

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



UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
EM SISTEMAS INDUSTRIAIS DE VENTILAÇÃO

Kleber David Belinovski

Uberlândia-MG
2011

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

UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
EM SISTEMAS INDUSTRIAIS DE VENTILAÇÃO

Dissertação a ser apresentada por Kleber David Belinovski à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Décio Bispo, Dr. – UFU (Orientador)

Prof. Antônio Carlos Delaiba, Dr. – UFU

Prof. Sérgio Ferreira de Paula Silva, Dr. – UFU

Prof. Danilo Pereira Pinto, Dr. – UFJF

**UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
EM SISTEMAS INDUSTRIAIS DE VENTILAÇÃO**

Kleber David Belinovski

Dissertação a ser apresentada por Kleber David Belinovski à
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. Décio Bispo, Dr.
Orientador

Prof. Alexandre Cardoso, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus que me deu a vida e a saúde. Dedico também à minha família, e em especial aos meus pais, que sempre me incentivaram e me ensinaram a sonhar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, saúde, cuidado e capacidade que permitiram a realização deste trabalho.

Agradeço aos meus pais Maria José e Joel pelos exemplos de vida, luta e honestidade que pautaram toda minha vida, e pelo incentivo incondicional ao estudo.

Ao meu orientador que não mediu esforços, Prof. Décio Bispo, minha gratidão pela confiança depositada, pela paciência, e por acreditar na conclusão deste trabalho mesmo em meio às dificuldades. Agradeço ainda pelos conhecimentos e pela formação técnica e humana que me acompanharão durante toda a vida.

Ao colega de graduação e pós-graduação Victor de Paula e Silva, agradeço pelo importante apoio e pela amizade prestados durante as jornadas de estudo. Ao Prof. Sérgio Ferreira de Paula Silva, agradeço pelo apoio e pela contribuição nas discussões dos temas envolvidos neste trabalho. Aos funcionários da Faculdade de Engenharia Elétrica, pela atenção e presteza nos assuntos relacionados ao curso.

À minha namorada Adriana pelo apoio, paciência, e incentivo na realização deste trabalho.

À Eletrobras e à Fapemig pelo apoio e pela credibilidade depositada na Faculdade de Engenharia Elétrica. Agradeço ainda a cada cidadão brasileiro, que mantém a Universidade Federal de Uberlândia.

“Quem não se importa com os centavos não é digno de possuir um euro.”

Provérbio alemão, em alusão ao princípio da eficiência energética.

RESUMO

O objetivo deste documento é apresentar um método de análise e verificação da eficiência energética e qualidade da energia elétrica em sistemas industriais de ventilação. Primeiramente são apresentados a motivação, as metodologias e procedimentos utilizados, além de uma descrição da bancada de ensaio. As análises estão dirigidas especificamente ao ventilador centrífugo instalado na Faculdade de Engenharia Elétrica – UFU. As análises consistem na substituição de equipamentos ineficientes e obsoletos por outros modernos e eficientes, principalmente motores da linha padrão por motores de alto rendimento, e a modernização do controle da vazão de ar através da introdução de inversor de frequência. O estudo de eficiência energética analisa o consumo do sistema para essas situações. O estudo da qualidade da energia elétrica verifica os distúrbios causados pelo sistema de ventilação quando acionado pelo inversor de frequência. Além disso, analisa seu comportamento quando é submetido à alimentação não ideal, e a influência desse evento no rendimento total do sistema. Finalmente, serão apresentados métodos para análise econômica de investimentos e um estudo de caso.

Palavras – Chave: Eficiência energética, sistemas motrizes, ventiladores.

ABSTRACT

The objective of this document is to provide a method of analysis and verification of energy efficiency and power quality in industrial ventilation systems. Firstly, the motivation, procedures, methodologies used and a description of the work bench are presented. Analyses are directed specifically to the centrifugal fan installed in the Faculty of Electrical Engineering - UFU. The analysis consists of the substitution of inefficient and obsolete equipment by other modern and efficient, especially standard motors for motors of high efficiency and modernizing the control of air flow with the introduction of frequency inverter. The energy efficiency study examines the consumption of the system for these situations. The power quality study checks disturbances caused by the ventilation system when it is driven by frequency inverter. It also examines its behavior when subjected to non-ideal source and the influence of this event in total system efficiency. Finally, methods for economic analysis of investments will be presented, and a case study.

Keywords: Energy efficiency, motor systems, fans.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

1.	Considerações iniciais	1
1.1.	Introdução geral	1
1.2.	Balanço energético.....	2
1.2.1.	Oferta interna de energia	3
1.2.2.	Oferta interna de energia elétrica.....	3
1.2.3.	Consumo final energético por fonte	4
1.2.4.	Consumo final energético por setor.....	5
1.3.	Usos finais da energia elétrica	6
1.4.	Estrutura do trabalho.....	8

CAPÍTULO II

2.	Descrição da bancada de ensaios.....	10
2.1.	Introdução	10
2.2.	Componentes da bancada do ventilador	10
2.2.1.	Diagrama esquemático	11
2.2.2.	Ventilador	13
2.2.3.	Motores.....	16
2.2.4.	Partida direta.....	24
2.2.5.	Partida suave.....	25

2.2.6. Inversor de frequência	28
2.3. Componentes do sistema supervisório.....	30
2.3.1. Descrição do sistema supervisório	30
2.3.2. Medidor de energia.....	36
2.3.3. Sensores e atuadores.....	37
2.4. Conclusões parciais.....	38

