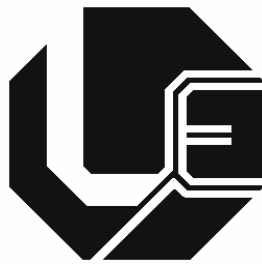


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM
SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO

Alexandre Borges Zappellini

Uberlândia
2008

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

ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM
SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO

Dissertação a ser apresentada por Alexandre Borges Zappellini à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências. Aprovada em 23 de Janeiro de 2008.

BANCA EXAMINADORA:

Décio Bispo, Dr. (Orientador) - UFU
Antônio Carlos Delaiba, Dr. - UFU
Paulo César Abreu Leão, Dr. – UFSJ
Sérgio Ferreira de Paula Silva, Dr. - QUALITY
Carlos Aparecido Ferreira, Msc. – ELETROBRÁS

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Z35a Zappelini, Alexandre Borges, 1979-
 Análise de eficiência energética em sistemas de ar comprimido /
Alexandre Borges Zappelini. - 2008.

134 f. : il.

Orientador: Décio Bispo.

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

Inclui bibliografia.

1. Compressores de ar - Teses. 2. Ar comprimido - Teses. 3. Energia elétrica - Racionamento - Teses. I. Bispo, Décio. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.51

ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO

Alexandre Borges Zappelini

Dissertação a ser apresentada por Alexandre Borges Zappelini à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. Décio Bispo, Dr
Orientador

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

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, em primeiro lugar, a Deus e em especial aos meus pais Pedro e Lílían que me ensinaram a viver e a sonhar.

AGRADECIMENTOS

Quero aqui expressar minha imensa alegria em estar concluindo mais um trabalho.

À Deus, agradeço, por ter estado comigo nos momentos difíceis e de angústia. Agradeço a Ele, pois sem a sabedoria que me foi dada do alto, não seria capaz de concluir esse projeto.

Agradeço aos meus pais, Pedro e Lílian, pelo apoio moral, financeiro e principalmente pela presença e preocupação com meus estudos. Aos meus irmãos pela amizade e companheirismo.

Ao professor Dr. Décio Bispo meus mais profundos agradecimentos, pela confiança depositada, amizade, compreensão às minhas limitações e orientação segura. Ao professor João Cícero da Eng. Mecânica pela amizade e pelo auxílio na elaboração deste trabalho.

Aos colegas de pós-graduação, em especial, Paulo Henrique B. Naves e Carlos Eduardo A. R. de Oliveira pelo companheirismo e apoio. Aos colegas Ronaldo Guimarães e Luiz Gustavo Martins que participaram deste projeto.

Ao amigo Fabrício Augusto por ter estado comigo e por me fazer ter certeza que valores como amizade e companheirismo são mais preciosos que qualquer título.

À ELETROBRÁS/PROCEL pelo subsídio financeiro e pela credibilidade depositada na Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU.

RESUMO

Os sistemas de ar comprimido representam parcela expressiva do consumo energético de uma instalação industrial. Todavia, a falta de um projeto adequado e de uma manutenção regular provoca redução no desempenho global caracterizando uma fonte constante de desperdícios. Este fato norteou o tema de pesquisa desta dissertação, a qual se encontra direcionada para o desenvolvimento e aplicação de técnicas para análise da eficiência energética de sistemas de ar comprimido. A análise será dirigida mais precisamente ao estudo do compressor instalado no laboratório de sistemas motrizes da Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU. Dentro deste foco principal, as atividades desenvolvidas e apresentadas neste documento contemplam questões associadas com a conservação de energia, apresentação do protótipo, sua análise através de simulações digitais no domínio do tempo, metodologia de diagnóstico energético, e por fim, um estudo de caso obtido do protótipo.

Palavras-Chave: Eficiência industrial, sistemas motrizes, compressores, eficiência energética.

ABSTRACT

The compressed air systems represent plot expressive of energy consumption of an industrial plant. However, the lack of an appropriate project and a regular maintenance causes reduction in the overall performance featuring a constant source of waste. This fact guided the subject of this dissertation research, which is directed towards the development and application of techniques for analysis of the energy efficiency of compressed air systems. The analysis will be addressed more specifically to the study of the compressor installed in the laboratory systems driving the Faculty of Electrical Engineering of the Federal University of Uberlândia. Within this focus, the activities developed and presented in this document include issues related to energy conservation, presentation of the prototype, its analysis through digital simulations in the field of time, method of diagnosis energy, and finally, a case study obtained the prototype.

Keywords: Industrial Efficiency, Motor Systems, Compressors, Energy efficiency.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

Introdução geral.....	01
1.1 Considerações iniciais.....	01
1.2 Diretrizes desta dissertação.....	04
1.3 Contribuições oferecidas por esta dissertação.....	05
1.4 Estrutura da dissertação.....	05

CAPÍTULO II

Descrição da plataforma de ensaios	08
2.1 Introdução.....	08
2.2 Plataforma de ensaio do compressor.....	08
2.2.1– Diagrama esquemático.....	09
2.2.2– Motores.....	13
2.2.3– Chave de Partida Direta.....	18
2.2.4– Módulo de Partida Suave	19
2.2.5– Multimedidor de Energia	20
2.2.6– Sensores e Atuadores.....	22
2.2.7– Compressor.....	23
2.3 Supervisório.....	28
2.3.1 – Descrição da Ferramenta.....	28
2.3.2 – Plataforma do Compressor.....	29
2.4 Conclusões parciais.....	36

CAPÍTULO III

Estudo computacional de desempenho do modelo motor-

compressor no programa ATP.....	37
3.1 Introdução.....	37
3.2 Simulador ATP.....	38
3.2.1 - ATPDRAW.....	38
3.2.2 - ATP Settings.....	40
3.2.3 - Simulações no ATPDRAW.....	42
3.2.4 - Rotina TACS.....	42
3.3 Modelagem do motor de indução trifásico no ATP.....	43
3.3.1 - Motores elétricos.....	44
3.3.2 - Modelo de Park ou dq0.....	46
3.3.3 - Modelo no programa ATP (Alternative Transients Programs).....	46
3.3.4 - Determinação dos parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico de 1,5 CV da linha padrão.....	51
3.3.5 - Determinação dos parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico de 1,5 CV da linha alto rendimento.....	55
3.3.6 - Inserção dos parâmetros no modelo representativo do motor no ATPDRAW.....	59
3.4 Modelagem do acionamento do motor de indução trifásico através de partida direta e <i>soft-starter</i> no programa ATP.....	63
3.4.1 - Partida direta.....	63
3.4.2 - Partida <i>Soft-Starter</i>	63

3.5	Modelagem da carga acoplada ao motor (compressor).....	71
	3.5.1 – Compressor.....	72
3.6	Análise transitória e em regime permanente da partida direta e <i>Soft-Starter</i> através do programa ATP.....	73
	3.6.1 - Análise transitória.....	75
	3.6.2 - Análise em regime permanente.....	78
3.7	Síntese dos resultados.....	84
3.8	Conclusões parciais.....	85

CAPÍTULO IV

	Metodologia de diagnóstico energético e estudo de caso.....	86
4.1	Introdução.....	86
4.2	Ar comprimido.....	87
	4.2.1 - Consumo dos Motores <i>Standard</i> e de Alto Rendimento.....	87
	4.2.2 - Perdas por vazamento.....	92
	4.2.3 - Perdas por Aumento de Temperatura.....	95
	4.2.4 - Perdas por aumento de pressão.....	97
	4.2.5 - Avaliação do superdimensionamento por método gráfico.....	99
4.3	Estudo de caso e análise financeira.....	100
4.4	Conclusões parciais.....	125

CAPÍTULO V

Conclusões.....	126
------------------------	------------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	130
--	------------

ANEXOS.....	134
--------------------	------------

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxograma do compressor.....	09
Figura 2.2 – Foto da plataforma de ensaio do sistema de ar comprimido.....	10
Figura 2.3 – Vista frontal e superior da plataforma do compressor.....	11
Figura 2.4 – Desenho Esquemático do Controle.....	12
Figura 2.5 – Curva Característica do Motor <i>Standard</i>	16
Figura 2.6 – Curva Característica do Motor de Alto Rendimento.....	17
Figura 2.6 – Base de Potência.....	17
Figura 2.7 – Detalhes do Display.....	22
Figura 2.8 – Classificação dos compressores.....	23
Figura 2.9 – Corte de um compressor a pistão.....	25
Figura 2.10 – Compressor Recíproco: Admissão.....	26
Figura 2.11 – Compressor Recíproco: Compressão.....	26
Figura 2.12 – Compressor Recíproco: Descarga.....	26
Figura 2.13 – Compressor Recíproco: Expansão.....	26
Figura 2.14 – Compressor Recíproco: Ciclo de compressão ideal.....	27
Figura 2.15 – Tela inicial do sistema supervisório.....	28
Figura 2.16 – Tela de opções de plataformas.....	29
Figura 2.17 – Tela principal do compressor.....	30
Figura 2.18 – Tela Comando do Compressor.....	32
Figura 2.19 – Tela Grandezas Elétricas.....	33
Figura 2.20 – Tela Temperatura do Motor.....	33
Figura 2.21 – PID – Compressor.....	34
Figura 2.22 – Tela Gráfico do Compressor.....	35
Figura 2.23 – Tela referente ao Banco de Dados.....	36
Figura 3.1 – Modelos de elementos de redes elétricas disponíveis no ATPDRAW.....	39
Figura 3.2 – Acesso a janela ATP SETTINGS.....	41
Figura 3.3 – Divisões da janela ATP SETTINGS.....	41
Figura 3.4 – Estimativa do consumo de energia consumida pela indústria.....	45

Figura 3.5 – Circuito equivalente para o eixo d.....	47
Figura 3.6 – Circuito equivalente para o eixo q.....	47
Figura 3.7 – Analogia entre Torque e Corrente feita pelo ATP.....	48
Figura 3.8 – Analogia entre Constante de Mola e Indutância feita pelo ATP.....	49
Figura 3.9 – Analogia entre Amortecimento Viscoso e Condutância feita pelo ATP.....	49
Figura 3.10 – Analogia Eletro-Mecânica feita pelo ATP.....	50
Figura 3.11 – Ícone representativo do motor de indução no ATPDRAW.....	60
Figura 3.12 – Inserção dos ramos RLC, chave controlável e fonte de alimentação.....	61
Figura 3.13 – Ligação do nó do rotor e do nó de neutro.....	61
Figura 3.14 – Esquema da partida direta no ATP.....	63
Figura 3.15 – Comparação entre arranque direto e com controlador.....	65
Figura 3.16 – Modelo do <i>Soft-Start</i> no ATPDRAW.....	67
Figura 3.17 – Forma de onda da tensão que alimenta o estator de 0 a 60 [ms].....	68
Figura 3.18 – Valor RMS da tensão fundamental no período considerado.....	68
Figura 3.19 – Forma de onda da tensão que alimenta o estator de 0.99 a 1.080 [s].....	69
Figura 3.20 – Valor RMS da tensão fundamental no período considerado.....	69
Figura 3.21 – Forma de onda da tensão que alimenta o estator de 1.28 a 1.38 [s].....	70
Figura 3.22 – Valor RMS da tensão fundamental no período considerado.....	70
Figura 3.23 – Característica de aceleração das cargas.....	72
Figura 3.24 – Inserção da fonte de corrente representando o compressor.....	73
Figura 3.25 – Montagem da partida direta, motor trifásico e carga (compressor).....	73
Figura 3.26 – Montagem da partida <i>soft-starter</i> , motor trifásico e carga (compressor).....	74
Figura 3.27 – Família de curvas representativa de conjugado de carga constante.....	74
Figura 3.28 – Velocidade do motor com partida direta e partida por <i>Soft-Starter</i>	76
Figura 3.29 – Corrente de partida direta (verde) e com <i>soft-starter</i> (vermelho).....	76
Figura 3.30 – Torque do motor com partida direta e <i>soft-starter</i>	77
Figura 3.31 – Forma de onda da corrente de regime permanente.....	78
Figura 3.32 – Valor RMS da corrente de regime permanente.....	78
Figura 3.33 – Forma de onda do conjugado de carga.....	79
Figura 3.34 – Valor do conjugado de carga.....	79
Figura 3.35 – Forma de onda da velocidade em rad/s.....	80
Figura 3.36 – Valor da velocidade em rad/s.....	80
Figura 3.37 – Forma de onda da potência ativa de entrada no motor.....	81
Figura 3.38 – Valor da potência de entrada no motor.....	81
Figura 3.39 – Forma de onda da potência de saída do motor.....	82

Figura 3.40 – Valor da potência de saída do motor.....	82
Figura 3.41 – Forma de onda representativa do torque interno do motor (vermelho) e do conjugado de carga (verde).....	83
Figura 4.1 – Gráfico de carga e alívio referente à XV-02.....	103
Figura 4.2 – Composição percentual do custo das perdas para XV-02.....	106
Figura 4.3 – Gráfico de carga e alívio referente à XV-03.....	107
Figura 4.4 – Composição percentual das perdas pra XV – 03.....	109
Figura 4.5 – Gráfico de carga e alívio referente à XV-04.....	110
Figura 4.6 – Composição percentual das perdas para XV – 04.....	111
Figura 4.7 – Gráfico de carga e alívio referente à XV-05.....	113
Figura 4.8 – Composição percentual das perdas para XV – 05.....	114
Figura 4.9 – Gráfico de carga e alívio referente à XV-06.....	116
Figura 4.10 – Composição percentual das perdas para XV – 06.....	117
Figura 4.11 – Curvas de desempenho do motor <i>Standard</i>	119
Figura 4.12 – Ponto de carregamento do motor <i>Standard</i> de 1,5 [CV].....	120
Figura 4.13 – Ponto de carregamento, rendimento e fator de potência do motor <i>Standard</i> de 1,5 [CV].....	121
Figura 4.14 – Curva Característica do Motor de Alto Rendimento.....	122
Figura 4.15 – Ponto de carregamento do motor de Alto Rendimento de 1,5 [CV].....	123
Figura 4.16 – Ponto de carregamento, rendimento e fator de potência do motor de Alto Rendimento de 1,5 [CV].....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Grandezas medidas pelo Power Logic Meter.....	20
Tabela 3.1 – Analogia eletromecânica.....	48
Tabela 3.2 – Parâmetros do Ramo Magnético inseridos no modelo do motor no ATP.....	59
Tabela 3.3 – Parâmetros do Estator inseridos no modelo do motor no ATP.....	59
Tabela 3.4 – Parâmetros do Rotor inseridos no modelo do motor no ATP.....	60
Tabela 3.5 – Parâmetros Gerais inseridos no modelo do motor no ATP.....	60
Tabela 3.6 – Correspondência entre sistema mecânico e elétrico no ATP.....	62
Tabela 3.7 – Dados referentes aos pontos de pressão máxima e de pressão mínima.....	75
Tabela 3.8 – Análise em regime permanente das grandezas estudadas.....	84
Tabela 4.1 – Tempos parciais do ciclo de carga e alívio para XV-02.....	103
Tabela 4.2 – Composição do custo das perdas.....	105
Tabela 4.3 – Valores das grandezas referentes ao vazamento XV-03.....	107
Tabela 4.4 - Tempos parciais do ciclo de carga e alívio para XV-03.....	107
Tabela 4.5 – Composição do custo das perdas.....	108
Tabela 4.6 – Valores das grandezas referentes ao vazamento XV-04.....	109
Tabela 4.7 – Tempos parciais do ciclo de carga e alívio para XV-04.....	110
Tabela 4.8 – Composição do custo das perdas.....	111
Tabela 4.9 – Valores das grandezas referentes ao vazamento XV-05.....	112
Tabela 4.10 – Tempos parciais do ciclo de carga e alívio para XV-05.....	112
Tabela 4.11 – Composição do custo das perdas.....	113
Tabela 4.12 – Valores das grandezas referentes ao vazamento XV-06.....	115
Tabela 4.13 - Tempos parciais do ciclo de carga e alívio para XV-06.....	115
Tabela 4.14 – Composição do custo das perdas.....	116

CAPÍTULO I

Introdução geral

1.1 – Considerações iniciais

Os problemas ocorridos nos anos 90, no setor elétrico brasileiro, demonstraram que a energia elétrica é um insumo valioso e, como tal, deve ser usado de maneira racional. A necessidade de metodologias e estudos que visem à eficiência energética foi demonstrada de forma cabal pela crise de abastecimento que assolou o país no ano de 2001 [1].

As fontes de energia utilizadas em maiores escalas no mundo atual, sejam elas provenientes do petróleo, do carvão, ou de fontes hídricas se tornam cada vez mais escassas. E outras, como a nuclear, apresentam restrições quanto a sua segurança; a solar limitação tecnológica e a eólica problemas de localização que restringem sua implantação.

Assim, o constante aumento da demanda energética, sustentado pelas mudanças inerentes sofridas no cenário mundial, sejam elas mudanças de caráter tecnológico ou mesmo ligadas ao nicho ao qual a sociedade encontra-se imersa. Logo, novas soluções

devem ser desenvolvidas de forma a suprir esse aumento e concomitantemente atender as condições de preservação do planeta.

O cenário traçado pelo Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) estima que o PIB brasileiro deverá crescer 4,5% em 2007 e aproximadamente 5% nos próximos três anos [2]. O crescimento econômico acarreta necessariamente aumento no consumo de energia elétrica.

Segundo o Gerente de Utilização de Energia da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) ações que objetivem o uso racional e eficiente de energia correspondem a construção de uma usina virtual de energia [3]. Embasando tal opinião, Howard Steven Geller relata: a economia de energia elétrica, em 1998, permitiu que as concessionárias brasileiras evitassem implementar aproximadamente 1560 MW de nova capacidade geradora, o que significou cerca de 3,1 bilhões de investimentos evitados [4].

O setor industrial, segundo o Balanço Energético Nacional – BEN de 2005, consumiu 203,48 TWh o correspondente a 47,9% de toda a eletricidade consumida no país. No que se refere ao cenário industrial, a CEMIG informa, em seu sítio que: no Brasil, os motores elétricos de indução são responsáveis por cerca de 50% das cargas elétricas industriais, chegando a 70% em determinadas regiões.

A tendência é que o déficit de energia seja cada vez maior ao longo do tempo. Neste particular, a busca por soluções que visem combater o desperdício em todas as áreas de utilização da energia elétrica se torna imprescindível.

O conceito de utilização racional de energia veio alterar a forma de encarar a energia, demonstrando ser possível crescer sem aumentar o consumo ou afetar a produção. Nesse sentido, o termo gestão da energia deve ser encarado como qualquer outro fator de produção, devendo ser gerida de forma contínua e eficaz.

A justificativa mais usual e que mais sensibiliza a generalidade dos industriais é o argumento da competitividade. Reforçando esta questão veio à pressão ambiental como mais um ponto determinante da eficiência energética. Seja por imposição legal, seja pela necessidade de cumprir requisitos ambientais cada vez mais a eficiência energética é um assunto pertinente e atual.

Assim, a eficiência energética, conceito entendido como o gerenciamento amplo do uso das fontes existentes e das que estão emergindo, é o melhor caminho para evitar o desperdício de energia e garantir a oferta necessária ao desenvolvimento sustentável.

Com tais preocupações em mente, a Eletrobrás apóia programas estratégicos do governo federal como o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL). Esta iniciativa apresenta fundamental importância na definição de estratégias e mobilização da sociedade contra o desperdício de energia elétrica. A energia economizada permite adiar o investimento em novas unidades geradoras e focar recursos em outras áreas.

Dentro deste contexto, a Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Minas Gerais, em parceria com ELETROBRÁS/PROCEL, idealizou um laboratório que, de forma prática e inteligente, permite o estudo das principais cargas motrizes utilizadas no setor industrial. Com vasta e reconhecida atuação nos campos da qualidade da energia elétrica e máquinas elétricas, essa universidade reconheceu a necessidade de, também, avançar no campo da utilização da energia elétrica de forma racional [1].

1.2 – Diretrizes desta dissertação

Os sistemas de ar comprimido representam parcela expressiva do consumo energético de uma instalação industrial. Todavia, a falta de um projeto adequado e de uma manutenção regular provoca redução no desempenho global caracterizando uma fonte constante de desperdícios.

Infelizmente no nosso país poucos gestores e técnicos encaram o ar comprimido como uma forma de energia, que deverá ser utilizada racionalmente de modo à rentabilizar o processo produtivo.

Assim, este trabalho pretende contribuir para o estudo de eficiência energética no sistema de ar comprimido instalado no laboratório de sistemas motrizes da Faculdade de Engenharia Elétrica conveniado junto à Eletrobrás. Esta contribuição é no âmbito de apresentar procedimentos que podem ser realizados em laboratório, como também, dentro das estruturas das indústrias com o objetivo de se fazer o diagnóstico energético de sistemas de ar comprimido.

Com base nessas análises, algumas soluções serão apresentadas objetivando reduzir o consumo e desperdício de energia elétrica.

A redução dos custos de geração de ar comprimido requer processos adequados e algumas medidas operacionais relacionadas ao controle da temperatura ambiente que se encontra o compressor, vazamentos na rede de distribuição e pressão de trabalho em níveis adequados.

1.3 – Contribuições oferecidas por esta dissertação

Tendo contextualizado o tema e estabelecido às diretrizes que nortearão a concepção e o desenvolvimento da presente pesquisa, vale ressaltar que esta dissertação apresenta as seguintes contribuições:

- Desenvolvimento do modelo computacional de desempenho do motor-compressor no programa ATP, utilizando de técnicas de representação baseadas no domínio do tempo;
- Aplicação de metodologias de diagnóstico energético já consagrados na literatura técnica especializada direcionada especificamente ao sistema de ar comprimido;
- Realização de estudo de caso a partir de dados obtidos dos ensaios operacionais executados no sistema de ar comprimido;
- Sensibilizar os gestores e técnicos ligados à atividade industrial da importância de se adotar um gerenciamento adequado e racional voltados ao consumo energético de sistemas de ar comprimido, objetivando com isso rentabilizar o processo produtivo.

1.4 – Estrutura da dissertação

Com o intuito de atender as metas supracitadas, esta dissertação apresenta-se estruturada, além deste capítulo introdutório, com as seguintes unidades:

CAPÍTULO II – DESCRIÇÃO DA PLATAFORMA DE ENSAIOS

Este capítulo destina-se a descrição das características e funcionalidades do laboratório de sistemas motrizes enfocando a plataforma do compressor. A meta é familiarizar o pesquisador com o sistema a ser analisado. Serão apresentados os principais componentes, o seu funcionamento, o sistema de controle através do supervisor e alguns detalhes pertinentes que contribuirão para o desenvolvimento desta pesquisa.

CAPÍTULO III – ESTUDO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO DO MODELO

MOTOR-COMPRESSOR NO PROGRAMA ATP

Esta unidade tem por meta desenvolver uma modelagem para simular e comparar o acionamento do motor de indução trifásico (*standard* e alto rendimento) através de partida direta e *soft-starter* utilizando técnicas de modelagem no programa ATP. A simulação considera como carga mecânica o compressor que está acoplado ao eixo do motor.

O intuito é analisar as características e particularidades em termos de grandezas elétricas e mecânicas do modelo completo representativo da bancada do compressor e verificar sua validação em relação ao modelo real.

CAPÍTULO IV – METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO E ESTUDO DE CASO

Este capítulo está centrado nas descrições e características de metodologias de diagnóstico energético para determinação da perda de energia devido a vazamentos na rede de distribuição, e também a perda de eficiência do compressor no que se refere à temperatura de admissão do ar e aos níveis de pressão na operação do compressor. O método utilizado para quantificação dos caudais de vazamento será o da medição do tempo em carga. Com relação ao motor que aciona a carga, as análises se restringiram ao consumo e possível substituição do motor *Standard* pelo de Alto Rendimento, e também a verificação de eventual sobredimensionamento.

Com os ensaios executados e os dados colhidos se tornou pertinente o estudo de caso e análise financeira com o intuito de evidenciar as fórmulas demonstradas e comprovar numericamente as grandezas relacionadas ao tema Eficiência Energética.

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES

Este capítulo sintetiza as principais contribuições do trabalho e suas conclusões finais a respeito dos pontos focados ao longo do documento, quanto às características avaliadas para a bancada do compressor em estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Por fim, condensa-se o material bibliográfico utilizado para o desenvolvimento desta dissertação.

CAPÍTULO II

Descrição da plataforma de ensaios

2.1– Introdução

Este capítulo traz a descrição, características e funcionalidades do laboratório de sistemas motrizes. A descrição envolve o detalhamento da plataforma de ensaio do compressor. Esta carga foi instalada de forma independente, contendo um sistema de comando composto por: sistemas de automação, controle e medições integrados. Um acionamento composto por dois motores (*standard* e *auto-rendimento*) e dois modos de partida (*direta* e *soft-start*) que acoplados à carga, permitem a visualização das formas de controle e operação dos equipamentos, sobre o enfoque da eficiência industrial [1].

2.2 - Plataforma de ensaio do compressor

É composta por um sistema completo de acionamento. Está instalado um micro-computador (CPU, monitor, mouse, teclado e *no-break*) responsável pelo monitoramento e controle através do supervisor *Indusoft 6.1*. Estão instalados dois motores (*Standard* e *Alto Rendimento*), o módulo de carga (com variação de 0 a 120% da carga nominal do motor) e dispositivos de sensoramento e atuação. Em um painel estão instalados os dispositivos de partida (*partida direta* e *soft-starter*), o controlador programável (CLP),

medidor de grandezas elétricas e elementos de acionamento e proteção como contatores, disjuntores e fusíveis [1].

Na sequência são apresentados os detalhes de cada equipamento que compõe a plataforma do compressor.

2.2.1 – Diagrama esquemático

As conexões existentes entre os equipamentos, enfocando-se o fluxograma e a vista frontal e superior da plataforma, são mostradas na sequência.

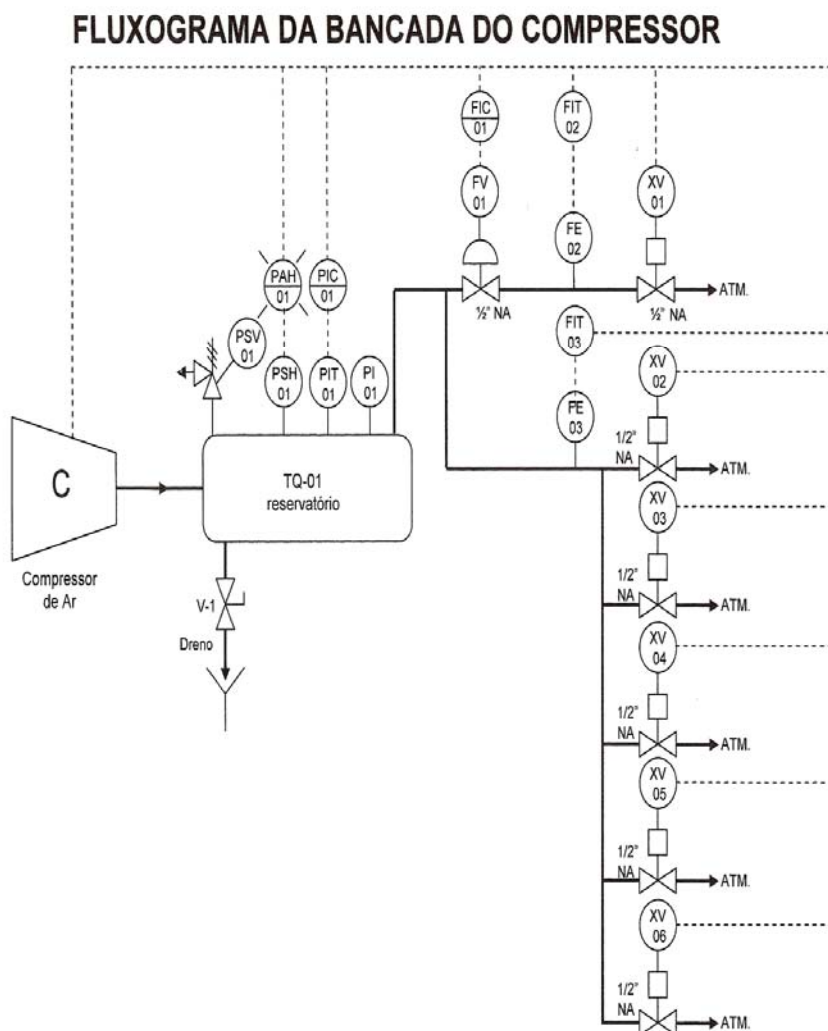


Figura 2.1 - Fluxograma do compressor

CAPÍTULO II – Descrição da plataforma de ensaios

A figura 2.1 representa o fluxograma do compressor. Os componentes deste fluxograma serão apresentados em momento oportuno no item referente ao supervisor.

A figura 2.3 representa a vista frontal e superior da plataforma de ensaio do compressor, juntamente com o esquema unifilar simplificado de comando considerando partida direta e *soft-starter*. Contempla também as comunicações em rede via Ethernet (entre PC e o CLP) e Modbus (entre CLP e os dispositivos de partida e medição), juntamente com as entradas analógicas e digitais.



Figura 2.2 – Foto da plataforma de ensaio do sistema de ar comprimido

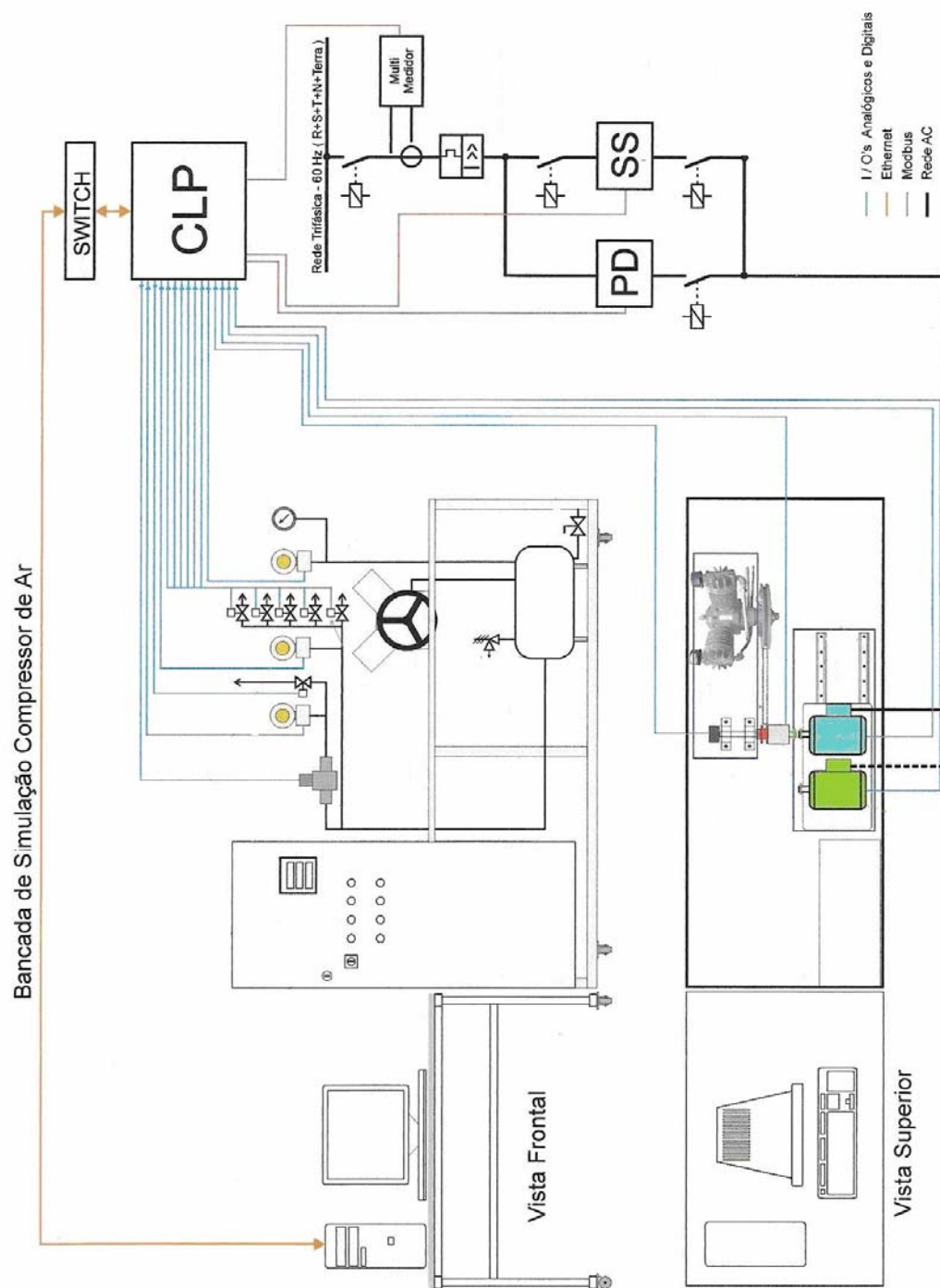


Figura 2.3 – Vista frontal e superior da plataforma do compressor

CAPÍTULO II – Descrição da plataforma de ensaios

A figura 2.4 representa de forma simplificada as conexões de controle entre os dispositivos de partida, sensores, atuadores e controladores.

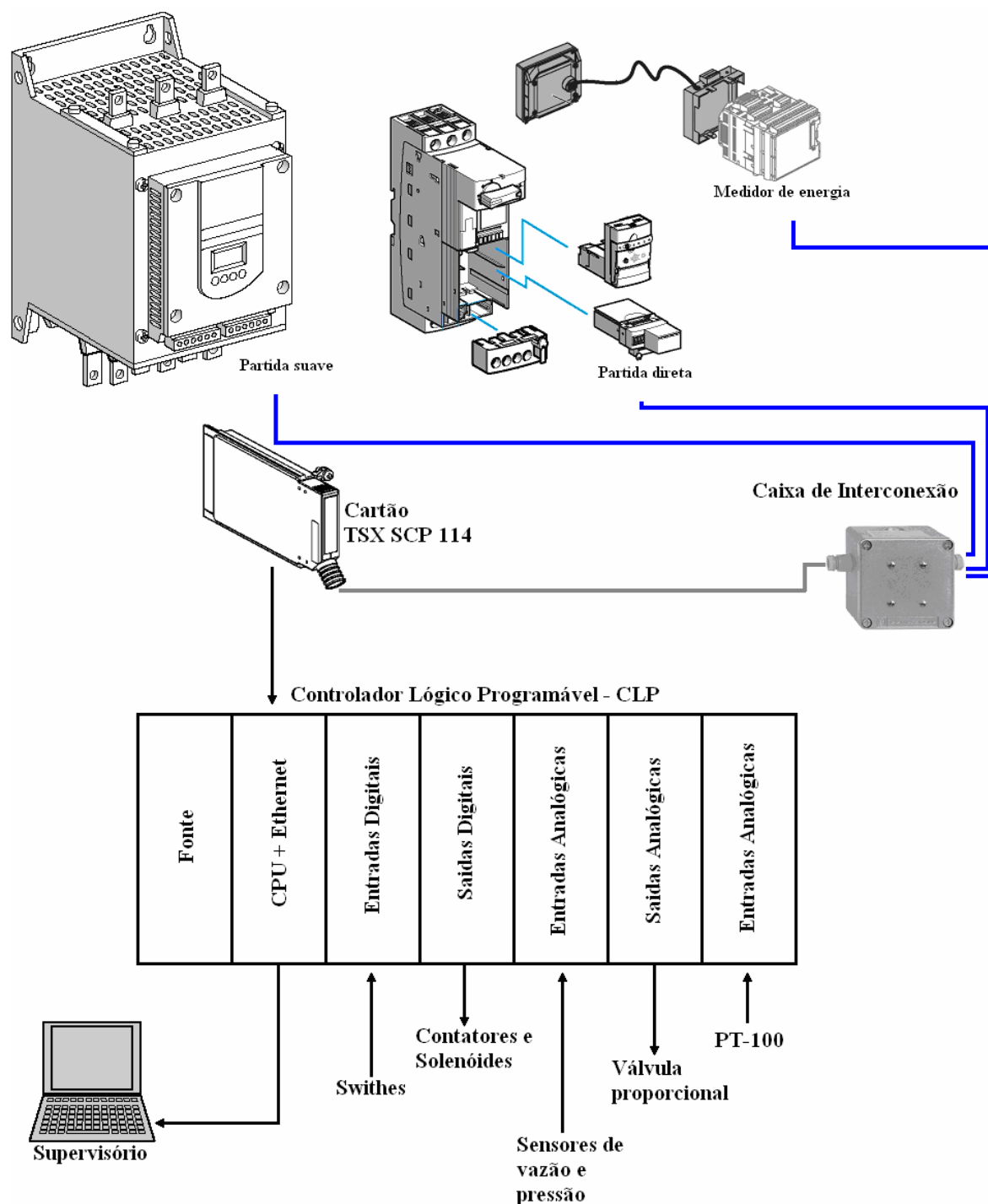


Figura 2.4 – Desenho Esquemático do Controle

A comunicação entre o CLP e os dispositivos de partida e medição é realizada via protocolo Modbus RTU. Já a comunicação do microcomputador (supervisório) com o CLP é realizada via Ethernet [1].

A comunicação dos equipamentos de medição e partida é detalhada mais adiante.

2.2.2 – Motores

Na plataforma do compressor são utilizados dois motores de indução trifásicos de 1,5CV. Um *Standard* (azul) e outro de Alto Rendimento (verde).

Adiante serão apresentadas algumas especificações técnicas de cada um dos motores [5]:

- **Motor Standard:**
 - o Modelo: HE36350;
 - o Grau de Proteção: IP55;
 - o Isolação: B;
 - o Regime: S1;
 - o Potência Nominal: 1,5 CV;
 - o Tensões Nominais: 220/380;
 - o Correntes Nominais: 4,27/2,47;
 - o Frequência Nominal: 60 Hz;
 - o Velocidade de Rotação Nominal: 3370 rpm;
 - o Razão da Corrente de Partida pela Corrente Nominal (I_p/I_n): 7,5;
 - o Categoria de desempenho: N;

- o Fator de Serviço: 1,15;
 - o Rendimento Nominal: 78,6;
 - o Fator de Potência Nominal: 0,86.
- **Motor de Alto Rendimento:**
 - o Modelo: G192961;
 - o Grau de Proteção: IP55;
 - o Isolação: F;
 - o Regime: S1;
 - o Potência Nominal: 1,5 CV;
 - o Tensões Nominais: 220/380;
 - o Correntes Nominais: 4,02/2,33;
 - o Frequência Nominal: 60 Hz;
 - o Velocidade de Rotação Nominal: 3390;
 - o Razão da Corrente de Partida pela Corrente Nominal (I_p/I_n): 7,5;
 - o Categoria de desempenho: N;
 - o Fator de Serviço: 1,15;
 - o Rendimento Nominal: 82,5;
 - o Fator de Potência Nominal: 0,87.

O Grau de Proteção define as condições de segurança e de funcionamento em função da agressividade do ambiente e a segurança das pessoas, na qual tem a função de impedir que sejam atingidas e corram risco de vida. No caso dos motores empregados, o

CAPÍTULO II – Descrição da plataforma de ensaios

grau de proteção IP55 indica que o motor está protegido contra poeira prejudicial ao motor (primeiro numeral), e protegido contra jato de água em qualquer direção (segundo numeral) [5].

A Isolação do motor indica a classe de isolante utilizado na fabricação do mesmo. No caso dos motores utilizados, a classe do isolante é B para o motor da linha *Standard* e F para o motor de alto rendimento. Isolação B indica que o isolante suporta uma temperatura de 130°C e isolação F indica que o isolante suporta uma temperatura de 155°C [6].

