O torque experimentou ligeira elevação e as velocidades se mantiveram dentro da faixa registrada com o inversor alimentado com tensão senoidal simétrica e equilibrada.
- No capítulo 4, utilizando a plataforma ATPDraw, foi desenvolvida a modelagem no domínio do tempo do sistema de bombeamento alimentado com tensões senoidais equilibradas e desequilibradas. Para todas as situações de alimentação, foi implementada a modelagem de variação de vazão por estrangulamento de válvula. Os resultados obtidos mostraram-se muito próximos dos valores registrados pelos medidores durante os ensaios para alimentação ideal. Para alimentação com distorções harmônicas e desequilíbrios, as variáveis elétricas de entrada do motor se aproximaram dos

obtidos em laboratório. Quanto aos parâmetros mecânicos, alguns resultados tiveram os valores não muito próximos do observados nos ensaios, devido ao fato do *software* não considerar todas as perdas do motor, o que indica que a modelagem para sinais de tensão ideal se aplica completamente. Para alimentação com sinais providos de distorções harmônicas e sinais desequilibrados, há a necessidade de desenvolver modelos mais elaborados.

5.1 – Trabalhos Futuros

Este trabalho concentrou-se na mitigação do comportamento do sistema de bombeamento frente à alimentação com sinais dos itens de qualidade de energia abrangendo o comportamento elétrico, mecânicos, hidráulico e eficiência energética do sistema, entretanto existem alguns elementos detectados durante o desenvolvimento desta dissertação que influenciam no comportamento do sistema de motor-bomba. Em virtude da abrangência desses fatores e que, portanto, extrapola os limites deste trabalho, os assuntos foram tratados de forma condensada. Sugere-se, portanto uma abordagem mais minuciosa de alguns aspectos de grande valia para o conhecimento do comportamento dos sistemas de bombeamento, principalmente sob o ponto de vista da eficiência energética, entre esses aspectos pode se citar:

- 1) Comportamento térmico do sistema de bombeamento, envolvendo os parâmetros elétricos, mecânicos e hidráulicos.
- 2) A influência da pressão de sucção, envolvendo principalmente os parâmetros elétricos.
- 3) Simulação no ATP do sistema de bombeamento acionado por inversor de frequência.

Dentre os aspectos citados, a pressão de sucção é um aspecto que pode ser avaliado com certa facilidade no laboratório Lamotriz da Faculdade de Engenharia elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, em vista que pode ser realizada pequena mudança na bancada de bombeamento permitindo a mitigação desse fator.

Outro aspecto não tratado neste trabalho e que deve ser pesquisado com maior atenção é a forma como os medidores registram os valores de potência aparente, potência reativa e potência ativa.

Referências Bibliográficas

- [1] GELLER, H. S. Energy Revolution: Policies for a Sustainable Future. Washington: Island Press, 2003.
- [2] Balanço Energético Nacional. Ano base 2005. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, 2008.
- [3] GUIMARÃES, R. Comportamento elétrico, mecânico e hidráulico de um sistema de bombeamento sob o enfoque da eficiência energética; UFU - 2007.
- [4] Previsão de carga do sistema interligado – 1ª revisão quadrimestral do planejamento anual a operação energética; EPE/NOS – Rio de Janeiro, maio de 2008.
- [5] SANTOS A. H. M, et al. “Conservação de energia: eficiência energética de instalações e equipamentos”, FUPAI – Itajubá-MG, 2001.
- [6] Disponível em: www.abesco.com.br. Acesso em: 30/11/2008.
- [7] Programa de Qualidade e Eficiência Energética Em Transformadores de Distribuição No Brasil - Carlos Azevedo Sanguedo, Ana Angélica da S. Oliveira e Carmem P. Medeiros – CBEE 2009 – Belém, Pará.
- [8] Estimativa do Momento de Inércia de Cargas Mecânicas para Estudos em Eficiência Energética - Ronaldo Guimarães, Antonio Carlos Delaiba, Sergio Ferreira de Paula Silva, Décio Bispo – III CBEE 2009 – Belém, Pará.
- [9] Utilização da Automação Como Agente para Aumento da Eficiência Energética em Sistemas Motrizes Industriais - Adalmano Ofir de S. M. Duarte, Rogério D. de Souza e Silva, Maria Emília de Lima Tostes, Caio S. de A. Fernandes - II CBEE 2007 – Vitória, ES.
- [10] Implementação de Motores de Alto Rendimento na Indústria de Alimentos – Mário César do Espírito Santo e Hédio Tatizawa – Eletricidade Moderna – 2005.
- [11] Eficiência Energética de Conjuntos Moto-Bomba - Flávia Valente Porto Machado - II CBEE 2007 – Vitória, ES.
- [12] Operação de Sistemas de Bombeamento Visando a Eficiência Energética - Celso Rogério Schmidlin Júnior, Ricardo Silva Thé Pontes, Adson Bezerra Moreira, Felipe Azevedo Guimarães, Victor de Paula B. Aguiar - II CBEE 2007 – Vitória, ES.