CAPÍTULO III

3. Análise de sistemas de ventilação	39
3.1. Introdução	39
3.2. Princípios de funcionamento	39
3.3. Critérios de classificação	41
3.4. Características dos ventiladores.....	42
3.4.1. Vazão.....	42
3.4.2. Pressão.....	43
3.4.3. Potência hidráulica	47
3.4.4. Rendimento total do sistema.....	47
3.5. Rotação específica	48
3.6. Curvas características	48
3.6.1. Curvas características dos ventiladores	48
3.6.2. Curva característica da instalação.....	51

3.7.	Fatores que modificam as curvas características	51
3.7.1.	Fatores que modificam a curva do ventilador	51
3.7.2.	Fatores que modificam a curva da instalação	54
3.7.3.	Controle de vazão por inversor de frequência	55
3.8.	Conclusões parciais.....	57

CAPÍTULO IV

4.	Análise de eficiência energética	58
4.1.	Introdução	58
4.2.	Comparação de consumo entre o motor da linha padrão e o motor de alto rendimento	58
4.3.	Comparação de consumo entre o controle de vazão através de <i>damper</i> e inversor de frequência	60
4.4.	Análise dos resultados	62
4.5.	Conclusões parciais.....	64

CAPÍTULO V

5.	Análise de qualidade da energia elétrica	65
5.1.	Introdução	65
5.2.	Variações de Tensão de Longa Duração – VTLD's	66
5.3.	Comportamento do sistema de ventilação submetido à alimentação com presença de VTLD's.....	67
5.4.	Conclusões parciais.....	76

CAPÍTULO VI

6. Simulações computacionais.....	77
6.1. Introdução	77
6.2. Considerações sobre as simulações	77
6.3. Simulações realizadas	83
6.3.1. Partida direta.....	83
6.3.2. Partida suave.....	85
6.3.3. Inversor de frequência	88
6.4. Conclusões parciais.....	91

CAPÍTULO VII

7. Análise da viabilidade financeira	92
7.1. Introdução	92
7.2. Critérios para análise e classificação de projetos.....	92
7.2.1. Projeção de resultados	92
7.2.2. Indicadores da viabilidade financeira	95
7.2.3. Árvores de decisão.....	104
7.3. Estudo de caso	105
7.3.1. Apresentação da metodologia e do sistema do estudo de caso.....	106
7.3.2. Substituição do motor da linha padrão por alto rendimento.....	107

7.3.3.	Substituição do <i>damper</i> por inversor de frequência	111
7.3.4.	Aplicação do motor de alto rendimento e do inversor de frequência.....	114
7.3.5.	Discussão dos resultados	118
7.4.	Conclusões parciais.....	121

CAPÍTULO VIII

8.	Considerações finais	122
----	----------------------------	-----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Oferta interna de energia no Brasil	3
Figura 1.2 – Oferta interna de energia elétrica no Brasil.....	4
Figura 1.3 – Consumo final energético por fonte	5
Figura 1.4 – Consumo final energético por setor	5
Figura 1.5 – Distribuição do consumo por uso final na indústria.....	6
Figura 1.6 – Percentual de indústrias que dispõem de sistemas motrizes	6
Figura 1.7 – Distribuição da força motriz por uso final	7
Figura 1.8 – Forma de controle em sistemas de ventilação.....	7
Figura 1.9 – Participação da energia elétrica no custo total	8
Figura 2.1 – Bancada do ventilador.....	11
Figura 2.2 – Diagrama da bancada do ventilador.....	12
Figura 2.3 – Esquema de controle	13
Figura 2.4 – Ventilador utilizado nos ensaios – visão frontal e da entrada de ar.....	14
Figura 2.5 – Dimensões do ventilador.....	15
Figura 2.6 – Curvas de desempenho do ventilador	15
Figura 2.7 – O motor de alto rendimento	18
Figura 2.8 – Comparativo de rendimentos	19
Figura 2.9 – Economia de energia anual	20
Figura 2.10 – Curvas características do motor da linha padrão.....	23
Figura 2.11 – Curvas características do motor de alto rendimento.	23
Figura 2.12 – Corrente e conjugado de partida durante a partida direta	24
Figura 2.13 – Módulo TeSys U	24
Figura 2.14 – Diagrama de funcionamento do <i>soft-starter</i>	25
Figura 2.15 – Saída de tensão do SCR individual.....	26
Figura 2.16 – Tensão e corrente aplicadas no motor – partida suave.....	26
Figura 2.17 – Comparação do comportamento da corrente durante a partida.....	27
Figura 2.18 – <i>Soft-starter</i> utilizado nos ensaios	27
Figura 2.19 – Diagrama do inversor de frequência	28
Figura 2.20 – Formas de onda típicas de saída do inversor.....	29
Figura 2.21 – Área proporcional à economia de energia.....	29
Figura 2.22 – Inversor de frequência utilizado nos ensaios	30