O Regime de Serviço indica como se comporta a carga ao longo do tempo. No caso, o regime é S1, isso corresponde a uma carga constante no eixo do motor, com duração suficiente para que o equilíbrio térmico seja atingido [6].

O Fator de Serviço multiplicado pela potência nominal do motor indica a carga que pode ser acionada pelo motor. É uma reserva de energia que pode ser utilizada, preferencialmente, em regime não contínuo porque a utilização desse fator em regime contínuo implica numa redução de 50% da vida útil do sistema de isolação [6]. O fator de serviço dos motores da bancada é de 1,15. Sendo a potência Nominal de 1,5CV, logo temos uma potência total disponível de 1,725CV.

As figuras 2.5 e 2.6 a seguir representam a curva de desempenho dos motores *Standard* e de Alto Rendimento, respectivamente [5].

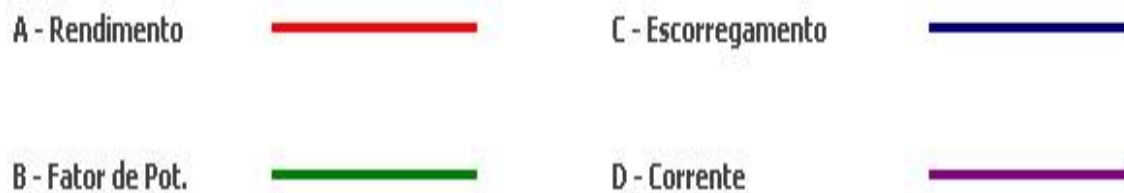
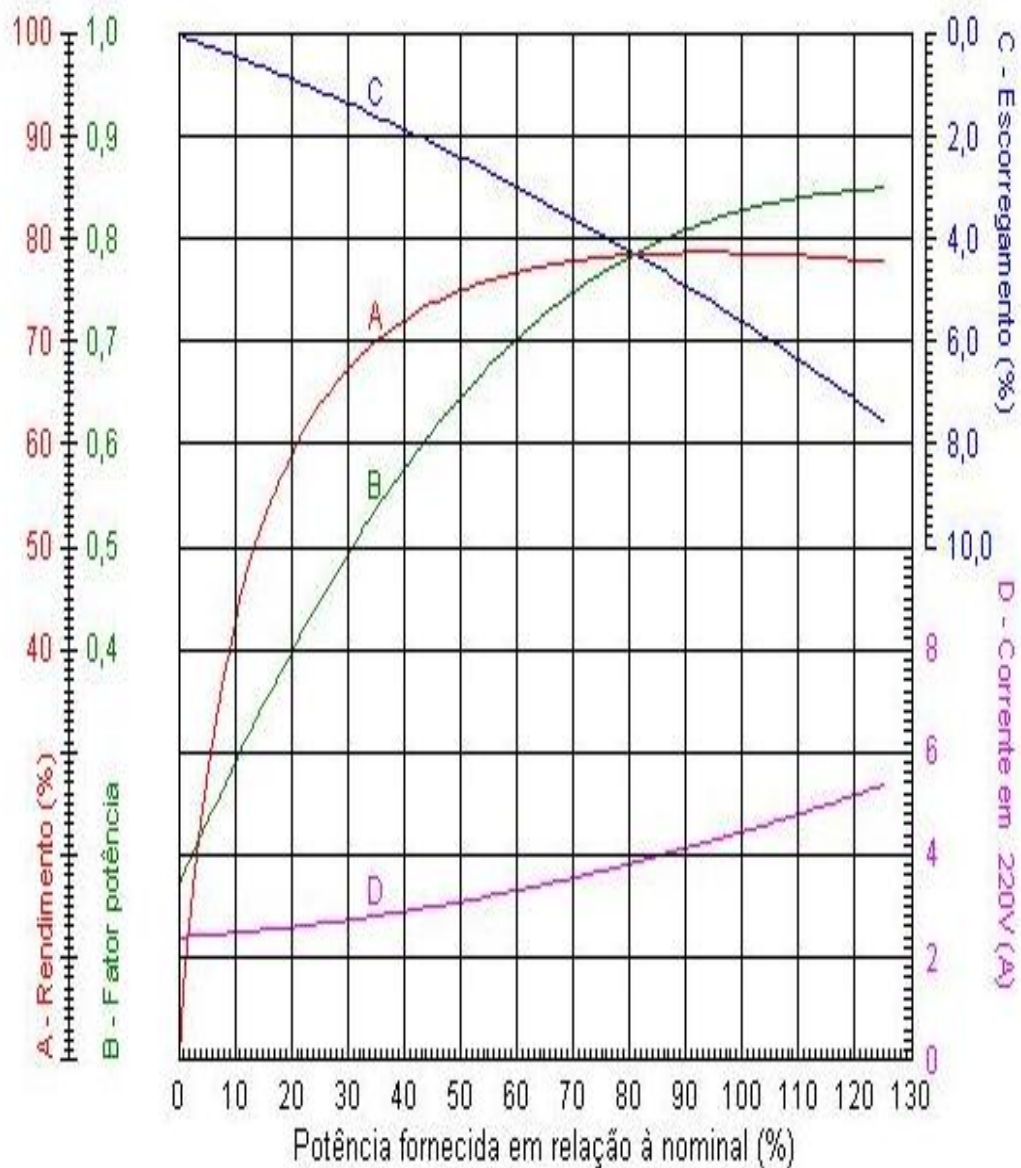
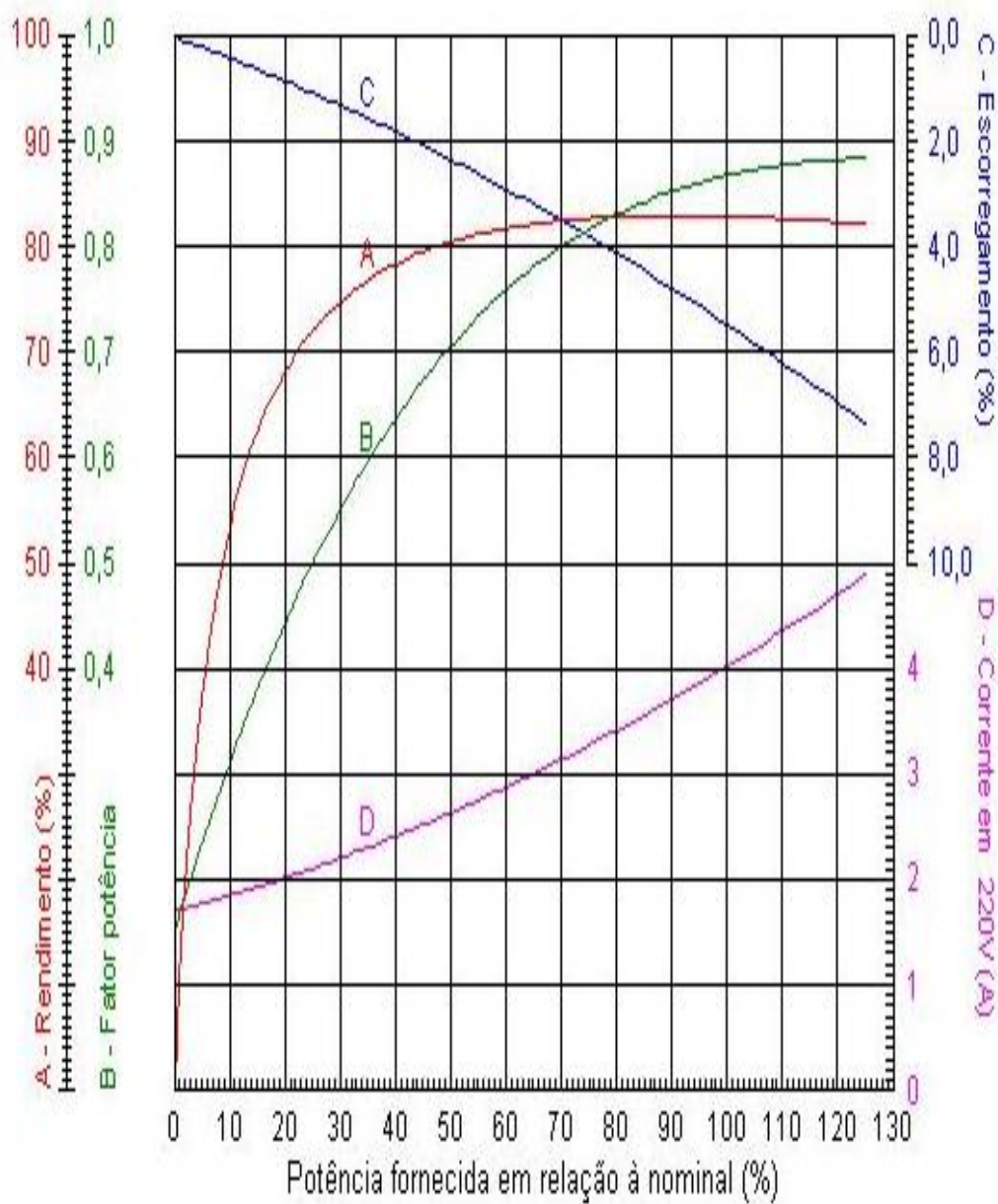


Figura 2.5 – Curva Característica do Motor *Standard*



A - Rendimento



C - Escorregamento



B - Fator de Pot.



D - Corrente



Figura 2.6 – Curva Característica do Motor de Alto Rendimento

2.2.3 – Chave de Partida Direta

Partida direta consiste em acionar motores conectando-os diretamente à rede elétrica. Isso se dá, aplicando-se tensão nominal nos enrolamentos do estator do motor de maneira direta [6].

Esse tipo de partida é caracterizado por elevar a corrente de partida de, aproximadamente, 6 a 7 vezes da corrente nominal do motor. É a forma mais barata de acionar uma máquina, porém apresenta várias desvantagens.

Algumas das desvantagens com relação a outros métodos de partida são, como por exemplo, um transiente de corrente e torque durante a partida. A corrente variando entre 6 e 7 vezes a nominal, obriga o projetista do sistema elétrico a superdimensionar o sistema de alimentação, disjuntores, fusíveis, que fazem parte do circuito elétrico que alimenta o motor. Dependendo dos valores de pico de corrente, a tensão do sistema pode sofrer quedas significativas. O Transiente de torque, faz com que os componentes mecânicos associados ao eixo do motor, sofram desgaste prematuro. A situação piora à medida que a potência elétrica do motor aumenta.

A partida direta do compressor é realizada através de um dispositivo fabricado pela Telemecanique [7]. É utilizada a chave de Partida Integrada de Motor TeSys modelo U [7]. Ela é composta por uma base de potência, por uma unidade de controle e por um módulo de comunicação.

2.2.4 – Módulo de Partida Suave

Os *soft-starters* são equipamentos eletrônicos tiristorizados que, de acordo com o controle das três fases do motor assíncrono, regulam a tensão e a corrente durante a parada e a partida de motores elétricos, realizando o controle efetivo do conjugado [8], [9].

Os sensores de corrente incorporados enviam as informações ao microprocessador para realizar e controlar o conjugado, diante das diferentes condições de carga além de proteger o motor de eventuais sobrecargas.

É recomendado o uso de partidas progressivas *soft-starter*, quando se deseja alguns benefícios como: reduzir picos de corrente na rede durante a partida; para desacelerações suaves; paradas controladas sem desgastes e sem aumento de temperatura; reduzir as quedas de tensão na linha; otimizar o funcionamento da máquina. Sua aplicação é mais comum quando não é exigida a variação de velocidade.

O *Soft-Starter* controla a tensão sobre o motor através do circuito de potência, constituído por seis SCR's, variando-se o ângulo de disparo dos mesmos e, conseqüentemente, variando-se a tensão eficaz aplicada ao motor. Assim, pode-se controlar a corrente de partida do motor, proporcionando uma "partida suave" (*soft start* em inglês), de forma a não provocar quedas de tensão bruscas na rede de alimentação, como ocorre em partidas diretas devido ao grande valor de corrente.

Os *Soft-Starters* costumam funcionar com a tecnologia chamada *by-pass*. Essa tecnologia consiste em ligar um contator substituindo os módulos de tiristores após a partida do motor. Isso evita o sobreaquecimento dos tiristores.

A partida utilizando-se *Soft-Starter* do compressor é realizada através de um equipamento da Telemecanique: Altistart 48 – ATS 48D17Q [10].

O conversor Altistart 48 é um equipamento com 6 tiristores que permite a partida e a parada progressiva totalmente controlada em conjugado dos motores assíncronos trifásicos de gaiola [10].

Este equipamento possui as funções de partida e paradas suaves, de proteção das máquinas e dos motores e as funções de comunicação com os automatismos.

2.2.5 – Multimedidor de energia

O Multimedidor de energia é um equipamento multifuncional. É um instrumento digital e possui dispositivo de controle e aquisição de dados. Ele é equipado com comunicação RS485 para integrar sistemas de controle e monitoramento.

A tabela 2.1 adiante apresenta uma lista de grandezas mensuráveis pelo Power Logic [11].

Tabela 2.1 – Grandezas medidas pelo Power Logic Meter

Grandezas em Tempo Real	Analizador de Energia
✓ Corrente nas três fases e no neutro	✓ Tensão Fundamental por fase
✓ Tensão de fase e de linha nas três fases	✓ Corrente Fundamental por fase
✓ Potência Ativa nas três fases	✓ Potência Ativa Fundamental por fase
✓ Potência Reativa nas três fases	✓ Potência Reativa Fundamental por fase
✓ Potência Aparente nas três fases	✓ Desequilíbrio de Tensão e Corrente
✓ Fator de Potência nas três fases	✓ Rotação de fase
✓ Frequência	✓ Amplitude e ângulo dos harmônicos de corrente e tensão
✓ DHT	

CAPÍTULO II – Descrição da plataforma de ensaios

Energia	Demanda
✓ Energia Ativa acumulada	✓ Demanda de corrente nas três fases
✓ Energia Reativa acumulada	✓ Fator de Potência Médio
✓ Energia Aparente acumulada	✓ Demanda de Potência Ativa nas três fases (atual e de pico)
	✓ Demanda de Potência Reativa nas três fases (atual e de pico)
	✓ Demanda de Potência Aparente nas três fases (atual e de pico)
	✓ Previsão de Demanda de Potência

A alimentação do equipamento é feita por tensão alternada utilizando-se a fase L1 ou A, e a fase L2 ou B disponíveis no painel.

É importante observar no diagrama elétrico do painel que foi apresentado anteriormente, que os TC's estão dispostos de tal forma que por eles passam somente a corrente que vai para os motores. A corrente que alimenta os dispositivos internos do painel não passa pelos TC's. Isto porque a análise que se deseja fazer através dos ensaios é da eficiência dos motores.

A figura 2.7 indica cada componente do display do medidor [11]. Através desse display, várias informações poderão ser acessadas. A maioria delas será acessada via supervisor.

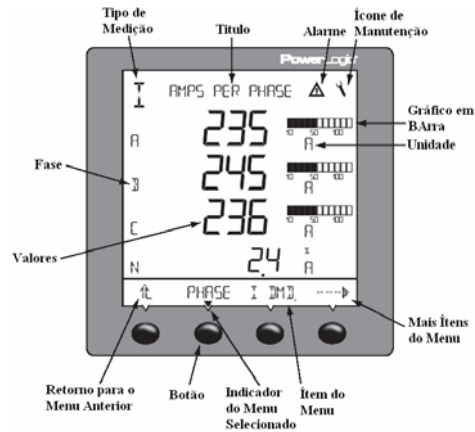


Figura 2.7 – Detalhes do Display

2.2.6 – Sensores e Atuadores

- **Sensores:**

- o **PIT-01:** SMC PRESSURE. Esse é um sensor que indica e transmite para o CLP o valor da pressão do reservatório de ar comprimido. A transmissão é feita no padrão 4-20mA [12].
- o **FIT-02:** YOKOGAWA. Esse é um sensor que indica e transmite para o CLP o valor da vazão de ar correspondente às perfurações que simulam os vazamentos no sistema. A transmissão é feita no padrão 4-20mA [13].
- o **FIT-03:** YOKOGAWA. Esse é um sensor que indica e transmite para o CLP o valor da vazão de ar correspondente à carga no sistema. A transmissão é feita no padrão 4-20mA [13].

- o **Encoder:** hohner - TH22R4500. Esse é um sensor de velocidade de rotação. Ele transmite o valor para o CLP no padrão 4-20mA .
- **Atuadores:**
 - o **Válvulas Solenóides (XV-1 à XV-6):** Fabricante SMC, modelo VXZ 2240. Essas válvulas são responsáveis por permitirem ou não o fluxo de ar na saída principal que simula a carga e nas saídas correspondentes às perfurações. Elas são acionadas quando alimentadas por 24 VDC.
 - o **FV-01:** Fabricante SMC, modelo VEF 314. Ver detalhe em [14]. Essa é uma válvula elétrica proporcional. Ela é responsável por controlar a vazão de ar na saída principal (de carga) do sistema. Sua abertura é determinada pelo valor da corrente (4 à 20mA) advinda da placa de controle. Ver detalhes da placa em [15].

2.2.7 - Compressor

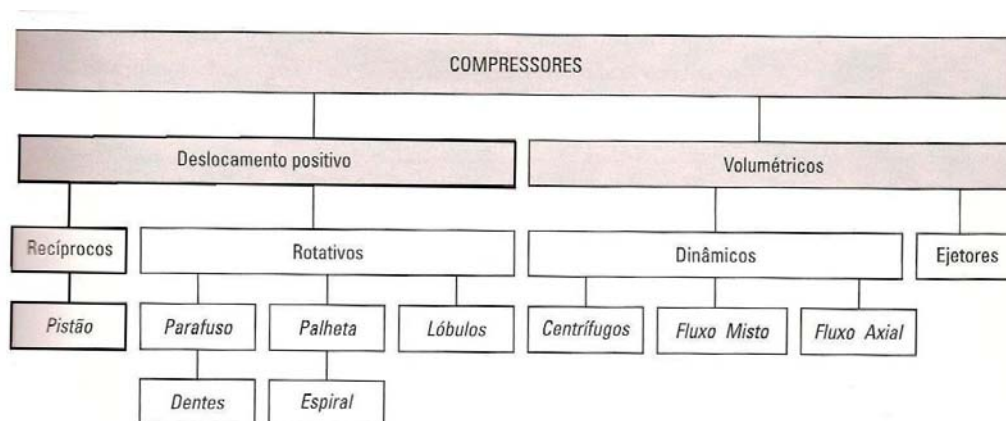


Figura 2.8 – Classificação dos compressores

A figura 2.8 apresenta uma classificação dos tipos de compressores existentes, segundo o princípio de operação.

Os compressores de deslocamento positivo a pistão e os de parafuso são os mais utilizados. Os dinâmicos, como os centrífugos e axiais, são mais utilizados em sistemas de pressões menores, mas com vazões elevadas. Os demais compressores são usados para outros gases ou para aplicações especiais.

As principais vantagens dos compressores recíprocos de pistão são os fatos de produzirem altas pressões e funcionarem com excelente desempenho mecânico.

Os compressores de parafuso são do tipo rotativo. Foram desenvolvidos durante os anos 30, quando se necessitou de compressores que produzissem altas vazões e que mantivessem o comportamento estável quando houvesse variação de carga. As características mais importantes são: volume reduzido; produção contínua de ar; e temperatura mais baixa no fim da compressão.

Os compressores dinâmicos são também denominados compressores de fluxo. Dentre eles merece destaque o compressor axial que apresenta como características: produção uniforme do ar comprimido; produção do ar isenta de óleo; é sensível a variações de carga e tensões; e atendem a vazões elevadas. E o compressor centrífugo que apresenta características semelhantes, diferenciando apenas em aspectos construtivos mecânicos.

O compressor que compõe a plataforma é recíproco cuja forma construtiva utiliza pistão para realizar o deslocamento e a compressão do volume de gás a ser comprimido [16].

O compressor recíproco é classificado como sendo de deslocamento positivo, como mostra a figura 2.8. Isto significa que a compressão é realizada a partir do confinamento de sucessivos volumes de gás em um espaço fechado.

O princípio de funcionamento apresenta um sistema biela-manivela que converte o momento rotativo de um motor em movimento linear, como na figura 2.9 [16].

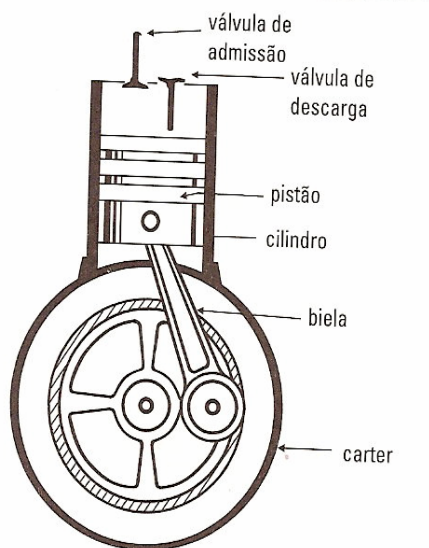


Figura 2.9 – Corte de um compressor a pistão

Para realizar a compressão durante o movimento linear do pistão, o cabeçote foi provido de válvulas na admissão e descarga do gás. Durante a admissão do ar o êmbolo retorna à sua posição inferior no cilindro reduzindo a pressão no interior do mesmo. A válvula de sucção abre-se permitindo a entrada de gás a ser comprimido, conforme mostra a figura 2.10. Durante o movimento ascendente do pistão (compressão) a válvula de sucção fecha-se e a válvula de descarga permanece fechada, conforme figura 2.11. No instante em que a pressão no interior do cilindro se torna superior à pressão na descarga a válvula de descarga abre-se para fora do cilindro, permitindo a saída do gás comprimido, conforme

figura 2.12. Ao final do percurso ascendente do êmbolo a válvula de descarga fecha-se e o êmbolo inicia nova descida, como mostra a figura 2.13. Como o êmbolo não pode encostar-se ao topo do cilindro, uma quantidade residual de gás comprimido permanece no volume morto do cilindro, retardando a abertura da válvula de sucção até que a queda de pressão no interior do cilindro permita a abertura da mesma [16].

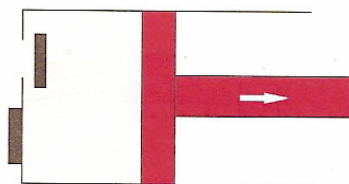


Figura 2.10 – Compressor Recíproco: Admissão

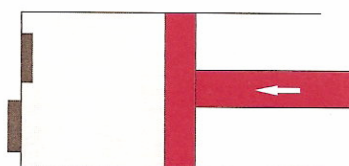


Figura 2.11 – Compressor Recíproco: Compressão

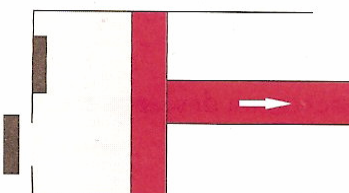


Figura 2.12 – Compressor Recíproco: Descarga

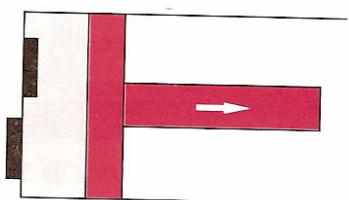


Figura 2.13 – Compressor Recíproco: Expansão

O ciclo de compressão ideal dos compressores recíprocos é mostrado na figura 2.14.

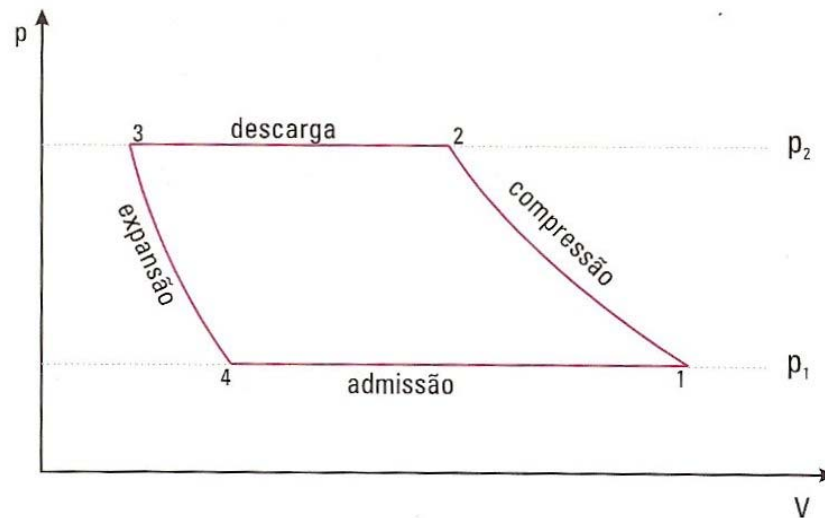


Figura 2.14 – Compressor Recíproco: Ciclo de compressão ideal

As características nominais do compressor em estudo são:

- Vazão de 16,888 [m³/h];
- Pressão máxima de 120 [lb/pol²];
- Cilindradas 348,36 [cm³];
- Potência 2 [CV];

Em se tratando do controle por inversores de frequência, a justificativa de sua ausência como dispositivo de partida é pelo fato do compressor não apresentar rendimento constante na faixa de regulação. A este fato somam-se as perdas do compressor e o comportamento não-linear da potência dos compressores. Assim, os inversores de frequência utilizados de maneira incorreta podem aumentar o consumo de energia elétrica.

2.3– Supervisório

2.3.1 – Descrição da Ferramenta

O sistema supervisório do laboratório é o *InduSoft Web Studio 6.1*. Ele foi configurado para realizar o controle de todo o processo apresentando uma capacidade de monitoramento em tempo real através da rede de dados Modbus Ethernet [17].

Cada plataforma do laboratório possui um computador específico no qual foi disponibilizado o acesso do sistema supervisório por meio de uma senha.

É possível acessar qualquer uma das bancadas através de qualquer um dos computadores. Ao acessar o sistema, será apresentada a tela da figura 2.15.

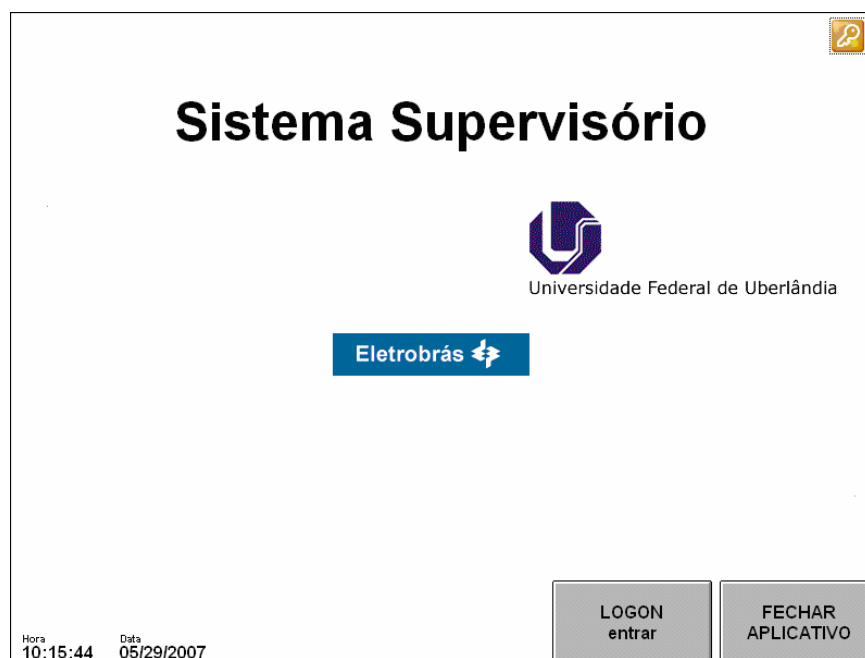


Figura 2.15 – Tela inicial do sistema supervisório.

Com a tela inicial aberta, o usuário poderá optar por FECHAR O APLICATIVO ou LOGON. Ao efetuar o Logon, será disponibilizada ao usuário a tela da figura 2.16, permitindo que o usuário escolha o sistema em que deseja efetuar os testes.

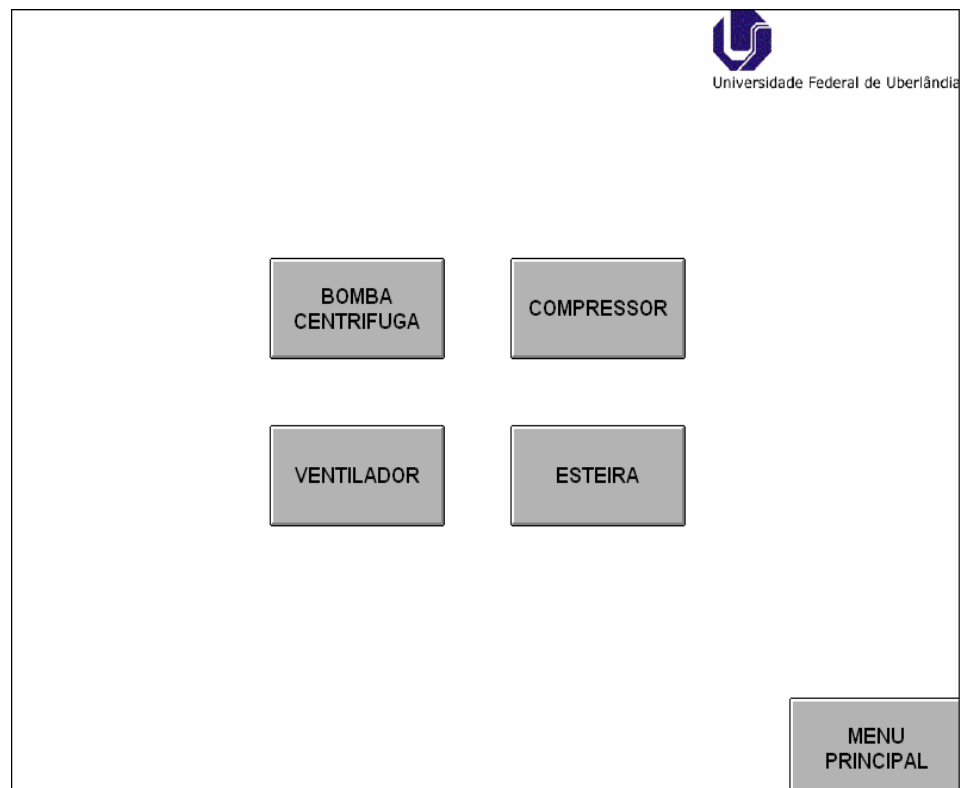


Figura 2.16 – Tela de opções de plataformas

Nesta tela o usuário poderá optar ainda por voltar à tela da figura 2.15, para isso ele deverá clicar sobre o botão MENU PRINCIPAL.

Adiante serão apresentadas as principais telas do sistema supervisório correspondente ao compressor.

2.3.2 – Plataforma do Compressor

Ao optar pelo compressor, o usuário terá disponível a tela da figura 2.17 que apresenta o esquema físico completo da plataforma.

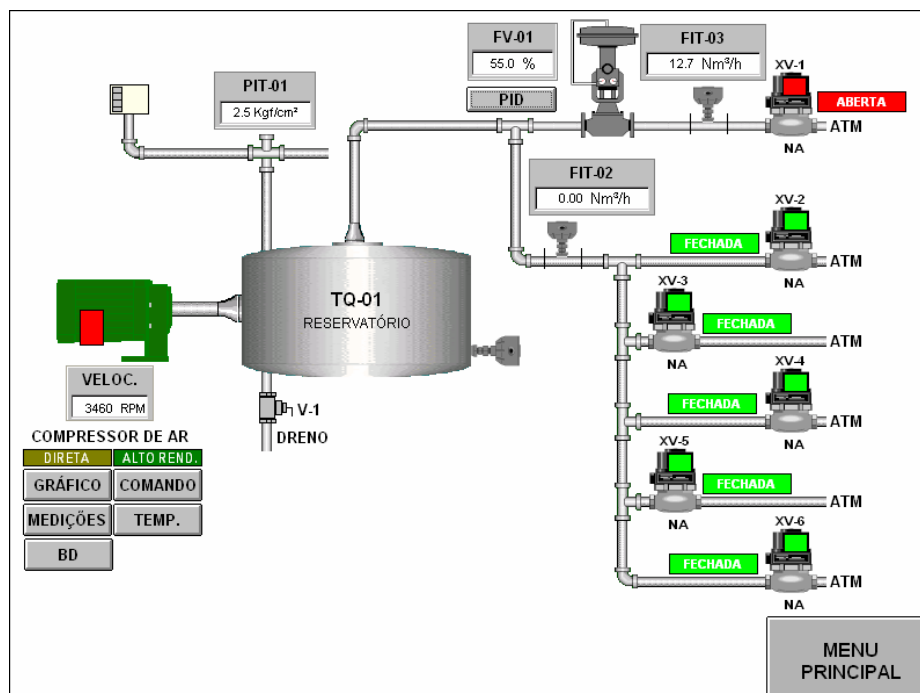


Figura 2.17 – Tela principal do compressor.

Através da tela apresentada anteriormente é possível fazer as seguintes observações:

- PIT-01: Indica a pressão do reservatório de ar comprimido em Kgf/cm²;
- FIT-02: Indica a vazão no ponto indicado em Nm³/h;
- FIT-03: Indica a vazão no ponto indicado em Nm³/h;
- FV-01: Válvula proporcional de vazão. Indica a percentagem de abertura da válvula;
- VELOCIDADE: Velocidade do motor em rpm;
- XV-1: Solenóide para simulação de carga. Fechado (verde) e aberto (vermelho);
- XV-2 a XV-6: Solenóides para simulação de vazamentos. Fechado (verde) e aberto (vermelho);

- Motor: O motor só aparece quando o mesmo está acoplado no sistema. Se estiver na cor verde indica que o motor acoplado é o de Alto Rendimento, se estiver na cor azul indica que o motor acoplado é o *Standard*. O detalhe retangular sobre a figura do motor indica se está operando (vermelho), parado (verde) e com defeito (amarelo).
- Botões:
 - o COMANDO: Abre a tela “Comando do Compressor”;
 - o MEDIÇÕES: Abre a tela “Grandezas Elétricas – Compressor”;
 - o TEMP: Abre a tela “Temperatura do Motor – Compressor”;
 - o GRÁFICO: Abre a tela “Gráfico do Compressor”;
 - o BD: Abre a tela Banco de Dados;
 - o PID: Abre a tela PID;
 - o MENU PRINCIPAL: Volta à tela da figura 2.16.

A tela “Comando do Compressor” da figura 2.18, disponibiliza as seguintes funções:

- Escolha da Partida: DIRETA ou *SOFT-START*;
- Comando: LIGA, DESLIGA e RESET;
- Abertura e fechamento dos solenóides;
- ACC: Tempo da partida em segundos;
- DCC: Tempo de desaceleração em segundos;
- Controle: Automático ou Manual;
- Pressões de regulação para controle automático;

- Função Automático ou Manual para religamento e desligamento.

É importante observar que os parâmetros de ACC e DCC só aparecerão na tela de comando quando for feita a opção de partida por *soft-start*.



Figura 2.18 – Tela Comando do Compressor.

A tela “Grandezas Elétricas - Compressor” da figura 2.19, disponibiliza a leitura das seguintes grandezas:

- Tensão: Tensão de linha das três fases;
- Corrente: Corrente das três fases, do neutro e a média;
- Demanda;
- Fator de Potência: Fator de Potência nas três fases e a média;
- Harmônicas: DHT de tensão entre fases e fase-neutro, THD de corrente nas fases e neutro. Distorções harmônicas de tensão e corrente com os respectivos ângulos até o 50º ordem.

- Potência: Potências ativa, reativa e aparente por fase e a total;
- Energia: Energia ativa, reativa e aparente por fase e a total;
- Frequência: Frequência da tensão de alimentação.

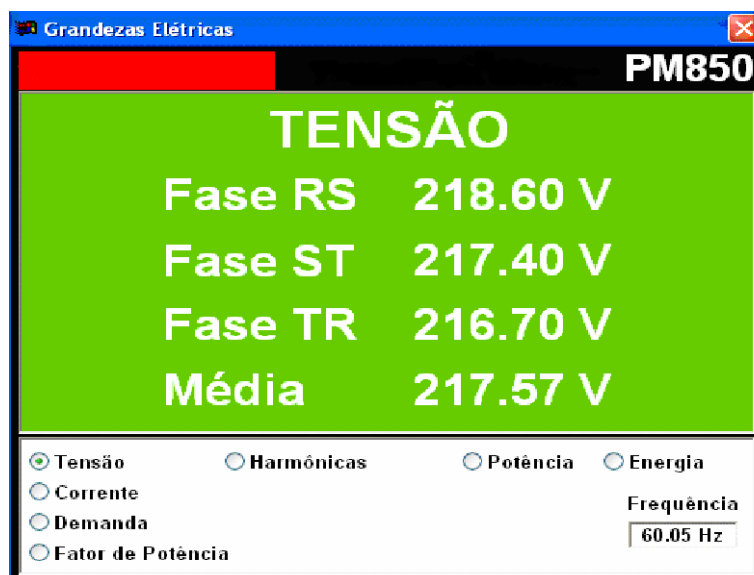


Figura 2.19 – Tela Grandezas Elétricas

A tela “Temperatura do Motor - Compressor” da figura 2.20 disponibiliza a leitura das temperaturas das bobinas do motor (cada fase individualmente) e a temperatura da carcaça. A temperatura indicada é correspondente ao motor acoplado no sistema.

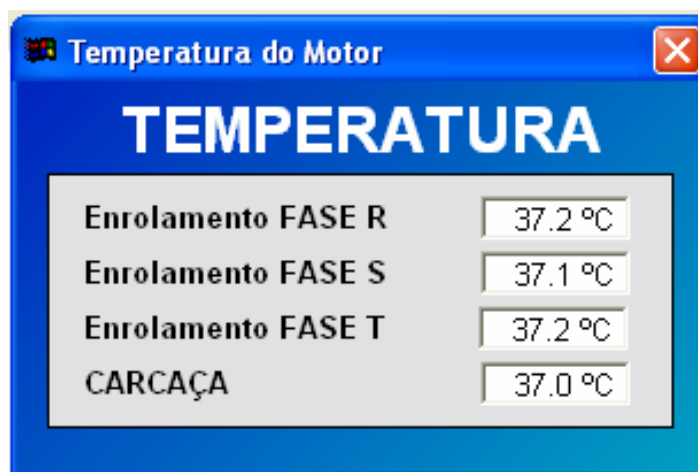


Figura 2.20 – Tela Temperatura do Motor

A tela “PID” da figura 2.21, disponibiliza as seguintes funções:

- Automático: este item sendo selecionado, o controlador PID irá buscar a vazão pré-determinada do sistema, controlando a abertura e fechamento da válvula proporcional elétrica automaticamente;
- Manual: este item sendo selecionado, a válvula proporcional elétrica poderá ser aberta ou fechada conforme determinado no espaço MV.
- P: determina o valor proporcional do sistema de controle automático;
- I: determina o valor integral do sistema de controle automático;
- D: determina o valor derivativo do sistema de controle automático;
- SP: Set Point é o valor de vazão pré-determinado pelo usuário. Este espaço somente interfere no sistema se o controle da válvula proporcional elétrica for automático;
- PV: Present Value é o valor atual da vazão de ar do sistema indicado no sensor FIT-03;
- MV: Moviment Value é o valor atual da abertura da válvula proporcional elétrica caso seja escolhida a opção Automático.