- [13] Utilização de inversores de frequência em sistemas de bombeamento sob o enfoque da eficiência energética - Rafael Alves Ferreira, Sérgio Ferreira de Paula Silva, Antonio Carlos Delaiba, Décio Bispo – SOBRAEP – 2009.
- [14] Eficiência Energética e Qualidade da Energia: Aplicação da Eletrônica de Potência - C. H. Duarte, J. C. Aguiar e M.Q.F. Balthazar - III CBEE 2009 – BELÉM, PARÁ.
- [15] Impactos térmicos e econômicos da qualidade da energia em motores de indução trifásicos – Olívio Souto, Cláudio Pacheco, Antônio Carlos Delaiba, José Carlos Oliveira – ICBEE 2005 – Belo Horizonte, Minas Gerais.
- [16] Análise Comparativa de Distúrbios Elétricos Presentes em Motores de Indução - Helder S. Silva, Fábio M. S. Oliveira, Maria Emília de L. Tostes, Ubiratan Holanda Bezerra, Rogério Diógenes S. e Silva - II CBEE 2007 – Vitória, ES.
- [17] Módulo Energia Elétrica: Conceitos, qualidade e tarifas – Procel
- [18] WEG – Motores elétricos. (apostila)
- [19] NBR 5383 - Máquinas elétricas girantes - parte 1: Motores de Indução trifásicos - Ensaio; Associação Brasileira de Normas técnicas - 2002.
- [20] NOGUEIRA, F. J. H. Módulo: Acoplamento motor carga. ELETROBRÁS/PROCEL.
- [21] MONACHESI, M. G. Eficiência energética em sistemas de bombeamento. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 2005.
- [22] Módulo: Bombas Centrífugas. ELETROBRÁS/PROCEL.
- [23] AMÉRICO, M. Acionamento Eletrônico: guia avançado. ELETROBRÁS/PROCEL. Rio de Janeiro, dezembro/2004.
- [24] RESENDE, J. W., Apostila “Introdução à Qualidade da Energia”.
- [25] Norma IEEE standard 519-1992, “IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System (ANSI).
- [26] SOUTO, O. C. N., “Modelagem e Análise do Desempenho Térmico de Motores de Indução Sob Condições Não Ideais de Alimentação”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, dezembro de 2001.
- [27] FILHO, João Mamede. Instalações Elétricas Industriais – 6ª edição – 2001.
- [28] FREITAS, P. C. F., “Comparação dos rendimentos dos motores da linha padrão e de alto rendimento, obtidos de forma indireta” Iniciação Científica PROCEL/ELETROBRÁS, Universidade Federal de Uberlândia, outubro de 2007.
- [29] SCHNEIDER MOTOBOMBAS. *Bombas centrífugas série BC-92SH*. Catálogo.

- [30] YOKOGAWA. *Model EJA 110 A. General Especifications*. Catálogo.
- [31] SMAR. *LD301. Manual de Instruções operação e manutenção*, versão 6, 2005.
- [32] FOX WALL *Série C51*. Catálogo
- [33] TELEMECANIQUE. *TeSys U communitation variables – user manual*, 2006.
- [34] SCHNEIDER ELECTRIC. *Altistart 48 Telemecanique*. – user’s manual. s/d.
- [35] TELEMECANIQUE. *Altivar 31 - user’s manual*. s/d.
- [36] MELIN GERIN. *Power meter series 850 – Technical data sheet*, 2004.
- [37] TELEMECANIQUE. *Modicon Premium PLCs TX57/PCX57, Safety and Discrete Interfaces Installation manual, Volume 2 – 2006*.
- [38] ATP – RULEBOOK, Section 10 sources 1987.
- [39] TAVARES, M. C D.; CAMPOS, P. G; PRADO, P. *Guia resumido do ATP – Alternative Transient Program*. Apostila. Universidade Estadual de Campinas, 2003.
- [40] BARBI, I. *Teoria Fundamental do Motor de Indução*, UFSC/ELETROBRÁS – Florianópolis-SC – 1985.
- [41] Disponível em: www.weg.net/br. Acesso em: 14/03/2009.
- [42] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. Jr; KUSKO, A. *Máquinas elétricas: conversão eletromecânica da energia, processos, dispositivos e sistemas*: 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1975.
- [43] FERREIRA, W. A., “Modelagem e simulações de motores de indução trifásico no programa ATP” Iniciação Científica PROCEL/ELETROBRÁS, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- [44] Moreira, H. J. F., et al, *Guia operacional de motores elétricos*; Cepel - Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2000.
- [45] LOCATELLI, E. R., “Motor elétrico – guia avançado”; PROCEL INDÚSTRIA – Rio de Janeiro:dez/2004.