Figura 2.23 – Tela inicial do sistema supervisório.....	31
Figura 2.24 – Tela de escolha de sistemas industriais.....	31
Figura 2.25 – Tela inicial da bancada do ventilador.....	32
Figura 2.26 – Indicador de velocidade, temperatura e vazão do ar.....	32
Figura 2.27 – Funcionalidade do botão “Gráfico”	33
Figura 2.28 – Funcionalidade do botão “Comando”	34
Figura 2.29 – Funcionalidade do botão “Medições”	34
Figura 2.30 – Funcionalidade do botão “Temp.”	35
Figura 2.31 – Funcionalidade do botão “PID”	36
Figura 2.32 – Funcionalidade do botão “BD”	36
Figura 2.33 – Detalhes do <i>display</i> do medidor.....	37
Figura 3.1 – Principais componentes de um ventilador.....	40
Figura 3.2 – Princípio de funcionamento de um ventilador	40
Figura 3.3 – Sistema de ventilação típico.....	44
Figura 3.4 – Rotações específicas para os ventiladores	48
Figura 3.5 – Curvas características para um sistema de ventilação típico	49
Figura 3.6 – Curvas características dos ventiladores para rotação constante.....	50
Figura 3.7 – Influência da rotação nas curvas características de um ventilador	52
Figura 3.8 – Campo básico de funcionamento de um ventilador centrífugo.....	53
Figura 3.9 – Campo básico de funcionamento de um ventilador axial.	53
Figura 3.10 – Campo de um ventilador com variação no diâmetro do rotor.....	54
Figura 3.11 – Curvas da instalação de um ventilador.....	55
Figura 3.12 – Curvas de um ventilador controlado por inversor de frequência	56
Figura 3.13 – Economia de energia em um sistema de ventilação controlado por inversor	56
Figura 4.1 – Comparação do consumo entre motor da linha padrão e alto rendimento	59
Figura 4.2 – Comparação do consumo entre <i>damper</i> e inversor	61
Figura 4.3 – Comparação do consumo para quatro situações	62
Figura 4.4 – Economia em relação à utilização de <i>damper</i> e motor da linha padrão.....	64
Figura 5.1 – Forma de onda de uma VTLD	66
Figura 5.2 – Esquema de conexões utilizadas para o ensaio	68
Figura 5.3 – Fonte programável utilizada durante o ensaio	68
Figura 5.4 – Analisador de energia RMS MARH-21993.....	69
Figura 5.5 – Esquema detalhado de conexão do analisador de energia e da fonte.....	69

Figura 5.6– Formas de onda da tensão e da corrente - VTLD com 0.8 pu.....	70
Figura 5.7 - Tensão e corrente do sistema submetido à alimentação com VTLD's.....	71
Figura 5.8 - Potência ativa do sistema submetido à alimentação com VTLD's.....	71
Figura 5.9 - Fator de potência do sistema submetido à alimentação com VTLD's	72
Figura 5.10 – Temperatura no enrolamento e na carcaça do motor submetido à alimentação com VTLD's	73
Figura 5.11 – Rotação do motor submetido à alimentação com VTLD's.....	74
Figura 5.12 – Vazão do sistema quando submetido à alimentação com VTLD's	74
Figura 5.13 – Velocidade do ar do sistema quando submetido à alimentação com VTLD's.....	75
Figura 5.14 – Rendimento total do sistema submetido à alimentação com VTLD's....	75
Figura 6.1 – Entrada dos parâmetros do motor	83
Figura 6.2 – Partida direta para motor 1.5 CV	84
Figura 6.3 – Corrente no estator para partida direta	84
Figura 6.4 – Velocidade do rotor para partida direta.....	85
Figura 6.5 – Torque para partida direta	85
Figura 6.6 – Tensão nos terminais do motor para partida direta	85
Figura 6.7 – Partida suave para motor 1.5 CV	86
Figura 6.8 – Corrente no estator para partida suave	86
Figura 6.9 – Velocidade do rotor para partida suave.....	87
Figura 6.10 – Torque para partida suave	87
Figura 6.11 – Tensão nos terminais do motor para partida suave	87
Figura 6.12 – Inversor de frequência para motor 1.5 CV	88
Figura 6.13 – Corrente no estator para operação com inversor de frequência	88
Figura 6.14 – Velocidade do rotor para operação com inversor de frequência.....	89
Figura 6.15 – Torque para operação com inversor de frequência	89
Figura 6.16 – Tensão no barramento DC para operação com inversor de frequência ...	89
Figura 6.17 – Tensão nos terminais do motor	90
Figura 6.18 – Detalhe da forma de onda da tensão nos terminais do motor	90
Figura 7.1 – Fluxo de caixa	96
Figura 7.2 – Exemplo de árvore de decisão	105
Figura 7.3 – Perfil de operação do sistema do estudo de caso	106
Figura 7.4 – Comparação do consumo para quatro situações	107
Figura 7.5 – VPL para a análise 1	109