PID - Compressor	
CONFIGURAÇÃO PID	
☒ Automático	AUTOMÁTICO SELECIONADO
☐ Manual	
P	?????
I	?????
D	?????
SP	??? Nm³/h
PV	???.? Nm³/h
MV	???.? %

Figura 2.21 – PID – Compressor.

CAPÍTULO II – Descrição da plataforma de ensaios

A tela “Gráfico do Compressor” da figura 2.22, disponibiliza as curvas de vários parâmetros do sistema em função do tempo. Estes parâmetros podem ser elétricos ou mecânicos, como por exemplo: tensão, corrente, potência, pressão, vazão, temperatura, velocidade, etc.

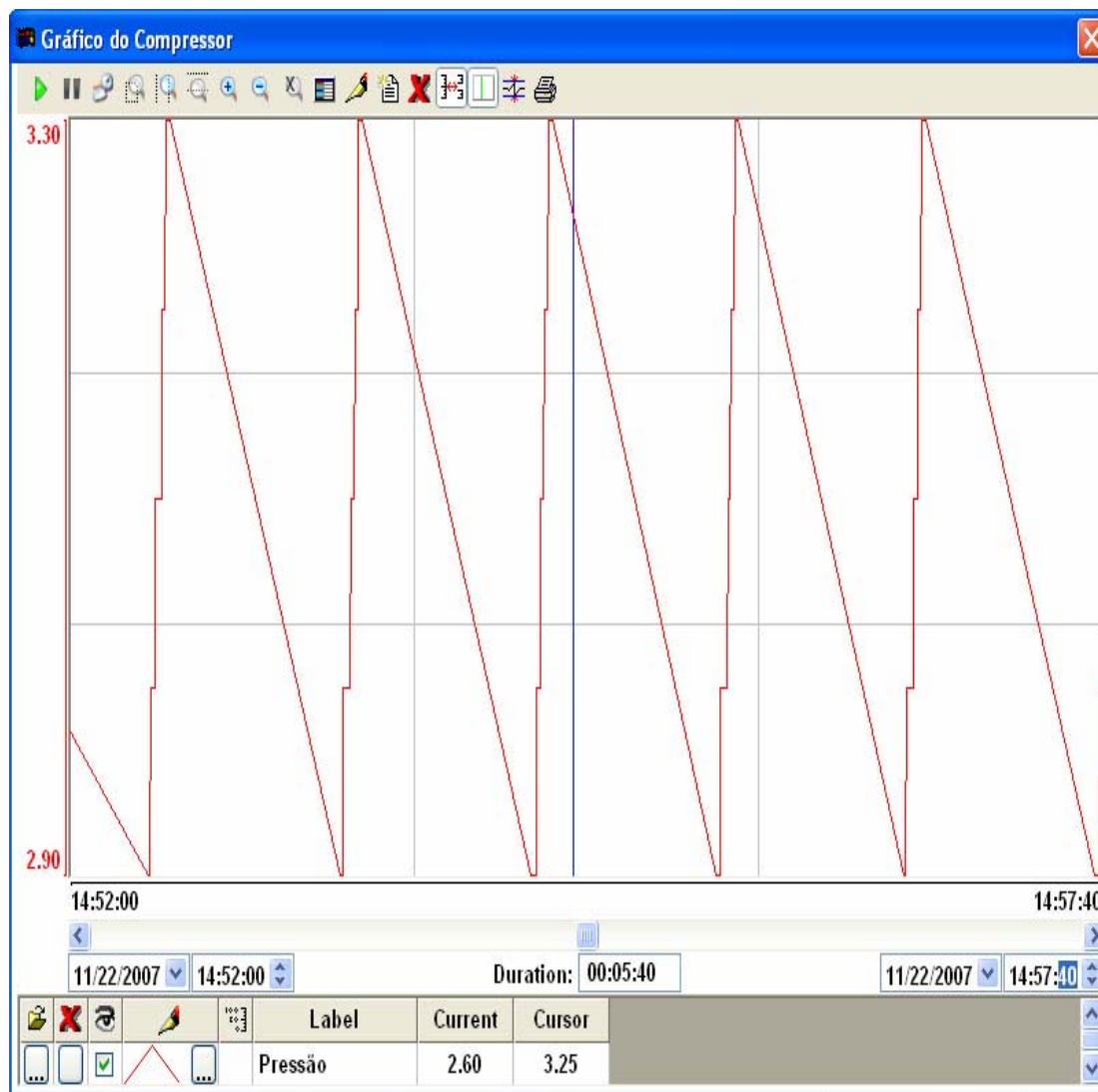
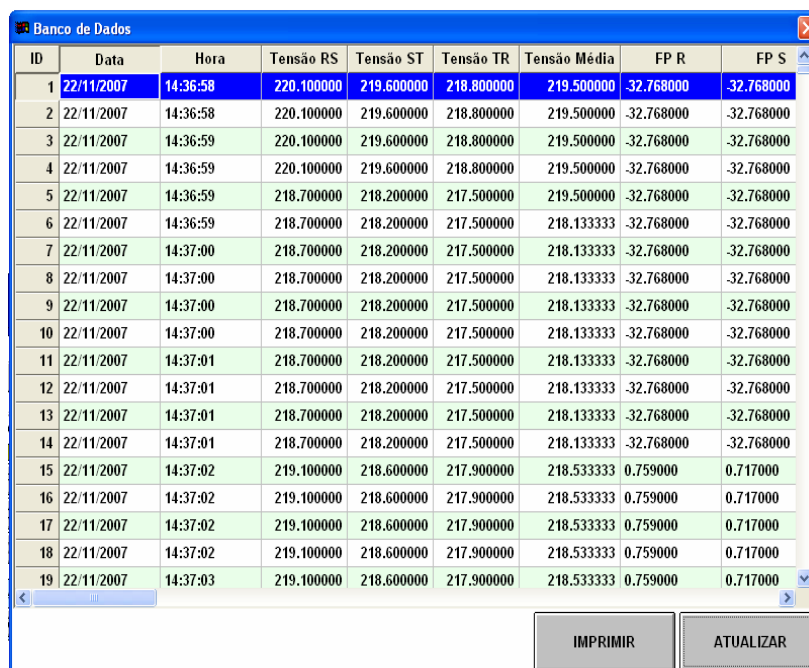


Figura 2.22 – Tela Gráfico do Compressor

A tela “BD - Compressor” da figura 2.23 disponibiliza dados referentes às várias grandezas elétricas e físicas coletadas pelo sistema ao longo do tempo.



ID	Data	Hora	Tensão RS	Tensão ST	Tensão TR	Tensão Média	FP R	FP S
1	22/11/2007	14:36:58	220.100000	219.600000	218.800000	219.500000	-32.768000	-32.768000
2	22/11/2007	14:36:58	220.100000	219.600000	218.800000	219.500000	-32.768000	-32.768000
3	22/11/2007	14:36:59	220.100000	219.600000	218.800000	219.500000	-32.768000	-32.768000
4	22/11/2007	14:36:59	220.100000	219.600000	218.800000	219.500000	-32.768000	-32.768000
5	22/11/2007	14:36:59	218.700000	218.200000	217.500000	218.133333	-32.768000	-32.768000
6	22/11/2007	14:36:59	218.700000	218.200000	217.500000	218.133333	-32.768000	-32.768000
7	22/11/2007	14:37:00	218.700000	218.200000	217.500000	218.133333	-32.768000	-32.768000
8	22/11/2007	14:37:00	218.700000	218.200000	217.500000	218.133333	-32.768000	-32.768000
9	22/11/2007	14:37:00	218.700000	218.200000	217.500000	218.133333	-32.768000	-32.768000
10	22/11/2007	14:37:00	218.700000	218.200000	217.500000	218.133333	-32.768000	-32.768000
11	22/11/2007	14:37:01	218.700000	218.200000	217.500000	218.133333	-32.768000	-32.768000
12	22/11/2007	14:37:01	218.700000	218.200000	217.500000	218.133333	-32.768000	-32.768000
13	22/11/2007	14:37:01	218.700000	218.200000	217.500000	218.133333	-32.768000	-32.768000
14	22/11/2007	14:37:01	218.700000	218.200000	217.500000	218.133333	-32.768000	-32.768000
15	22/11/2007	14:37:02	219.100000	218.600000	217.900000	218.533333	0.759000	0.717000
16	22/11/2007	14:37:02	219.100000	218.600000	217.900000	218.533333	0.759000	0.717000
17	22/11/2007	14:37:02	219.100000	218.600000	217.900000	218.533333	0.759000	0.717000
18	22/11/2007	14:37:02	219.100000	218.600000	217.900000	218.533333	0.759000	0.717000
19	22/11/2007	14:37:03	219.100000	218.600000	217.900000	218.533333	0.759000	0.717000

Figura 2.23 – Tela referente ao Banco de Dados

2.4 – Conclusões parciais

Este capítulo foi centrado na descrição, características, especificações e funcionalidades do laboratório de sistemas motrizes no que se refere à plataforma de ensaio do compressor. Inicialmente foram tecidos comentários sobre os aspectos básicos, desde o diagrama esquemático até a especificação de cada dispositivo que a compõem. Vale mencionar a descrição do sistema supervisorio que comanda e disponibiliza dados técnicos instantâneos relevantes aos ensaios. Assim, é possível simular diversas condições operativas de carga demonstrando os fenômenos eletromecânicos pertinentes a este sistema.

Como diferencial, existe a possibilidade de se fazer um estudo integrado relacionando sistema elétrico, mecânico, térmico e hidráulico que é fiel às condições de uma planta industrial real.

CAPÍTULO III

Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

3.1– Introdução

O objetivo deste capítulo é desenvolver uma modelagem para simular e comparar o acionamento do motor de indução trifásico (*standard* e alto rendimento) através de partida direta e *soft-starter* utilizando técnicas de modelagem no programa ATP. A simulação considera como carga mecânica o compressor que está acoplado ao eixo do motor.

O intuito é analisar as características e particularidades em termos de grandezas elétricas e mecânicas do modelo completo representativo da bancada do compressor e verificar sua validação em relação ao modelo real.

CAPITULO III – Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

O processo de modelagem é iniciado pelo estudo teórico de todos os componentes que compõem o sistema de acionamento do motor-carga considerado no estudo (motor de indução trifásico, chaves de partidas e carga mecânica).

3.2– Simulador ATP

O ATP (*Alternative Transients Program*) é um programa computacional que trabalha no domínio do tempo desenvolvido para simular sistemas elétricos de potência. Esse programa foi originado de uma adaptação do programa EMTP (*ElectroMagnetic Transient Program*) para a utilização em microcomputadores, sendo o mesmo completamente livre de “royalties”. Como tal ele é distribuído em diversas partes do mundo pelo grupo de usuários do EMTP (*EMTP User Group*) [18], [19].

O programa permite a representação de não-linearidades, elementos com parâmetros concentrados, elementos com parâmetros distribuídos, chaves, transformadores, reatores, enfim, a grande maioria dos equipamentos de sistema de energia elétrica.

O ATP não dispõe de modelos para todos os componentes do sistema elétrico, porém possui ferramentas para elaborar modelos específicos quando os mesmos não estiverem disponíveis.

3.2.1 – ATPDRAW

O ATPDRAW, figura 3.1, é um software pré-processador do ATP que atua como uma interface gráfica na plataforma MS – WINDOWS ao ATP (*Alternative Transients Programs*) [19].

CAPITULO III – Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

Desenvolvido por Hans Kr. Hoidalén (Noruega, 1999), o ATPDRAW permite a construção de arquivos de entradas por conjunto de blocos. Possui mais de 65 componentes padrões e possibilita a criação de novos objetos (Models).

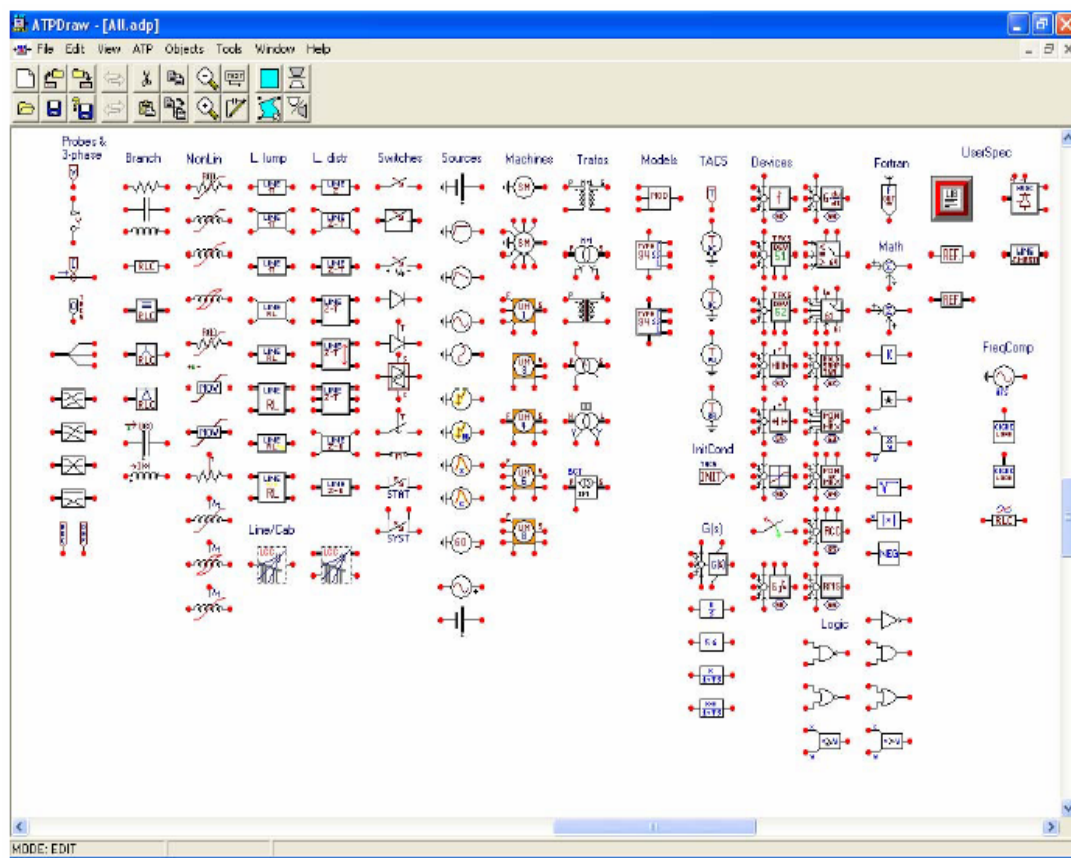


Figura 3.1 – Modelos de elementos de redes elétricas disponíveis no ATPDRAW

Permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, através de um método que utiliza a matriz de admitância de barras. A formulação matemática é baseada no método das características (método de

CAPITULO III – Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

Bergeron) para elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para elementos com parâmetros concentrados [19].

O ATPDRAW permite a criação dos arquivos de entrada de dados com base no circuito a ser simulado, que é construído graficamente com os modelos existentes no simulador.

Cada componente gráfico permite a inclusão dos parâmetros correspondentes em janelas próprias que ajuntam os dados aos formatos de entrada requeridos pelo ATP.

Como desvantagem do ATPDRAW pode ser citada a necessidade de se manter qualquer alteração de circuito sempre dentro do ambiente do programa. Este fato se deve a correspondência que existe entre o arquivo de referência para dados do circuito, que é gráfico, e o arquivo de dados gerados para o EMTP – ATP. Assim sendo, a edição direta do arquivo de dados no formato para EMTP – ATP quebra a correspondência existente aos dois arquivos (o gráfico e o de dados formatados), a única forma de manter a correspondência seria sempre realizar as alterações de dados ou de circuito no ATPDRAW. Esta desvantagem citada constitui uma das razões pelas quais os usuários experientes costumam não usar o ATPDRAW, uma vez que a edição direta dos arquivos é sempre o meio mais rápido de efetuar pequenas alterações nos arquivos do EMTP – ATP.

3.2.2 – ATP Settings

É o local do ATPDRAW onde são configurados os parâmetros da simulação [19]. Esta janela é acessada como mostra a figura 3.2 ou através da tecla de atalho F3. As suas divisões são mostradas na figura 3.3.

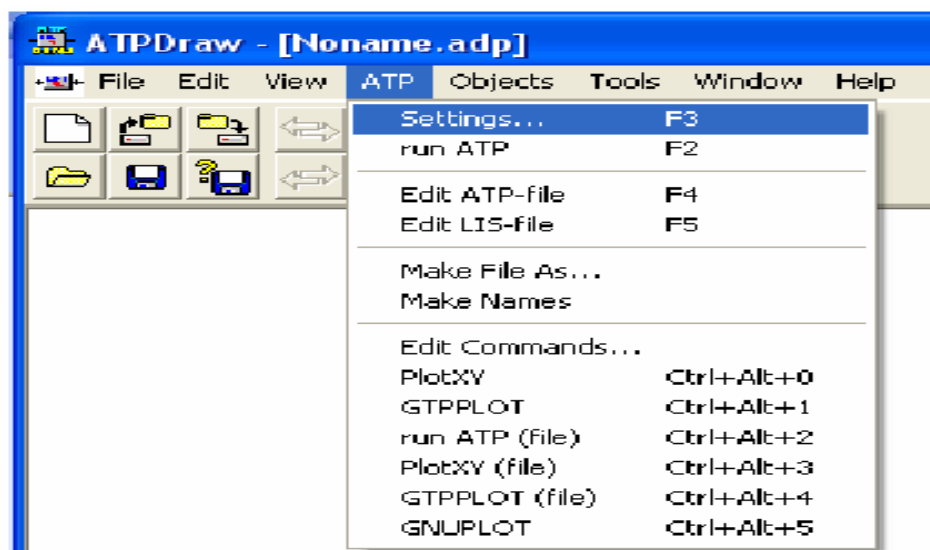


Figura 3.2 – Acesso a janela ATP SETTINGS

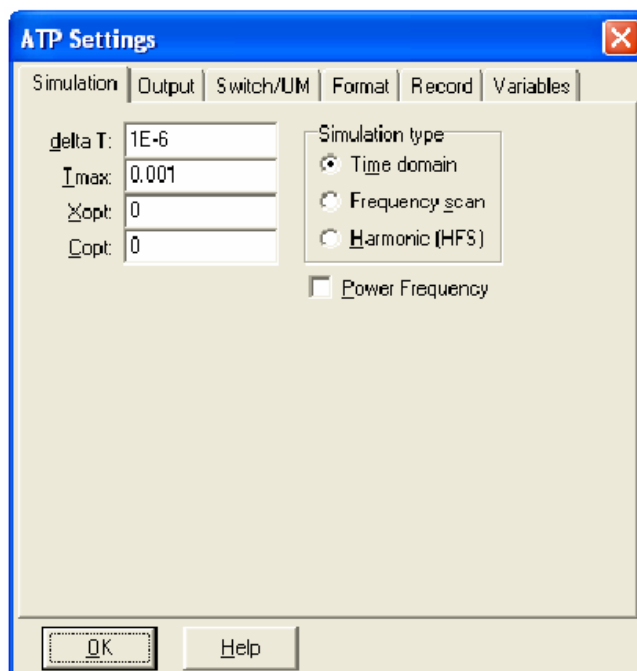


Figura 3.3 – Divisões da janela ATP SETTINGS

3.2.3 – Simulações no ATPDRAW

Após as devidas escolhas dos parâmetros no ATP SETTINGS pode-se realizar a simulação de um determinado circuito.

Não ocorrendo erro no circuito, a simulação é realizada. Essa simulação fornece alguns tipos de arquivos de saída como arquivo no formato .PL4 e arquivo no formato .LIS.

3.2.4 – Rotina TACS

TACS é uma rotina de análise transitória de sistemas de controle. Foi desenvolvida para simular interações dinâmicas entre a rede elétrica e os sistemas de controle de um determinado equipamento. Os sistemas de controle podem ser descritos por diagramas de blocos no domínio da frequência com configurações arbitrárias dos elementos disponíveis. É permitida a representação de funções de transferência, somadores, multiplicadores, limitadores estáticos e dinâmicos, funções algébricas e lógicas, fontes de sinal, chaves controladas, funções definidas pelo usuário, etc. O menu TACS dá acesso à maioria dos componentes TACS [19], [20].

A partir do componente COUPLING TO CIRCUIT as informações do circuito de potência são repassadas para os componentes TACS. Pode ser um sinal de tensão, corrente, variáveis internas ou de chaves.

A TACS possui um processamento independente do processamento do ATP durante a execução do programa. A cada passo de integração o ATP processa as grandezas do sistema elétrico e repassa os dados de tensão ou corrente para a TACS. Por sua vez, a TACS processa esses dados algebricamente e os repassa ao sistema elétrico através de

CAPITULO III – Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

fontes de corrente ou tensão. As saídas da TACS no instante T , foram calculadas no instante $T-\Delta T$. Portanto, a transferência de sinais de controle da TACS para o sistema elétrico ocorre com um retardo de tempo de um passo de integração.

3.3 – Modelagem do motor de indução trifásico no ATP

O grau de desenvolvimento tecnológico alcançado na sociedade industrial não seria possível sem o motor elétrico de corrente alternada. A ausência nesta máquina de elementos submetidos à fricção possibilita redução de manutenção quando dimensionada e usada corretamente. Por outro lado, uma porcentagem muito grande de energia elétrica consumida mundialmente é devida a estes motores, constituindo hoje uma importante linha de investigação e redução de perdas nestes motores como meio de reduzir o respectivo consumo energético.

A versatilidade e universalidade do emprego do motor elétrico de corrente alternada passa também pelos controladores eletrônicos de velocidade. A eletrônica de potência, graças ao desenvolvimento de excelentes semicondutores como o retificador de silício controlado nas suas diversas variantes e dos transistores bipolares permitiu a fabricação de equipamentos eficientes através da produção de ondas de corrente alternada com frequência e tensão controlada (conversores de frequência), que aplicadas ao motor, tanto síncrono como assíncrono, fazem dele uma máquina versátil para o controle de conjugado e velocidade, como o motor elétrico de corrente contínua.

Dentre todos os destinos da eletricidade, a sua transformação em energia mecânica é uma das aplicações mais importantes e graças aos conversores de frequência consegue-se que essa energia mecânica se produza com motores elétricos convencionais, de uma forma

CAPITULO III – Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

altamente controlada e flexível. Atinge-se, desse modo, as melhores prestações de eficiência e melhoria da qualidade.

Do ponto de vista do consumo de eletricidade, os motores apresentam-se como as cargas mais importantes usadas em vários setores e com uma vasta gama de aplicação de que são exemplos ventiladores, compressores, bombas, transportadores, etc. Desta vasta gama de aplicações podem inferir-se significativas economias de energia elétrica, sendo portanto desejável a utilização de tecnologias mais eficientes, capazes de reduzir o consumo de eletricidade em força motriz. Estas tecnologias incluem os motores de alto rendimento, os variadores eletrônicos de velocidade e as melhorias dos sistemas mecânicos de transmissão, entre outros.

O consumo de eletricidade pelos motores é influenciado por diversos fatores onde se incluem: a eficiência e o controle da velocidade do motor, a qualidade da rede de alimentação, a presença de distorções harmônicas, o dimensionamento dos sistemas, a rede de distribuição, os sistemas mecânicos de transmissão, as práticas de manutenção e a eficiência do dispositivo utilizador final (ventilador, compressor, bomba, etc).

3.3.1 – Motores elétricos

Os motores elétricos efetuam a conversão da energia elétrica recebida da rede em energia mecânica no seu eixo, por intermédio das interações eletromagnéticas e mecânicas entre os enrolamentos e os materiais magnéticos do rotor e estator.

O acionamento de máquinas e equipamentos mecânicos por motores elétricos é um assunto de extraordinária importância para o contexto da eficiência energética industrial.

CAPITULO III – Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

No campo dos acionamentos industriais, avalia-se que cerca de 70% da energia elétrica consumida pelo conjunto de todas as indústrias seja transformada em energia mecânica através de motores elétricos, da qual apenas metade é energia útil [3], [4], [21]. Este fato, resultante de uma escolha pouco criteriosa do equipamento instalado, transforma o campo de aplicações dos motores elétricos numa área onde os potenciais de economia de energia são significativos.

Os motores de indução converteram-se no tipo de motor mais utilizado na indústria. São utilizados em várias aplicações, tais como: compressores, ventiladores, bombas, esteira rolante, máquinas-ferramentas, etc. A figura 3.4 mostra uma estimativa do consumo de energia consumida pela indústria [34].

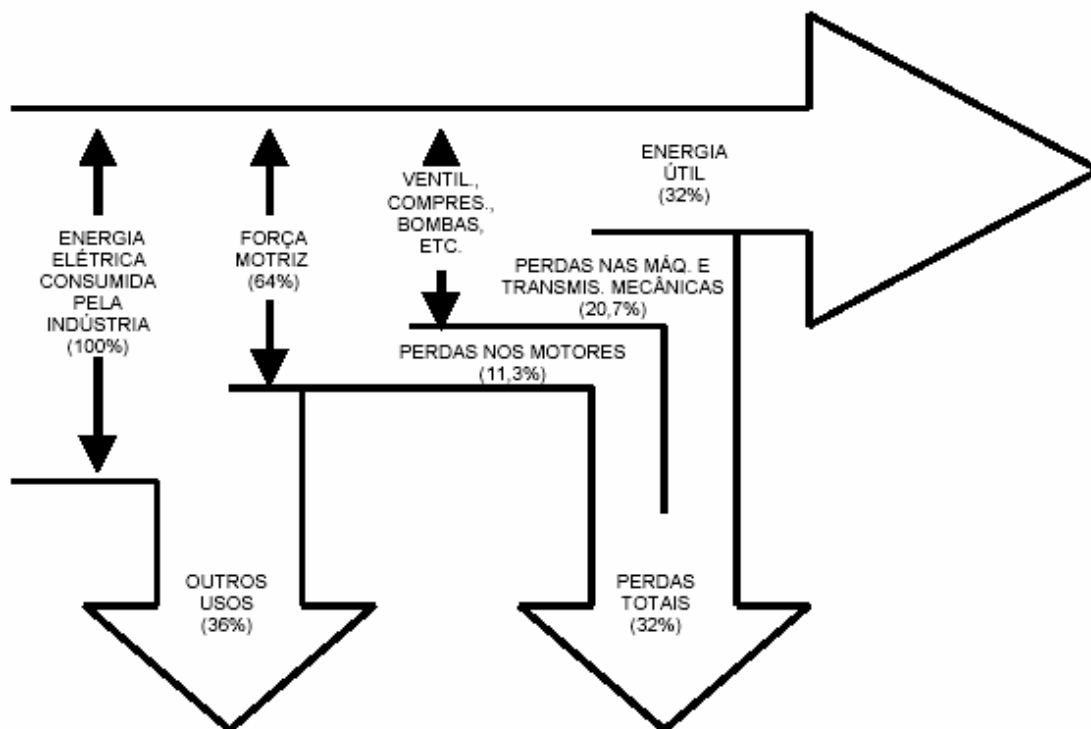


Figura 3.4 – Estimativa do consumo de energia consumida pela indústria

3.3.2 – Modelo de Park ou dq0

A transformação dq0 é uma solução matemática utilizada para eliminar o ângulo θ (função do tempo) do sistema de equações diferenciais representativo da máquina. A transformação consiste em decompor o sistema trifásico em componentes d e q localizadas nos eixos direto e de quadratura do rotor e fixos no rotor [22], [23].

Do exposto, pode-se inferir que tal transformação é importante para o estudo do motor de indução trifásico desacoplando o sistema de equações matriciais e simplificando sua solução.

3.3.3 – Modelo no programa ATP (Alternative Transients Programs)

O modelo do motor de indução trifásico no programa ATP é baseado nos equacionamentos da máquina com as variáveis dq0, que após serem calculadas as tensões e correntes, estas são transformadas em grandezas de fase e apresentadas como resultados de saída.

O sistema de equações formado a partir das componentes dq0 permite chegar aos seguintes circuitos equivalentes para os eixos d e q, os quais são acoplados entre si pelas forças eletromotrizes de velocidade (fem's). Nesses circuitos essas fem's são representadas por fontes de tensão inseridas no ramo do rotor [18].

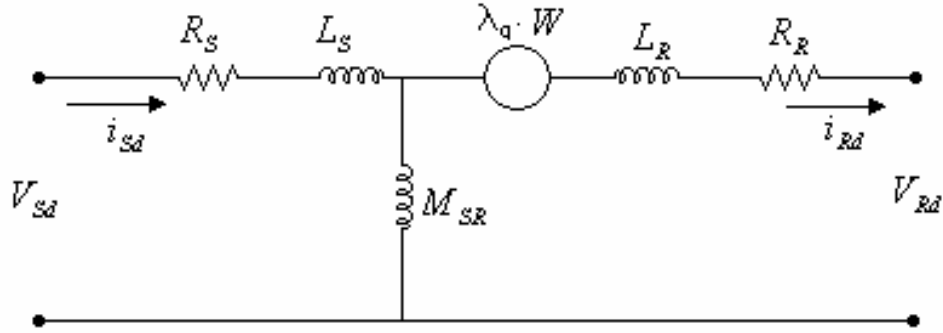


Figura 3.5 – Circuito equivalente para o eixo d

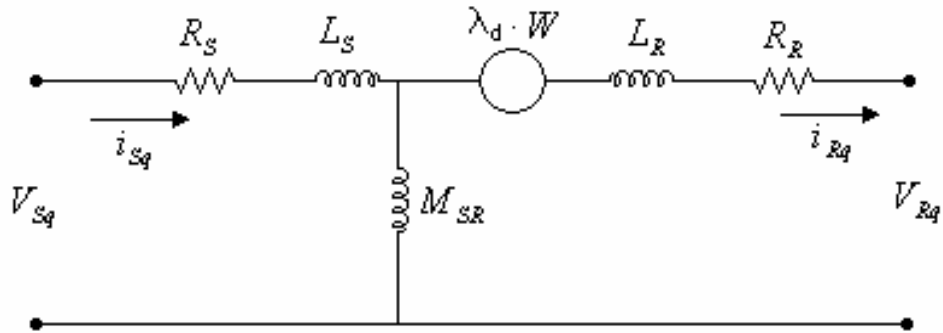


Figura 3.6 – Circuito equivalente para o eixo q

Nos circuitos equivalentes, λ_d e λ_q são os fluxos magnéticos dos eixos d e q respectivamente e são determinados por:

$$\lambda_q = M_{sr} \cdot i_{sq} + L_r \cdot i_{rq} \quad (3.1)$$

$$\lambda_d = -M_{sr} \cdot i_{sd} - L_r \cdot i_{rd} \quad (3.2)$$

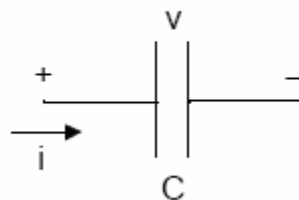
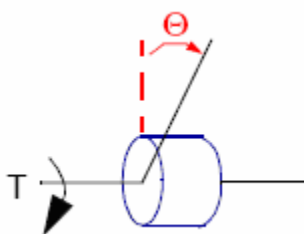
Para fazer o acoplamento com a parte mecânica do eixo do motor, o torque, determinado a partir das componentes dq0 é representado por uma fonte de corrente, a qual deverá ser associada ao circuito elétrico representativo da carga do motor [18]. Esse

CAPITULO III – Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

circuito deve ser construído de acordo com a analogia eletromecânica estabelecida a seguir, na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Analogia eletromecânica

Grandeza mecânica	Grandeza elétrica
T (torque na massa)	I (corrente no nó)
W_m (velocidade angular)	V (voltagem do nó)
θ_m (ângulo)	q (carga do capacitor)
J (momento de inércia)	C (capacitância pra terra)
K (constante de mola)	1/L (recíproco de indutância)
D (amortecimento viscoso)	1/R (condutância)



$$T = J \frac{d^2\theta}{dt^2} = J \frac{dW}{dt}$$

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

Figura 3.7 – Analogia entre Torque e Corrente feita pelo ATP

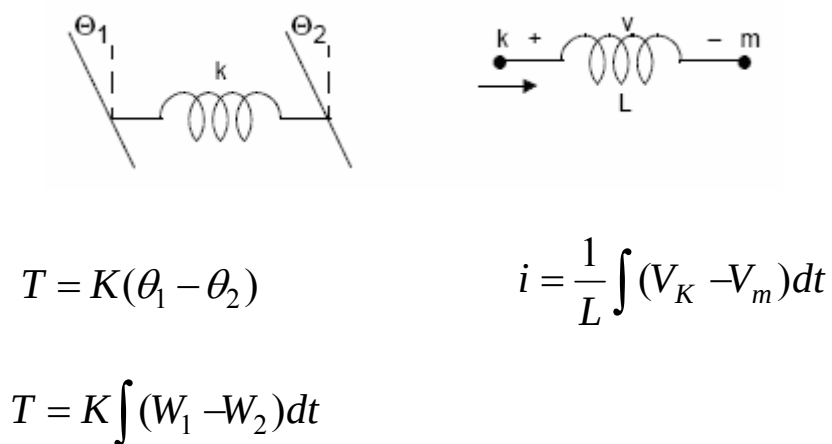


Figura 3.8 – Analogia entre Constante de Mola e Indutância feita pelo ATP

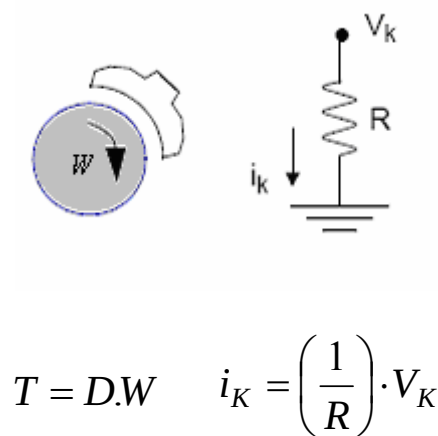


Figura 3.9 – Analogia entre Amortecimento Viscoso e Condutância feita pelo ATP

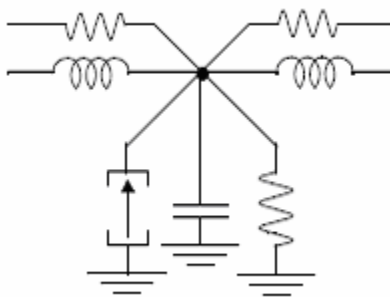


Figura 3.10 – Analogia Eletro-Mecânica feita pelo ATP

Da figura 3.7 pode-se observar que existirá um torque interno da máquina representado por uma fonte de corrente aplicada numa capacitância, representando o momento de inércia, ambos aterrados e mostrados na figura 3.10. Também pode ser visto que aparece um torque dependente de uma constante de mola visto na Figura 3.8 e sua analogia com o circuito elétrico também mostrado na figura 3.10. E por fim pode ser visto também o torque devido a um amortecimento viscoso e sua analogia com o circuito elétrico na figura 3.9, que mostra a resistência aterrada. Na figura 3.10, pode-se ver todos os torques existentes internamente ao motor.

A tensão em cima do nó do rotor mostrado na figura 3.10 representa a velocidade angular ω total que será inserida nos circuitos equivalentes das figuras 3.5 e 3.6. A partir disso, num processo iterativo são feitos todos os cálculos nas equações da máquina por coordenadas $dq0$ para que se obtenham os dados de saída das simulações do motor.

Para que o motor seja inserido no programa ATP é preciso que sejam inseridos os parâmetros do motor, tanto do estator como do rotor e indutâncias mútuas nos eixos $dq0$: R_s (Resistência de estator), L_s (Indutância do estator) , R_r (Resistência do rotor) , L_r (Indutância do rotor) e L_m (Indutância mútua).

CAPITULO III – Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

Os dados são inseridos no programa ATP em relação aos eixos dq0 e não em relação aos eixos ABC de fases, de forma que serão os mesmos calculados a partir dos ensaios a vazio e de rotor bloqueado do motor, onde os parâmetros de eixo d e q , são iguais aos de fase da máquina já que o entreferro é pequeno e constante, e a componente de seqüência zero não existe, pois consideramos o motor simétrico com alimentação trifásica balanceada não existindo caminho para a circulação de corrente de seqüência zero, já que o estator do motor vai estar conectado em delta ou estrela sem aterramento, portanto pode-se colocar qualquer valor para parâmetro de eixo 0.

Para se encontrar as reatâncias e resistências a serem inseridas no ATP, como já foi dito anteriormente, é realizado os ensaios de rotor bloqueado e a vazio nos motores e determinam-se através de cálculo os parâmetros de fase que serão os mesmos para as componentes d e q.

Foram fornecidos pela WEG os dados de ensaio de dois motores, um da linha standard e o outro de alto rendimento, ambos de 1,5 [CV], os quais serão utilizados no laboratório do projeto da Eletrobrás para acionar as cargas estudadas. A partir destes dados de ensaio serão calculados os parâmetros do circuito equivalente dos motores, os quais serão inseridos posteriormente no ATP através da interface ATPDRAW.

3.3.4 – Determinação dos parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico de 1,5 CV da linha standard

Para o motor da linha *standard* estes são os dados de placa:

$$P_m = 1,5 \text{ [CV]}$$

CAPITULO III – Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

$$\text{Tensão} = 220 / 380 \text{ [V]}$$

$$\text{Frequência} = 60 \text{ [Hz]}$$

$$\text{Corrente} = 4,42 / 2,56 \text{ [A]}$$

$$I_p / I_n = 7,5 \text{ [A]}$$

$$\cos \varphi = 0,83$$

$$\eta = 0,786$$

Onde: P_m (Potência mecânica no eixo do motor)

I_n (Corrente nominal do motor)

I_p (Corrente de partida do motor)

$\cos \varphi$ (Fator de potência do motor)

η (Rendimento do motor)

Agora serão mostrados os dados de ensaios de resistência elétrica, a vazio e de rotor bloqueado e os cálculos dos parâmetros a partir dos mesmos.