ANEXO

Artigo “Desempenho de um Sistema de Bombeamento Submetido a uma Alimentação Senoidal Equilibrada e Desequilibrada” apresentado no VIII CBQEE – Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica. Blumenau – SC, 2009

Desempenho de um Sistema de Bombeamento Submetido a uma Alimentação Senoidal Equilibrada e Desequilibrada

Bernanci Pedroso de Almeida

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, Rua Professora Zulmira Canavarros, 95 – Centro – Cuiabá – MT

Antônio Carlos Delaiba, Décio Bispo e Sérgio Ferreira de Paula Silva

Universidade Federal de Uberlândia, Avenida João Naves de Ávila, 2121 – Campus Santa Mônica – Uberlândia – MG

Resumo — Este trabalho tem por objetivo mostrar o comportamento elétrico, mecânico e hidráulico de um sistema de bombeamento frente à presença de tensões desequilibradas em módulo e ângulo, com ênfase na eficiência energética e qualidade da energia. No desenvolvimento dos ensaios, o sistema industrial foi acionado por um dispositivo de partida suave e inversor de frequência, procurando representar os métodos de controle de vazão por estrangulamento de válvula e variação de velocidade do conjunto motor-bomba.

Palavras-chaves — Sistema de bombeamento, qualidade da energia, desequilíbrio de tensão, eficiência energética.

I. INTRODUÇÃO

A preocupação com a eficiência energética e qualidade da energia no Brasil é recente. Uma das iniciativas para implementação de uma política para conservação de energia elétrica no Brasil foi dada com a criação do Procel (Programa de Conservação de Energia Elétrica) em 1985[1]. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética – EPE [2], o setor que mais consome energia elétrica no país é o industrial, respondendo por um consumo de 42.451 GWh de um total de 95.257 GWh de energia do mercado de distribuição. O eficiente uso da energia elétrica em parques industriais constitui um grande diferencial na eficiência e competitividade das mesmas. Dentre os sistemas utilizados nas indústrias, o sistema de bombeamento figura como um grande potencial para economia no consumo de energia elétrica. Segundo a referência [3] nos sistemas de distribuição e transmissão observa-se comumente a presença de motores de indução, sistemas a tração e uma grande gama de cargas monofásicas com processamento eletrônico da energia elétrica. Tais elementos melhoram bastante a qualidade de acionamentos das máquinas e o controle dos processos produtivos, contudo são geradores de desequilíbrios de tensão na rede elétrica e conseqüentemente depreciam a qualidade da energia, pois proporciona condições não ideais de funcionamento. Neste sentido, e de um modo geral, esses efeitos são traduzidos na forma de estresse térmico, dielétrico e operação irregular de equipamentos, etc. Da mesma forma

pequenas variações na rotação da bomba centrífuga pouco interfere na sua curva de rendimento, porém, grandes variações podem fazer diminuir o seu rendimento. A automação dos sistemas de bombeamento aliada à utilização de controladores lógicos programáveis e inversores de frequência, permite que o conjunto motor-bomba trabalhe próximo do ponto de melhor rendimento da bomba. Desta forma, este artigo tem por objetivo apresentar o comportamento elétrico, mecânico, e hidráulico de um sistema de bombeamento com alimentação senoidal trifásica equilibrada e tensão desequilibrada em módulo e fase, sob o enfoque da qualidade de energia elétrica e da eficiência energética.

II. DESENVOLVIMENTO DOS TRABALHOS

Para o desenvolvimento dos trabalhos, foi utilizado o laboratório de sistemas motrizes da Universidade Federal de Uberlândia - UFU. Os conceitos, definições e os procedimentos de cálculo relativos aos desequilíbrios de tensão, basearam-se na recomendação “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST”, Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica [4].