Figura 7.6 – VPL para a análise 2	112
Figura 7.7 – VPL para a análise 3	116
Figura 7.8 – VPL das análises 1, 2, e 3	119
Figura 7.9 – Comparação de rentabilidades para setembro de 2010.....	120
Figura 7.10 – Comparação de rentabilidades acumulada em 2010	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Dados do fabricante do ventilador	14
Tabela 2.2 – Classificação do ventilador do laboratório	16
Tabela 2.3 – Funcionalidades da tela da bancada do ventilador	32
Tabela 3.1 – Classificação dos ventiladores de acordo com a pressão de operação	41
Tabela 3.2 – Classificação dos ventiladores de acordo com a forma do rotor	41
Tabela 3.3 – Classificação dos ventiladores de acordo com o modo de entrada de fluido	42
Tabela 3.4 – Classificação dos ventiladores de acordo com a posição das pás do rotor	42
Tabela 3.5 – Determinação do coeficiente de atrito	45
Tabela 3.6 – Rugosidade absoluta para alguns materiais novos.....	46
Tabela 3.7 – Massa específica, viscosidade absoluta e viscosidade relativa do ar.....	46
Tabela 3.8 – Características dos ventiladores.....	51
Tabela 4.1 – Ensaio comparativo entre motor de alto rendimento e da linha padrão	59
Tabela 4.2 – Ensaio comparativo entre <i>damper</i> e inversor de frequência.....	61
Tabela 4.3 – Comparação do consumo para quatro situações	63
Tabela 4.4 – Economia em relação à utilização de <i>damper</i> e motor da linha padrão	63
Tabela 5.1 – Classificação das variações de tensão de longa duração	66
Tabela 5.2 – Coeficiente de perda do <i>damper</i>	68
Tabela 6.1 – Dados do motor.....	78
Tabela 6.2 – Ensaio à vazio	78
Tabela 6.3 – Ensaio com rotor bloqueado	79
Tabela 6.4 – Ensaio de medição da resistência do estator.....	79
Tabela 6.5 – Parâmetros do circuito equivalente do motor	79
Tabela 7.1 – Critério decisório do VPL.....	97
Tabela 7.2 – Vida útil média dos motores de indução.....	102
Tabela 7.3 – Valores de vazão e tempo para os ensaios.....	106
Tabela 7.4 – Condições da análise 1.....	108
Tabela 7.5 – Economia de energia para a análise 1.....	108
Tabela 7.6 – Condições da análise 2.....	111
Tabela 7.7 – Economia de energia para a análise 2.....	111
Tabela 7.8 – Condições da análise 3.....	115

Tabela 7.9 – Economia de energia para a análise 3.....	115
Tabela 7.10 – Resultados do estudo de caso	118

CAPÍTULO I

1. Considerações iniciais

1.1. Introdução geral

A preocupação com a redução do consumo de energia elétrica e de desperdícios envolvidos nas atividades industriais, comerciais e residenciais não é recente. Utilizar de forma inteligente a energia é uma maneira adequada de aumentar a produtividade, reduzir custos e impactos ambientais. Entretanto, a partir da crise do petróleo da década de setenta que elevou bruscamente o custo desse insumo, e a mais recente crise energética brasileira de 2001 fizeram com que a discussão sobre o combate ao desperdício de energia se tornasse um assunto mais importante. Além disso, as preocupações ambientais e o cenário geopolítico internacional relacionado à produção dos combustíveis fósseis têm fortalecido ainda mais essas preocupações [1]. O combate ao desperdício de energia possui uma vertente tecnológica e uma vertente humana. A vertente tecnológica deve ser entendida como um conjunto de ações que são realizadas a fim de que se aumente a eficiência no uso energético, ou seja, procura-se fazer com que os processos produzam os mesmos níveis de benefícios e conforto, entretanto, com uma quantidade de energia menor. Já a vertente humana compreende esforços como formação e capacitação de pessoas a fim de provocar uma mudança de hábitos que contribuam para o combate ao desperdício de energia.

A retomada do crescimento econômico na década de oitenta e a consequente elevação da demanda por energia fez com que o Ministério de Minas e Energia se adiantasse à escassez energética ao liderar a criação do Programa de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL, em 1985. Merece destaque o selo PROCEL de economia de energia, que submete vários eletrodomésticos a ensaios em laboratórios e os classifica de acordo com a relação entre o consumo de energia e o benefício. Esse selo

visa orientar os consumidores na hora de escolher produtos mais eficientes e estimula o aperfeiçoamento no desenvolvimento desses eletrodomésticos.

A discussão sobre a eficiência energética e sua importância fez com que em 2001 entrasse em vigor a Lei 10.295, que estabelece níveis máximos de consumo, ou mínimos de eficiência energética de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no país, com base em dados técnicos pertinentes [2].

Observa-se que o crescimento econômico e a demanda por energia são indicadores diretamente proporcionais. Dessa forma, havendo crescimento econômico haverá maior demanda por energia. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética – EPE, autarquia ligada ao Ministério de Minas e Energia, a demanda por eletricidade apresentou alta de 8,1% no ano de 2010 [3]. Considerando-se ainda o protagonismo do Brasil no cenário internacional, que tende a elevá-lo a uma potência mundial com crescimento sustentável, é possível observar que a demanda por energia tende a se elevar cada vez mais.

É nesse cenário que se pretende atuar, a fim de possibilitar o desenvolvimento de técnicas eficientes para o setor industrial, comercial, e residencial. Dentro desse contexto, a Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia e a Eletrobras idealizaram um laboratório de sistemas motrizes [4] que permite ensaios, estudos e observações nos sistemas motrizes mais presentes nas indústrias. Cada um dos sistemas motrizes é constituído por uma carga mecânica acoplada a um motor elétrico trifásico acionado pela rede elétrica trifásica. O presente trabalho aborda um deles, o sistema de ventilação industrial, um processo bastante utilizado em indústrias de diversos setores, como será detalhado adiante.

1.2. Balanço energético

O Balanço Energético Nacional é um documento elaborado desde 2006 e publicado anualmente pelo Ministério de Minas e Energia, e apresenta uma pesquisa relativa à oferta e ao consumo de energia em todas suas formas no âmbito nacional. Este documento revela detalhes confiáveis e importantes sobre o perfil energético brasileiro que interessam a vários setores [5]. Um dos setores que obtém grande benefício a partir desses dados é o setor envolvido com a eficiência energética, pois a partir desse balanço é possível identificar tendências de oferta e consumo e planejar a atuação efetiva nas

áreas que possam retornar o maior benefício em termos de economia energética. A seguir, podem ser observadas algumas informações coletadas nos resultados preliminares do Balanço Energético Nacional de 2010.