3.3.4.1 - Dados de ensaio de resistência elétrica fornecidos pela WEG:

$$\text{Resistência} = 7,72 \text{ } [\Omega] \quad \rightarrow \quad R_s = 7,72 / 2 = 3,86 \text{ } [\Omega]$$

3.3.4.2 - Dados de ensaio a vazio fornecido pela WEG:

$$\text{Tensão} = 380 \text{ [V]}$$

$$f = 60 \text{ [Hz]}$$

$$\text{Corrente} = 1,37 \text{ [A]}$$

$$\text{Potência} = 157,20 \text{ [W]}$$

CAPITULO III – Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

$$V = 380 \text{ [V]}$$

$$I_0 = 1,37 \text{ [A]}$$

$$P_0 = 157,20 \text{ [W]}$$

$$Z_0 = \frac{V / \sqrt{3}}{I_0} \quad (3.3)$$

$$Z_0 = 160,14 \text{ [\Omega]}$$

$$P_{rot} = P_0 - 3.R_s.I_0^2 = 157,2 - 3.3,86.1,37^2 = 135 \text{ [W]} \quad (3.4)$$

Onde, P_{rot} = perdas rotacionais

$$X_s + X_m = \sqrt{Z_0^2 - R_s^2} = \sqrt{160,14^2 - 3,86^2} = 160,09 \text{ [\Omega]} \quad (3.5)$$

3.3.4.3 - Dados de ensaio de rotor bloqueado fornecidos pela WEG:

$$V = 380 \text{ [V]}$$

$$f = 60 \text{ [Hz]}$$

$$\text{Corrente} = 18,13 \text{ [A]}$$

$$P = 9,36 \text{ [KW]}$$

$$T_n = 0,316.9,813 = 3,1 \text{ [N.m]} \text{ (Torque nominal)}$$

$$T_p / T_n = 3,74 \text{ (Torque de partida em relação ao nominal)}$$

$$P = 3.R_{rb}.I_2^2 \quad (3.6)$$

$$9360 = 3.R_{rb}.18,13^2$$

CAPITULO III – Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

$$R_{rb} = R_s + R_r = 9,49 \text{ } [\Omega] \quad \rightarrow \quad R_r = 9,49 - 3,86 = 5,63 \text{ } [\Omega] \quad (3.7)$$

$$Z_{rb} = \frac{V_{rb} / \sqrt{3}}{I_{rb}} \quad (3.8)$$

$$Z_{rb} = 12,1 \text{ } [\Omega]$$

$$X_s + X_r = \sqrt{Z_{rb}^2 - (R_s + R_r)^2} = \sqrt{12,1^2 - 9,49^2} = 7,5 \text{ } [\Omega] \quad (3.9)$$

Sabe-se que é válida a seguinte expressão:

$$\frac{R_s}{X_s} = \frac{R_r}{X_r} = \frac{R_{rb}}{X_{rb}} \quad (3.10)$$

$$\text{logo, } 3,86/X_s = R_{rb}/X_{rb}, \quad 3,86/X_s = 9,49/7,5$$

$$X_s = 3,05 \text{ } [\Omega] \quad \rightarrow \quad L_s = 3,05 / 377 = 8,09 \text{ } [\text{mH}]$$

$$3,05 + X_m = 160,09$$

$$X_m = 157,04 \text{ } [\Omega] \quad \rightarrow \quad L_m = 157,04 / 377 = 416 \text{ } [\text{mH}]$$

$$3,86/6,1 = 1,77/X_r$$

$$X_r = 2,78 \text{ } [\Omega] \quad \rightarrow \quad L_r = 2,78 / 377 = 7,37 \text{ } [\text{mH}]$$

3.3.4.4 - Dados do motor

$$P = 1,5 \text{ } [\text{CV}] = 1,5 \times 736 = 1104 \text{ } [\text{W}]$$

$$W = 3395 \text{ } [\text{rpm}] = 355 \text{ } [\text{rad/s}]$$

$$2 \text{ pólos} - 3600 [\text{rpm}] = 377 [\text{rad/s}]$$

$$\text{escorregamento(s)} = (3600 - 3395) / 3600 = 0,0569$$

$$P_n = T_n \cdot W \rightarrow T_n = 1104 / 355 = 3,11 [\text{N.m}] \quad (3.11)$$

$$I_n = \frac{1104}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,786 \cdot 0,83} \rightarrow I_n = 2,57 [\text{A}] \quad (3.12)$$

Assim, todos os parâmetros que serão inseridos na interface ATPDRAW com relação às impedâncias são mostrados a seguir :

$$R_s = 7,72 / 2 = 3,86 [\Omega]$$

$$R_r = 9,49 - 3,86 = 5,63 [\Omega]$$

$$L_s = 3,05 / 377 = 8,09 [\text{mH}]$$

$$L_r = 2,78 / 377 = 7,37 [\text{mH}]$$

$$L_m = 157,04 / 377 = 416 [\text{mH}]$$

3.3.5 – Determinação dos parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico de 1,5 CV da linha alto rendimento

Para o motor de alto rendimento estes são os dados de placa:

$$P = 1,5 [\text{CV}]$$

$$\text{Tensão} = 220 / 380 [\text{V}]$$

$$\text{Frequência} = 60 [\text{Hz}]$$

$$\text{Corrente} = 4 / 2,32 [\text{A}]$$

$$I_p / I_n = 7,5$$

$$\cos \varphi = 0,87$$

$$\eta = 0,83$$

Agora serão mostrados os dados de ensaios de resistência elétrica, a vazio e de rotor bloqueado e os cálculos dos parâmetros a partir dos mesmos.

3.3.5.1 - Dados de ensaio de resistência elétrica fornecidos pela WEG:

$$\text{Resistência} = 7,84 \text{ } [\Omega] \quad \rightarrow \quad R_s = 7,84 / 2 = 3,92 \text{ } [\Omega]$$

3.3.5.2 - Dados de ensaio a vazio fornecido pela WEG:

$$\text{Tensão} = 380 \text{ } [V]$$

$$f = 60 \text{ } [Hz]$$

$$\text{Corrente} = 0,91 \text{ } [A]$$

$$\text{Potência} = 105,70 \text{ } [W]$$

$$V = 380 \text{ } [V]$$

$$I_0 = 0,91 \text{ } [A]$$

$$P_0 = 105,70 \text{ } [W]$$

$$Z_0 = \frac{V / \sqrt{3}}{I_0} \tag{3.13}$$

$$Z_0 = 241,09 \text{ } [\Omega]$$

$$P_{rot} = P_0 - 3 \cdot R_s \cdot I^2 = 105,7 - 3 \cdot 3,92 \cdot 0,91^2 = 95,96 \text{ } [W] \tag{3.14}$$

$$X_s + X_m = \sqrt{Z_0^2 - R_s^2} = \sqrt{241,09^2 - 3,92^2} = 241,06 \quad [\Omega] \quad (3.15)$$

3.3.5.3 - Dados de ensaio de rotor bloqueado fornecidos pela WEG:

$$V = 380 \text{ [V]}$$

$$f = 60 \text{ [Hz]}$$

$$\text{Corrente} = 17,09 \text{ [A]}$$

$$P = 8,50 \text{ [KW]}$$

$$T_n = 0,316.9,813 = 3,1 \text{ [N.m]}$$

$$T_p / T_n = 3,6$$

$$P = 3.Rrb.I_2 \quad (3.16)$$

$$8500 = 3.Rrb.17,092$$

$$Rrb = R_s + R_r = 9,7 \text{ } [\Omega] \quad \rightarrow \quad R_r = 9,7 - 3,92 = 5,78 \text{ } [\Omega] \quad (3.17)$$

$$Z_{rb} = \frac{V_{rb} / \sqrt{3}}{I_{rb}} \quad (3.18)$$

$$Z_{rb} = 12,84 \text{ } [\Omega]$$

$$X_s + X_r = \sqrt{Z_{rb}^2 - (R_s + R_r)^2} = \sqrt{12,84^2 - 9,7^2} = 8,4 \text{ } [\Omega] \quad (3.19)$$

Sabe-se que é válida a seguinte expressão:

CAPITULO III – Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

$$\frac{R_s}{X_s} = \frac{R_r}{X_r} = \frac{R_{rb}}{X_{rb}} \quad (3.20)$$

$$\text{logo, } 3,92 / X_s = R_{rb} / X_{rb}, \quad 3,92 / X_s = 9,7 / 8,4$$

$$X_s = 3,3946 [\Omega] \quad \rightarrow \quad L_s = 3,3946 / 377 = 9 \text{ [mH]}$$

$$3,3946 + X_m = 241,06$$

$$X_m = 237,66 [\Omega] \quad \rightarrow \quad L_m = 237,66 / 377 = 630 \text{ [mH]}$$

$$3,92 / 3,3946 = 5,78 / X_r$$

$$X_r = 5,005 [\Omega] \quad \rightarrow \quad L_r = 5,005 / 377 = 0,01327 \text{ [H]}$$

3.3.5.4 - Dados do motor

$$P = 1,5 [\text{CV}] = 1,5 \times 736 = 1104 [\text{W}]$$

$$W = 3400 [\text{rpm}] = 356,05 [\text{rad/s}]$$

$$2 \text{ pólos} - 3600 \text{ rpm} = 377 [\text{rad/s}]$$

$$s = (3600 - 3400) / 3600 = 0,0555$$

$$P_n = T_n \cdot W \quad \rightarrow \quad T_n = 1104 / 356,05 = 3,1 [\text{N.m}] \quad (3.21)$$

$$I_n = \frac{1104}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,83 \cdot 0,87} \quad \rightarrow \quad I_n = 2,323 [\text{A}] \quad (3.22)$$

Assim, todos os parâmetros ficam mostrados abaixo:

$$R_s = 7,84 / 2 = 3,92 [\Omega]$$

$$R_r = 9,7 - 3,92 = 5,78 \text{ } [\Omega]$$

$$L_s = 3,3946 / 377 = 9 \text{ } [\text{mH}]$$

$$L_r = 5,005 / 377 = 13,27 \text{ } [\text{mH}]$$

$$L_m = 237,66 / 377 = 630 \text{ } [\text{mH}]$$

3.3.6 – Inserção dos parâmetros no modelo representativo do motor no ATPDRAW

A inserção dos dados do motor de indução no ATPDRAW é iniciada a partir dos parâmetros representativos do circuito equivalente do motor em componentes dq0, do tipo de ligação do estator, número de pares de pólos, frequência e escorregamento inicial.

Vale ressaltar que os parâmetros calculados do circuito equivalente do motor de indução podem sofrer pequenos ajustes em função da melhor adequação do modelo à simulação e as respostas desejadas. As tabelas 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 mostram uma síntese dos principais parâmetros adotados e inseridos no modelo do motor.

Tabela 3.2 – Parâmetros do Ramo Magnético inseridos no modelo do motor no ATP

Parâmetros do Ramo Magnético	
LMUD	0.516
LMUQ	0.516

Tabela 3.3 – Parâmetros do Estator inseridos no modelo do motor no ATP

Parâmetros do Estator		
	R [ohm]	L [H/pu]
0	0	0
d	3.86	0.00809
q	3.86	0.00809

Tabela 3.4 – Parâmetros do Rotor inseridos no modelo do motor no ATP

Parâmetros do Rotor		
	R [ohm]	L [H/pu]
1	5.63	0.0118
2	5.63	0.0118

Tabela 3.5 – Parâmetros Gerais inseridos no modelo do motor no ATP

Parâmetros Gerais	
Ligação	Δ
Pares de pólos	1

A figura 3.11 mostra o ícone representativo do motor com o significado dos respectivos nós do circuito.

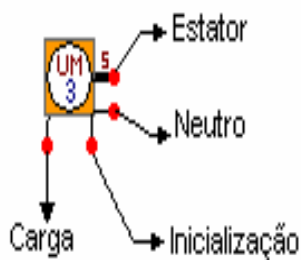


Figura 3.11 – Ícone representativo do motor de indução no ATPDRAW

O nó referente ao estator é conectado as características da fonte de alimentação. O valor da tensão é dado em valor de pico e por fase. Os ramos RLC em série e em paralelo com o estator apresentam a função de fazer com que o motor reconheça adequadamente o ramo que está sendo conectado no respectivo nó e não produza erro durante a compilação. É inserida também uma chave controlável com o objetivo de fornecer o tempo certo de ligação do motor à fonte de alimentação. Todos estes detalhes são contemplados na figura 3.12.

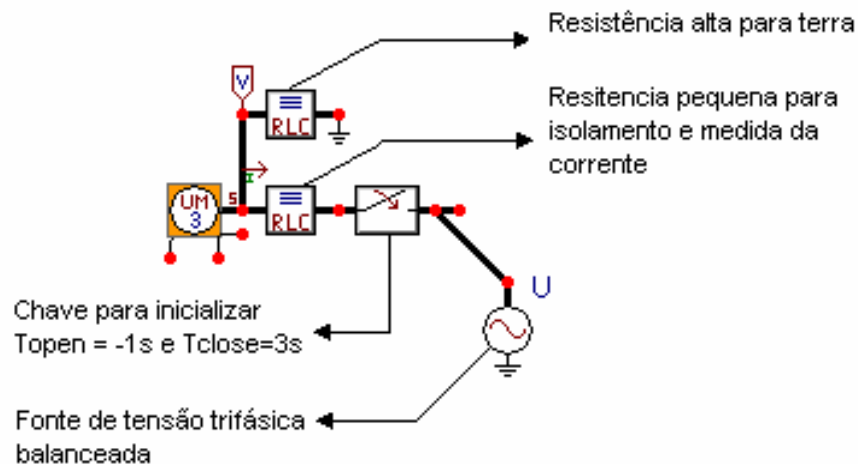


Figura 3.12 – Inserção dos ramos RLC, chave controlável e fonte de alimentação

A figura 3.13 evidencia o nó de inicialização do rotor e o nó de neutro. A função da fonte de corrente conectada no rotor é indicar a corrente inicial e sua frequência no momento em que a simulação tem início.

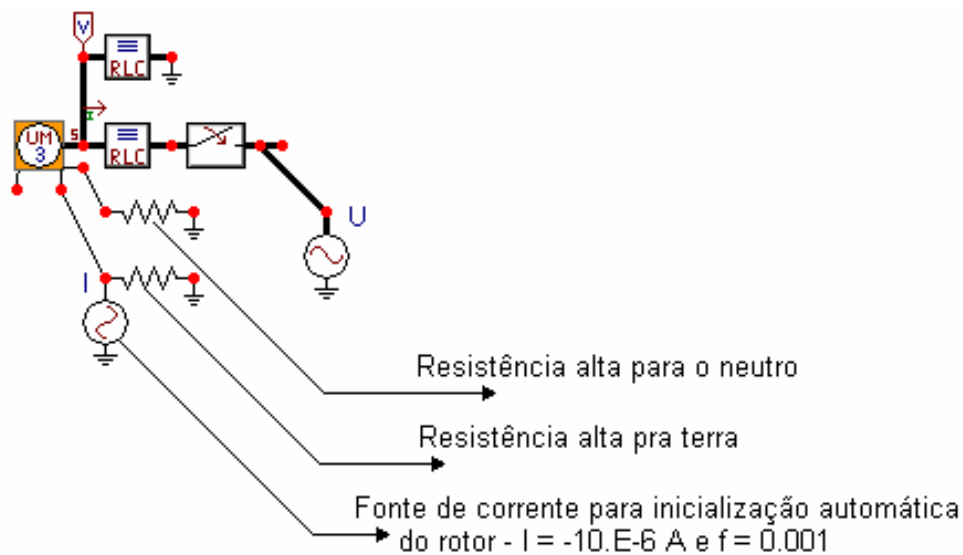


Figura 3.13 – Ligação do nó do rotor e do nó de neutro

CAPITULO III – Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

No nó de carga é inserido um circuito elétrico análogo a um sistema mecânico de carga com torque, momento de inércia, velocidade, etc.

Assim, as características de grandezas mecânicas no ATP devem ser representadas pelo seu equivalente em termos de grandezas elétricas como mostra a tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Correspondência entre sistema mecânico e elétrico no ATP

Grandeza Mecânica	Grandeza Elétrica
T (torque)	I (corrente)
ω_m (velocidade)	V (tensão)
Θ_m (ângulo)	q (carga capacitor)
J (momento de inércia)	C (capacitância)

Assim, obtém-se o dimensionamento da carga que será inserida neste nó, sabendo que a carga pode ser de várias formas, como torque constante podendo ser representado por uma fonte de corrente constante de valor negativo (lembrando que no motor o torque possui valor negativo); uma rampa, que pode ser representada por uma resistência em paralelo com a capacitância que representa a inércia da carga e seu valor é calculado a partir do valor do torque e da velocidade angular, $R = W_m / T_n$, já que “ W_m ” representa a tensão no nó e “ T_n ” representa a corrente nominal que passa no nó; carga parabólica que seria representada em uma rotina TACS e inserida posteriormente no nó do rotor, entre outros tipos que podem ser inseridos.

3.4 – Modelagem do acionamento do motor de indução trifásico através de partida direta e *soft-starter* no programa ATP

3.4.1 – Partida direta

Na partida direta o motor parte a plena tensão diretamente da rede elétrica. No ATP isso será realizado através de uma chave controlada trifásica ligada a uma fonte de tensão trifásica.

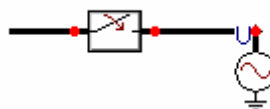


Figura 3.14 – Esquema da partida direta no ATP

3.4.2 – Partida *Soft-Starter*

Nos ambientes industriais os motores são os principais consumidores de energia elétrica tornando a forma de arranque dos motores de indução uma característica que pode produzir melhor utilização racional da energia.

A corrente de partida em ligação direta pode ser seis ou sete vezes a corrente nominal a plena carga. Em certas circunstâncias – e especialmente para motores pequenos – esta elevada corrente de partida é aceitável, mas para máquinas maiores, a corrente requisitada pode ser grande provocando quedas de tensão proibitivas para o funcionamento adequado da rede elétrica.

CAPITULO III – Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

Os motores assíncronos trifásicos apresentam durante a partida desempenhos desfavoráveis de conjugado e de intensidade de corrente originados por acionamentos clássicos de tensão reduzida, de que são exemplos a partida estrela-triângulo e a partida por auto-transformador, e que se repercutem em elevadas perdas energéticas. De forma a corrigir estes desempenhos, estabelecendo-se as melhores condições de funcionamento, utilizam-se cada vez mais os controladores de estado sólido, que substituem as tradicionais partidas eletromecânicas [9].

Os *soft-starters* são equipamentos eletrônicos tiristorizados que, de acordo com o controle das três fases do motor assíncrono, regulam a tensão e a corrente durante uma parada e partida de motores elétricos, realizando o controle efetivo do conjugado [24].

A partir de uma pequena economia de energia durante a rampa de subida, os arrancadores suaves não reduzem a energia que o motor consome. No entanto, reduzem o desgaste mecânico durante a aceleração e a desaceleração.

É recomendado o uso de partidas progressivas *soft-starter*, quando se deseja alguns benefícios como: reduzir picos de corrente na rede durante a partida, para desacelerações suaves, paradas controladas sem desgastes e sem aumento de temperatura, reduzir as quedas de tensão na linha, otimizar o funcionamento da máquina. Sua aplicação é mais comum quando não é exigida a variação de velocidade.

Os arrancadores do tipo estado sólido fornecem um arranque gradual por aplicação de tensões variáveis progressivas sobre o motor através do circuito de potência, obtendo-se correntes de arranque limitados e binários convenientes. Permitem, por isso, poupar energia no funcionamento dos motores elétricos, por aplicação, em cada momento, da tensão

CAPITULO III – Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

adequada relativamente ao estado de carga, ou seja, ajustar o consumo do motor à carga, em cada instante.

A figura 3.15 ilustra a comparação de valores típicos, respectivamente:

- Corrente de arranque (direto e com controlador) em relação à intensidade nominal;
- Tempos de aceleração (direto e com controlador);
- Binário de arranque (direto e com controlador).



Figura 3.15 – Comparação entre arranque direto e com controlador

As principais vantagens do uso de controladores de estado sólido é a possibilidade de eliminação do ponto de transição de corrente e o tempo requerido para atingir a tensão nominal que pode ser ajustado na faixa de 2 a 30 segundos.

3.4.2.1 – Modelo no ATP da partida *Soft-Starter*

A modelagem do *Soft-Starter* [8], [25] e seu sistema de controle de chaveamento trifásico foram implementados utilizando a rotina TACS.

CAPITULO III – Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

O código de comando do módulo Soft-Stater Trifásico foi feito no ATP LAUNCHER e segue a seguinte sequência de raciocínio:

- 1) Transferir o sinal elétrico da fonte para a TACS através de uma variável. Deve-se então implementar uma lógica de controle para detectar o zero do sinal da fonte. Para isso deve-se determinar o instante em que a função muda de sinal e armazenar a variável obtida em um instante anterior com um outro nome. Então, envia-se a variável para o sistema elétrico na forma de fonte de tensão, a qual é aplicada sobre uma resistência. A seguir, faz-se com que o sinal sobre o nó da resistência, que possui o mesmo valor da fonte vinda da TACS, seja enviada a TACS, com outro nome. Isso faz com que o sinal retorne a rotina TACS com um atraso de tempo;
- 2) A cada meio ciclo da onda de tensão da fonte o ângulo de disparo de cada chave varia progressivamente de forma a diminuir seu ângulo de condução e aumentar o tempo de condução das chaves. Assim, o sistema de controle atua de modo a diminuir o ângulo de disparo cada vez que a onda de tensão da fonte passa pelo zero. Isso é feito segundo uma equação que tem como variável o número de zeros da fonte de tensão;
- 3) A referência para determinar o ângulo de disparo de cada chave é o instante em que a onda de tensão passa por zero. O sistema de controle conta um intervalo de tempo, determina e envia o comando de fechamento das chaves;
- 4) É feito o cálculo e a geração do pulso de disparo das chaves, onde se tem um equacionamento de forma a determinar quanto tempo depois da passagem da tensão

CAPITULO III – Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

da rede pelo zero deve haver o chaveamento, sendo também calculado a variação do ângulo de disparo das chaves;

- 5) É calculado a variação do ângulo de disparo das chaves estáticas de forma que a tensão varie de acordo com a curva de aceleração do dispositivo;
- 6) No final do tempo de aceleração o sistema de controle para de enviar pulsos de chaveamento para as chaves;
- 7) O usuário entra com as variáveis para definir a curva de aceleração.

No modelo do Soft-Starter [25] o usuário deve entrar com a amplitude, o tempo de rampa e a frequência.

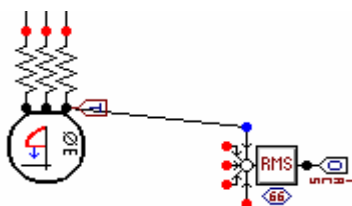


Figura 3.16 – Modelo do Soft-Start no ATPDRAW

Na sequência será mostrado a forma de onda da tensão que alimenta o estator do motor de indução enfatizando a evolução do ângulo de disparo e seus efeitos na forma de onda da tensão além do aumento gradual do valor RMS da tensão que caracteriza o funcionamento do *Soft-Starter*.

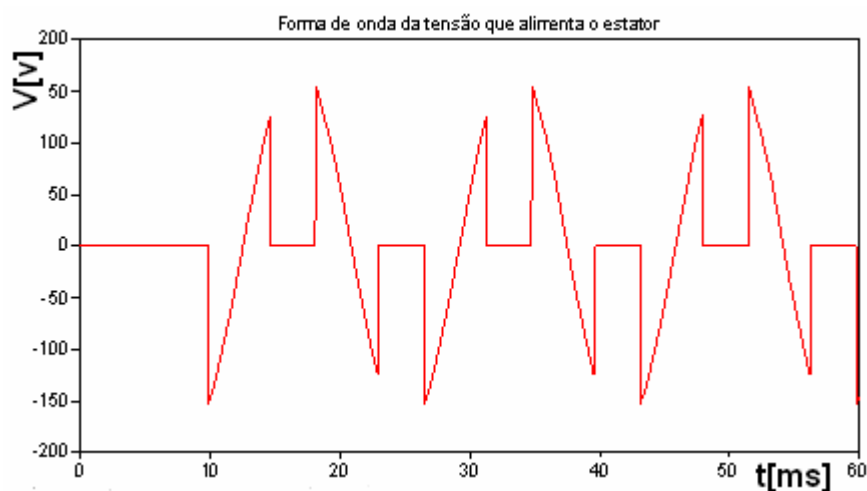


Figura 3.17 - Forma de onda da tensão que alimenta o estator de 0 à 60 [ms]

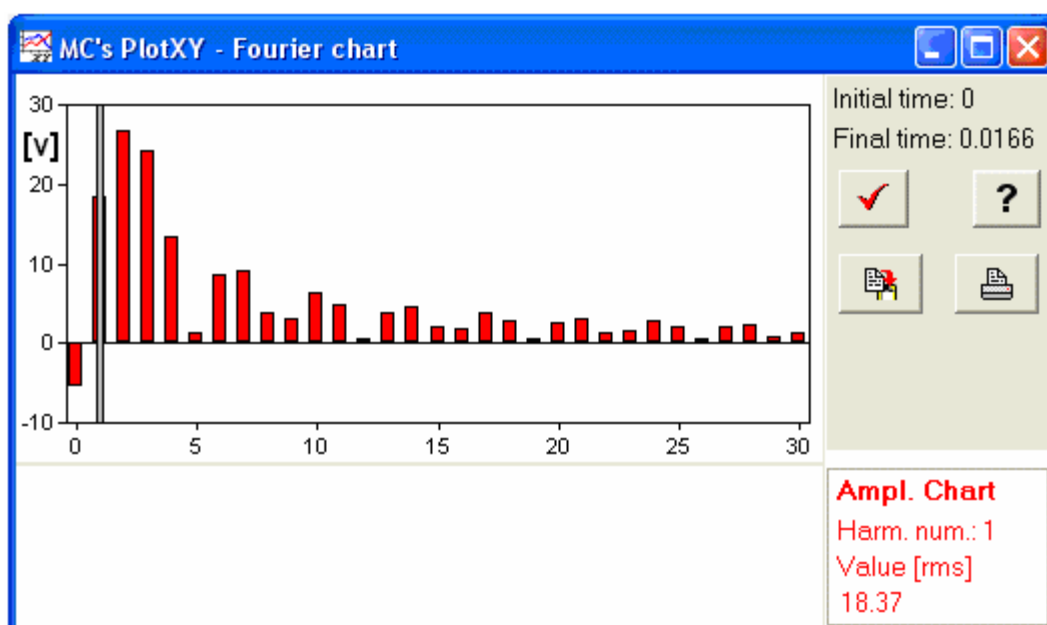


Figura 3.18 – Valor RMS da tensão fundamental no período considerado

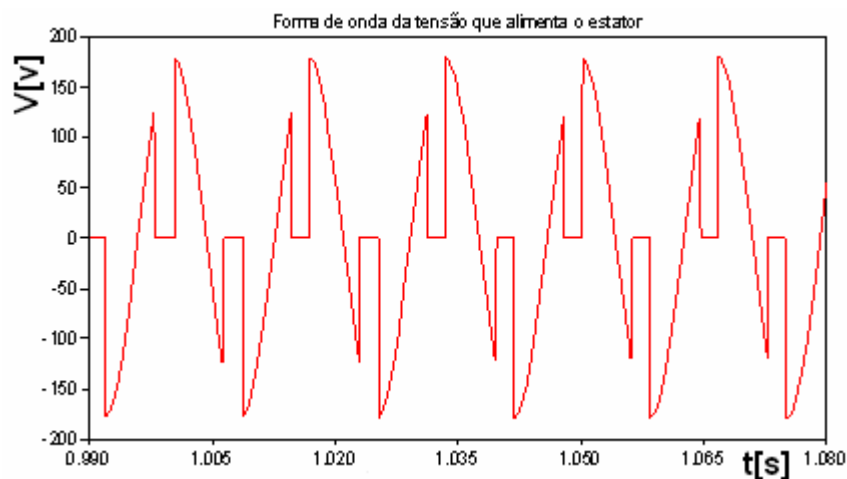


Figura 3.19 - Forma de onda da tensão que alimenta o estator de 0.99 à 1.080 [s]

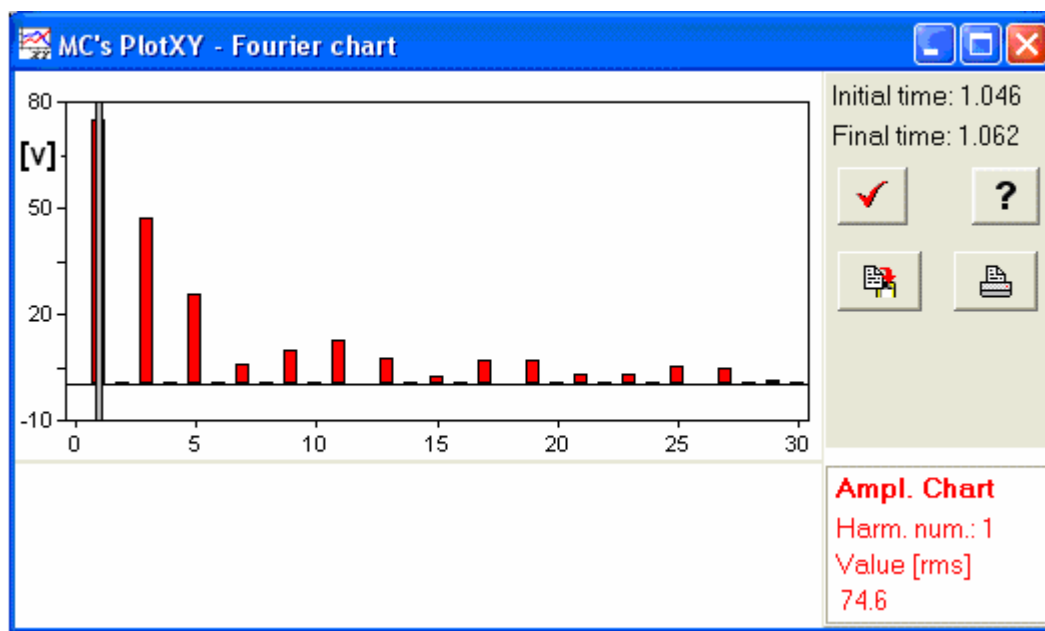


Figura 3.20 – Valor RMS da tensão fundamental no período considerado

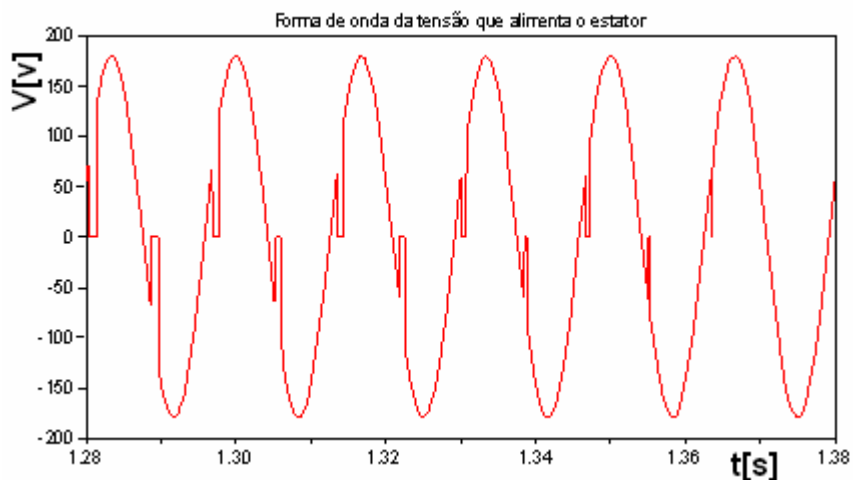


Figura 3.21 - Forma de onda da tensão que alimenta o estator de 1.28 à 1.38 [s]

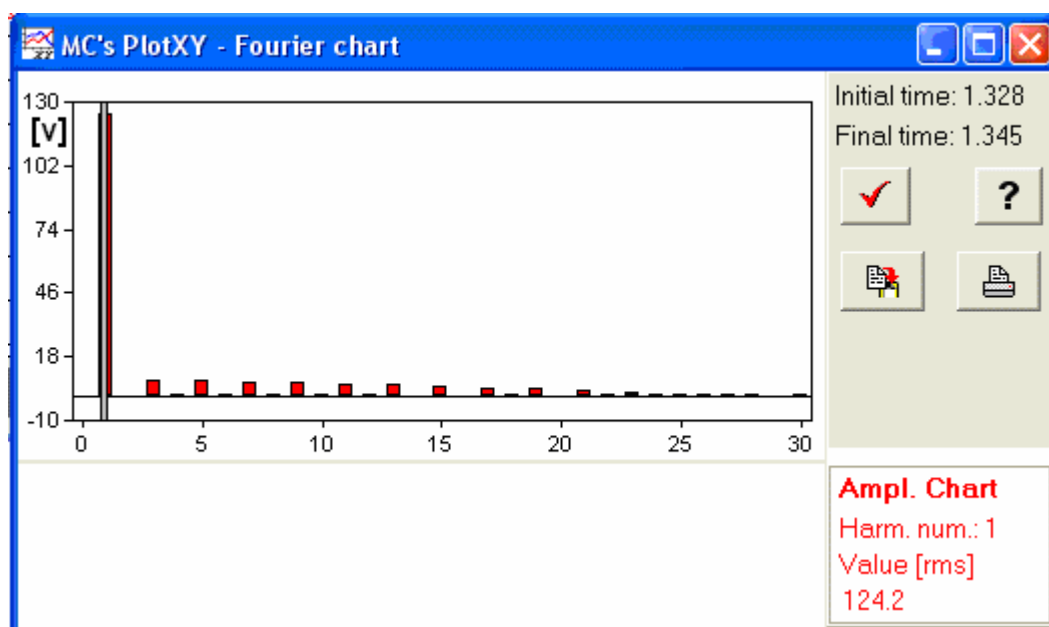


Figura 3.22 – Valor RMS da tensão fundamental no período considerado

O valor RMS vai crescendo gradualmente de acordo com a diminuição do ângulo de disparo que é influenciado pelo tempo de rampa. Isso vai acontecendo até o valor RMS atingir o valor de fase que no caso é 127 [V].

3.5 – Modelagem da carga acoplada ao motor (compressor)

As características de aceleração das cargas podem ser apresentadas resumidamente em três tipos básicos: conjugado variável, conjugado constante e potência constante [24]. A figura 3.23 mostra graficamente cada característica mencionada.

- **Conjugado Variável:** As leis fundamentais que gerem o funcionamento dos ventiladores e das bombas (conjugado parabólico), mostram que estas aplicações têm um grande potencial de economia de energia. As leis associadas indicam que o conjugado (ou pressão) varia com o quadrado da velocidade e a potência com o cubo da velocidade, sendo o caudal proporcional à velocidade. Reduzindo a velocidade da carga, vê-se que, para mudanças relativamente pequenas de velocidade produz-se uma grande diminuição na potência absorvida;
- **Conjugado Constante:** É observado em aplicações que produzem deslocamentos efetivos (compressores, esteira rolante, etc), que apresentam como característica a não variação do conjugado com a velocidade e a potência é diretamente proporcional ao trabalho útil realizado. A potencial economia de energia que se consegue reduzindo a velocidade não é tão importante quanto as aplicações regidas pelo conjugado parabólico mas observa-se que reduzindo a metade a velocidade de uma carga de conjugado constante pode-se reduzir na mesma proporção o consumo de energia;

- Potência Constante: Este tipo de característica da carga é observado em situações onde a potência não varia com a velocidade e o conjugado é inversamente proporcional à velocidade.

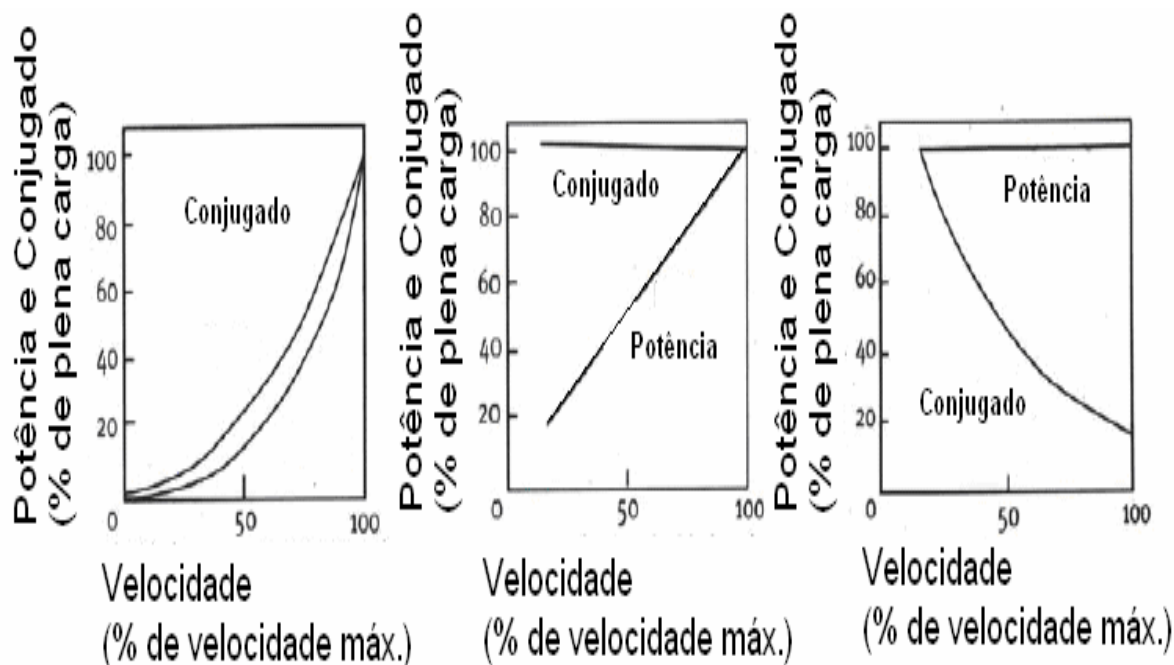


Figura 3.23 – Característica de aceleração das cargas

3.5.1 – Compressor

A modelagem do compressor no ATP é feita por uma fonte de corrente contínua em paralelo com o capacitor, uma vez que o equivalente elétrico do conjugado é a corrente. A figura 3.24 mostra a inserção da fonte de corrente representativa do torque, e uma resistência em paralelo representativa das perdas rotacionais.

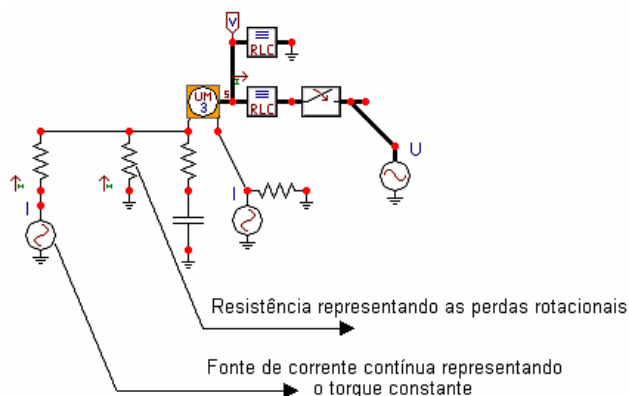


Figura 3.24 – Inserção da fonte de corrente representando o compressor

3.6 – Análise transitória e em regime permanente da partida direta e *Soft-Starter* através do programa ATP

O objetivo deste tópico é comparar as características da partida direta e *soft-starter* no programa ATP e verificar se o modelo do *soft-starter* responde de forma satisfatória e coerente com a situação de acionamento real do dispositivo. As figuras 3.25 e 3.26 trazem a montagem e modelagem do acionamento completo no ATP considerando partida direta e *soft-starter*, respectivamente.