A. Apresentação do laboratório e equipamentos de medição utilizados

A bancada utilizada para representar o sistema de bombeamento possui um conjunto de acionamento completo, composto por proteção e medição; sistemas de automação e medição integrados, capazes de controlar automaticamente a execução dos ensaios, a coleta de dados e emissão de relatórios. O acionamento é composto por dois motores e três modos de partida distintos, permitindo a visualização de diversas formas de controle e operação de equipamentos industriais similares e de maior porte. Nas experiências são utilizados apenas o motor de alto rendimento e as partidas por *soft-starter* e inversor de frequência.

A seguir estão relacionados os principais componentes do laboratório utilizado nos ensaios:

- Inversor de frequência: trifásico; para motor de 1,5 cv; 220 V; 60 Hz; controle escalar e vetorial; comunicação via rede Modbus, entrada para encoder; controle PID; entrada 0-10 V analógica para controle de velocidade.

- Dispositivo de partida suave (*Soft-Starter*): trifásico; 220 V; para motor de 1,5 cv; comunicação via rede Modbus; entradas e saídas digitais;
- Motor elétrico: 1,5 cv; indução, trifásico. 220/380 V; 2 pólos; 60 Hz; IP 21; alto rendimento, com sensores do tipo PT 100 instalados nas bobinas do estator e na carcaça.
- Bomba centrífuga: 1,5CV; 3450 rpm, diâmetro do rotor 130 mm, pressão máxima (mca) – 30.
- Multimedidor de grandezas elétricas contemplando valores de tensão fase-fase e fase-neutro, corrente, potência ativa, reativa e aparente fator de potência trifásica e monofásica, frequência, energia ativa e reativa, desequilíbrios, distorções harmônicas.
- Fonte HP6834A trifásica de 4,5 KVA: com essa fonte programável é possível a geração de sinais senoidais trifásicos equilibrados, desequilibrados em módulo e ângulo, sinais trifásicos com distorções harmônicas, flicker, VTCDs equilibrados ou não, entre outros.

A título de ilustração, mostra-se na Fig. 1 uma fotografia do sistema de bombeamento mencionado, citando que esta estação de trabalho é resultado de convênio firmado entre a ELETROBRÁS e a UFU.



Fig. 1. Sistema de bombeamento – bancada de ensaios.

B. Operações com bombas centrífugas

Bombas são máquinas operatrizes hidráulicas que fornecem energia ao líquido com a finalidade de transportá-lo de um ponto a outro. Normalmente recebem energia mecânica e a transformam em energia de pressão e cinética ou em ambos. Ao se projetar uma bomba visa-se, especificamente, o alcance de determinada vazão em certa altura manométrica, de modo a se obter o máximo rendimento. As bombas de pequenas potências apresentam rendimento em torno de 68% [5]. O sistema de bombeamento pode ter algum parâmetro alterado, como é o caso de sistemas que estão sujeitos a variações na altura manométrica e na vazão. Essas modificações provocam alteração da curva de operação, pois a vazão, altura manométrica, velocidade, potência consumida e rendimento estão inter-relacionados. Para bombas centrífugas essas relações estão mostradas na Fig. 2. Num sistema de bombeamento, o ponto de funcionamento da

bomba pode variar ao longo do dia, conforme a variação da curva do sistema. A maior eficiência energética pode ser buscada mantendo o rendimento mais próximo o possível do PMR (ponto de maior rendimento), isso é possível variando-se a curva de performance da bomba, através da variação de sua rotação para compensar a variação da curva do sistema hidráulico. Para atingir esse objetivo faz-se uso de uma lei chamada de “leis de similaridade ou afinidade” que relacionam a rotação com a vazão, altura manométrica (pressão) e potência elétrica consumida, onde as relações são indicadas em (1).

$$\frac{Q_1}{Q} = \frac{n_1}{n}; \quad \frac{H_1}{H} = \left(\frac{n_1}{n}\right)^2; \quad \frac{P_1}{P} = \left(\frac{n_1}{n}\right)^3 \quad (1)$$

Onde:

n - velocidade da bomba; H - altura manométrica (pressão);
Q – vazão; P - potência elétrica consumida.

A potência elétrica exigida pela bomba (P), em cv, é dada por (2):

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta_b \cdot \eta_m \cdot \eta_{ac}} \quad (2)$$

Onde:

γ - peso específico (kgf/m³);

Q - Vazão (m³/s);

H - pressão (mca);

η_b - rendimento da bomba;

η_m - rendimento do motor elétrico

η_{ac} - rendimento do acoplamento (direto = 1).