1.2.1. Oferta interna de energia

A Oferta Interna de Energia é definida como a quantidade de energia disponível, que compreende o consumo final, a energia a ser transformada e as perdas nos sistemas de distribuição. A Oferta Interna de Energia em 2009 foi de 243,9 milhões de tep (tonelada equivalente de petróleo). Esse valor representa cerca de 2% da energia mundial. A tep é uma unidade de energia que corresponde à quantidade de energia contida em uma tonelada de petróleo de referência[5].

A Figura 1.1 ilustra a Oferta Interna de Energia no Brasil, de acordo com os resultados preliminares do Balanço Energético Nacional de 2010.

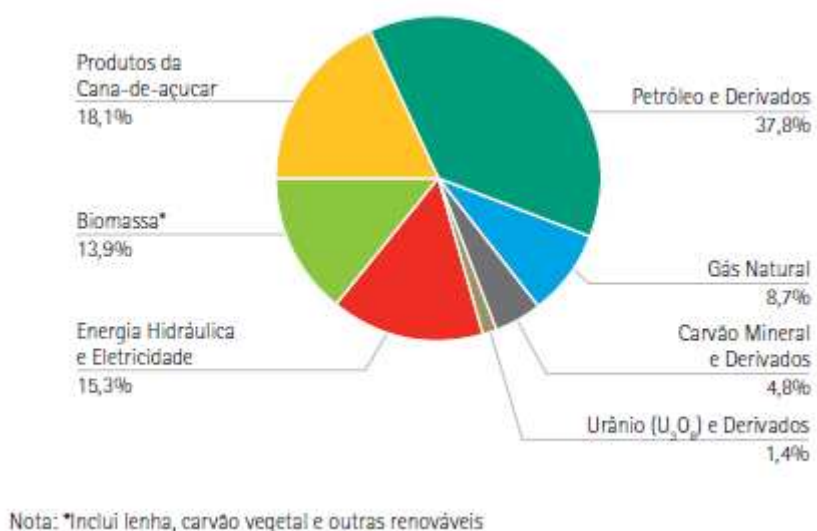


Figura 1.1 – Oferta interna de energia no Brasil

É possível observar que a matriz de oferta de energia brasileira é constituída por 52,7% de energia não renovável (petróleo, gás natural, carvão mineral, urânio e seus derivados), e por 47,3% de energia renovável (produtos da cana-de-açúcar, energia hidráulica e eletricidade, lenha e carvão vegetal, dentre outros). É importante ressaltar que a média percentual mundial de oferta de energia renovável é de apenas 12,7%, o que coloca o Brasil em uma posição de destaque nesse cenário.

1.2.2. Oferta interna de energia elétrica

A Oferta Interna de Energia Elétrica é a quantidade de energia gerada na forma elétrica e disponibilizada para o uso final, já incluídas as perdas de distribuição. A Figura 1.2 mostra os percentuais de energia por fonte. Observa-se que a matriz elétrica brasileira é predominantemente hidráulica, que apresenta 76,7% da oferta de energia elétrica.



Figura 1.2 – Oferta interna de energia elétrica no Brasil

1.2.3. Consumo final energético por fonte

O Consumo Final de Energia é definido como a quantidade de energia efetivamente consumida pelos diversos setores e para atendimento de usos finais como aquecimento, refrigeração, força motriz e iluminação. Nesse cenário não está incluída a quantidade de energia utilizada como matéria-prima em processos de transformação para outras formas de energia. A Figura 1.3 ilustra os percentuais de consumo final por fonte:

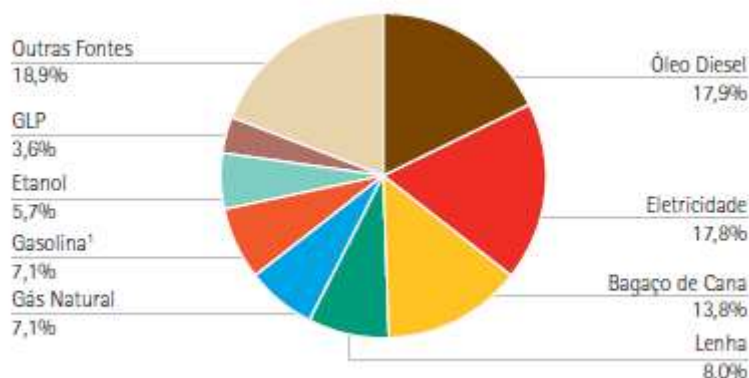


Figura 1.3 – Consumo final energético por fonte

Observa-se que o perfil de oferta diferencia-se consideravelmente do perfil de consumo de energia, sendo que este apresenta a maior parcela consumida em óleo diesel, seguido por eletricidade e bagaço de cana.

1.2.4. Consumo final energético por setor

Considerando-se o consumo final distribuído nos diversos setores, observa-se que cerca de um terço da energia consumida no país abastece o setor industrial, um terço abastece o setor de transportes, e a parcela restante é consumida por outros setores.