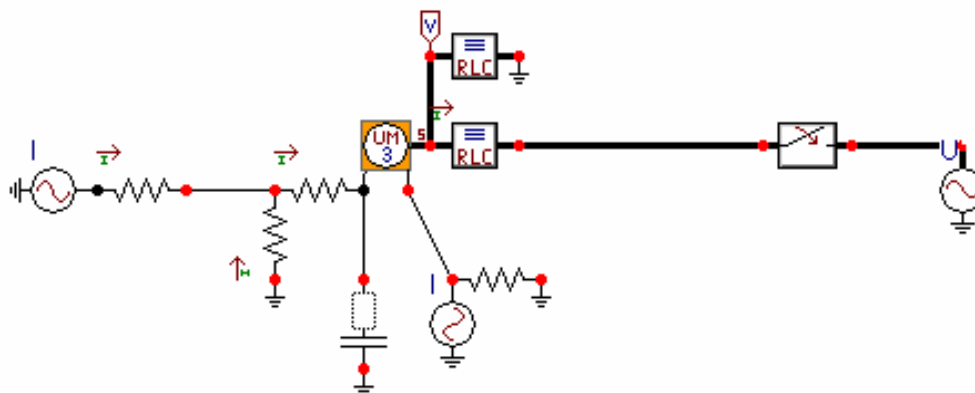


Figura 3.25 – Montagem da partida direta, motor trifásico e carga (compressor)

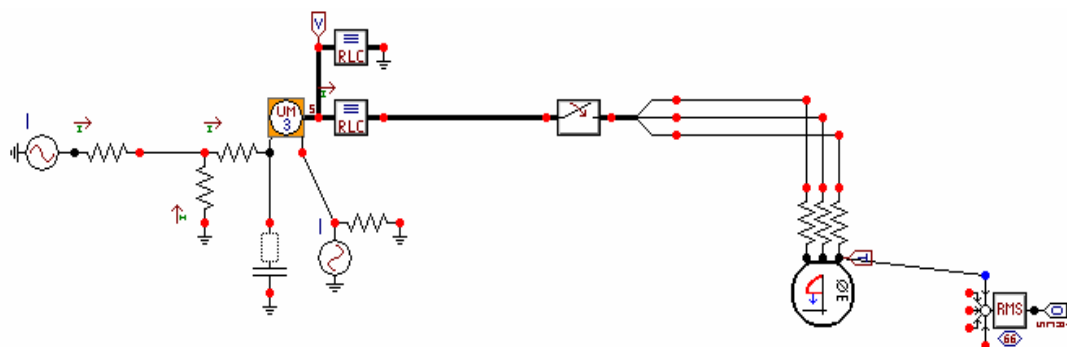


Figura 3.26 – Montagem da partida *soft-starter*, motor trifásico e carga (compressor)

Através da figura 3.27 podemos verificar uma família de curvas constantes que representam o conjugado de carga para vários pontos de pressões representativas do sistema. Assim, cada pressão corresponde a um conjugado de carga constante equivalente e cujo valor será inserido na fonte de corrente representativo do modelo da carga no ATP. O C_c nominal de 3,1271 [N.m] representa a pressão de 3,3 Kgf/cm² referente ao PMS (Ponto Morto Superior).

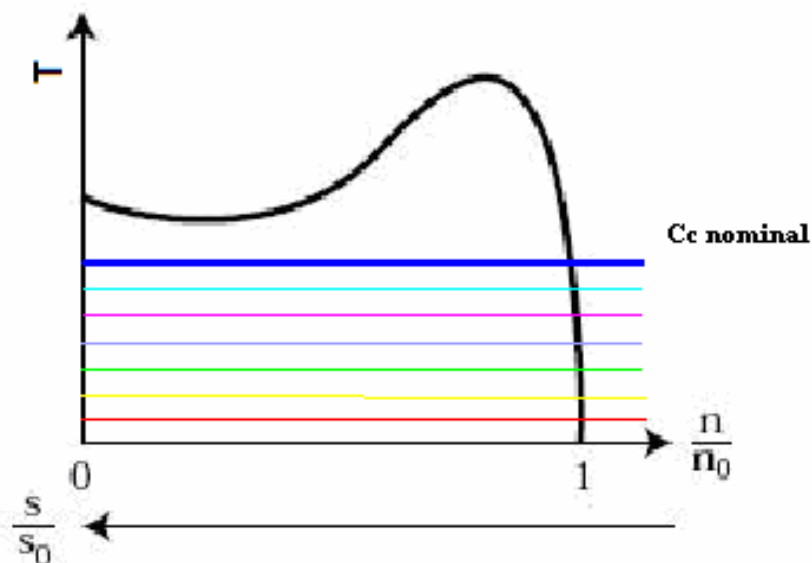


Figura 3.27 – Família de curvas representativa de conjugado de carga constante

3.6.1 – Análise transitória

Para a verificação da simulação e comprovação da modelagem no ATP, será utilizado como referência de conjugados os pontos de pressão mínima e de pressão máxima utilizados nos ensaios. Assim, esses pontos de trabalho (carga e alívio do compressor) correspondem respectivamente à pressão mínima de 2,8 Kgf/cm² e pressão máxima de 3,3 Kgf/cm².

Com os ensaios chegou-se aos resultados apresentados na tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Dados referentes aos pontos de pressão máxima e de pressão mínima

Potência Entrada (W)	Corrente (A)	Rotação (RPM)	rad/s	η	Pot.Eixo (W)	Torque (N.m)	Pressão (Kgf/cm ²)
1404	4.27	3370	352.8952	0.786	1103.544	3.127116	3.3
1308	4.1	3401	356.1414	0.77	1007.16	2.827978	2.8

O valor utilizado na fonte de corrente que representa o conjugado constante do compressor será referente à pressão de 2,8 Kgf/cm² (PMI). Este valor como mostra a tabela 3.7 é de aproximadamente 2,827 [N.m]. Este valor de conjugado deverá ser vencido pelo motor para que este tenha condições de acionar a carga.

Assim, as condições de partida direta e por *soft-starter* foram avaliadas neste ponto de funcionamento.

Com relação à simulação com partida direta os valores são coerentes e compatíveis com o esperado. O valor da simulação é de 358,49 rad/s enquanto o valor de ensaio é de 356,14 rad/s assumindo um erro percentual de 0,65%.

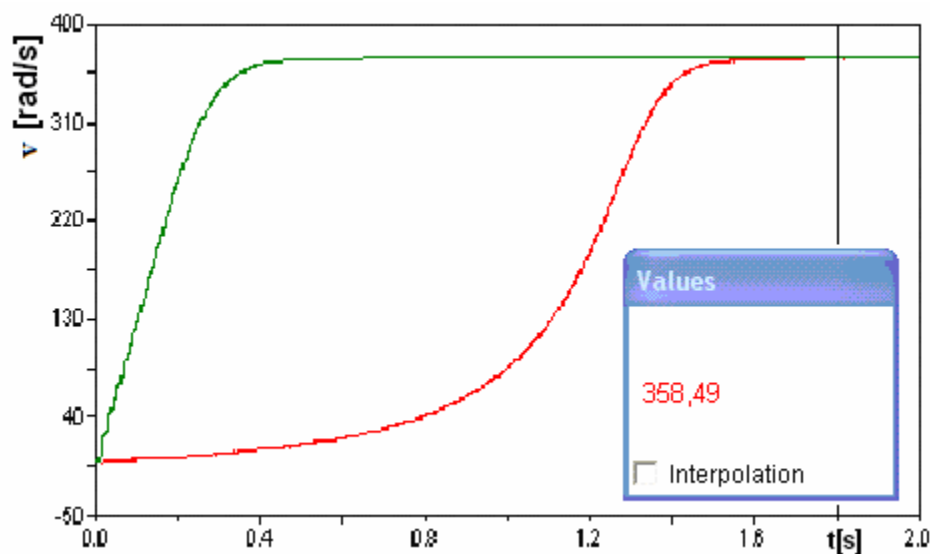


Figura 3.28 - Velocidade do motor com partida direta (verde) e *soft-starter* (vermelho)

Pela figura 3.28 fica evidente a diferença em termos de aceleração e velocidade. Com *soft-starter* o valor da velocidade nominal é atingido de forma lenta e gradual até o valor de regime otimizando o funcionamento da máquina.

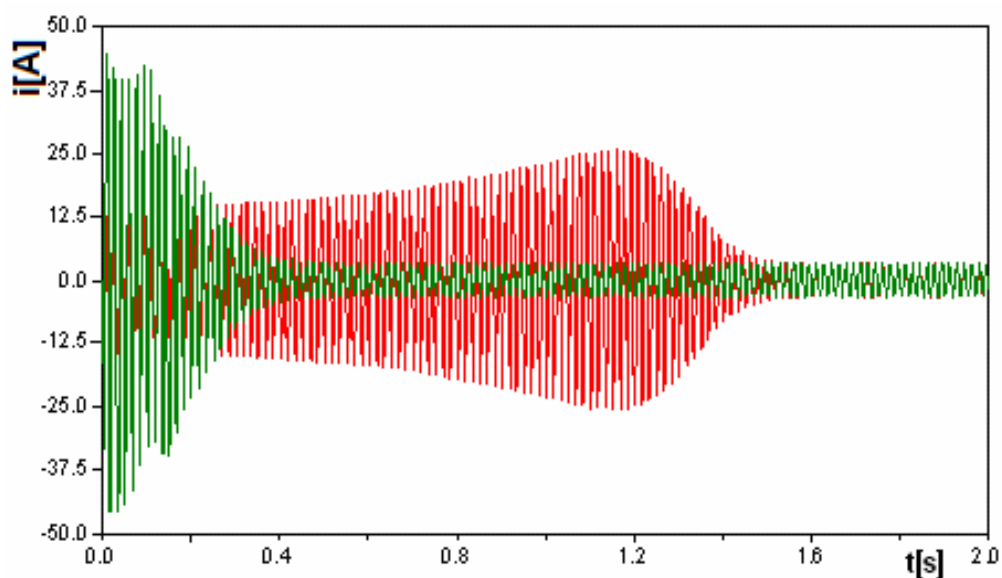


Figura 3.29 – Corrente de partida direta (verde) e com *soft-starter* (vermelho)

A simulação representada na figura 3.29 mostra a comparação qualitativa e quantitativa entre partida direta e partida com *soft-starter*. Observa-se uma redução significativa na magnitude da corrente de partida e também no tempo de duração desta corrente. Com partida direta a corrente de pico alcança valores em torno de 7,5 vezes a corrente nominal do motor (37,7 [A]), enquanto que com a utilização do *soft-starter* este valor de corrente assume o valor de aproximadamente 21,5 [A]. O tempo de duração da corrente de partida com *Soft-Starter* é influenciado pelo valor do tempo de rampa.

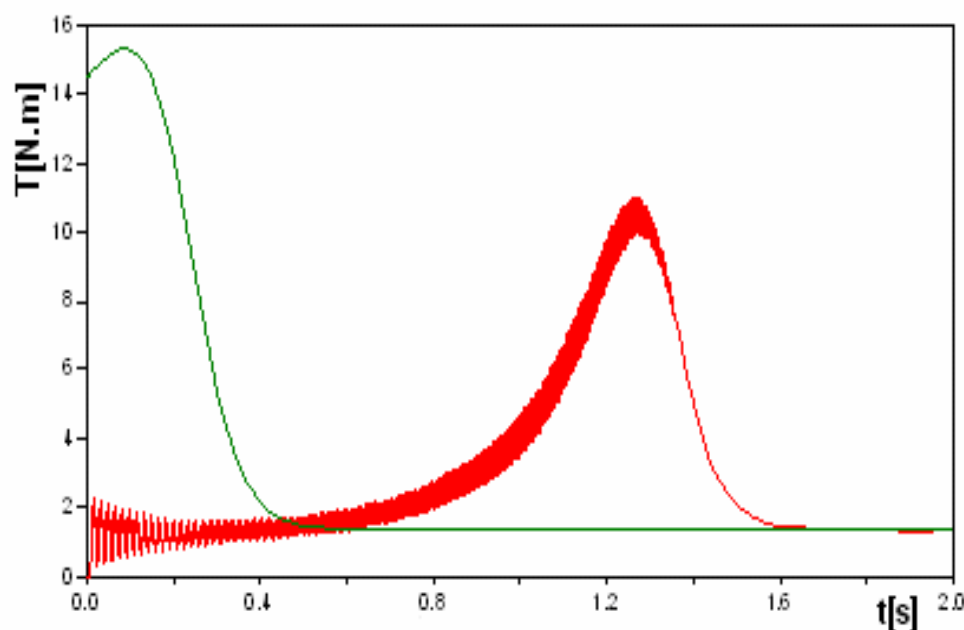


Figura 3.30 – Torque do motor com partida direta e *soft-starter*

A figura 3.30 mostra as diferenças e características do conjugado realizado com partida direta e com partida por *soft-starter*. Ficam evidentes os benefícios em termos de adequação e duração do conjugado de partida e do controle do torque proporcionado pelo dispositivo.

3.6.2 – Análise em regime permanente

Para o estudo computacional adequado de desempenho em regime permanente do modelo implementado, será considerada a pressão máxima de trabalho do compressor já que esta condição expressa as características nominais de carregamento do Motor *Standard* Trifásico de 1,5 CV , que corresponde ao conjugado de carga constante de 3,1271 [N.m].

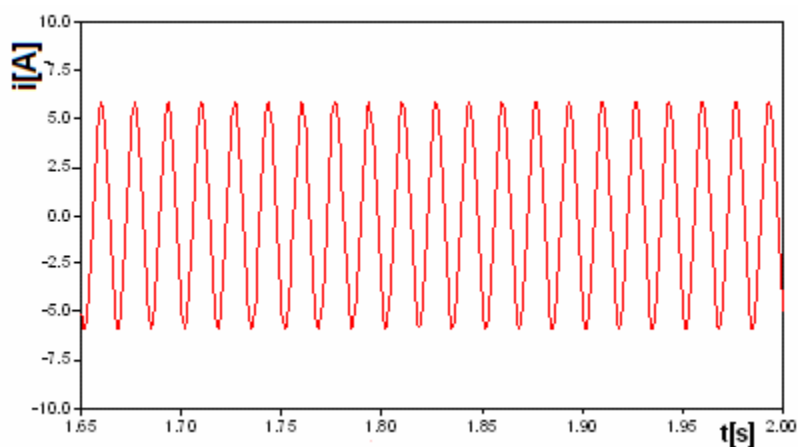


Figura 3.31 – Forma de onda da corrente de regime permanente

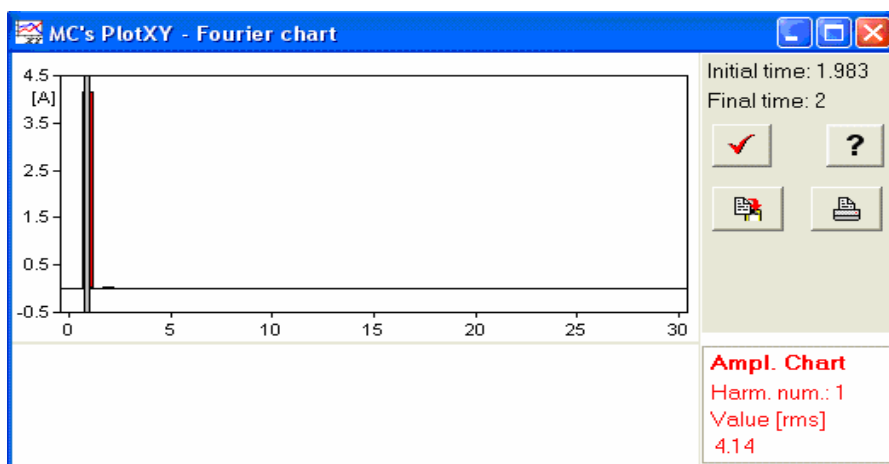


Figura 3.32 – Valor RMS da corrente de regime permanente

CAPITULO III – Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

As figuras 3.31 e 3.32 representam a forma de onda e o valor RMS da corrente fundamental no intervalo de tempo de 1,983 [s] a 2 [s] em regime permanente tendo como referência um ciclo completo. O valor RMS de acordo com a simulação é de 4,14 [A] que é bem próximo do valor nominal de 4,27 [A]. O erro percentual é de 3,04 %.

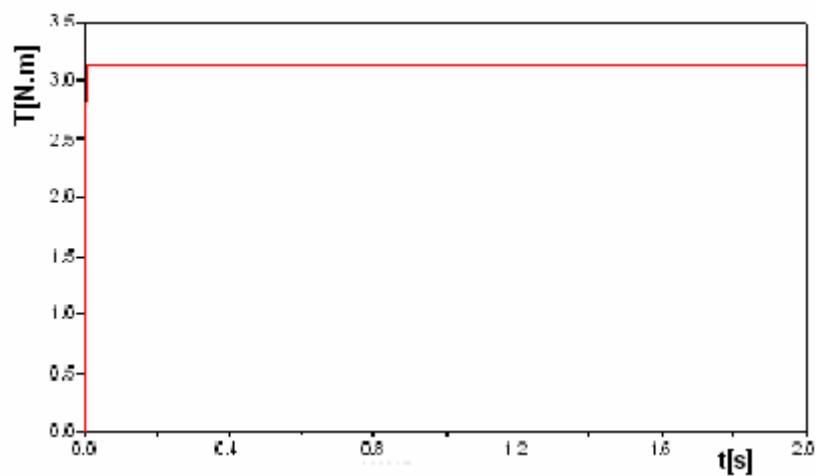


Figura 3.33 – Forma de onda do conjugado de carga

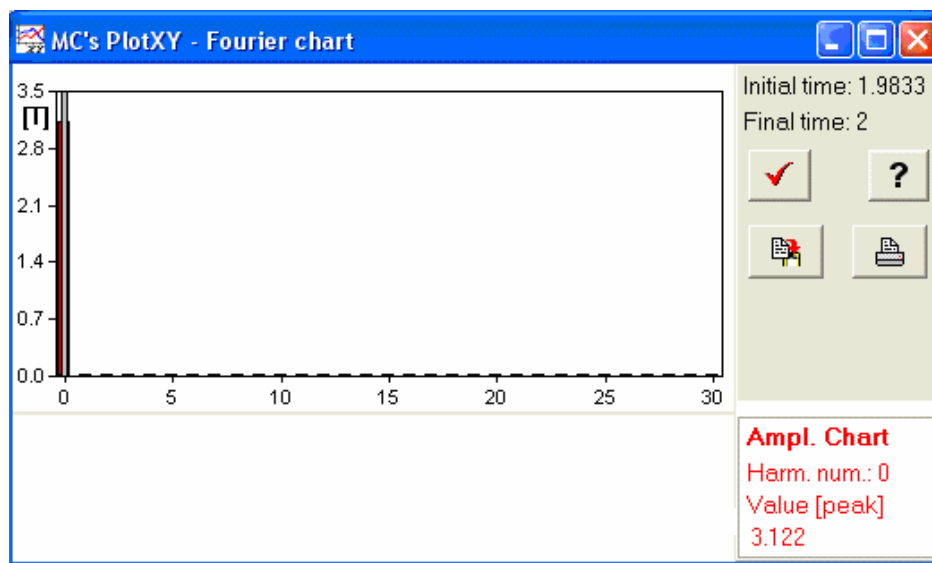


Figura 3.34 – Valor do conjugado de carga

CAPITULO III – Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

As figuras 3.33 e 3.34 representam à forma de onda e o valor do conjugado de carga constante do compressor. O valor de 3,122 [N.m] é o valor do conjugado na condição nominal do compressor em estudo e que representa carga nominal no eixo do motor, cujo valor é de 3,11 [N.m]. O erro percentual é de 0,32 %.

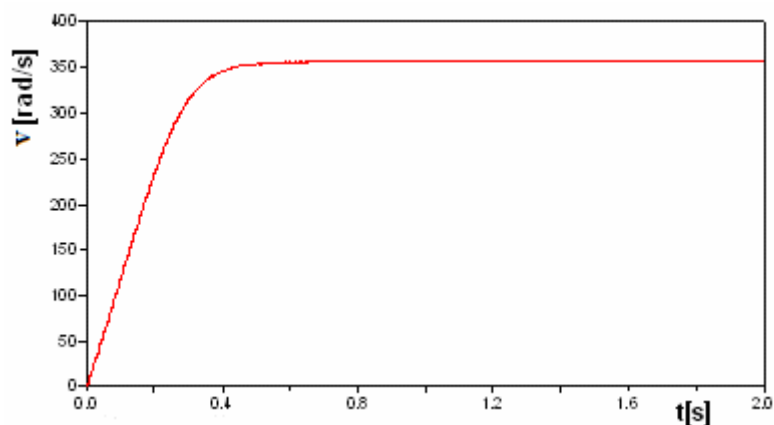


Figura 3.35 – Forma de onda da velocidade em rad/s

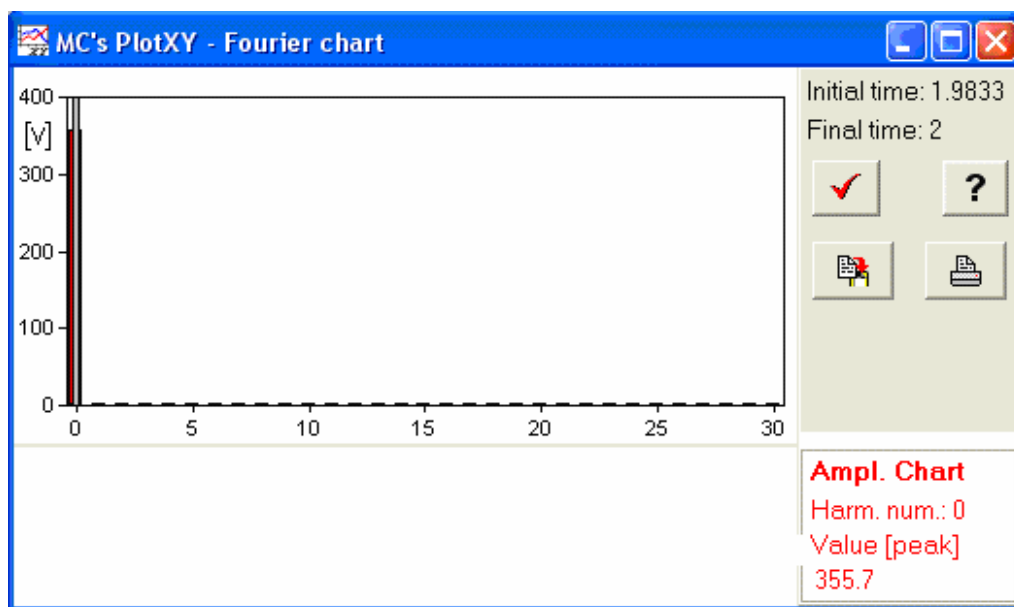


Figura 3.36 – Valor da velocidade em rad/s

CAPITULO III – Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

As figuras 3.35 e 3.36 representam à forma de onda e o valor da velocidade em rad/s na condição de regime permanente e nominal. O valor de 355,7 [rad/s] expressa de maneira adequada o valor de rotação nominal de 355 [rad/s]. O erro percentual é de 0,19 %.

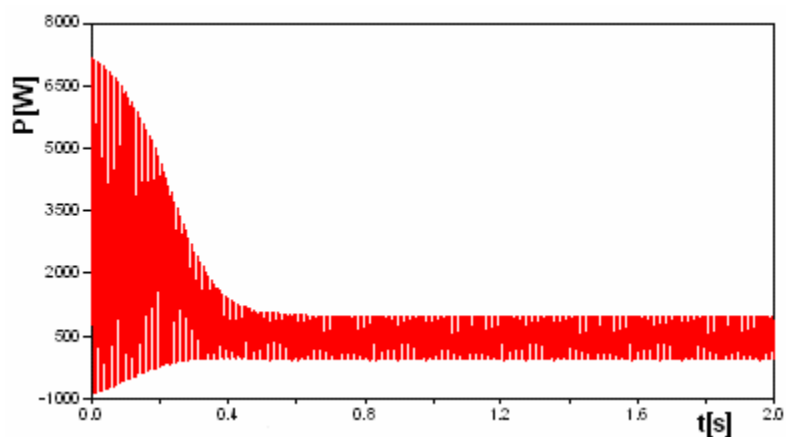


Figura 3.37 – Forma de onda da potência ativa de entrada no motor

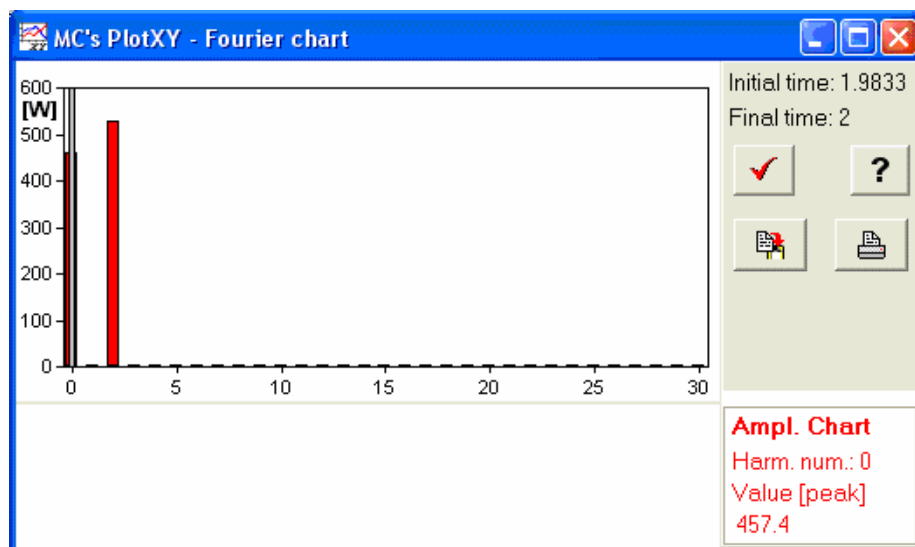


Figura 3.38 – Valor da potência de entrada no motor

CAPITULO III – Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

As figuras 3.37 e 3.38 representam à forma de onda e o valor da potência de entrada no motor na condição de regime permanente e nominal. O valor de 457,4 [W] deve ser multiplicado por três para representar a potência de entrada trifásica. Assim, o valor 1372,2 expressa de maneira adequada o valor de potência nominal de 1404,58 [W]. O erro percentual é de 2,3 %.

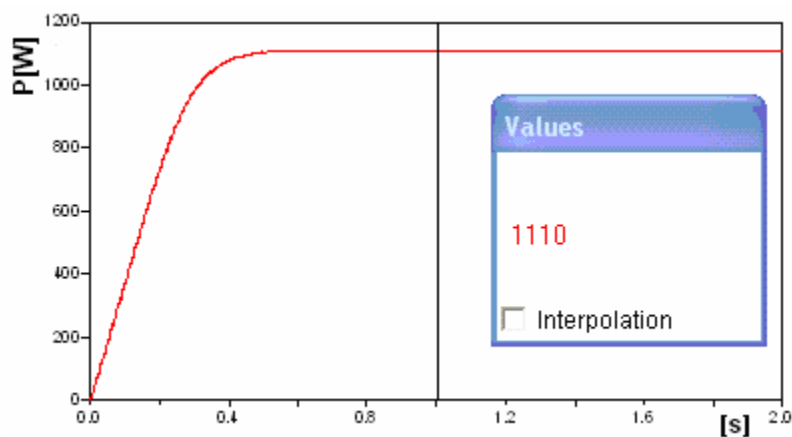


Figura 3.39 – Forma de onda da potência de saída do motor

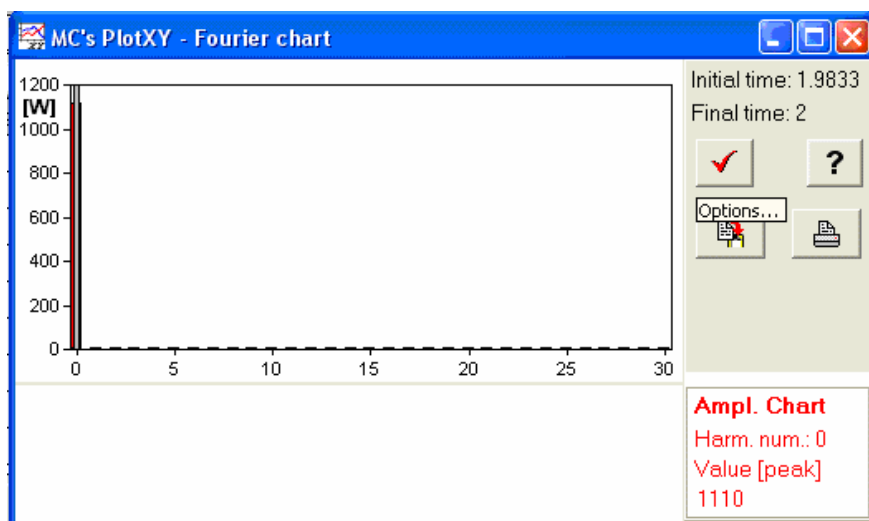


Figura 3.40 – Valor da potência de saída do motor

CAPITULO III – Estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP

As figuras 3.39 e 3.40 representam a forma de onda e o valor da potência de saída do motor na condição de regime permanente e nominal. O valor de 1110 [W] representa a potência de saída para a condição de carga considerada. Este valor expressa de maneira adequada o valor de potência nominal de 1107,6 [W]. O erro percentual é de 0,21 %.

Nessas circunstâncias o rendimento será de 80 % expressando de forma adequada o valor de 78,6 % fornecido em placa. O erro percentual é de 1,78 %.

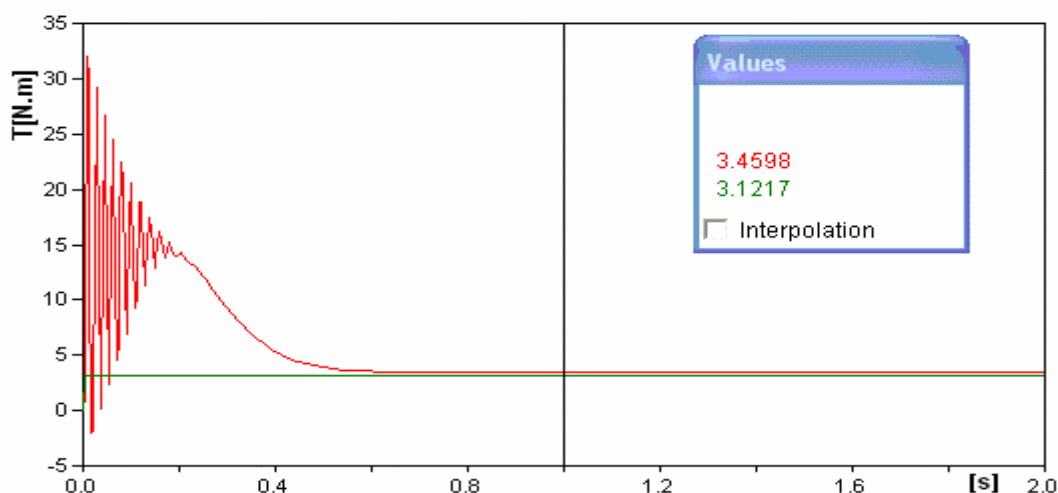


Figura 3.41 – Forma de onda representativa do torque interno do motor (vermelho) e do conjugado de carga (verde)

Pela figura 3.41 podemos observar uma pequena diferença entre o torque interno do motor e o conjugado de carga. Isso se justifica devido à ausência das perdas rotacionais e no cobre do rotor que não foram contempladas. Assim, o conjugado de carga somado com as perdas rotacionais e no cobre do rotor deve ser igual ao torque desenvolvido no entreferro.

3.7 – Síntese dos resultados

Uma vez visualizado e comentado diversos aspectos relacionados com as principais grandezas que expressam a operação da bancada do compressor, realiza-se, na seqüência, uma síntese dos principais resultados, focando, de modo especial, os valores das mesmas.

Tabela 3.8 – Análise em regime permanente das grandezas estudadas

Grandezas	Valores Simulados	Valores Experimentais	Erro Percentual [%]
Corrente [A]	4,14	4,27	3,04
Conjugado de carga [N.m]	3,122	3,11	0,32
Velocidade [rad/s]	355,7	355	0,19
Potência ativa de entrada [W]	1372,2	1404,58	2,3
Potência ativa de saída [W]	1110	1107,6	0,21
Rendimento [%]	80	78,6	1,78

Os ensaios e resultados foram obtidos para o Motor *Standard* de 1,5 [CV] em estudo. Para o Motor de Alto Rendimentos as análises são semelhantes justificando sua omissão.

3.8 – Conclusões parciais

O capítulo em pauta foi iniciado através da caracterização da plataforma computacional utilizada para as simulações. Como informado, trata-se de um software que emprega técnicas de modelagem no domínio do tempo, fato este que está em consonância com as metas desta dissertação.

A partir de princípios bastante difundidos no contexto internacional e nacional sobre a questão da modelagem de motores de indução trifásicos em componentes dq0, modelagem dos dispositivos de partida e da carga acoplada ao eixo do motor, como apontado nas referências comentadas, foram então desenvolvidos os modelos próprios ao presente trabalho de pesquisa. Os resultados obtidos encontram consonância de forma qualitativa e quantitativa com a situação real de acionamento da bancada.

Assim, através da utilização das características prática da plataforma de ensaio do compressor, compreendendo desde a definição das características da fonte de alimentação e acionamento, passando pela determinação e cálculo dos parâmetros do circuito equivalente do motor, e culminando pela determinação do valor de conjugado de carga a ser utilizado em função dos limites de pressão de trabalho do compressor, foi então estabelecida a topologia geral da bancada em estudo.

Dentre as possibilidades de seleção das grandezas a serem focadas para o trabalho optou-se pela análise das: correntes de partida e em regime permanente, conjugados, velocidade, potências e rendimento. Comparando-se as formas de onda e os valores a elas pertinentes, foi então possível correlacionar o desempenho do estudo computacional do modelo motor-carga no programa ATP e concluir que o mesmo responde de forma satisfatória e coerente comprovando sua potencialidade e versatilidade.

CAPÍTULO IV

Metodologia de diagnóstico energético e estudo de caso

4.1 – Introdução

Atualmente, o ar comprimido é utilizado para diversos fins: ferramentas pneumáticas, acionamentos, controles de equipamentos, etc.

Depois da energia elétrica, o ar comprimido é a forma de energia mais consumida na indústria de transformação. É também a forma de energia mais onerosa e, paradoxalmente, negligenciada [16], [26], [27].

Nesse capítulo, o enfoque principal será dado à distribuição de ar comprimido desenvolvendo uma metodologia de diagnóstico energético para cálculo da perda de energia devido a vazamentos na rede de distribuição, e também a perda de eficiência do compressor.

É mostrado também um estudo de caso para evidenciar as metodologias e comprovar numericamente as grandezas relacionadas ao tema Eficiência Energética.

4.2 – Ar comprimido

Os sistemas de ar comprimido representam parcela expressiva do consumo energético de uma instalação industrial. Todavia, a falta de um projeto adequado e de uma manutenção regular provoca redução no desempenho global caracterizando uma fonte constante de desperdícios [28], [27].

Infelizmente no nosso país poucos gestores e técnicos encaram o ar comprimido como uma forma de energia, que deve ser utilizada racionalmente de modo à rentabilizar o processo produtivo.

Assim, serão apresentados modelos de ensaios para a determinação da eficiência de um sistema de compressão de ar no que tange à escolha do motor que acionará o compressor (Linha *Standard* ou Alto Rendimento), aos vazamentos devido à precariedade da manutenção da instalação, à regulagem do compressor no que tange a temperatura e pressão de trabalho, e avaliação do superdimensionamento do motor através de curvas específicas de desempenho [16], [29].

4.2.1 – Consumo dos Motores *Standard* e de Alto Rendimento

Este item visa estabelecer as diretrizes para avaliação e comparação da eficiência energética dos motores *Standard* e Alto Rendimento.

O procedimento de ensaio deve considerar uma mesma condição de carga para os motores. Para tanto, é necessário fixar uma vazão constante no sistema utilizando-se o

regulador de vazão PID do supervisor. A escolha da vazão pode ser feita arbitrariamente, mas observando-se os seguintes critérios:

- O valor da vazão deve ser regulado de forma que a pressão no reservatório de ar comprimido não sofra redução se o compressor estiver ligado, pois dessa forma a pressão máxima do sistema não seria atingida;
- A vazão não deve ser muito alta para que o compressor entrando em alívio o tempo para o religamento seja o suficiente para que o motor reduza sua temperatura. Se isso ocorresse, o motor poderia ser danificado devido ao fato de se submeter à corrente de partida por várias vezes em pouco tempo.

Antes de começar a coletar as informações do estado inicial do sistema, é necessário acionar o sistema para que o reservatório de ar seja preenchido até a pressão máxima determinada no projeto. Atingido a pressão máxima, o sistema entrará em alívio. Neste momento, deverá ser anotado o valor da energia acumulada no sistema até o presente momento. Esta informação se encontra na janela <Medições>. Escolher as opções <Energia> e <Ativa>. Esse valor será a variável $E_{inicial}$.

O sistema estará em alívio até que a pressão mínima seja atingida. Quando ela for atingida, o compressor entrará em carga novamente, ou seja, o motor será acionado e permanecerá assim até que a pressão máxima seja atingida e o sistema passe a trabalhar em alívio novamente. No momento em que o sistema entrar em carga, um cronômetro deverá ser acionado.

Para a comparação dos consumos dos dois motores (*Standard* e *Alto Rendimento*) é necessário que o sistema oscile entre carga e alívio durante o máximo de vezes possível. Quanto maior o número de vezes, maior será a precisão dos resultados. É aconselhável que o sistema opere no mínimo 10 vezes entre carga e alívio.

No final das n vezes que o compressor alternou entre carga e alívio, o cronômetro deverá ser paralisado e anotado o valor. Além disso, a energia ativa final deverá ser anotada seguindo o mesmo procedimento descrito anteriormente para se obter a energia ativa inicial. A energia ativa final será a variável E_{final} e o tempo cronometrado será a variável t . Esse tempo deverá ser dado em horas.

A potência média para realizar o trabalho de compressão nos n ciclos carga/alívio será dada pela seguinte fórmula:

$$P_m = \frac{E_{final} - E_{inicial}}{t} \quad (4.23)$$

Onde:

P_m [kW] → Potência média;

$E_{inicial}$ [KWh] → Energia inicial;

E_{final} [KWh] → Energia final;

t [h] → Tempo de medição total.

O valor de P_m deverá ser calculado para os dois motores. É importante salientar que o número de ciclos de carga/alívio deverá ser o mesmo para os dois motores.

Para determinar a potência média do motor é necessário conhecer o ponto morto superior (PMS), que representa a pressão máxima de trabalho, e o ponto morto inferior (PMI), que representa a pressão mínima de trabalho.

As grandezas PMS e PMI não são obtidas de forma aleatória. É necessário conhecer a pressão de trabalho do sistema (P_{trab}) e a perda de carga da instalação (ΔP). Para o estudo em questão, pode-se considerar como perda máxima admissível uma perda de carga de 0,08 Kgf/cm² a cada 100 metros de tubulação equivalente [16], [26], [30]. Assim, as grandezas PMS e PMI são obtidas como se segue:

$$PMI = P_{trab} + \Delta P \quad (4.24)$$

$$PMS = PMI + (5\% \text{ a } 10\%). PMI \quad (4.25)$$

Onde:

PMI [bar] → Ponto Morto Inferior;

PMS [bar] → Ponto Morto Superior;

P_{trab} [bar] → Pressão de trabalho;

ΔP [bar] → Perda de carga da instalação.

Obtidos o PMS e o PMI determina-se a potência média do motor. O procedimento experimental, de forma resumida, para análise da potência média na bancada será:

- Acopla-se o motor ao sistema;
- Configura-se na janela <Comando> do sistema supervisor os valores referentes aos pontos PMS e PMI e adota-se religamento automático do compressor;

- Aciona-se o motor por partida direta;
- Assim que o sistema entrar em alívio, anota-se o valor referente à energia inicial ($E_{inicial}$) através da janela Medições do sistema supervisorio;
- Abre-se o solenóide XV-04;
- O sistema deverá operar em carga/alívio durante 5 ciclos. Deverá ser cronometrado e somado os tempos em que o compressor operar em carga;
- Ao final dos 5 ciclos anota-se o valor da energia ativa final total do sistema (E_{final}).

A economia de energia ao se utilizar o motor de alto rendimento ao invés do motor Standard é dado por:

$$E.E = (P_{st} - P_{AR}) \cdot t_c \quad (4.26)$$

Onde:

$E.E$ [KWh] → Economia de Energia;

P_{st} [KW] → Potência média do motor Standard;

P_{AR} [KW] → Potência média do motor de Alto Rendimento;

t_c [h] → Tempo de operação em carga do compressor.