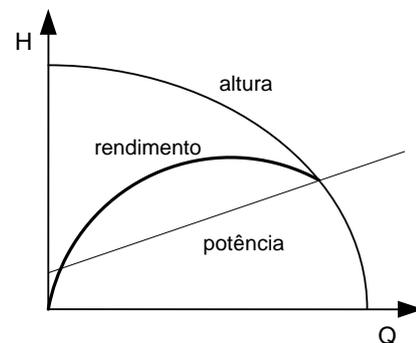


Fig. 2. Curva altura, rendimento e potência para bomba centrífuga.

C. Controle de vazão utilizando bomba centrífugas

O controle de vazão com bombas centrífugas pode ser realizado, basicamente, de três formas: *by-pass*, estrangulamento de válvula e variação da velocidade de rotação da bomba. Neste trabalho estão contemplados apenas os dois últimos casos.

Controle de vazão por estrangulamento de válvula

O método da inserção de válvulas de estrangulamento ao longo da tubulação utiliza o conceito de perda de carga, uma vez que a presença de válvulas provoca o aumento dessa perda à medida que a válvula é fechada. Portanto, a vazão

requerida é atingida com a mudança da curva característica do sistema ou tubulação, conforme visto na Fig. 3.

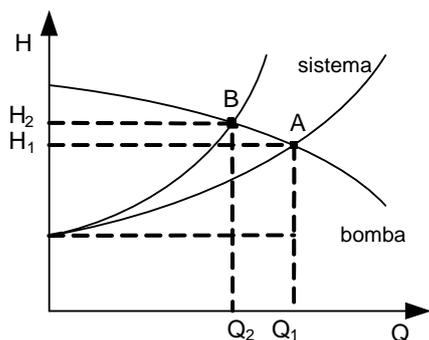


Fig. 3. Controle de vazão por estrangulamento de válvula.

Controle da vazão pela variação da velocidade de rotação

O método da variação da rotação influencia na curva característica da bomba e não na curva do sistema. Pode-se observar na curva característica de uma bomba, a influência causada ao modificarmos a velocidade de rotação. A diminuição da velocidade de rotação faz com que a bomba, para um mesmo valor de vazão, entregue menos energia de pressão ao líquido, conseqüentemente menor consumo de energia elétrica, conforme ilustra a Fig. 4.

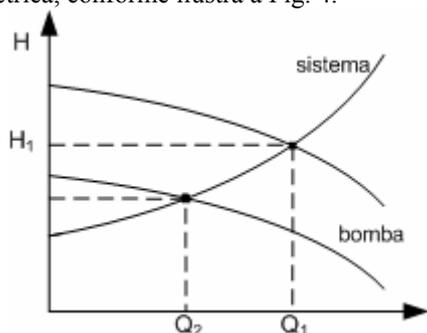


Fig. 4. Controle de vazão por variação da velocidade da bomba.

III. ENSAIOS LABORATORIAIS

Para verificar o comportamento do sistema frente a desequilíbrios de tensão foram realizados ensaios laboratoriais para quatro pontos de funcionamento da bomba centrífuga tomando como referência a vazão. Em relação ao controle de vazão utilizando válvula de estrangulamento, a bomba foi acionada pelo *soft-starter*, em virtude de limitações na corrente máxima a ser suprida pela fonte utilizada para gerar os distúrbios. Para o controle de vazão pela variação da rotação da bomba, foi utilizado o inversor de frequência.

Os ensaios laboratoriais foram realizados com aplicação de tensão senoidal trifásica equilibrada comparadas com outras duas situações de tensões senoidais e desequilibradas em módulo e ângulo. Complementarmente, foi realizado a comparação da eficiência energética dos sistemas motor-bomba ao utilizar estrangulamento de válvula e variação de velocidade, considerando a condição de tensão senoidal trifásica equilibrada. A título de ilustração a Tabela I mostra

a relação dos ensaios anteriormente referidos.

TABELA I. ENSAIOS REALIZADOS.