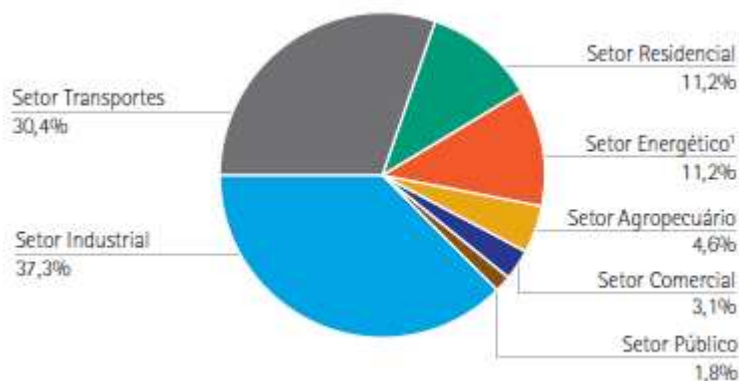


Figura 1.4 – Consumo final energético por setor

Observa-se que o setor industrial e o de transportes possuem o maior potencial de fornecer resultados expressivos na aplicação de técnicas de combate ao desperdício de energia. Infelizmente, mesmo com a divulgação frequente de técnicas que busquem a eficiência energética, a parcela de instituições envolvidas ainda é reduzida.

1.3. Usos finais da energia elétrica

Foi realizada uma avaliação do mercado de eficiência energética no Brasil pela Ecoluz, juntamente com a Eletrobras, e foi possível observar várias informações importantes sobre esse setor. A pesquisa foi realizada em uma amostra de 488 indústrias brasileiras dos mais diversos setores, abrangendo concessionárias que abastecem 92% do consumo nacional de energia elétrica [6].

Foi observado que a força motriz representa 69% do consumo final de energia elétrica para essas indústrias, seguida respectivamente por eletrotermia, iluminação, e eletrólise.



Figura 1.5 – Distribuição do consumo por uso final na indústria

Observando o percentual de indústrias que dispõem de sistemas motrizes, na Figura 1.6, é possível verificar que em 72% das indústrias há utilização de sistemas de ar comprimido e em 46% delas há utilização de algum sistema de ventilação, o foco principal dessa abordagem.

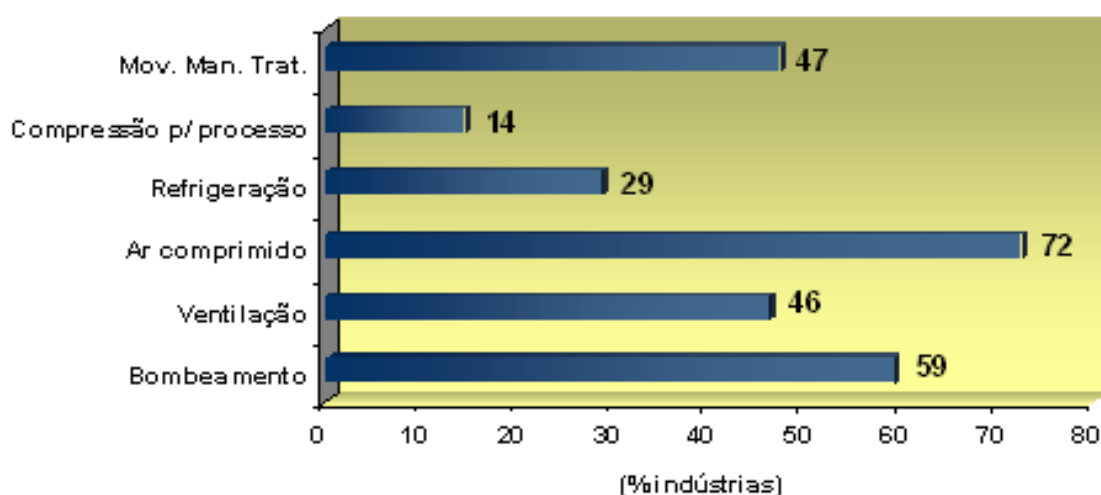


Figura 1.6 – Percentual de indústrias que dispõem de sistemas motrizes

Considerando-se o consumo final energético, foi verificado que os sistemas de ventilação são responsáveis por 12% da força motriz utilizada. Outros usos finais podem ser observados na Figura 1.7.

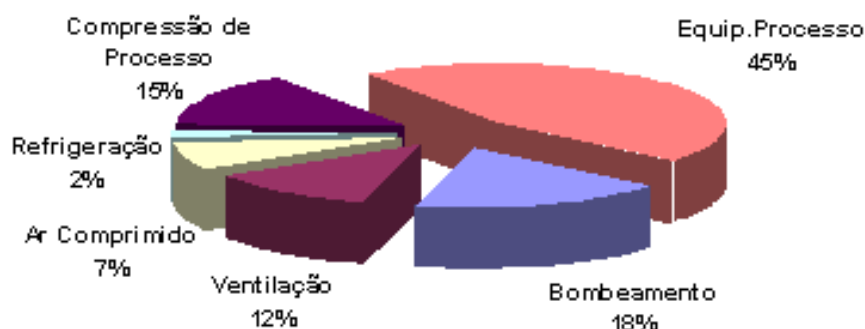


Figura 1.7 – Distribuição da força motriz por uso final

Entre as indústrias citadas que possuem algum sistema de ventilação, insuflamento ou exaustão, 82% declararam que utilizam “liga-desliga” como forma de controle, enquanto que 12% utilizam o controle através de *damper* e 2% desses sistemas utilizam o inversor de frequência.