Em termos percentuais, temos:

$$E.E \% = \frac{E.E}{P_{st} \cdot t_c} \cdot 100 \quad (4.27)$$

A economia de energia em R\$/a é dada por:

$$E.E_{R\$/a} = E.E \times V_{energia} \quad (4.28)$$

Onde:

$V_{energia}$ [R\$/KWh] → Valor específico da energia elétrica;

$R\$/a$ → Reais por ano.

4.2.2 – Perdas por vazamento

Uma parcela expressiva de energia elétrica é eliminada através de vazamentos nas instalações de ar comprimido. Na prática não é possível eliminar totalmente os vazamentos do sistema, entretanto ele não deverá exceder a 5% da capacidade instalada para que o sistema seja considerado eficiente [16].

A metodologia que será utilizada evidencia uma maneira de se calcular o desperdício de energia devido aos vazamentos. O método empregado é o da medição do tempo em carga [16].

Primeiramente é necessário conhecer alguns parâmetros do sistema para que os cálculos possam ser realizados. Os parâmetros iniciais necessários são:

- Vazão do compressor ou Descarga Livre Efetiva (DLE) em m³/h;
- Potência do motor do compressor ou potência média do motor no ponto de operação do sistema (Pm) em kW;
- Ponto Morto Superior (PMS) em bar;
- Ponto Morto Inferior (PMI) em bar.

Normalmente, a potência do motor e a vazão do compressor já estão explicitadas nas placas de especificações dos equipamentos. A vazão encontrada na placa do compressor corresponde à vazão quando o compressor está trabalhando na sua pressão nominal. O mesmo acontece com o motor. Entretanto, nem sempre o compressor estará regulado para trabalhar na sua condição nominal. Muitas vezes, a pressão que o sistema foi regulado é menor que a pressão máxima suportada pelo compressor. Nesse caso, a vazão do compressor será maior num ponto de menor pressão.

Com base no problema apresentado anteriormente, é necessário encontrar a vazão do compressor na pressão regulada do sistema, e, além disso, é necessário obter a potência média consumida pelos motores entre o ponto de religamento do compressor e o ponto de alívio do mesmo. A potência média será diferente para cada um dos motores (*Standard* e *Alto Rendimento*), esses valores podem ser encontrados pela equação (23) apresentada no item 4.2.1. É importante salientar que essa equação deverá ser utilizada supondo-se que o aumento de pressão no sistema em carga em relação ao tempo resulta em uma função do tipo linear.

Para se determinar o percentual de vazamento da instalação de ar comprimido, proceda da seguinte forma:

- Esvaziar o reservatório de ar comprimido através dos solenóides;
- Após o esvaziamento completo, manter todos os solenóides fechados;
- Ligar o compressor através da chave de partida direta na janela <Comandos> e esperar que o mesmo encha o reservatório até atingir a pressão máxima do sistema 3,3 [bar] onde ocorre o desligamento automático;

- Quando ocorrer o desligamento, ou seja, o sistema entrar em alívio, acionar o primeiro cronômetro;
- Quando o sistema entrar em carga novamente acionar o outro cronômetro e pausá-lo quando o sistema entrar em alívio novamente;
- Anotar o primeiro tempo de carga;
- Anotar o tempo de carga do compressor durante 5 ciclos (t_1, t_2, t_3, t_4 e t_5);
- Ao final do quinto ciclo de carga, ou seja, no final da quinta medição de tempo de carga, pausar o primeiro cronômetro e anotar o tempo total dos cinco ciclos totais (t_{total}).

O caudal de vazamento é dado por:

$$V_v = V_c \cdot \frac{\sum_{i=1}^5 t_i}{t_{total}} \quad (4.29)$$

Onde:

V_v [m³/s] → Caudal do Vazamento;

V_c [m³/s] → Vazão do compressor na pressão de trabalho;

$\sum_{i=1}^5 t_i$ [s] → Tempo de funcionamento em carga, durante a medição;

t_{total} [s] → Tempo de medição total.

O percentual de perdas por vazamento é dado pela seguinte fórmula:

$$V_v \% = \frac{V_v}{V_c} \cdot 100 \quad (4.30)$$

O custo anual da perda por vazamento é calculado utilizando-se a expressão apresentada adiante:

$$C_v = C_{ac} \cdot \frac{V_v \%}{100} \quad (4.31)$$

Onde:

C_v [R\$/a] → Custo da perda por vazamento;

C_{ac} [R\$/a] → Custo anual de geração de ar comprimido;

$V_v \%$ [%] → Percentual de perdas por vazamento.

C_{ac} é dado por:

$$C_{ac} = P_m \cdot t_c \cdot C_{kWh} \quad (4.32)$$

Onde:

C_{ac} [R\$/a] → Custo anual de geração de ar comprimido;

P_m [kW] → Potência média;

t_c [h/a] → Tempo de operação do compressor em carga;

C_{kWh} [R\$/kWh] → Custo da perda por vazamento;

4.2.3 – Perdas por Aumento de Temperatura

Devido aos ciclos de compressão, o rendimento de uma instalação de ar comprimido é função da temperatura de sucção do ar. Quanto mais quente o ar, pior o rendimento da instalação. Assim, é uma variável fundamental em termos de eficiência energética.

Segundo estimativas, o compressor consumirá 1% a mais de potência para disponibilizar o ar nas mesmas condições, tendo como referência um acréscimo de 3°C na temperatura de admissão do ar. Isso se justifica pelo fato do aumento da temperatura diminuir a massa específica do ar (massa de ar contida numa unidade de volume) em cerca de 1%, resultando também 1% a mais no volume [16].

O percentual de perdas por temperaturas elevadas na captação do ar é dado pela seguinte equação:

$$T_{\%} = \left(1 - \frac{T_0' + 273,15}{T_0 + 273,15} \right) \cdot 100 \quad (4.33)$$

Onde:

$T_{\%}$ [%] → Percentual de perdas por temperaturas elevadas na sucção;

T_0 [°C] → Temperatura inicial do ar;

T_0' [°C] → Temperatura inicial do ar pós-otimização.

O custo anual devido a temperaturas elevadas na captação de ar é obtido da seguinte forma:

$$C_T = C_{ac} \cdot \frac{T_{\%}}{100} \quad (4.34)$$

Onde:

C_T [R\$/a] → Custo devido a temperaturas elevadas na captação de ar;

C_{ac} [R\$/a] → Custo anual de geração de ar comprimido;

$T_{\%}$ [%] → Percentual de perdas por temperaturas elevadas na sucção.

4.2.4 – Perdas por aumento de pressão

Uma outra variável importante para uma boa eficiência do sistema de ar comprimido é a pressão máxima regulada para o reservatório. Uma pressão inadequada resulta em maior perda de rendimento. Quanto maior a pressão no sistema, maior será a perda por vazamento.

A pressão máxima (*PMS*) e mínima (*PMI*), como comentado no item 4.2.1, deve ser estabelecida de forma a se obter o ponto ideal de eficiência, sendo necessário, para isso, conhecer os dados técnicos dos equipamentos que compõem a instalação e ajustar tais limites de forma prática durante a implementação do sistema de ar comprimido.

O percentual de perdas por pressão elevadas na captação do ar é dado pela equação seguinte:

$$P_{\%} = \left[1 - \frac{\left(\sqrt[n]{r_p'} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\left(\sqrt[n]{r_p} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1} \right] \cdot 100 \quad (4.35)$$

Onde:

$P_{\%}$ [%] → Percentual de perdas devido à pressão elevada;

r_p → Relação de compressão original;

r_p' → Relação de compressão pós-otimização;

n → Número de estágios de compressão;

k → Coeficiente adiabático (isentrópico).

Para o ar, o coeficiente k varia pouco em condições normais de temperatura de trabalho e pode ser assumido como sendo igual a 1,41[1].

A relação de compressão é dada por:

$$r_p = \frac{p_1 + p_{atm}}{p_{atm}} \quad (4.36)$$

Onde:

r_p → Relação de compressão;

p_1 [bar] → pressão máxima;

p_{atm} [bar] → Pressão atmosférica em bar.

$$r'_p = \frac{p'_1 + p_{atm}}{p_{atm}} \quad (4.37)$$

Onde:

r'_p → Relação de compressão para pressão otimizada;

p'_1 [bar] → pressão otimizada;

O custo anual devido a pressão elevada no sistema de ar comprimido é obtido da seguinte forma:

$$C_p = C_{ac} \cdot \frac{P_{\%}}{100} \quad (4.38)$$

Onde:

C_p [R\$/a] → Custo devido a pressão elevada;

C_{ac} [R\$/a] → Custo anual de geração de ar comprimido;

$P_{\%}$ [%] → Percentual de perdas por pressão elevada.

4.2.5 – Avaliação do superdimensionamento por método gráfico

O método gráfico de avaliação do superdimensionamento é uma simulação manual obtida por meio de curvas específicas de desempenho do motor. Tais curvas são fornecidas pelos fabricantes e através delas pode-se estimar o carregamento dos motores determinando se sua operação está adequada e favorável [31].

O procedimento de análise segue a seguinte rotina:

- O motor deve estar operando numa situação de maior carga;
- Devem ser medidas as correntes nas três fases. Esta informação se encontra na janela <Medições>. Escolher as opções <Corrente> e <Ativa>. Deve ser realizada uma média aritmética simples dos três valores para efeito de análise;
- O valor médio encontrado deve então ser marcado no gráfico com as curvas características do motor em análise para se determinar o carregamento;
- Na curva de desempenho do motor, marcar a corrente média no eixo vertical referente ao valor de corrente e traçar uma horizontal até interceptar a curva da corrente. A partir desse ponto, descer uma vertical até o eixo do carregamento;
- Determina-se graficamente o nível de carregamento do motor. Se o valor estiver abaixo de 75%, provavelmente o motor apresenta sinais de superdimensionamento. Nos casos em que o carregamento estiver abaixo de 50%, deverá então ser avaliada a possibilidade da sua imediata substituição por outro de capacidade compatível com a carga acionada;

- Prolongar a vertical referente ao carregamento até interceptar as curvas de fator de potência e de rendimento. Com esses valores determinados, pode-se calcular a energia consumida pelo motor.

Assim, será apresentado na sequência, um estudo de caso a partir dos modelos de ensaios comentados.

4.3 – Estudo de caso e análise financeira

Este item destina-se a apresentar os resultados de um estudo de caso associado com a operação do sistema de ar comprimido do laboratório que é objeto deste estudo. Para tanto, foram realizados os ensaios e procedimentos detalhados minuciosamente nos itens anteriores, levando-se em consideração os aspectos relacionados às variáveis que influenciam de forma relevante na eficiência energética da instalação do sistema de ar comprimido.

As análises serão realizadas adotando-se os seguintes valores:

- O tempo de funcionamento do compressor será adotado como sendo de 6000 horas por ano. Assim, $t_{func} = 6000 \text{ h}$;
- O tempo de funcionamento em carga será de 4500 horas por ano. Assim, $t_{carga} = 4500 \text{ h}$;
- Custo específico da energia elétrica: $V_{energia} = 0,65R\$/KWh$;
- Ponto Morto Inferior (*PMI*): $PMI = 2,8 \text{ bar}$;

- Ponto Morto Superior (*PMS*): $PMS = 3,3 \text{ bar}$;
- Potência média do motor convencional: $P_{conv} = 1,28 \text{ KW}$;
- Potência média do motor de alto rendimento: $P_{AR} = 1,20 \text{ KW}$;
- Descarga Livre Efetiva do compressor (*DLE*): $281,47 \text{ l/min}$ ou $16,888 \text{ m}^3 / \text{h}$;
- Temperatura de admissão do ar: $T_0 = 30^\circ \text{C}$;
- Temperatura do ar pós-otimização: $T'_0 = 25^\circ \text{C}$;
- Vazamento intrínseco da tubulação de distribuição de ar:
 $V_{v-int} = 4,25 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s}$.
- Pressão atmosférica do local: $P_{atm} = 0,9745 \text{ ATM}$ ou $P_{atm} = 0,9875 \text{ bar}$.

A primeira análise será com relação ao consumo dos motores Standard e Alto Rendimento, conforme o item 4.2.1, enfocando a economia de energia proveniente da possível substituição dos motores.

$$E.E = (1,28 - 1,20) \cdot 4500 \rightarrow E.E = 360 \text{ KWh}$$

$$E.E\% = \frac{360}{1,28 \cdot 4500} \cdot 100 = 6,25\%$$

$$E.E_{R\$/a} = 360 \cdot 0,65 \rightarrow E.E_{R\$/a} = 234 \text{ R\$ / a}$$

A segunda análise será com relação às perdas por vazamentos, conforme o item 4.2.2. Ao realizar os ensaios com as perfurações XV-02 à XV-06, o vazamento intrínseco do sistema foi contabilizado junto, sendo necessário subtrair o valor do vazamento

intrínseco ($V_{v-int} = 4,25 \times 10^{-5} m^3 / s$) dos outros, para que os resultados representem valores confiáveis.

Será mostrado detalhadamente o cálculo para o vazamento provocado por XV-02.

$$V_v = 4,69 \times 10^{-3} \cdot \frac{8+7+7+7+7}{533} \rightarrow V_v = 3,1677 \times 10^{-4} m^3 / s - V_{v-int}$$

$$\rightarrow V_v = 2,7424 \times 10^{-4} m^3 / s$$

$$V_v \% = \frac{2,7427 \times 10^{-4}}{4,69 \times 10^{-3}} \cdot 100 \rightarrow V_v \% = 5,8479\%$$

$$C_{ac} = 1,28.4500.0,65 \rightarrow C_{ac} = 3744,00 R\$ / a$$

$$C_v = 3744,00 \cdot \frac{5,8479}{100} \rightarrow C_v = 218,94 R\$ / a$$

A figura 4.1 evidencia os ciclos de carga e alívio referente ao vazamento produzido pelo furo XV-02. É possível visualizar os limites PMS e PMI, o tempo inicial e final do evento, e os cinco ciclos contabilizados durante o ensaio. Pode-se observar “pequenos degraus” durante os ciclos. Isso se justifica devido à precisão do sistema supervisor que coleta os dados quatro vezes por segundo e traça o gráfico. Assim, quanto maior o vazamento (XV-02 até XV-06) mais pronunciado e evidente são os “degraus” já que o compressor vai demorando cada vez mais para alcançar o PMS e cada vez mais rápido o PMI é atingido. A curva de carga vai ficando menos inclinada ficando perfeitamente visível os “degraus”.

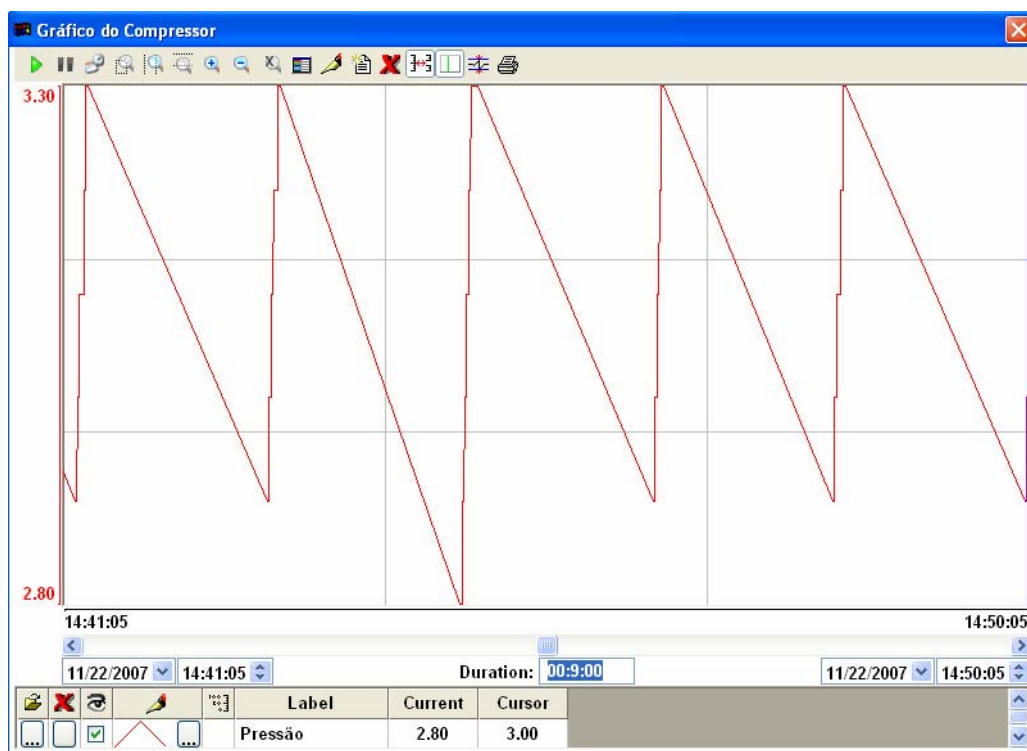


Figura 4.1 – Gráfico de carga e alívio referente à XV-02

Tabela 4.1 – Tempos parciais do ciclo de carga e alívio para XV-02

Furo	$t_1[s]$	$t_2[s]$	$t_3[s]$	$t_4[s]$	$t_5[s]$
XV-02	8	7	7	7	7
$t_{total}[s]$	533				

A terceira análise será com relação às perdas por aumento de temperatura, conforme o item 4.2.3. Nesse item, é analisado o consumo de energia devido às altas temperaturas na captação de ar. A temperatura de captação de ar durante os ensaios foi obtida por meio de um sensor de temperatura instalado na bancada apresentando o valor de $T_0 = 30^\circ C$ e deseja-se otimizar o sistema para que o ar seja captado à $T_0' = 25^\circ C$.

$$T_{\%} = \left(1 - \frac{25 + 273,15}{30 + 273,15} \right) \cdot 100 \rightarrow T_{\%} = 1,6493\%$$

$$C_T = 3744,00 \cdot \frac{1,6493}{100} \rightarrow C_T = 61,7516R\$/a$$

A quarta análise será com relação às perdas por aumento de pressão, conforme o item 4.2.4. Nesse item, é analisada a perda de energia devido às altas pressões de regulagem do sistema. A análise é em relação ao ponto morto inferior (PMI) do sistema, ou seja, p_1 assumindo o valor de $PMS = 3,3\text{bar}$ e p_1' assumindo o valor de $3,1\text{ bar}$. A pressão de $3,1\text{ bar}$ é considerada como ponto ideal para que o sistema funcione na condição nominal. A pressão atmosférica do laboratório é de $P_{atm} = 0,9875\text{bar}$.

$$r_p = \frac{3,3 + 0,9875}{0,9875} \rightarrow r_p = 4,34$$

$$r_p' = \frac{3,1 + 0,9875}{0,9875} \rightarrow r_p' = 4,14$$

$$P_{\%} = \left[1 - \frac{(\sqrt[1,41]{4,14})^{\frac{1,41-1}{1,41}} - 1}{(\sqrt[1,41]{4,34})^{\frac{1,41-1}{1,41}} - 1} \right] \cdot 100 \rightarrow P_{\%} = 3,9217\%$$

$$C_p = 3744,00 \cdot \frac{3,9217}{100} \rightarrow C_p = 146,82R\$/a$$

Na sequência segue a tabela 4.2 ilustrativa da composição do custo das perdas em relação às grandezas analisadas.

Através dos resultados apresentados fica evidente a importância dos custos relacionados às perdas devido à falta de projeto adequado e manutenção regular. Isso mostra que a redução do consumo energético não se limita apenas à troca de motores mas também as condições de trabalho da carga acionada.

Tabela 4.2 – Composição do custo das perdas

Composição do custo das perdas		
Uso MIT standard	234R\$/a	35,37%
Vazamento	218,94R\$/a	33,09%
Temperatura	61,75R\$/a	9,33%
Pressão	146,82R\$/a	22,21%
TOTAL	661,51R\$/a	100%

A figura 4.2 apresenta de forma visual o impacto da composição percentual do custo das perdas para o vazamento XV-02. O maior impacto de perdas é atribuído aos custos financeiros da utilização do MIT *standard* em detrimento do MIT de alto rendimento contabiliza 35,37% representando um impacto expressivo e que talvez justifique sua troca. Em segundo lugar aparece às perdas provocadas pelo caudal de vazamento contabilizando um percentual de 33,09%. Depois aparece às perdas provocadas por pressão elevada no regime operacional de funcionamento do compressor. Esta perda contabiliza um percentual de 22,21% para o ensaio realizado. Os O percentual relativo às perdas por temperaturas elevadas na captação do ar é de apenas 9,33% considerado irrisório comparativamente às outras perdas.



Figura 4.2 – Composição percentual do custo das perdas para XV-02

Será dada continuidade as análises referentes às perdas provocadas pelos furos de XV-03 à XV-06. Porém, para evitar um desenvolvimento dispendioso e cansativo, serão omitidos os cálculos realizados, já que os mesmos foram executados por *softwares*. Como os resultados referentes ao consumo dos motores, perdas por temperaturas e pressões elevadas são os mesmos, não importando o vazamento provocado por furo específico, as tabelas e valores apresentados na seqüência se restringirão às perdas por vazamentos.

A seguinte análise é para o vazamento provocado por XV-03.

Tabela 4.3 – Valores das grandezas referentes ao vazamento XV-03

Valores referentes ao vazamento XV-03	
Vv	$4,77 \times 10^{-4} m^3 / s$
Vv%	10,17%
Cv	380,79R\$/ a

Tabela 4.4 – Tempos parciais do ciclo de carga e alívio para XV-03

Furo	$t_1[s]$	$t_2[s]$	$t_3[s]$	$t_4[s]$	$t_5[s]$
XV-03	7	7	7	8	7
$t_{total}[s]$	325				

A figura 4.3 evidencia os ciclos de carga e alívio referente ao vazamento produzido pelo furo XV-03. É possível visualizar os limites PMS e PMI, o tempo inicial e final do evento, e os cinco ciclos contabilizados durante o ensaio.

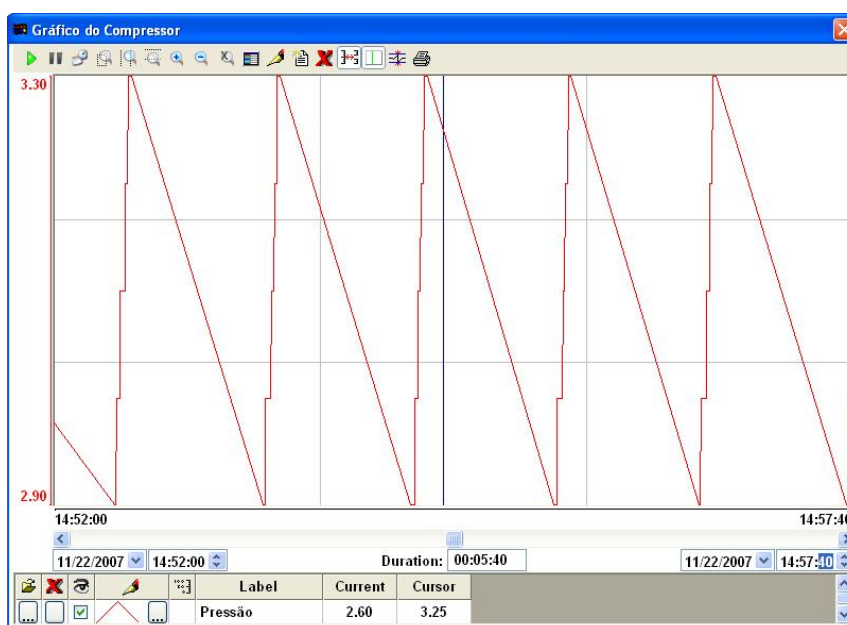


Figura 4.3 – Gráfico de carga e alívio referente à XV-03

Pela tabela 4.5 observa-se que o custo total das perdas aumentou de 661,51R\$/a para 823,36R\$/a, tal aumento é justificado pelo aumento das perdas por vazamento.

Tabela 4.5 – Composição do custo das perdas

Composição do custo das perdas		
Uso MIT standard	234R\$/a	28,42%
Vazamento	380,79R\$/a	46,24%
Temperatura	61,75R\$/a	7,49%
Pressão	146,82R\$/a	17,85%
TOTAL	823,36R\$/a	100%

A figura 4.4 apresenta de forma visual o impacto da composição percentual do custo das perdas para o vazamento XV-03. O maior impacto de perdas é atribuído ao caudal de vazamento contabilizando um percentual de 46,24%. Na sequência aparecem os custos financeiros ao se utilizar um MIT *standard* em detrimento do MIT de alto rendimento contabiliza 28,42%. Na sequência segue às perdas provocadas por pressão elevada no regime operacional de funcionamento do compressor. Esta perda contabiliza um percentual de 17,85% para o ensaio realizado. O percentual relativo às perdas por temperaturas elevadas na captação do ar é de apenas 7,49% considerado irrisório comparativamente às outras perdas. Como o caudal de vazamento é maior para XV-03 do que para XV-02 o percentual de contribuição nas perdas de energia será consequentemente maior.

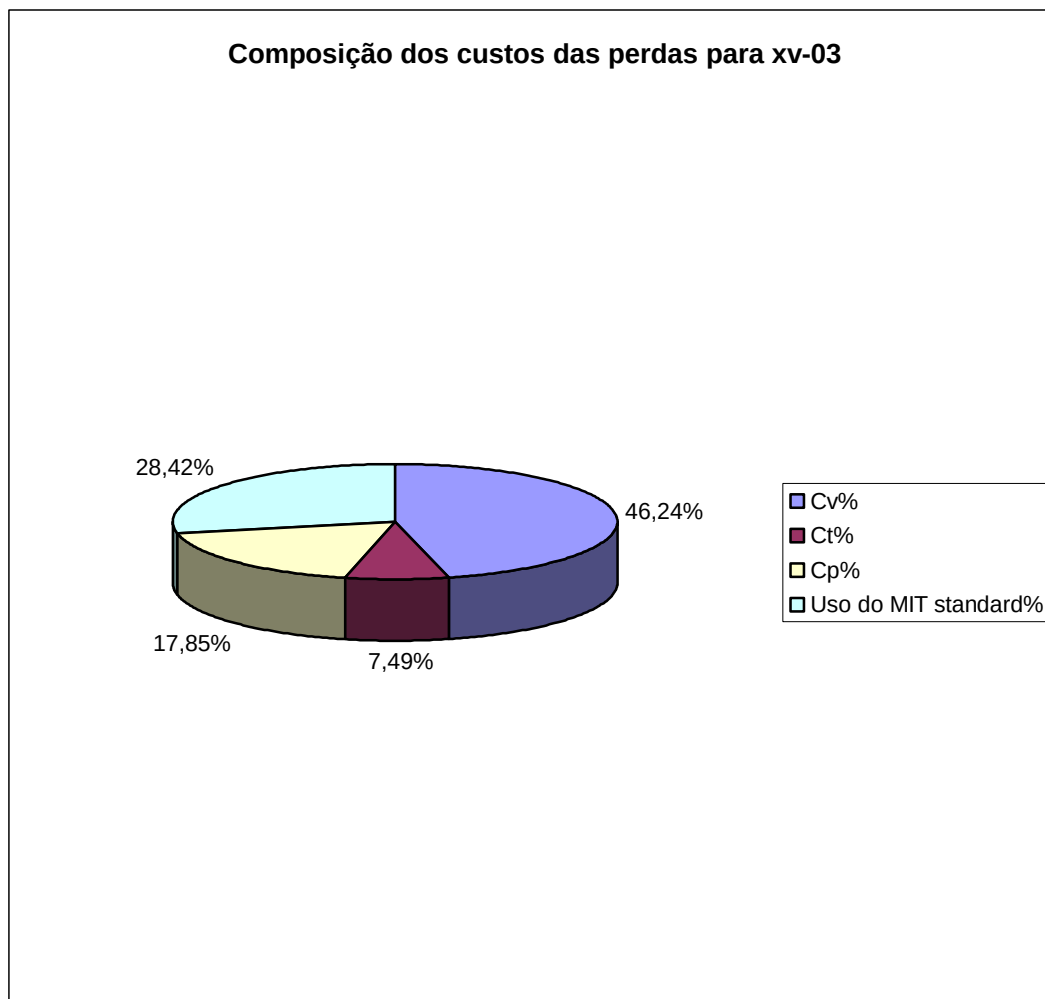


Figura 4.4 – Composição percentual das perdas para XV – 03

A seguinte análise é para o vazamento provocado por XV-04.

Tabela 4.6 – Valores das grandezas referentes ao vazamento XV-04

Valores referentes ao vazamento XV-04	
Vv	$8,99988 \times 10^{-4} m^3 / s$
Vv%	19,189%
Cv	718,45R\$/a

Tabela 4.7 – Tempos parciais do ciclo de carga e alívio para XV-04

Furo	$t_1[s]$	$t_2[s]$	$t_3[s]$	$t_4[s]$	$t_5[s]$
XV-04	8	9	8	9	8
$t_{total}[s]$	209				

A figura 4.5 evidencia os ciclos de carga e alívio referente ao vazamento produzido pelo furo XV-04. É possível visualizar os limites PMS e PMI, o tempo inicial e final do evento, e os cinco ciclos contabilizados durante o ensaio.



Figura 4.5 – Gráfico de carga e alívio referente à XV-04

Pela tabela 4.8 observa-se que o custo total das perdas aumentou de 823,36R\$/a para 1161,02R\$/a, tal aumento é justificado pelo aumento das perdas por vazamento.

Tabela 4.8 – Composição do custo das perdas

Composição do custo das perdas		
Uso MIT standard	234R\$/a	20,15%
Vazamento	718,45R\$/a	61,88%
Temperatura	61,75R\$/a	5,31%
Pressão	146,82R\$/a	12,66%
TOTAL	1161,02R\$/a	100%



Figura 4.6 – Composição percentual das perdas para XV – 04

A figura 4.6 reproduz de forma visual o impacto da composição percentual do custo das perdas para o vazamento XV-04. O maior impacto de perdas é atribuído ao caudal de

vazamento contabilizando um percentual de 61,88%. Na sequência aparecem os custos financeiros ao se utilizar um MIT *standard* em detrimento do MIT de alto rendimento contabiliza 20,15%. Em seguida segue às perdas provocadas por pressão elevada no regime operacional de funcionamento do compressor. Esta perda contabiliza um percentual de 12,66% para o ensaio realizado. O percentual relativo às perdas por temperaturas elevadas na captação do ar é de apenas 5,31% considerado irrisório comparativamente às outras perdas. Como o caudal de vazamento é maior para XV-04 do que para XV-03 o percentual de contribuição nas perdas de energia será consequentemente maior.

A seguinte análise é para o vazamento provocado por XV-05.

Tabela 4.9 – Valores das grandezas referentes ao vazamento XV-05

Valores referentes ao vazamento XV-05	
Vv	$14,80227 \times 10^{-4} m^3 / s$
Vv%	31,5613%
Cv	1181,65R\$/a

Tabela 4.10 – Tempos parciais do ciclo de carga e alívio para XV-05

Furo	$t_1[s]$	$t_2[s]$	$t_3[s]$	$t_4[s]$	$t_5[s]$
XV-05	10	10	10	10	10
$t_{total}[s]$	154				

A figura 4.7 evidencia os ciclos de carga e alívio referente ao vazamento produzido pelo furo XV-05. É possível visualizar os limites PMS e PMI, o tempo inicial e final do evento, e os cinco ciclos contabilizados durante o ensaio.

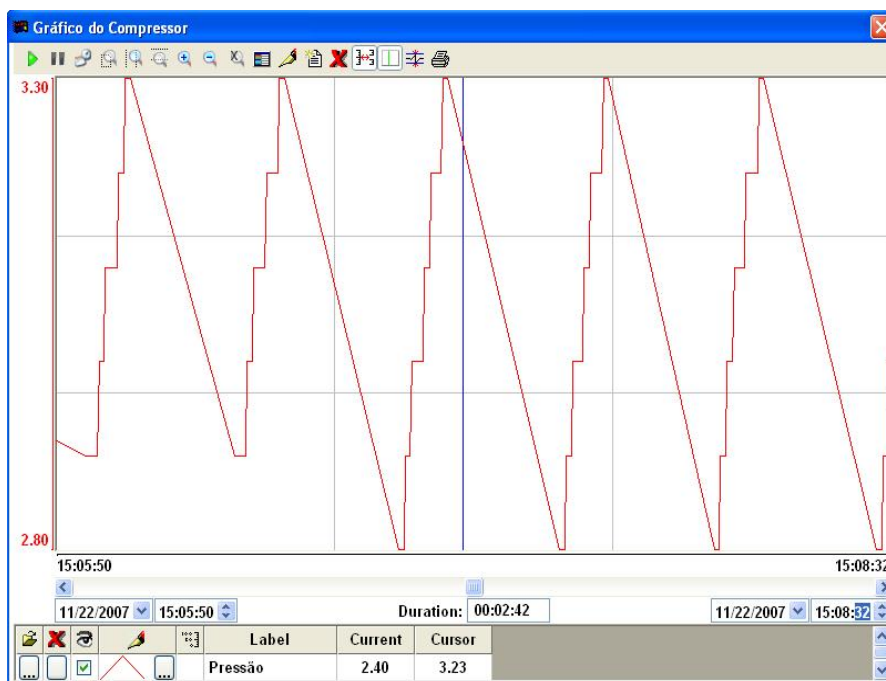


Figura 4.7 – Gráfico de carga e alívio referente à XV-05

Pela tabela 4.11 observa-se que o custo total das perdas aumentou de 1181,65R\$/a para 1624,22R\$/a, tal aumento é justificado pelo aumento das perdas por vazamento.

Tabela 4.11 – Composição do custo das perdas

Composição do custo das perdas		
Uso MIT standard	234R\$/a	14,40%
Vazamento	1181,65R\$/a	72,75%
Temperatura	61,75R\$/a	3,80%
Pressão	146,82R\$/a	9,05%
TOTAL	1624,22R\$/a	100%

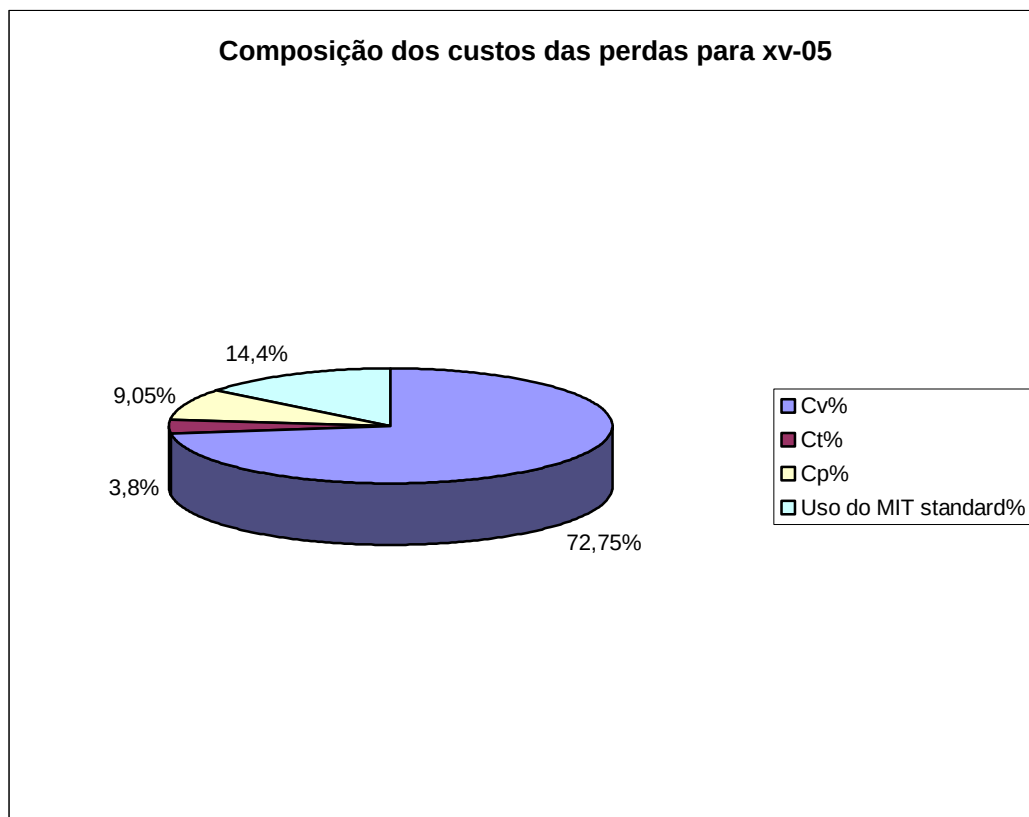


Figura 4.8 – Composição percentual das perdas para XV – 05

A figura 4.8 contempla de forma visual o impacto da composição percentual do custo das perdas para o vazamento XV-05. O maior impacto de perdas é atribuído ao caudal de vazamento contabilizando um percentual de 72,75%. Na sequência aparecem os custos financeiros ao se utilizar um MIT *standard* em detrimento do MIT de alto rendimento contabiliza 14,4%. Na sequência segue às perdas provocadas por pressão elevada no regime operacional de funcionamento do compressor. Esta perda contabiliza um percentual de 9,05% para o ensaio realizado. O percentual relativo às perdas por temperaturas elevadas na captação do ar é de apenas 3,8% considerado irrisório comparativamente às outras perdas.

Como o caudal de vazamento é maior para XV-05 do que para XV-04 o percentual de contribuição nas perdas de energia será consequentemente maior.

A seguinte análise é para o vazamento provocado por XV-06.

Tabela 4.12 – Valores das grandezas referentes ao vazamento XV-06

Valores referentes ao vazamento XV-06	
Vv	$24,29748 \times 10^{-4} m^3 / s$
Vv%	51,806%
Cv	1939,65R\$/a

Tabela 4.13 – Tempos parciais do ciclo de carga e alívio para XV-06

Furo	$t_1[s]$	$t_2[s]$	$t_3[s]$	$t_4[s]$	$t_5[s]$
XV-06	14	14	13	14	13
$t_{total}[s]$	129				

A figura 4.9 evidencia os ciclos de carga e alívio referente ao vazamento produzido pelo furo XV-06. É possível visualizar os limites PMS e PMI, o tempo inicial e final do evento, e os cinco ciclos contabilizados durante o ensaio.