Casos	Tensão Aplicada		Controle de Vazão	
	Senoidal	Desequilíbrios 3% 5%	Estrangulamento de Válvula	Varição de Velocidade
1	x		x	
2		x x	x	
3	x		x	x
4		x x		x

A seguir estão relacionados as tensões aplicadas:

- Tensão senoidal trifásica e equilibrada – 220 V entre fases, 60 Hz.
- Os desequilíbrios (K) aplicados foram programados levando-se em consideração as componentes simétricas [4]:
 - K de 3% ($V_{an} = 130,81 \angle 0^\circ V$, $V_{bn} = 123,14 \angle 121^\circ V$, $V_{cn} = 123,14 \angle 238^\circ V$);
 - K de 5% ($V_{an} = 133,35 \angle 0^\circ V$, $V_{bn} = 123,94 \angle 122^\circ V$, $V_{cn} = 123,94 \angle 237^\circ V$).

A. *Caso 1 – Controle de vazão por válvula de estrangulamento e condições ideais de alimentação: tensão nominal senoidal e equilibrada.*

Caracterização dos ensaios

Uma vez conhecido os aspectos pertinentes à estação de trabalho do sistema de bombeamento, os ensaios iniciaram com a aplicação de uma tensão trifásica senoidal, simétrica e equilibrada (220 V – 60 hz). A variação da carga mecânica imposta ao motor elétrico foi obtida através das variações das vazões, as quais foram alteradas pelo sistema supervisorio. O controle foi executado com a válvula de estrangulamento. As medições foram efetuadas após o sistema elétrico entrar em equilíbrio térmico. Esta condição térmica foi conseguida pelas indicações dos valores das temperaturas indicadas nos sensores térmicos instalados nos enrolamentos da máquina elétrica.

Resultados

Os resultados dos parâmetros elétricos obtidos estão relacionados na Tabela II. Os parâmetros mecânicos e hidráulicos podem ser vistos na Tabela III.

TABELA II. GRANDEZAS REGISTRADAS COM TENSÃO SENOIDAL EQUILIBRADA UTILIZANDO VÁLVULA DE ESTRANGULAMENTO.

Sinal	Q (m ³ /h)	Medidos			Calculado
		V _{méd} (V)	I _{méd} (A)	P (W)	E (kWh)
Senoidal	3,10	219,93	3,30	1036,33	7254,33
	2,60	219,93	3,20	1009,00	7063,00
	1,60	219,93	3,00	899,67	6297,67
	0,50	219,97	2,70	782,00	5474,00

TABELA III. GRANDEZAS MECÂNICAS E HIDRÁULICAS COM TENSÃO SENOIDAL EQUILIBRADA, UTILIZANDO VÁLVULA DE ESTRANGULAMENTO.

Sinal	Q (m ³ /h)	Medidos			Calculado
		H (mca)	T (N.m)	Vel. (rpm)	P _{eixo} (W)
Senoidal	3,10	2,20	2,538	3408	905,38
	2,60	2,40	2,462	3397	875,21
	1,60	2,70	2,308	3403	821,76

Comentários

Observa-se através da Tabela III, a diminuição da vazão é acompanhada de uma elevação na pressão do sistema e vice-versa, caracterizando o ponto de funcionamento da bomba, conforme apresentado pela Fig. 5. De um modo geral, ao alterarmos a vazão, há uma modificação coerente no comportamento elétrico, mecânico e hidráulico no sistema de bombeamento. Em termos de eficiência energética observa-se uma pequena redução na potência de entrada do motor, quando o controle da vazão é realizado pela válvula de estrangulamento. Com o objetivo de comprovar a baixa eficiência energética com uso desse método, a última coluna da Tabela II mostra o consumo de energia elétrica para um total de 7.000 horas de funcionamento anual. No que tange à qualidade da energia, não há desequilíbrios na tensão e, conseqüentemente, as correntes são também equilibradas. Por este motivo, a Tabela II indica apenas o valor médio entre as três fases.

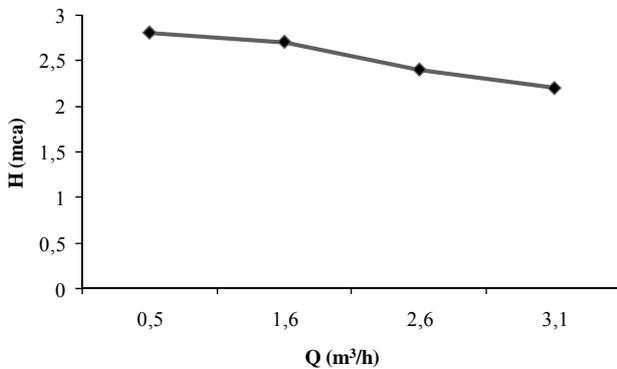


Fig. 5. Pressão x vazão – Caso 01.