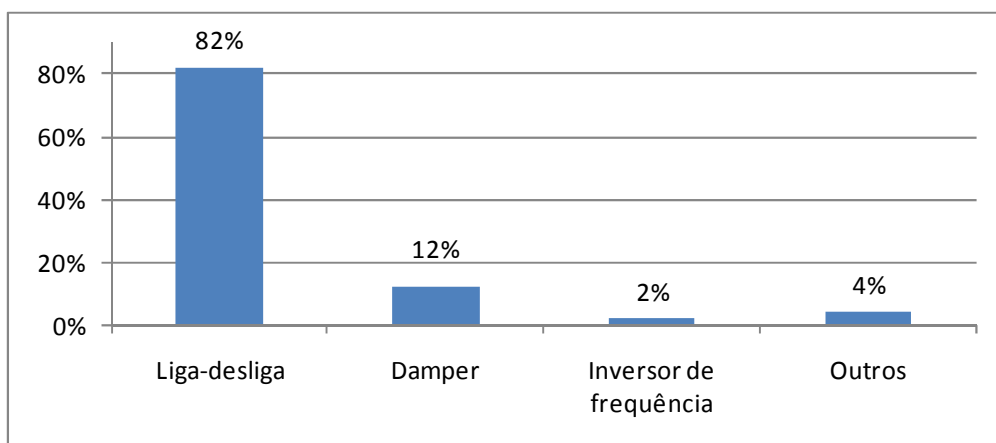


Figura 1.8 – Forma de controle em sistemas de ventilação

Ainda de acordo com a pesquisa, para a maior parte das indústrias, a participação dos custos da energia está entre 5% e 10% do custo total. Entretanto, para outras indústrias, esse valor pode chegar a mais de 30%, como pode ser verificado na Figura 1.9.

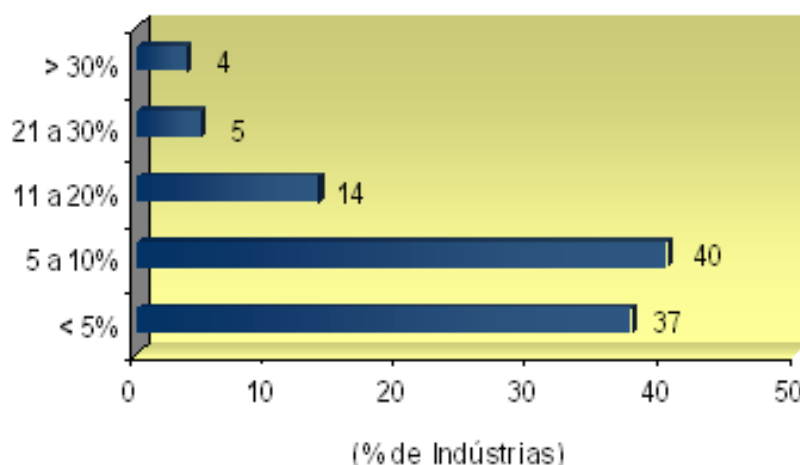


Figura 1.9 – Participação da energia elétrica no custo total

Considerando-se que 72% da amostra afirmaram que utilizariam recursos próprios para efficientização de processos e observando todos os aspectos expostos nessa motivação, fica evidente a importância da aplicação dos conceitos de combate ao desperdício de energia e seus consequentes impactos positivos na matriz de consumo de energia elétrica do país.

1.4. Estrutura do trabalho

Este trabalho é constituído por oito capítulos, incluindo o presente capítulo com as considerações iniciais.

No Capítulo 2 é apresentada a descrição da bancada de ensaio do ventilador do laboratório utilizada para a execução dos ensaios presentes no trabalho. Essa descrição inclui os componentes, diagrama esquemático, modelo e classificação do ventilador, características dos motores e meios de partida. Além disso, traz uma apresentação detalhada do sistema supervisorizado utilizado pela bancada.

O Capítulo 3 detalha os sistemas de ventilação, com princípios de funcionamento, critérios de classificação, equacionamento e curvas características.

No Capítulo 4 são verificados os ensaios realizados no sistema de ventilação do laboratório sob o enfoque da eficiência energética, que incluem observações no comportamento do consumo de energia para a utilização do motor da linha padrão e alto rendimento e para o controle de vazão através de damper e inversor de frequência.

Já o Capítulo 5 aborda o comportamento do sistema de ventilação e sua relação com a qualidade da energia elétrica, no qual são verificados os distúrbios causados pelo sistema e o seu comportamento quando submetido à alimentação não ideal.

No Capítulo 6 são apresentadas algumas simulações computacionais para um sistema de ventilação, semelhante ao utilizado nos ensaios do laboratório, incluindo observações em formas de onda para os métodos de partida, e também para condições de regime permanente, além de uma análise do sistema quando submetido à alimentação distorcida.

O Capítulo 7 traz um estudo econômico que contempla uma análise de viabilidade financeira para aplicação de investimentos de efficientização em um sistema de ventilação industrial.

Finalmente, o Capítulo 8 sintetiza todo o trabalho, apresentando as considerações finais e sustentando as premissas contidas em sua motivação.