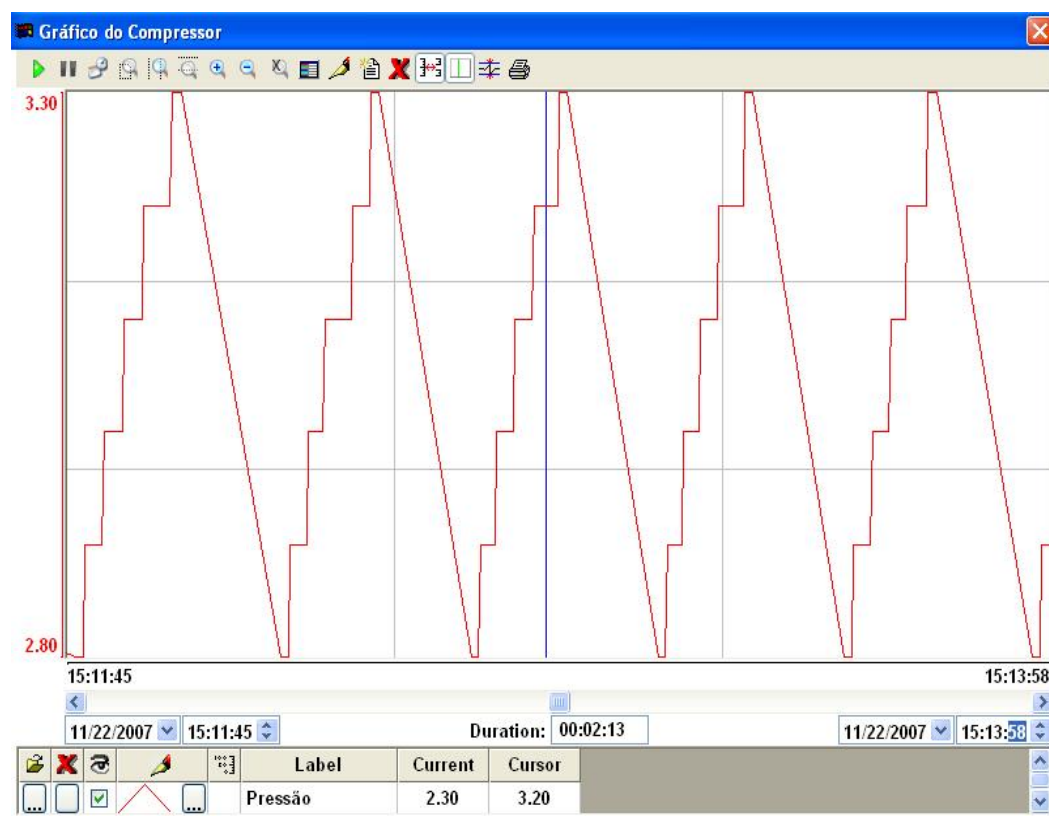


Figura 4.9 – Gráfico de carga e alívio referente à XV-06

Pela tabela 4.14 observa-se que o custo total das perdas aumentou de 1939,65R\$/a para 2382,22R\$/a, tal aumento é justificado pelo aumento das perdas por vazamento.

Tabela 4.14 – Composição do custo das perdas

Composição do custo das perdas		
Uso MIT standard	234R\$/a	9,82%
Vazamento	1939,65R\$/a	81,42%
Temperatura	61,75R\$/a	2,59%
Pressão	146,82R\$/a	6,17%
TOTAL	2382,22R\$/a	100%

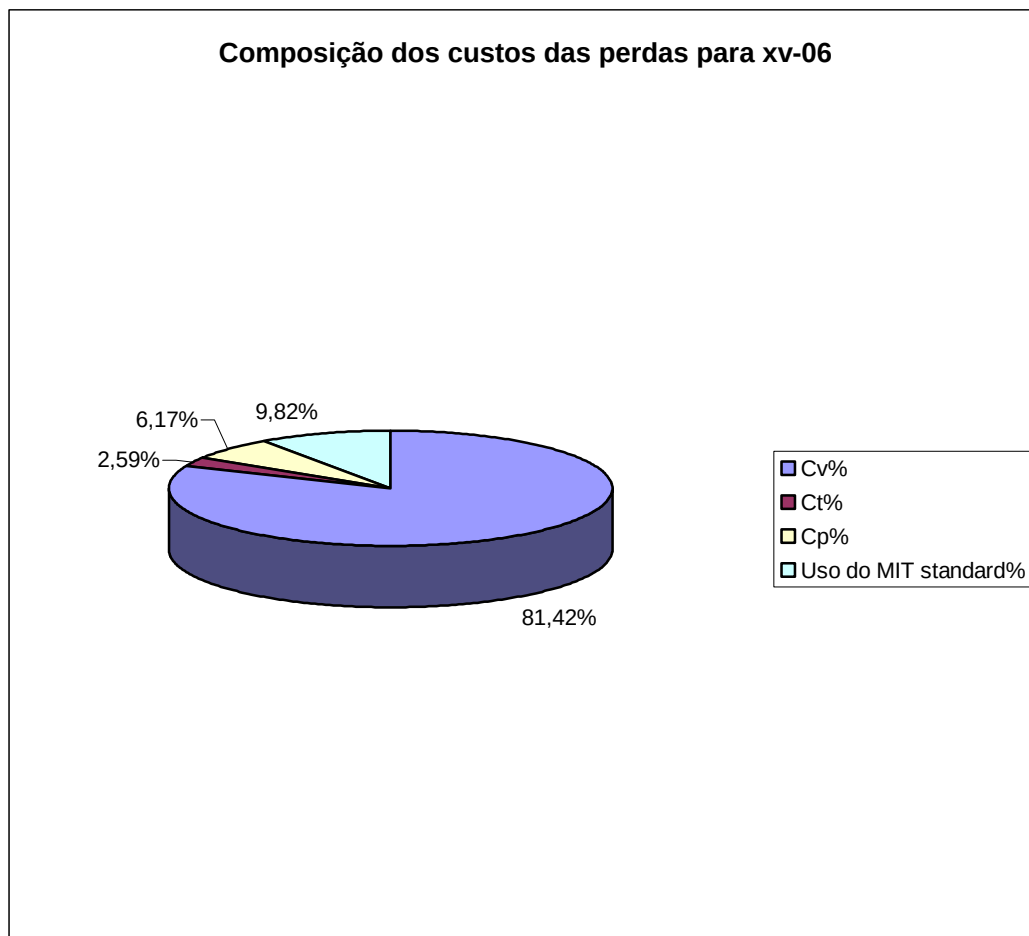


Figura 4.10 – Composição percentual das perdas para XV – 06

A figura 4.10 ilustra de forma visual o impacto da composição percentual do custo das perdas para o vazamento XV-06. O maior impacto de perdas é atribuído ao caudal de vazamento contabilizando um percentual de 81,42%. Na sequência aparecem os custos financeiros ao se utilizar um MIT *standard* em detrimento do MIT de alto rendimento contabiliza 9,82%. Em seguida segue às perdas provocadas por pressão elevada no regime operacional de funcionamento do compressor. Esta perda contabiliza um percentual de 6,17% para o ensaio realizado. O percentual direcionado às perdas por temperaturas elevadas na captação do ar é de apenas 2,59% considerado irrisório comparativamente às

outras perdas. Como o caudal de vazamento é maior para XV-06 do que para XV-06 o percentual de contribuição nas perdas de energia será consequentemente maior.

A quinta e última análise considerada neste trabalho se baseia na avaliação do superdimensionamento por método gráfico, conforme o item 4.2.5. As condições de carregamento dos motores são situações determinantes do seu funcionamento adequado e favorável. Assim, esta avaliação é totalmente pertinente ao tema eficiência energética.

O sobredimensionamento de motores de indução é uma situação freqüente na indústria, devido à utilização sistemática de fatores de segurança muito elevadas no dimensionamento destes motores. As desvantagens desta prática são:

- Maior investimento inicial na aquisição do motor e nos dispositivos de comando e proteção;
- Redução do rendimento do motor, conduzindo a maiores custos de funcionamento do motor;
- Degradação do fator de potência da instalação, com conseqüente aumento dos custos na conta de energia elétrica ou investimentos em equipamentos para compensar o fator de potência;

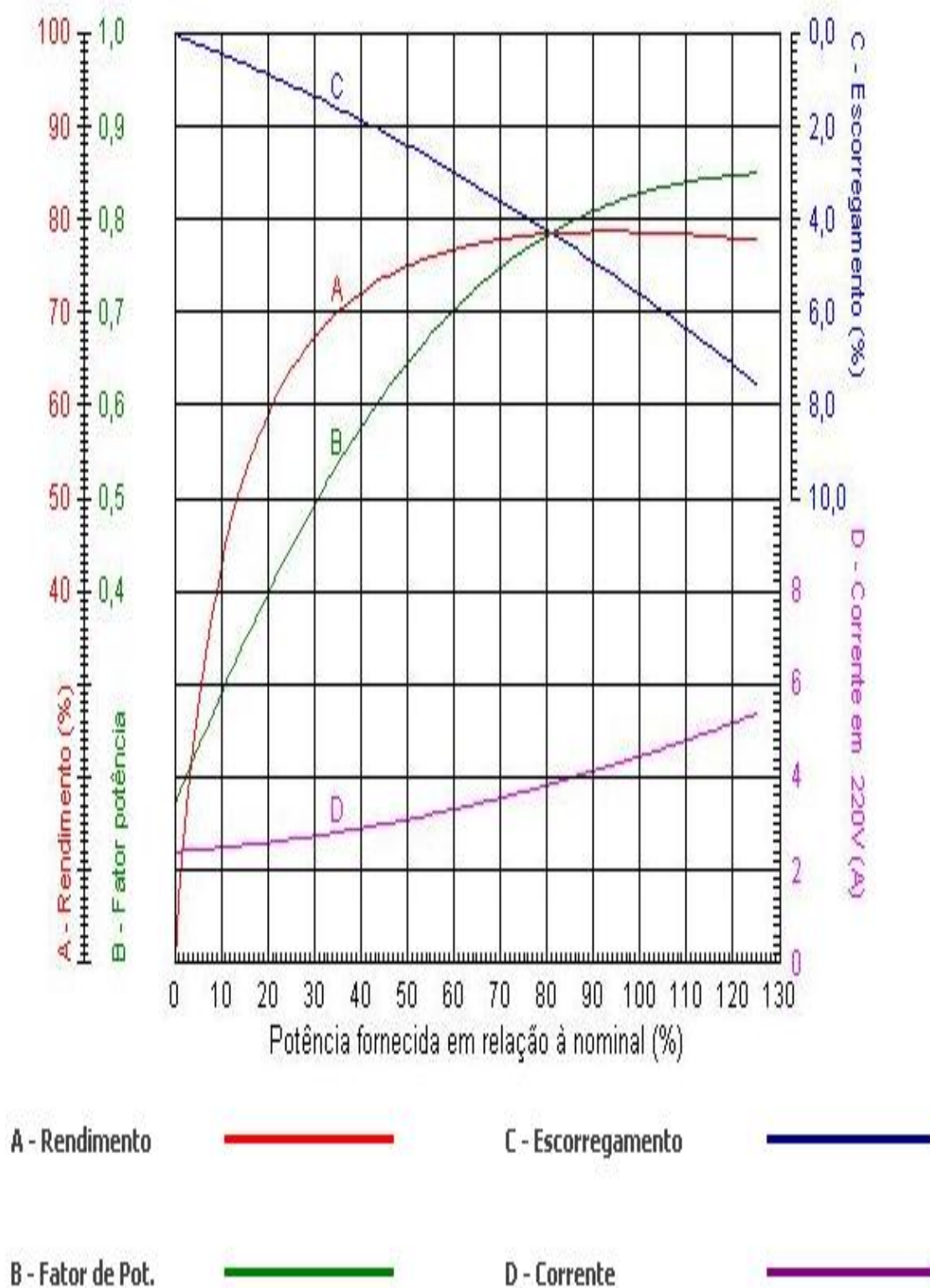


Figura 4.11 – Curvas de desempenho do motor *Standard*

A figura 4.11 representa a curva de desempenho que será utilizada no estudo da verificação do superdimensionamento do motor *Standard* de 1,5 [CV].

Através dos ensaios, verifica-se que o valor de corrente média assume o valor de 4,4 [A]. Esse valor de corrente deve ser marcado no eixo vertical referente à corrente e traça-se uma horizontal até interceptar a curva da corrente. A partir desse ponto, deve-se descer uma vertical até o eixo do carregamento. Todos esses passos são verificados na figura 4.12, podendo-se verificar que o carregamento é de aproximadamente 97%. Como este valor está acima de 75% pode-se concluir que não apresenta indícios de superdimensionamento.

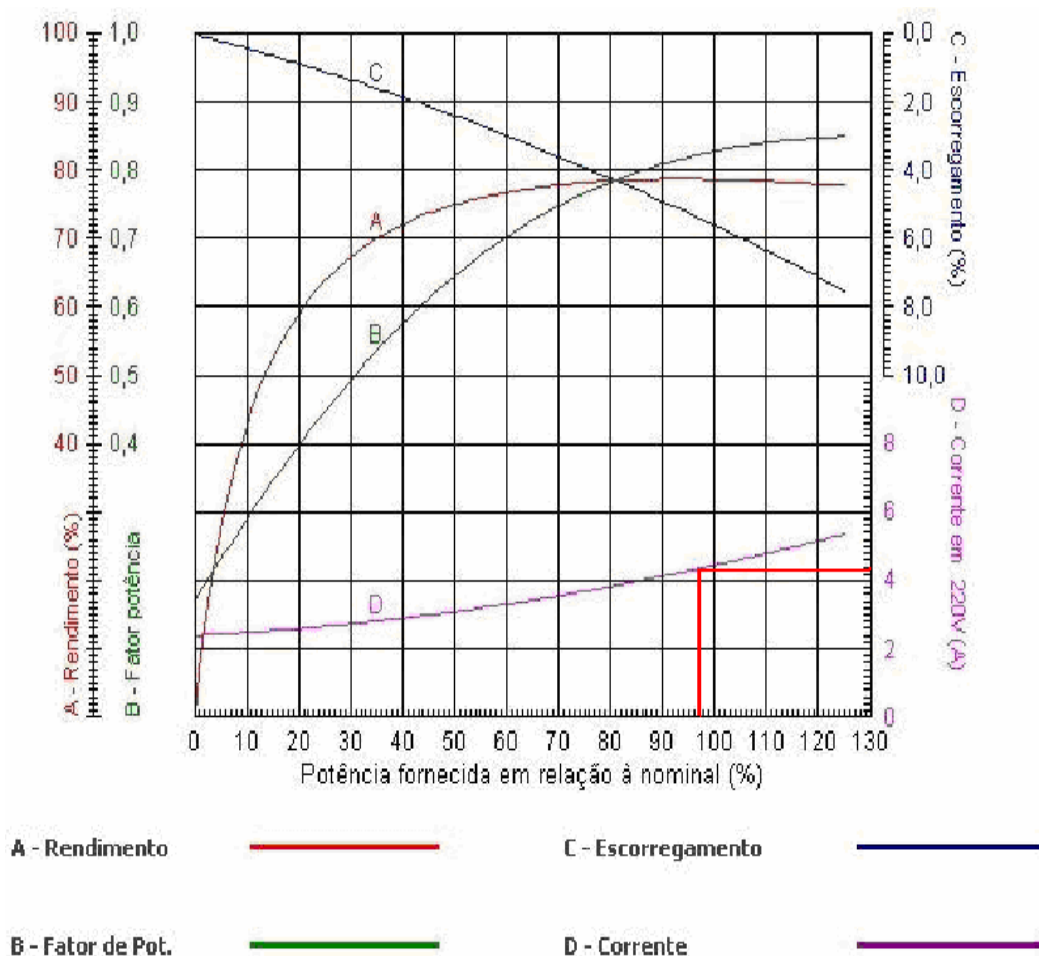


Figura 4.12 – Ponto de carregamento do motor *Standard* de 1,5 [CV]

A partir do ponto 1, eleva-se uma vertical interceptando as curvas de rendimento e fator de potência respectivamente. Todos esses passos são verificados na figura 4.13, podendo-se verificar que o rendimento é de aproximadamente 78% (ponto 2) e o fator de potência de 0,83 (ponto 3). Assim, pode-se concluir que o motor está operando em situação adequada de funcionamento não comprometendo a eficiência energética em relação a este aspecto.

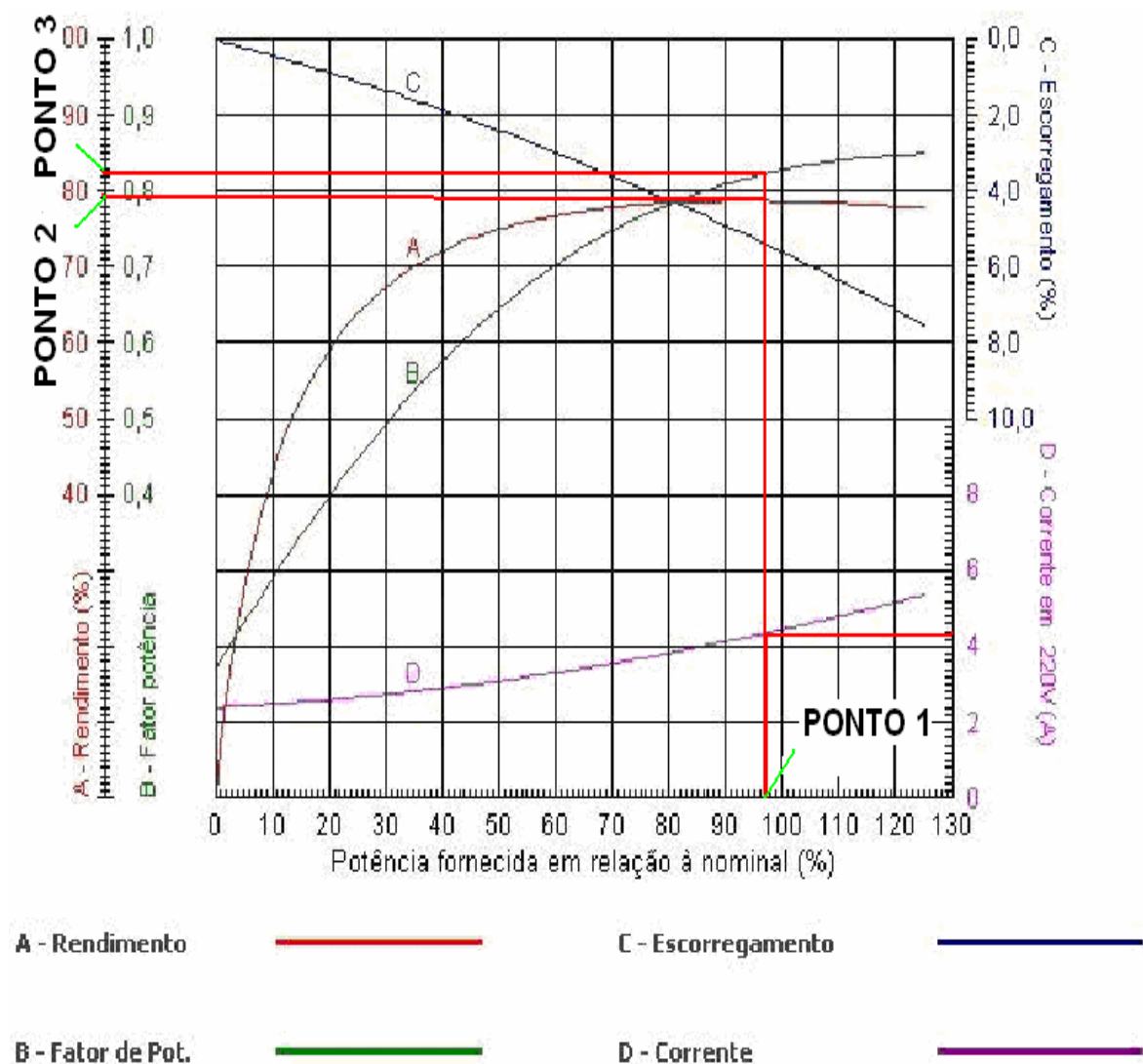


Figura 4.13 – Ponto de carregamento, rendimento e fator de potência do motor

Standard de 1,5 [CV]

Para complementar o estudo, será realizada análise similar para o motor de Alto Rendimento. A figura 4.14 representa a curva de desempenho que será utilizada no estudo da verificação do superdimensionamento do motor de Alto Rendimento de 1,5 [CV].

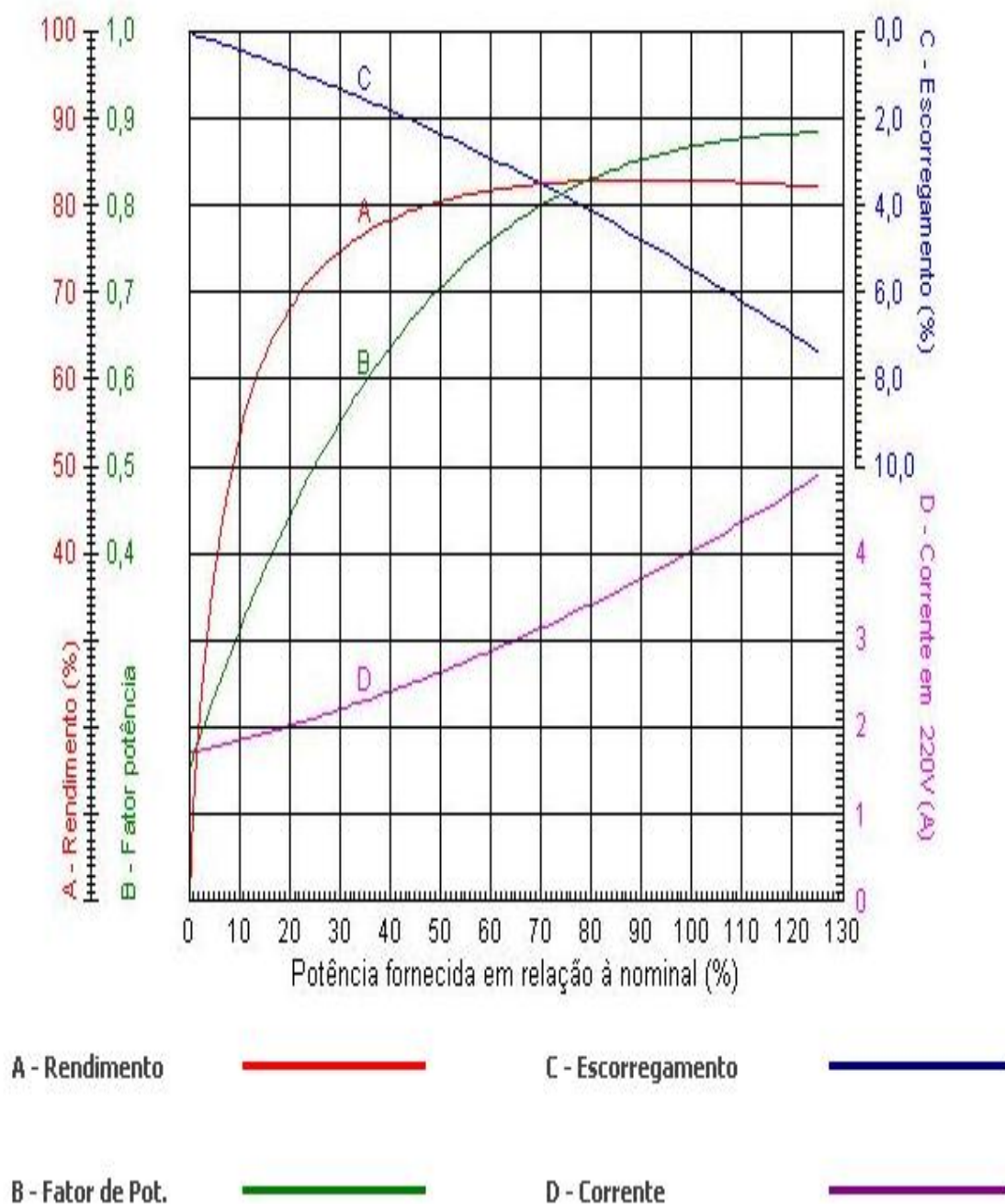


Figura 4.14 – Curva Característica do Motor de Alto Rendimento

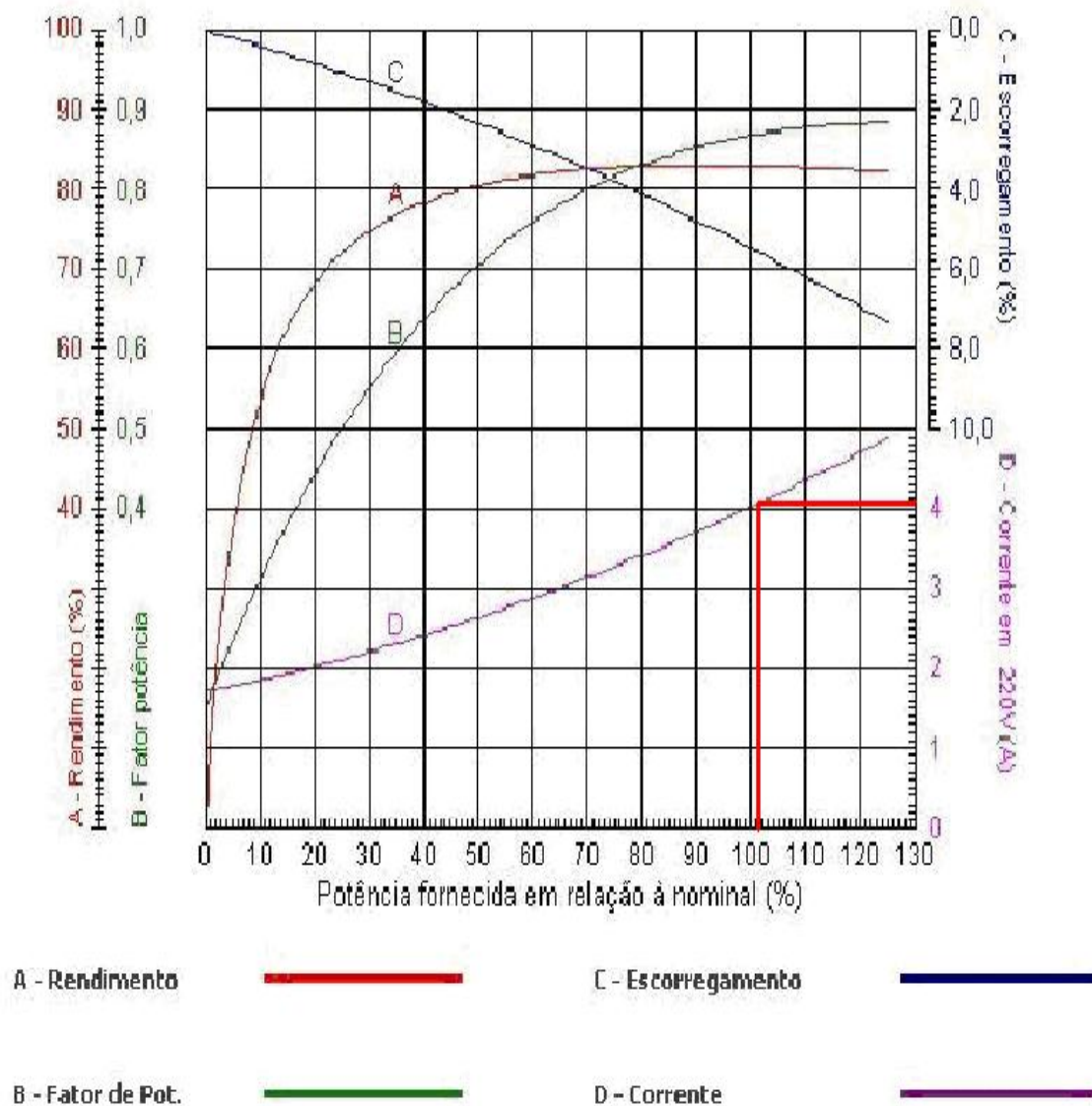


Figura 4.15 – Ponto de carregamento do motor de Alto Rendimento de 1,5 [CV]

Através dos ensaios, verifica-se que o valor de corrente média assume o valor de 4,1 [A]. Da mesma forma, esse valor de corrente deve ser marcado no eixo vertical referente à corrente e traça-se uma horizontal até interceptar a curva da corrente. A partir desse ponto, deve-se descer uma vertical até o eixo do carregamento. Todos esses passos são verificados na figura 4.15, podendo-se verificar que o carregamento é de aproximadamente 100,1%.

Como este valor está acima de 75% pode-se concluir que não apresenta indícios de superdimensionamento.

A partir do ponto 1, eleva-se uma vertical interceptando as curvas de rendimento e fator de potência respectivamente. Todos esses passos são verificados na figura 4.16, podendo-se verificar que o rendimento é de aproximadamente 82% (ponto 2) e o fator de potência de 0,87 (ponto 3). Assim, pode-se concluir que o motor está operando em situação adequada de funcionamento não comprometendo a eficiência energética em relação a este aspecto.

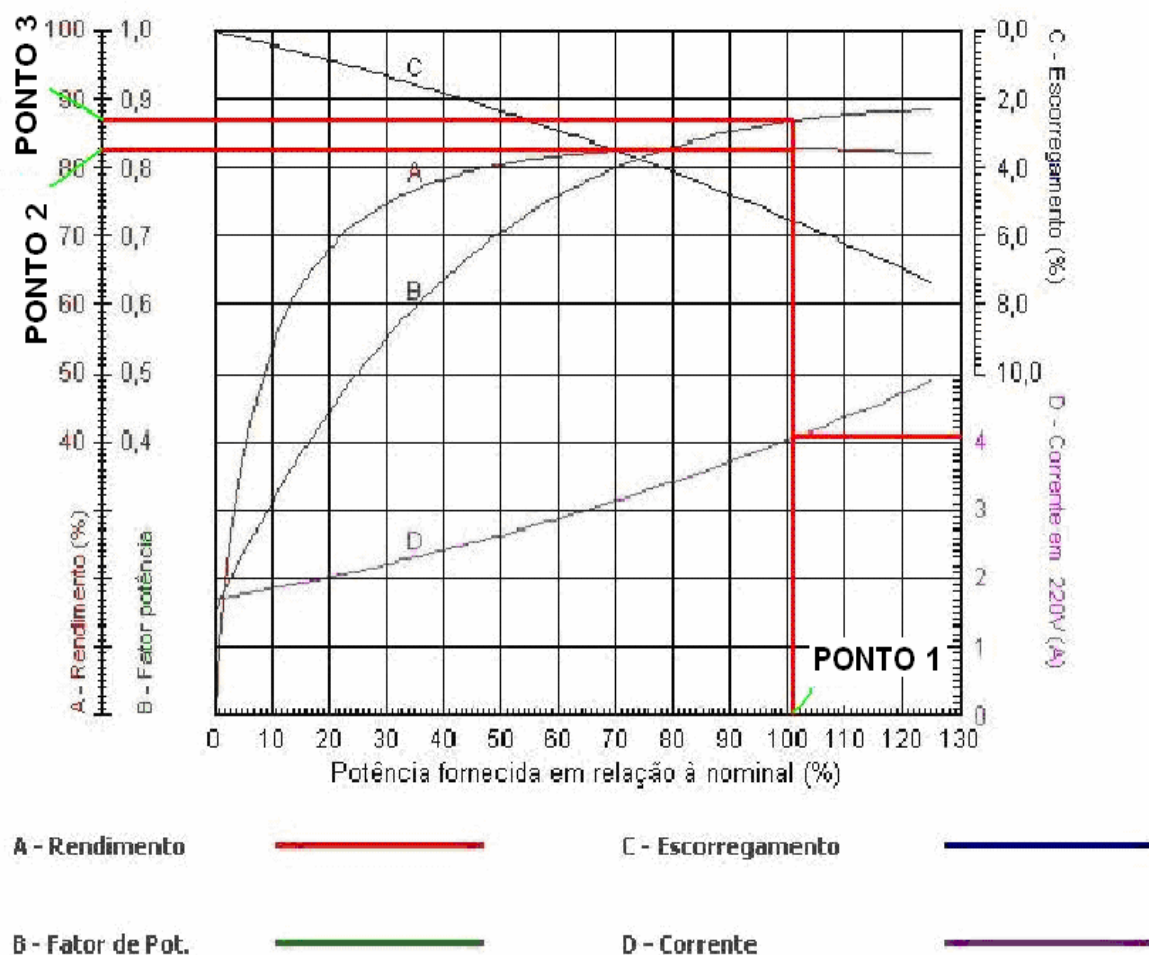


Figura 4.16 – Ponto de carregamento, rendimento e fator de potência do motor de Alto Rendimento de 1,5 [CV]

Observam-se, através dos valores das grandezas de corrente, rendimento e fator de potência do motor de Alto Rendimento suas vantagens em relação ao motor *Standard*.

4.4 – Conclusões parciais

Este capítulo foi centrado nas descrições e características de metodologias de diagnóstico energético para determinação da perda de energia devido a vazamentos na rede de distribuição, e também a perda de eficiência do compressor no que se refere à temperatura de admissão do ar e aos níveis de pressão na operação do compressor. O método utilizado para quantificação dos caudais de vazamento foi o da medição do tempo em carga já consagrado na literatura e normas especializadas. Com relação ao motor que aciona a carga, as análises se restringiram ao consumo e possível substituição do motor *Standard* pelo de Alto Rendimento, e também a verificação de eventual sobredimensionamento.

Através dos ensaios executados e dos dados colhidos se tornou pertinente o estudo de caso e análise financeira com o intuito de evidenciar as fórmulas demonstradas e comprovar numericamente as grandezas relacionadas ao tema Eficiência Energética.

Os resultados obtidos encontram consonância qualitativa e quantitativa com o esperado e através dos comentários tecidos, ficou evidente a importância dos custos relacionados às perdas devido à falta de projeto adequado e manutenção regular. A partir disso, pode-se concluir que a redução do consumo energético não se limita apenas à troca de motores, mas, sobretudo as condições operativas da carga acionada.

CAPÍTULO V

Conclusões

Muito embora a estrutura do trabalho tenha primado por análises e discussões dos principais pontos relacionados com as atividades desenvolvidas em cada capítulo, considera-se relevante, nesta fase final da dissertação, sintetizar os principais aspectos, contribuições e avanços obtidos ao longo da pesquisa.

Neste sentido, focando o conteúdo do Capítulo I, este foi centrado na caracterização do tema escolhido para o presente projeto, ressaltando que, no que tange à literatura disponível sobre a correlação: análise de eficiência energética em sistemas de ar comprimido; o número de publicações nacionais e internacionais é satisfatório apesar de todo o desenvolvimento deste trabalho ter sido executado a partir de normas técnicas de ensaio e do material disponibilizado pela Eletrobrás. De fato, a única referência diretamente aplicada corresponde àquela identificada como [16] sem expressivas mudanças no processo avaliativo.

Desta forma, fica reconhecido que, no âmbito mais completo da metodologia de diagnóstico energético em sistemas de ar comprimido, e ainda, o estabelecimento de um estudo computacional de desempenho do modelo motor-compressor no programa ATP, o

presente trabalho se apresenta como uma contribuição significativa para a melhoria da eficiência energética industrial.

Uma vez compreendida a importância de uma pesquisa na direção apontada, as atividades seguintes focaram a descrição, características e funcionalidades do laboratório de sistemas motrizes dando ênfase a bancada do compressor. A meta foi familiarizar o pesquisador com o sistema a ser analisado.

Utilizando os resultados obtidos tanto na simulação da bancada, através do *software* pré-processador ATPDRAW, como das medições realizadas sobre o protótipo do compressor de ar, verificou-se que é possível melhorar a eficiência do sistema, adotando técnicas desenvolvidas e aplicadas ao longo dos estudos realizados.

É importante ressaltar que o sistema simulado e ensaiado é de pequeno porte, apresentando como consequência resultados pouco expressivos, porém as técnicas apresentadas podem ser utilizados para sistemas maiores, com motores de maior potência e compressores também maiores e com vários estágios obtendo com isto resultados mais significativos quanto a eficiência energética.

Utilizando o ATPDRAW simula-se todo o sistema de acionamento do compressor com carga, considerando a condição do ponto morto superior (PMS), como a condição de carga máxima aplicada ao motor, condição esta que faz com que o compressor entre em alívio automaticamente.

Modelou-se a partida direta e com *soft-start*, que estão presentes na bancada do compressor, verificando correntes de partida e em regime permanente, conjugados, velocidade, potências e rendimento. Comparando-se as formas de onda e os valores a elas pertinentes, foi então possível correlacionar o desempenho do estudo computacional do modelo motor-carga no programa ATP e concluir que o mesmo responde de forma

satisfatória e coerente comprovando sua potencialidade e versatilidade. Os resultados obtidos estão bem próximos dos valores adquiridos dos ensaios através do sistema supervisorio.

No sistema de ar comprimido ensaiado no laboratório de sistemas motrizes da UFU, verificou-se através da utilização do motor da linha standard e de alto rendimento, uma economia de energia, deste último, ao longo do tempo considerado no estudo.

Um outro fator a ser considerado é a manutenção de todo o sistema de distribuição de ar comprimido, a redução de vazamentos é muito importante na verificação global da eficiência, minimizando as perdas.

Verificou-se ser de suma importância a temperatura de captação do ar na entrada do compressor. Temperaturas menores reduzem as perdas que muitas vezes são função da localização imprópria definida para instalação do sistema.

Outra preocupação se refere aos níveis de pressão na operação do compressor. Uma pressão inadequada resulta em maior perda de rendimento. Quanto maior a pressão no sistema, maior será a perda por vazamento.

Hoje já existem sistemas de ar comprimido do tipo centrífugo, que utilizam inversores de frequência para controle da vazão de entrada, apresentado uma alternativa significativa para aumentar a eficiência do sistema economizando energia elétrica.

Analisou-se também se o motor de indução da linha *standard* e alto rendimento estão bem especificados para o acionamento do compressor considerando-se a corrente do ponto morto superior (PMS), como o carregamento máximo aplicado aos motores e verificou-se que estes estão bem dimensionados.

A partir disso, pode-se concluir que a redução do consumo energético não se limita apenas à troca de motores, mas, sobretudo as condições operativas da carga acionada.

Observa-se, analisando os estudos realizados que outros fatores poderão ser incorporados para explorar melhor o assunto sobre o enfoque da eficiência energética como:

- Influência da rede elétrica na operação dos motores da linha standard e alto rendimento. Alterações ou flutuações da amplitude da tensão da rede, a existência de conteúdo harmônico alterando o comportamento senoidal da tensão aplicada aos motores;
- Influência da carga mecânica na operação dos motores. Regime de serviço, acoplamento entre motor e carga e programação da operação.

Como última observação, fica reconhecido que o trabalho aqui apresentado constitui-se em mais uma contribuição ao tema e, certamente, desenvolvimentos futuros deverão complementar e aprimorar o assunto até sua consolidação como ferramenta de análise e gerenciamento da energia elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. F. P. Silva, A. C. Delaiba, D. Bispo, at all – *Especificação para um laboratório de Eficiência Industrial*. II CBEE, Vitória – ES, 2007.
- [2] *Metalurgia & Materiais*, Volume 63, Julho 2007.
- [3] **MÁXIMA EFICIÊNCIA**: *Informativo do Programa Energia Inteligente da CEMIG*. No. 3 – 2005.
- [4] **GELLER, Howard S.** *Revolução energética: políticas para um futuro sustentável*. Trad. Maria Vidal Barbosa. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2003.
- [5] **Catálogos dos motores WEG**. Disponível em: <http://www.weg.com.br/asp/system/empty.asp?P=134&VID=default&SID=120849462674803&s=1&a=closeall&C=23546>. Acessado em Setembro de 2007.
- [6] **Mamede Filho, J.**, *Instalações Elétricas Industriais*, 7º Ed., Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- [7] Telemecanique – TeSys modelo U – Dominando Potência e Controle.
- [8] **Gurkan Zenginobus, Isik Cardici, Muammer Ermis, Cuneyt Barlak**, “*SOFT STARTING OF LARGE INDUCTION MOTORS AT CONSTANT CURRENT WITH MINIMIZED STARTING TORQUE PULSATIONS*”, IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 37, No. 5, September/October 2001.
- [9] **DEL TORO, V.**, *Fundamentos de máquinas elétricas*: Tradução Onofre de Andrade Martins. Rio de Janeiro : Prentice Hall do Brasil: Atlas, 1994.