A Tabela III evidencia que a mudança no ponto de operação do conjunto motor-bomba (redução na vazão) implica em uma diminuição do torque, porém a velocidade do eixo matem-se praticamente inalterada. Esta operação culmina em um menor consumo de energia elétrica.

A Fig. 6 ilustra o comportamento da potência ativa em função da vazão, mostrando uma relação praticamente linear entre estas grandezas.

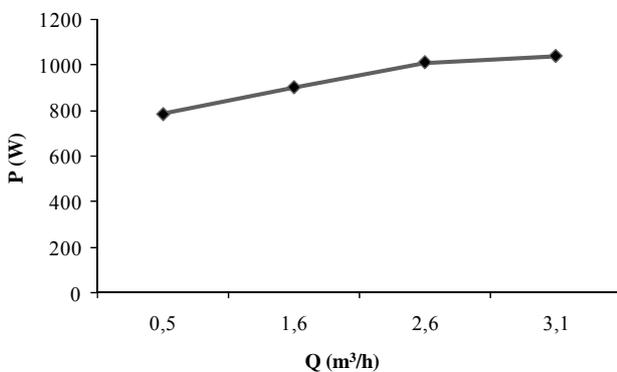


Fig. 6. Potência x vazão – Caso 01.

B. Caso 2 – Controle de vazão por válvula de estrangulamento em condições não ideais de alimentação: tensões desequilibradas

Caracterização do ensaios

Os ensaios prosseguiram com a aplicação de uma tensão trifásica senoidal e desequilibrada. Os desequilíbrios impostos foram de 3% e 5%. As observações para caracterização desse ensaio são as mesmas do Caso 1.

Resultados

Os resultados obtidos estão relacionados nas Tabela IV e V.

TABELA IV. GRANDEZAS REGISTRADAS COM TENSÃO SENOIDAL DESEQUILBRADA, UTILIZANDO ESTRANGULAMENTO DE VÁLVULA.

K	Medidos								Calculado
	Q (m³/h)	V _{AB} (V)	V _{BC} (V)	V _{CA} (V)	I _A (A)	I _B (A)	I _C (A)	P (W)	E (kWh)
3%	2,30	222,4	213,7	223,9	4,8	3,9	3,6	1344,00	9408,00
	2,00	222,4	213,7	223,9	4,7	3,7	3,4	1284,42	8990,92
	1,30	222,4	213,7	223,9	4,2	3,3	3,0	1110,33	7772,33
	-	222,5	213,7	223,9	3,8	2,8	2,7	941,00	6587,00
5%	2,30	224,5	209,5	226,1	5,4	4,0	3,3	1364,00	9548,00
	2,00	224,5	209,5	226,1	5,2	3,8	3,1	1302,00	9114,00
	1,30	224,6	209,5	226,2	4,7	3,3	2,8	1133,83	7936,83
	-	224,6	209,6	226,2	4,2	2,9	2,5	950,55	6653,82

TABELA V. GRANDEZAS MECÂNICAS E HIDRÁULICAS REGISTRADAS COM TENSÃO SENOIDAL DESEQUILBRADA, VÁLVULA DE ESTRANGULAMENTO

K	Medidos			
	Q (m³/h)	H (Kgf/cm²)	T (N.m)	Vel.(rpm)
3%	2,30	1,20	-	3340
	2,00	1,30	-	3331
	1,30	1,70	-	3364
	-	2,00	-	3386
5%	2,30	1,20	-	3316
	2,00	1,30	-	3343
	1,30	1,70	-	3362
	-	2,00	-	3390

Comentários

Observa-se na Tabela IV uma expressiva elevação da potência ativa e energia elétrica consumida em relação a alimentação com tensão senoidal (Caso 1) à medida que o desequilíbrio é majorado. Um grande desequilíbrio nas correntes de fase também pode ser observado. Em algumas situações, este desequilíbrio conduz a correntes superiores ao valor nominal para uma das fases, implicando em elevações de temperatura inadmissíveis e conseqüentemente redução da vida útil do motor.

Os valores programados de vazão foram idênticos ao Caso 1, porém nesta situação as grandezas registradas de vazão e pressão foram significativamente menores, chegando em algumas situações ao não registro das vazões. Durante a execução dos ensaios experimentais observou-se uma intensa vibrações no sistema de bombeamento, o que poderia ocasionar danos na bomba e no motor de alto rendimento. Neste sentido, acredita-se que este foi o motivo do torquímetro não indicar os valores no sistema supervisório.

TABELA IX. GRANDEZAS MECÂNICAS E HIDRÁULICAS REGISTRADAS COM TENSÃO SENOIDAL DESEQUILIBRADA E INVERSOR DE FREQUÊNCIA.

K	Medidos				Calculado P _{eixo} (W)
	Q (m ³ /h)	H (Kgf/cm ²)	T (N.m)	Vel.(rpm)	
3%	3,20	1,90	2,245	3212	755,13
	2,50	1,20	1,480	2840	440,16
	1,60	0,50	0,612	1796	115,10
	0,60	0,00	0,255	968	25,85
5%	3,20	1,90	2,296	3222	774,68
	2,40	1,10	1,429	2844	425,59
	1,60	0,50	0,612	1825	116,96
	0,60	0,00	0,255	986	26,33

Comentários

Observa-se neste caso que as correntes trifásicas estão desequilibradas e, apenas, na situação de maior vazão é superior ao valor nominal do motor. O torque voltou a ser registrado pelo torquímetro, denotando que o inversor consegue amenizar os efeitos nocivos causados no sistema pelo desequilíbrio de tensão. Este fato também é comprovado pelos valores medidos de vazão, os quais são próximos dos valores programados, diferentemente do ocorrido no Caso 02. Em relação à potência ativa e energia consumida, houve um ligeiro aumento quando comparado com o inversor alimentado com tensão senoidal trifásica, equilibrada, conforme ilustrado no Caso 3.

A Fig. 9 mostra que a potência de entrada do conjunto motor-bomba é praticamente a mesma para ambas as condições de desequilíbrio, mesma observação feita para o Caso 02.

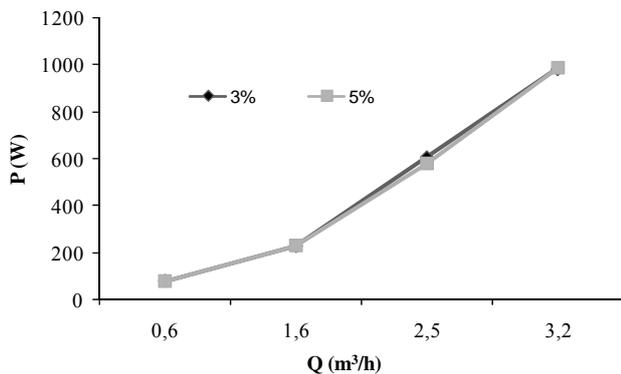


Fig. 9. Potência x vazão – Caso 04.

III. CONCLUSÃO

A análise do comportamento elétrico, mecânico e hidráulico de um sistema de bombeamento apresentada no presente trabalho comprovou que o controle de vazão realizado por variação de velocidade é vantajoso, sob o ponto de vista da eficiência energética, sobre o controle de vazão por válvula de estrangulamento. Esta característica é resultado da mudança do ponto de operação da bomba, melhorando o seu rendimento. Além de um menor consumo, o inversor de frequência também proporcionou melhores condições operacionais ao conjunto motor-bomba quando submetido a um suprimento com tensões desequilibradas, ou seja, proporciona uma melhor qualidade na tensão de alimentação do motor.

A presença de desequilíbrios na tensão de alimentação equivalente a 3 e 5% (valores ensaiados) mostrou-se crítica para o sistema de bombeamento quando da ausência do inversor de frequência. Essa situação altera acentuadamente o ponto de trabalho da bomba (vazão e pressão) e produz vibrações intensas nos sistemas mecânicos e hidráulicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Eletrobrás – Procel Indústria – pelo suporte financeiro para a capacitação do Laboratório de Sistemas Motrizes da UFU.

REFERÊNCIAS

- [1] H. J. F. Moreira, et al, Guia operacional de motores elétricos; Cepel - Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2000.
- [2] Previsão de carga do sistema interligado – 1ª revisão quadrimestral do planejamento anual da operação energética; EPE/ONS – Rio de Janeiro, maio de 2008.
- [3] M. A. G. Oliveira, A. L. F. Filho, M. G. S. Pinto, “Análise da Sensibilidade do Desequilíbrio de Tensão Frente a Variações nos Ângulos e Magnitudes das Tensões”, UNB – Brasília-DF, 2006.
- [4] A. H. M Santos, et al. “Conservação de energia: eficiência energética de instalações e equipamentos”, FUPAI – Itajubá-MG, 2001.
- [5] Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica, Dezembro 2008.