- [10] Telemecanique – Altistart 48 – O domínio da energia.
- [11] Reference Manual: PowerLogic Series 800 Power Meter PM820, PM850, and PM870.
- [12] SMC – Pressostato digital – Series ZSE30/ISE30.
- [13] General Especification – YOKOGAWA – Differential Pressure Transmitter – Modelo EJA110A.
- [14] SMC – Electro-pneumatic Proportional Valve – Series VEF/VEP.
- [15] SMC – Power Amplifier for Electro-pneumatic Proportional Valve – Series VEA.
- [16] **HAHN, A.**, *Programa de Eficientização Industrial – Módulo Compressores. ELETROBRÁS/PROCEL*, Dezembro 2004.
- [17] Users Guide and Technical Reference Manual – InduSoft Web Studio – Version 6.1 SP2.
- [18] **DOMMEL, H. W. (19894)**, “ *Electro Magnetic Transients Program – RULE BOOK*”, Oregon.
- [19] **IVANDRO ANTÔNIO BACCA**, “*ATP DRAW – INTRODUÇÃO*”, UFMT, 2007.
- [20] ATP – RULE BOOK, Section 14 – TACS, 1987.
- [21] **CEMIG**. Acesso em 03/02/2007, disponível em: <http://www.cemig.com.br>.
- [22] **Junichi Arai, Yasuhiro Nor**, “*AN INDUCTION MACHINE MODEL FOR AN ANALOG POWER SYSTEM SIMULATOR*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 4, November 1993.
- [23] **R. KRISHNAN**, “*ELECTRIC MOTOR DRIVES: MODELING, ANALYSIS, AND CONTROL*”. Prentice Hall, 2001.

- [24] User Guide Manual Schneider Electric.
- [25] **Daniel Álvares Mota, Marcelo Lynce Ribeiro Chaves**, *Modelagem de um dispositivo eletrônico de partida suave para motores de indução trifásicos no programa ATP*. V CEEL, Uberlândia – MG, 2007.
- [26] **L. C. Magalhães**. *Orientações Gerais para Conservação de Energia Elétrica em Prédios Públicos, PROCEL* - 1ª Edição – Abril de 2001.
- [27] **Wulfinghoff, D. R.** *Energy Efficiency manual*. Wheaton: energy Institute Press, 1999.
- [28] **Talbot, E. M.** *Compressed air systems: a guidebook on energy and cost saving*. 2nd Edition Liburn: The Fairmont Press, 1992.
- [29] Atlas-Copco; Brochura: Distribuição de Ar.
- [30] **Hicks, T.G.** *Handbook of mechanical engineering calculations*. New York: McGraw-Hill, 1997.
- [31] **Szyska, E., Americo, M.**, *Programa de Eficientização Industrial – Módulo Metodologia de Realização de Diagnóstico Energético*. ELETROBRÁS/PROCEL, Dezembro 2004.
- [32] **Daniel Álvares Mota, Marcelo Lynce Ribeiro Chaves**, *Utilização da rotina TACS compilada no programa ATP*. V CEEL, Uberlândia – MG, 2007.
- [33] **Cruz da Costa, E.** *Compressores*. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1988.
- [34] **Carlos Gaspar**, *Curso de Utilização Racional da Energia – Eficiência Energética na Indústria*, Gaia – Janeiro de 2004.
- [35] **Almeida Novais, J. M.** *Ar comprimido industrial: Produção, Tratamento e Distribuição*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1995.

[36] **Ong, Chee-Mun**, *Dynamic simulation of electric machinery*, Ed. Prentice Hall. Inc., 1998 – ISBN 0-13-723785-5.

[37] **Greene R. W.** *The chemical engineering guide to compressors*. New York: McGraw-Hill Publications Co.,1984.

[38] **ELETROBRÁS**. Acesso em 02/02/2007, disponível em: <http://www.eletrobras.gov.br>.

[39] **SANTOS, A. H..M. e outros (2001)**. *Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos* Editora da EFEI. 2ª. Ed. Itajubá. MG.

ANEXOS

Apresentação do artigo publicado no II CONGRESSO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA CBEE 2007, Vitória, ES.

Título: ESPECIFICAÇÃO PARA UM LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA INDUSTRIAL

ESPECIFICAÇÃO PARA UM LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA INDUSTRIAL

***Sergio Ferreira de Paula Silva, Antonio Carlos Delaiba, Décio Bispo, Renato Alves Pereira, Ronaldo Guimarães, Alexandre Borges Zappellini**

****Carlos Aparecido Ferreira**

**Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Avenida João Naves de Ávila, 2121 – Campus Santa Mônica – Uberlândia – MG
CEP- 38400-902*

***Eletrobrás*

Abstract: This paper has for objective the specification of an industrial efficiency's laboratory. This specification details components involving four groups of benches, which are: centrifugal pumps, compressors, fans and conveyor's belt. Each one of loads was specified in independent group of benches, with a system of composed drive for automation systems, controlled and integrated measurements. A composed drive for two motors (standard or high-efficiency) and three ways of departure (direct, variable frequency drives and soft start) that connected to the load allow to the visualization of the control forms and equipment operation, on the approach of the industrial efficiency. *Copyright © 2007 CBEE/ABEE*

Keywords: Specification, Laboratory, Industrial Efficiency, Motor Systems, Tree-phase Induction Motors.

Resumo: Este artigo tem por objetivo a especificação de um laboratório de eficiência industrial. Esta especificação detalha os componentes envolvendo quatro bancadas, quais sejam: bombas centrífugas, compressores, ventiladores e correias transportadoras. Cada uma das cargas foi especificada em bancada independente, contendo um sistema de acionamento composto por sistemas de automação, controle e medições integrados. Um acionamento composto por dois motores (standard ou alto-rendimento) e três modos de partida (direta, inversor de frequência e soft start) que acoplados à carga, permitem a visualização das formas de controle e operação de equipamentos, sobre o enfoque da eficiência industrial.

Palavras Chaves: Especificação, Laboratório, Eficiência Industrial, Sistemas Motrizes, Motores de Indução Trifásico.

1 INTRODUÇÃO

Os problemas ocorridos nos anos 90, no setor elétrico brasileiro, demonstraram que a energia elétrica é um insumo valioso e, como tal, deve ser usado de maneira racional. A necessidade de metodologias e estudos que visem à eficiência energética foi demonstrada de forma cabal pela crise de abastecimento que assolou o país no ano de 2001.

O uso eficiente de energia, que pode ser entendida como a utilização da menor quantidade possível de energia para realizar um trabalho sem que se perca qualidade e segurança na realização, tem como campo de atuação os mais diversos ramos de atividade da sociedade. Utilizar a energia com responsabilidade, sem desperdício, constitui um novo parâmetro a ser considerado no exercício da cidadania. (ELETROBRÁS/PROCEL/EFEI, 2001).

Segundo Gerente de Utilização de Energia da Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG ações que objetivem o uso racional e eficiente de energia correspondem a construção de uma usina virtual de energia (Máxima Eficiência, 2005). Embasando tal opinião, Howard Steven Geller relata: a economia de energia elétrica, em 1998, permitiu que as concessionárias brasileiras evitassem implementar aproximadamente 1560 MW de nova capacidade geradora, o que significou cerca de 3,1 bilhões de investimentos evitados. (Geller 2003). Ainda segundo o mesmo autor, ao se comparar os custos com a energia economizada e os custos para a geração da mesma quantidade houve um coeficiente de custo - benefício global de aproximadamente 12:1 (Geller 1998).

O setor industrial, segundo o Balanço Energético Nacional – BEN de 2005, consumiu 203,48 TWh o correspondente a 47,9% de toda a eletricidade consumida no país. No que se refere ao cenário industrial, a CEMIG nos informa, em seu site que: no Brasil, os Motores elétricos de indução são responsáveis por cerca de 50% das cargas elétricas industriais, chegando a 70% em determinadas regiões.

Dentro deste contexto, a Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Minas Gerais, em parceria com ELETROBRÁS/PROCEL, idealizou um laboratório que, de forma prática e inteligente, permite o estudo das principais cargas motrizes utilizadas no setor industrial. Com vasta e reconhecida atuação nos campos qualidade da energia elétrica e máquinas elétricas, essa universidade reconheceu a necessidade de, também, se avançar no campo da utilização da energia elétrica de forma racional. Os detalhes desse laboratório são apresentados na sequência deste trabalho.

2 DESCRIÇÃO GERAL DAS BANCADAS

O Laboratório de Sistemas Motrizes é composto por quatro bancadas, sendo que cada uma corresponde a um diferente tipo de carga comumente utilizado em processos industriais. Assim procedendo, as cargas correspondentes à bombas centrífugas, compressores, ventiladores e correias transportadoras, formam as bancadas mencionadas.

Cada uma das cargas foi instalada em bancada de ensaios independente das demais, formando um sistema de acionamento completo, composto por proteção e medição; sistemas de automação e medição integrados, capazes de controlar automaticamente a execução, 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.

Cada bancada é composta por duas mesas e um painel, sendo que a primeira mesa contém o micro-computador, a segunda os motores e o módulo de carga e o painel condiciona os sistemas de comando,

medição e acionamento. Na sequência são apresentadas as características/funcionalidades mínimas para estas bancadas:

- A primeira bancada possui dimensões apropriadas para a instalação de um micro-computador (CPU, monitor, teclado, *no-break* e mouse) e um multifuncional.
- Na segunda bancada foram instalados os motores (de alto rendimento e convencional), e o módulo de carga. Vale ressaltar, que o módulo de carga permitiu uma variação controlada via sistema supervisor, entre 0 e 120% da carga nominal do motor elétrico.
- No painel de acionamento e comando estão instalados o inversor de frequência, o soft-start, o controlador lógico programável (CLP) e os elementos de acionamento e proteção como contatores e disjuntores. Adicionalmente, esta bancada também é responsável pela medição dos parâmetros elétricos de entrada dos motores.
- A fixação dos motores na mesa possibilita que os mesmos sejam trocados de posição, ou seja, a carga poderá ser acoplada tanto ao motor de alto rendimento quanto ao convencional.
- O sistema de medição dos parâmetros elétricos, de entrada dos motores, é constituído por um multimedidor de grandezas elétricas, contemplando valores de tensão fase-fase e fase-neutro; corrente; potências ativa, reativa, aparente e fator de potência trifásico e monofásico; frequências e energia ativa e reativa. A comunicação deste instrumento com o elemento de controle (CLP) é realizada via ModBus, sendo que todos os parâmetros mencionados são mostrados e monitorados (histórico, curva no tempo, etc.) no supervisor em tela própria. O multimedidor possui, ainda, funções de oscilografia e medição de harmônicos até a 50ª ordem de tensão e corrente, sendo que todos estes valores podem ser visualizados em tempo real ou armazenados.
- O tipo de acionamento dos motores (alto rendimento ou convencional) é executado através do supervisor. Assim sendo, o usuário ao escolher o acionamento desejável (partida direta, partida suave ou inversor), o controlador programável aciona os respectivos contatores, sendo que os demais sistemas ficam desconectados.
- Os transmissores de torque e rotação foram instalados de forma a evitar a locomoção dos mesmos quando da troca dos motores.
- Cada motor (convencional e de alto rendimento) possui sensores de temperatura do tipo PT100, instalados na carcaça e em cada enrolamento do estator, permitindo a monitoração deste parâmetro via supervisor.
- Sinais de tensão e corrente (valor de tensão correspondente) estão disponíveis tanto na entrada

quando na saída dos acionamentos, permitindo sua verificação em osciloscópios.

2.1 Descrição Geral do Sistema de Controle e Acionamento

A figura 1 representa o esquema unifilar simplificado de comando considerando partida direta, soft-starter e inversor de frequência. Contempla também as comunicações em rede via Ethernet (entre PC e o CLP) e Modbus (entre CLP e os dispositivos de partida e medição), juntamente com as entradas analógicas e digitais.

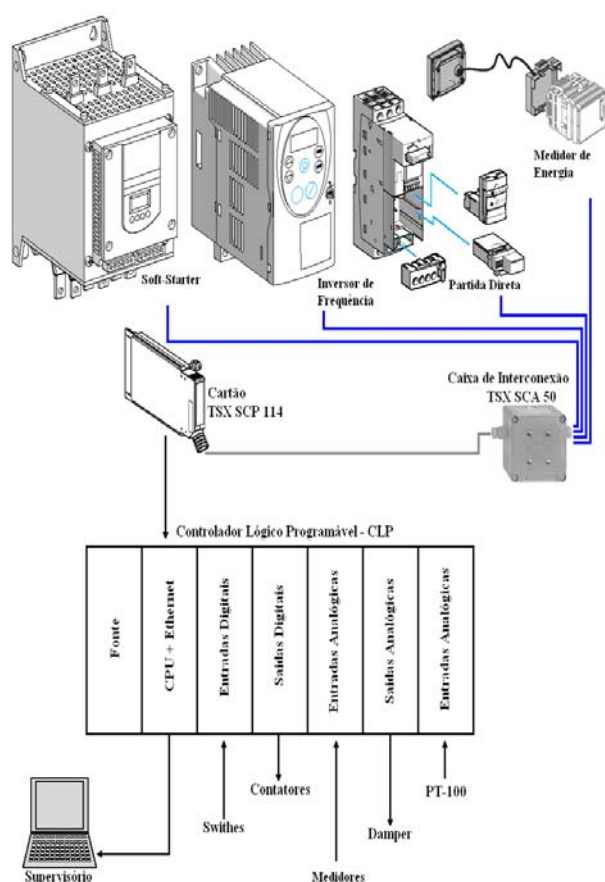


Figura 1 – Esquema unifilar do sistema de comando

- O acionamento via inversor de frequência e partida suave utiliza dois contatores cada (jusante e montante), inter-travados, sendo acionados pelo controlador programável de acordo com a escolha do tipo de acionamento na tela do supervisorio.
- Os controladores programáveis são conectados a um *switch* configurando uma rede de comunicação em padrão Ethernet.

A seguir estão especificados os elementos (equipamentos e serviços) mínimos constituintes para todas as bancadas do Laboratório de Sistemas Motrizes

Medidor de energia multifunção: trifásico; tensão (fase-fase ou fase-neutro); corrente; frequência;

potência ativa, reativa e aparente (por fase e total); fator de potência (por fase e total); THD% de tensão e corrente; demanda; energia ativa; energia reativa indutiva e capacitiva; medição True RMS; exatidão básica 0,5 %; comunicação RS-485 e RS232; protocolo modbus RTU; oscilografia, harmônicos até a 50ª ordem.

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

Dispositivo de partida suave (Soft Start): trifásico; 220 V; para motor de 1,5 cv; comunicação via rede Modbus; cabos de comunicação; entradas e saídas digitais; módulo de economia de energia.

Transmissor de Velocidade: medição de velocidade e ângulo de rotação (360 pulsos por giro) pulso compatível com o controlador programável utilizado. Também pode ser utilizado transmissor analógico com saída 0-10 VDC ou 4 a 20 mA.

Controlador Programável: 16 entradas digitais + 16 saídas digitais + 8 entradas analógicas + 8 saídas analógicas; Placa Ethernet; Placa Modbus; fonte de alimentação; cabos de conexão e programação; software de programação e comunicação (programação em até 3 diferentes linguagens, sendo obrigatório a presença do Ladder). Placa contendo entrada para 4 sensores de temperatura do tipo PT 100. Entrada de pulsos para o sinal de rotação e ângulo. Licença do software de configuração e comunicação. Para a bancada da bomba centrífuga, o CP deverá possuir entradas compatíveis com os sinais disponibilizados pelo transdutor de torque.

Motor elétrico: 1,5 cv; indução, trifásico; 220/380 V; 2 pólos; 60 Hz; IP 21; convencional (*standard*), com sensores do tipo PT 100 instalados nas bobinas do estator e na carcaça.

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.

2.2 Descrição Geral do Sistema Supervisório

O sistema supervisorio do laboratório é o InduSoft Web Studio 6.1. Ele foi configurado para realizar o controle de todo o processo apresentando uma capacidade de monitoramento em tempo real através da rede de dados Modbus Ethernet.

Ao acessar o sistema, será apresentada a tela indicada pela figura 2, na qual o operador define qual o tipo de bancada a ser acionada. Deve-se salientar que, cada bancada é acionada individualmente, no entanto o sistema supervisorio permite um acompanhamento da operação das demais estações de trabalho.

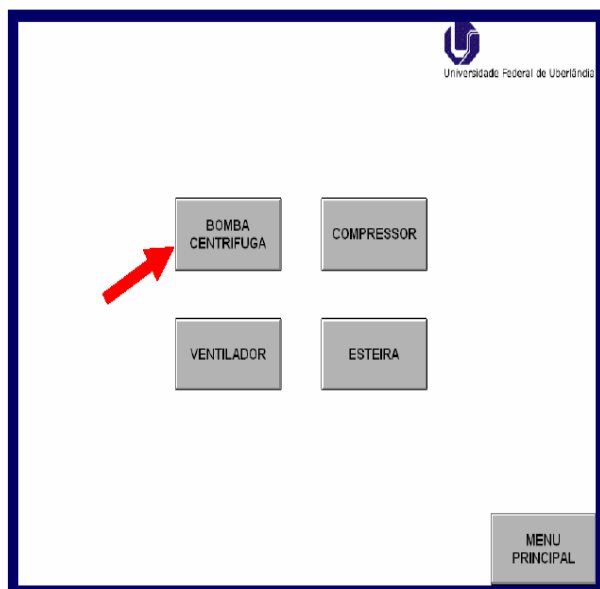


Figura 2 – Tela inicial do sistema supervisório

O supervisório contém uma tela principal para cada bancada, conforme o desenho esquemático representado pela Figura 3. Desta forma, cada elemento constituinte da bancada (multimedidor, acionamento, carga, etc) contém um atalho para abertura das telas de monitoração, ou seja: comando, temperatura, gráficos, medições e banco de dados. Adicionalmente a Figura 3 também fornece informações específicas de cada bancada como, por exemplo, torque, velocidade, pressão, vazão, etc.

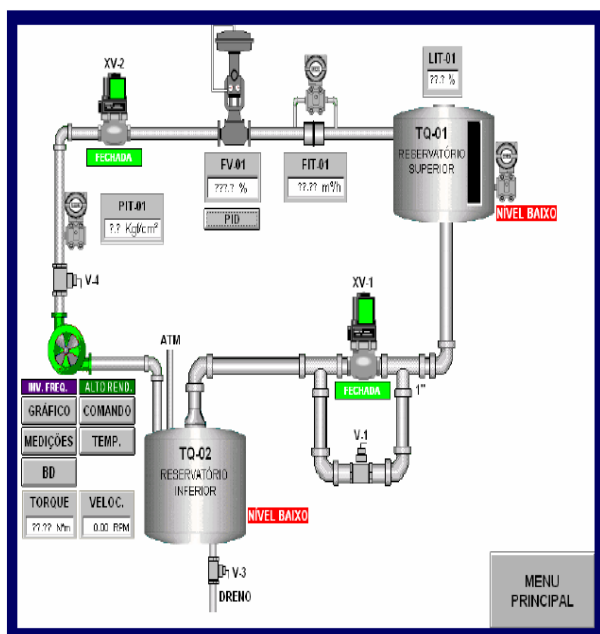


Figura 3 – Bancada da Bomba Centrífuga

Na figura 4 está representada a tela de comandos, nela tem-se acesso aos sistemas de partida direta, suave e por inversor de frequência. Esta tem seus parâmetros determinados pelo supervisório. Desta forma, o tempo de rampa de subida e descida, a velocidade e demais parâmetros referentes às características operacionais

das máquinas deverão ser configurados através de tela específica no supervisório de cada bancada.

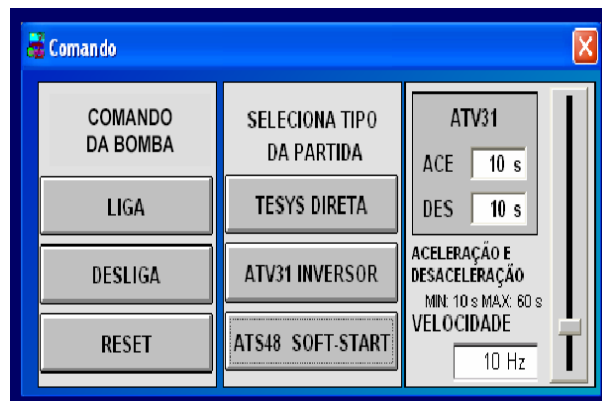


Figura 4 – Tela de Comando

Além das informações apresentadas diretamente na tela (medições), o sistema também oferece dados numéricos via banco de dados. Complementando ainda, é possível a construção de gráficos de parâmetros do sistema em função do tempo.

Licença de Supervisório: para controle de todo o processo, com capacidade de monitoramento em tempo real; através de rede de dados Modbus Ethernet; interface gráfica em tempo real; publicação em tempo real de telas gráficas dinâmicas; publicação em Internet; ambiente orientado a objeto; ferramenta de elaboração de relatórios; suporte a OPC; armazenamento de dados para histórico; editor de telas; 100 pontos

2.3 Especificação das Bancadas

Adicionalmente ao detalhamento presente no tópico anterior, cada bancada possui diferentes cargas, com sensoramento e peculiaridades distintas. Assim sendo, faz-se necessário uma complementação tanto ao nível de equipamentos/instrumentos quanto às funcionalidades inerentes a cada processo analisado. Desta forma, na sequência são apresentadas estas características típicas de cada bancada.

2.3.1 Bomba Centrífuga

Conforme mencionado, o presente item retrata as características/funcionalidades mínimas específicas para esta bancada:

- Além da bomba centrífuga, esta bancada é composta por um dinamômetro e este foi instalado no eixo do motor convencional.
- O acoplamento entre o motor de alto rendimento e a bomba é direto, assim como o acoplamento entre o motor convencional e o dinamômetro.
- O dinamômetro também é controlado pelo supervisório. Desta forma, novamente em tela própria, o usuário pode determinar a carga desejável em valores percentuais da potência nominal do motor (1,5 cv), sendo que esta variação deve ser de 0 a 120%.

- O módulo de carga é composto de dois reservatórios com capacidade de 100 litros cada, de material transparente, sendo que o primeiro foi instado na parte inferior da bancada e o segundo a uma altura de 2 metros. Entre os reservatórios foi instalado um duto de escoamento com uma válvula elétrica de retenção. Na saída da bomba centrífuga estão presentes uma válvula de retenção, uma válvula elétrica proporcional de estrangulamento e os transmissores analógicos de pressão e vazão. No reservatório superior instalou-se um transmissor de nível. Todos os sensores mencionados têm seus indicativos monitorados (histórico, curvas e valores instantâneos) e mostrados no supervisório da bancada.

O diagrama orientativo mostrado pela Figura 5 permite uma melhor visualização das características desejadas. Vale ressaltar que o diagrama abaixo não apresenta todos os instrumentos utilizados.

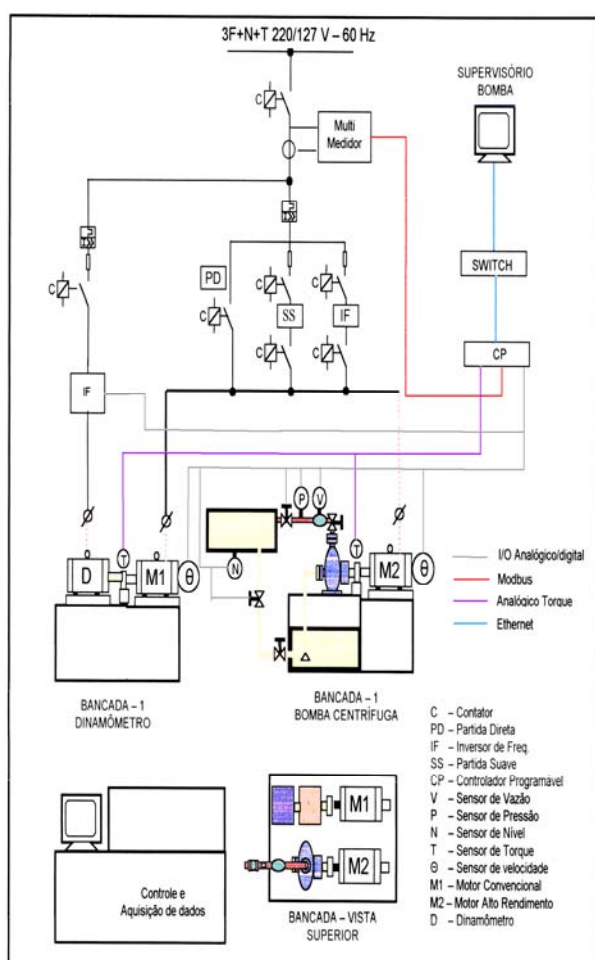


Figura 5 – Diagrama orientativo da bancada da bomba centrífuga

A lista a seguir apresenta os elementos adicionais presentes na bancada da bomba centrífuga.

Dinamômetro: CA 2 cv, 220 V, acionado por inversor regenerativo, com controle da carga via supervisório através de sinais de 0-10 V ou 4-20 mA.

Bomba centrífuga: compatível com motor de 1,5 cv, vazão mínima de 1 m³/h.

Transmissor de torque: 0-10 N.m: saída -10 a 10 V; classe de precisão 0.2; transmissão do sinal sem contato; para medição de torque em máquinas rotativas; medição de velocidade e ângulo de rotação incorporado (360 pulsos por giro) pulso compatível com o controlador programável utilizado; sobrecarga 200%; torque de quebra 280%.

2.3.2 Ventilador

Da mesma forma que para a bomba centrífuga, o presente item retrata a característica/funcionalidade mínima para a bancada do ventilador:

- O módulo de carga é composto por um damper elétrico, permitindo o controle da vazão de ar via supervisório. Um transmissor de vazão de ar instalado no ventilador permite a verificação deste parâmetro e a atuação do damper visando diminuir, aumentar ou mesmo bloquear este fluxo, sendo todas estas ações visualizadas e acionadas via supervisório.

O diagrama orientativo, figura 6, permite uma melhor visualização das características desejadas.

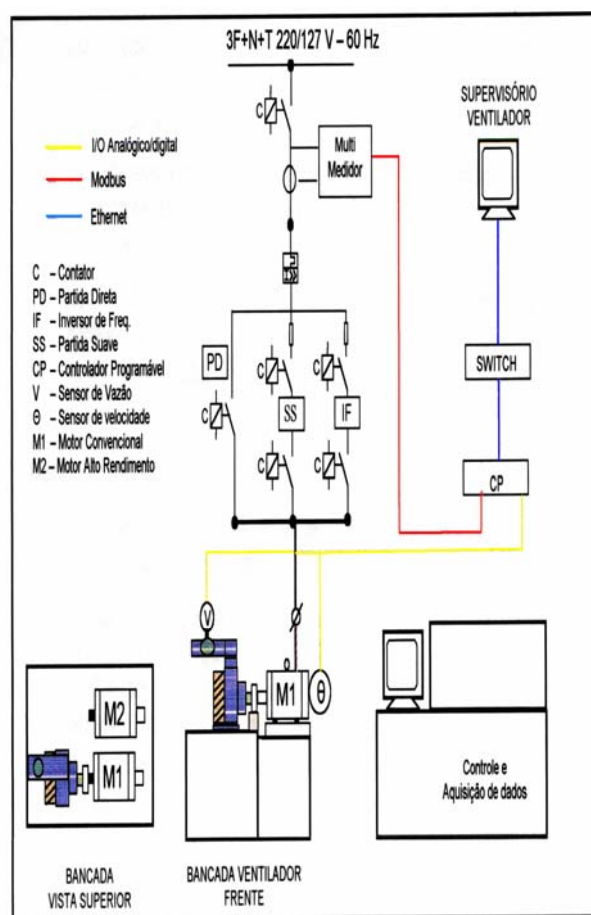


Figura 6 – Diagrama orientativo da bancada do ventilador

A seguir, são apresentados os elementos adicionais presentes na bancada do ventilador:

Ventilador: centrífugo; compatível com motor de 1,5 cv da linha padrão ou da linha alto-rendimento.

Damper elétrico: compatível com o ventilador, variação de 0 a 100%, com indicação da posição atual na tela do supervisório.

Transmissor de Vazão e Velocidade do ar: saída 4 a 20 mA ou 0 a 10 VDC; linear; precisão < 0,5%; 24 V DC; compatível com o ventilador.

2.3.3 Compressor de ar

Da mesma forma, o presente item retrata as características/funcionalidades mínimas específicas para o compressor de ar:

- O módulo de carga é composto por um compressor com um reservatório de ar comprimido, regulado por uma válvula elétrica de saída de ar (alívio de pressão), permitindo o controle da pressão do reservatório via supervisório. Adicionalmente, o tanque também contém uma válvula de segurança especificada de acordo com as condições de suportabilidade do reservatório.
- A tubulação permite a simulação de perda de carga através de furos de diferentes diâmetros (5 furos). A localização destes furos possibilita a medição das perdas.

A figura 7 ilustra o diagrama orientativo da bancada do compressor.

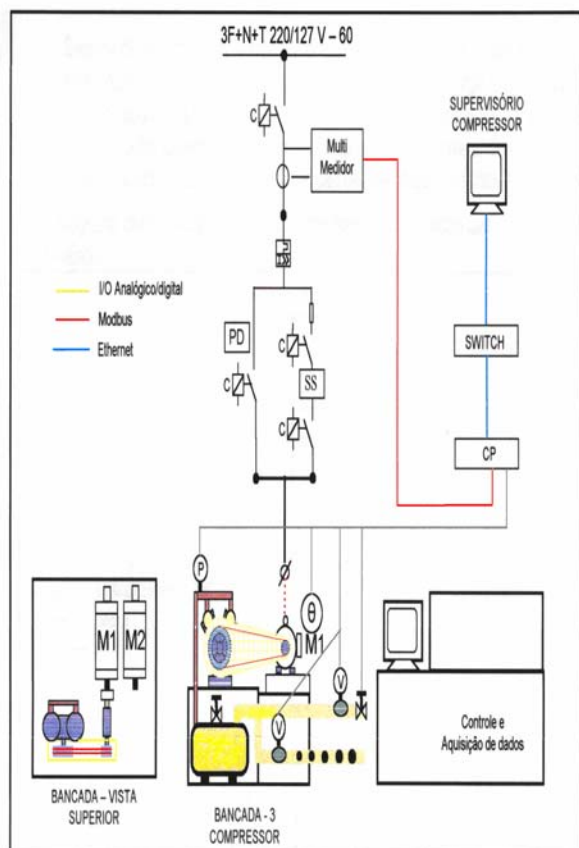


Figura 7 – Diagrama orientativo da bancada do compressor

A configuração mínima da bancada do compressor vem a seguir:

Compressor de ar: a pistão; compatível com motor de 1,5 cv.

Reservatório de ar comprimido: compatível com a pressão máxima do compressor, com pressostato de segurança.

Transmissor de Vazão: saída 4 a 20 mA ou 0 a 10 VDC; linear; precisão < 0,5%; 24 VDC; compatível com as tubulações do compressor.

Transmissor de Pressão: saída 4 a 20 mA ou 0 a 10 VDC; linear; precisão < 0,5%; 24 VDC; compatível com a suportabilidade do reservatório

Válvula elétrica proporcional de saída de ar: 24 V DC; compatível com a suportabilidade do reservatório, com regulação pelo supervisório, 0 a 10 V ou 4 a 20 mA.

Válvula de segurança de saída de ar: compatível com a suportabilidade do reservatório

Vale ressaltar que para a bancada do compressor somente foi utilizado o acionamento direto e o soft start, não sendo utilizado o inversor de frequência.

2.3.4 Correia Transportadora

Finalmente, na sequência são apresentadas as características/funcionalidades mínimas específicas para a bancada da correia transportadora:

O diagrama orientativo ilustrado pela figura 8 permite uma melhor visualização das características desejadas.

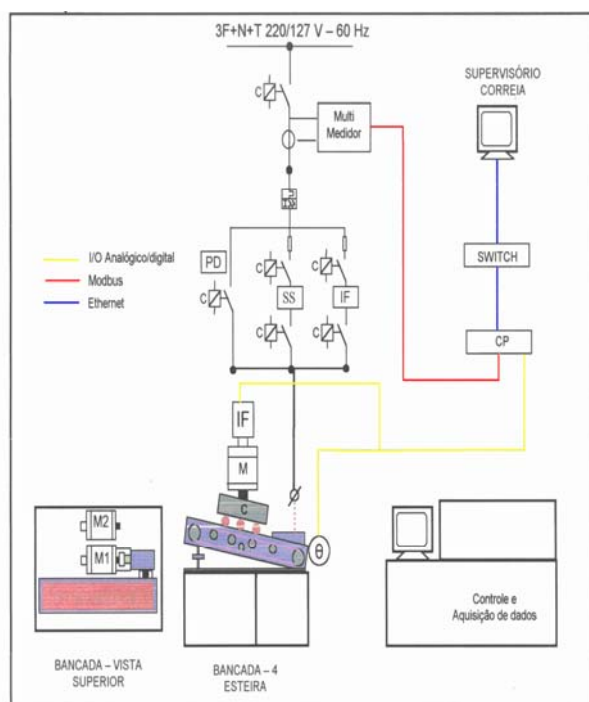


Figura 8 – Diagrama orientativo da bancada da esteira

- O módulo de carga é composto por uma correia transportadora com possibilidade de ajuste de angulação para até 30 graus.
- Sistema de deslocamento linear acionado por um servomotor ou por inversor de frequência e motor, é responsável pela simulação de carga sobre a correia transportadora. Como opção ao sistema de deslocamento linear, pode ser utilizado outro sistema de simulação de carga sobre a correia, desde que este sistema permita a simulação e a repetição de diferentes condições de carga.

A seguir estão os complementos para configuração mínima da bancada da correia transportadora.

Esteira transportadora: comprimento e largura adequados à utilização do sistema de deslocamento linear, inclinação de até 30 graus.

Transmissor de Velocidade da esteira: saída 4 a 20 mA ou 0 a 10 VDC; linear; precisão < 0,5%; 24 V DC; compatível com a velocidade máxima da esteira.

Servomotor: responsável pelo sistema de deslocamento linear. Pode ser substituído por um conjunto inversor/motor. Deve permitir a simulação de carga para até 120% da potência do motor de acionamento da correia, sendo esta simulação controlada pelo supervisório através de entradas analógicas.

Módulo de Carga: responsável pela simulação da carga, exercendo pressão sobre a correia, de acordo com condições de carga da correia estabelecidas via supervisório

Célula de Carga: para medição da pressão exercida sobre a esteira, com saída 4 a 20 mA ou 0-10 VDC com indicação dos valores medidos no sistema supervisório.

3 ENSAIOS E ESTUDOS

As bancadas permitem os seguintes ensaios/estudos:

- Levantamento das curvas características das cargas, ou seja, pressão em função da vazão;
- Levantamento das curvas características dos motores (convencional e alto rendimento), ou seja, conjugado no eixo em função de sua rotação;
- Estudo da eficiência energética dos motores para variações de carga entre 0 a 120%;
- Estudo da eficiência energética dos motores em função da variação da vazão da bomba (estrangulamento da válvula), variação da vazão de ar (abertura do damper) no ventilador e variação da pressão do reservatório, no compressor, assim como da variação de carga na correia transportadora;
- Estudo de eficiência energética dos motores em função da utilização de inversores de frequência, através da variação de velocidade do conjunto motor-carga;

- Comparação entre as grandezas elétricas e mecânicas considerando as partidas direta, suave (soft start) e inversor de frequência;

- Levantamento das características elétricas e mecânicas monitoradas em função do tempo de funcionamento do conjunto motor-carga;

- No caso de utilização de acoplamento por polia, deverá permitir a análise da eficiência energética considerando diferentes ajustes no acoplamento entre o motor e a carga (ajustes, rendimento e tipo da polia);

3.1 Exemplo de aplicação

Como exemplo de aplicação, foram feitos ensaios na bancada da bomba centrífuga para cinco valores diferentes de vazão. Para obtenção destas vazões usou-se apenas o método de estrangulamento de válvula e posteriormente foram coletados os valores indicados nas tabelas 1 e 2. O objetivo foi avaliar o consumo de energia apenas pela comparação entre o uso do motor da linha padrão e da linha alto-rendimento.

Tabela 1 - motor linha padrão (bomba)

Q (m ³ /h)	H (kgf/cm ²)	N (rpm)	I (A)	V (V)	P (W)
1	2.9	3500	4.3	220.7	1011
1.5	2.8	3480	4.4	219.7	1059
2	2.6	3410	4.6	219.9	1136
2.5	2.5	3470	4.9	219.3	1154
3	2.3	3500	5.3	220.3	1248

Tabela 2 - motor alto-rendimento (bomba)

Q (m ³ /h)	H (kgf/cm ²)	N (rpm)	I (A)	V (V)	P (W)
1	2.9	3416	3.7	221.23	856
1.5	2.9	3460	3.9	221.2	900
2	2.8	3417	4	221.23	946
2.5	2.8	3460	4.2	221.1	983
3	2.7	3450	4.4	221.2	1028

Na tabela 3 foi feita a comparação entre um sistema de bombeamento utilizando ambos os motores. Para um ano de utilização o estudo aponta para uma economia média de 15%.

Tabela 3 - economia de energia

	Vazão (m ³ /h)	horas/ ano	Potência (W)	Energia (kWh)	Econ. (%)
AR	1	8640	856	7395,84	15,33
LP	1	8640	1011	8735,04	
AR	1.5	8640	900	7776	15,01
LP	1.5	8640	1059	9149,76	
AR	2	8640	946	8173,44	16,73
LP	2	8640	1136	9815,04	
AR	2.5	8640	983	8493,12	14,82
LP	2.5	8640	1154	9970,56	
AR	3	8640	1028	8881,92	17,63
LP	3	8640	1248	10782,72	

4 CONCLUSÃO

Este artigo apresentou a especificação e as metas a serem alcançadas com a implantação do laboratório de eficiência industrial. A aquisição deste laboratório foi possível pela efetivação de um convênio entre a ELETROBRÁS/PROCEL/UFU, visando à cooperação técnica-financeira.

O Laboratório está apto a simular diversas condições operativas de cargas como bombas centrífugas, compressores, ventiladores e correias transportadoras demonstrando os fenômenos eletromecânicos pertinentes a estes sistemas.

Como diferencial, este laboratório traz a possibilidade de se fazer um estudo integrado de sistemas elétrico, mecânico, térmico e hidráulico. Uma vez que, a construção da bancada, se baseia na associação dos vários sistemas, torna-se impossível estudar a eficiência industrial por um sistema isolado.

Assim, tem sua relevância e inovação principalmente para o setor industrial, tornando-o competitivo a partir da redução do consumo e uso eficiente da energia elétrica.

5 AGRADECIMENTOS

A realização deste projeto foi possível pelo suporte financeiro proporcionado pela ELETROBRÁS/PROCEL.

6 REFERÊNCIAS

ELETROBRÁS. Acesso em 02/02/2007, disponível em: <http://www.eletrabras.gov.br>

GELLER, Howard S. *Revolução energética: políticas para um futuro sustentável*. Trad. Maria Vidal Barbosa. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2003.

GOLDEMBERG, José. VILLANUEVA, Luz Dondero. *Energia, meio ambiente e desenvolvimento*. Trad. André Koch. 2ª. ed. São Paulo: EDUSP, 2003.

PROCEL. *Orientações Gerais Para Conservação de Energia em Prédios Públicos*. Brasília, 2001.

CEMIG. Acesso em 03/02/2007, disponível em: <http://www.cemig.com.br>

SANTOS, A. H..M. e outros (2001). *Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos* Editora da EFEI. 2ª. Ed. Itajubá. MG

MÁXIMA EFICIÊNCIA: *Informativo do Programa Energia Inteligente da CEMIG*. No. 3 – 2005