CAPÍTULO II

2. Descrição da bancada de ensaios

2.1. Introdução

Neste capítulo, pretende-se apresentar todo o sistema da bancada de ventilação disponível no Laboratório de Sistemas Motrizes. Essa apresentação inclui detalhes, características e funcionalidades dos equipamentos destinados à automação, controle e medições do sistema. Basicamente, a bancada é constituída por um ventilador centrífugo, o painel que abriga os equipamentos de controle e um computador, responsável por monitorar e atuar no sistema através de um sistema supervisor. Além disso, o acionamento do ventilador pode ser realizado por dois motores distintos (um da linha padrão e um de alto rendimento) e três modos de partida (direta, *soft-starter* e inversor de frequência) o que permite que sejam feitas diversas comparações na operação do equipamento.

2.2. Componentes da bancada do ventilador

A bancada de ensaios é independente e é constituída por duas mesas, sendo que em uma encontra-se o computador (CPU, teclado, mouse, monitor e *no-break*) e na outra se encontram os motores, módulo de carga e o painel que abriga os sistemas de comando, medição e acionamento. A Figura 2.1 mostra a bancada de ventilação.



Figura 2.1 – Bancada do ventilador

O sistema é composto por proteção, medição e sistemas de automação integrados, capazes de controlar automaticamente a execução, a coleta de dados e a emissão de relatórios [4]. O módulo de carga permite o controle da vazão de ar através de um *damper*, via sistema supervisor *Indusoft 6.1*. Há um dispositivo transmissor de vazão que permite a monitoração deste parâmetro e sua alteração ou bloqueio.

2.2.1. Diagrama esquemático

A Figura 2.2 ilustra de forma simplificada o funcionamento do sistema de ventilação. A alimentação pode ser realizada através de partida direta, *soft-starter* ou inversor de frequência; enquanto que o acionamento pode ser feito através do motor da linha padrão ou de alto rendimento. Essa configuração permite diversas combinações de funcionamento. Há um multimedidor na alimentação trifásica do sistema que realiza a aquisição de parâmetros elétricos e os envia ao CLP (Controlador Lógico Programável) via *Modbus*. Os sensores de vazão e de velocidade realizam a aquisição de dados do sistema e também os envia ao CLP. Por fim, os dados são processados pelo CLP e enviados ao sistema supervisor via *Ethernet* [4].

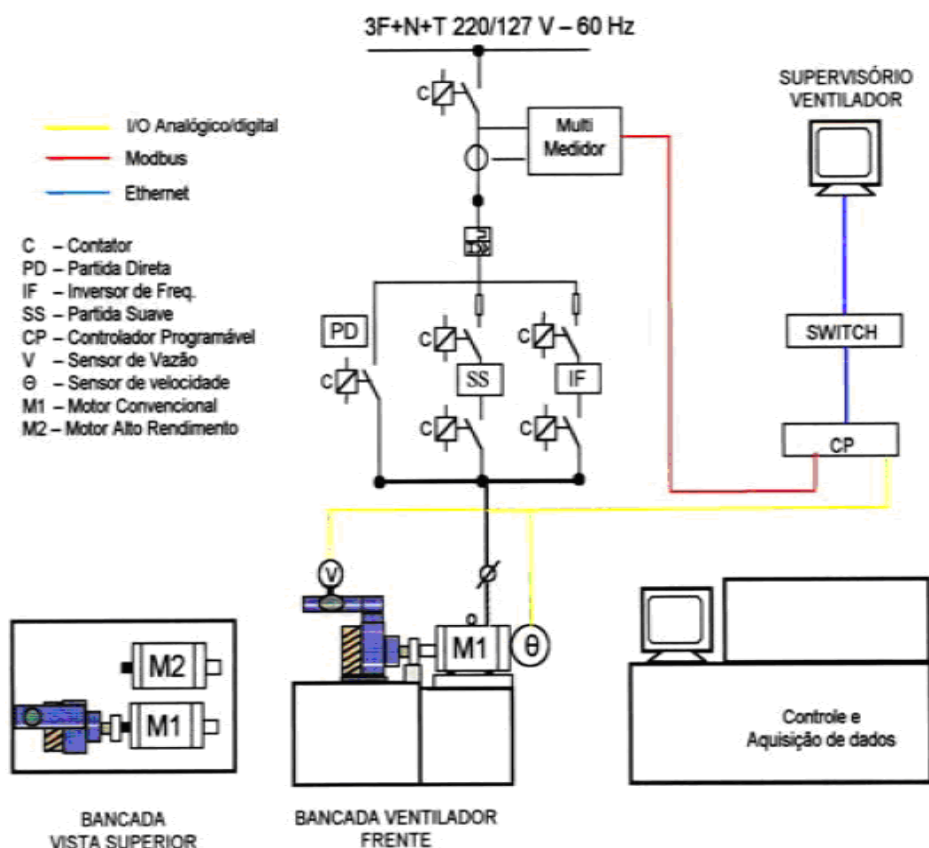


Figura 2.2 – Diagrama da bancada do ventilador

A Figura 2.3 ilustra de forma simplificada as conexões entre os dispositivos de partida, sensores, atuadores e controladores. O CLP envia através do cartão TSX SCP114, os dados determinando qual dispositivo de partida deve ser usado e todos os parâmetros necessários para essa operação. Através desse mesmo cartão, o CLP recebe os dados enviados pelo medidor de energia. Todos esses procedimentos são realizados via *Ethernet*. Além disso, o CLP recebe os dados referentes às entradas analógicas do medidor e do PT-100 e à entrada digital dos *switches*. O CLP também envia os dados referentes à saída digital para os contadores, a saída analógica para o *damper*, e realiza a devida interface com o sistema supervisório.

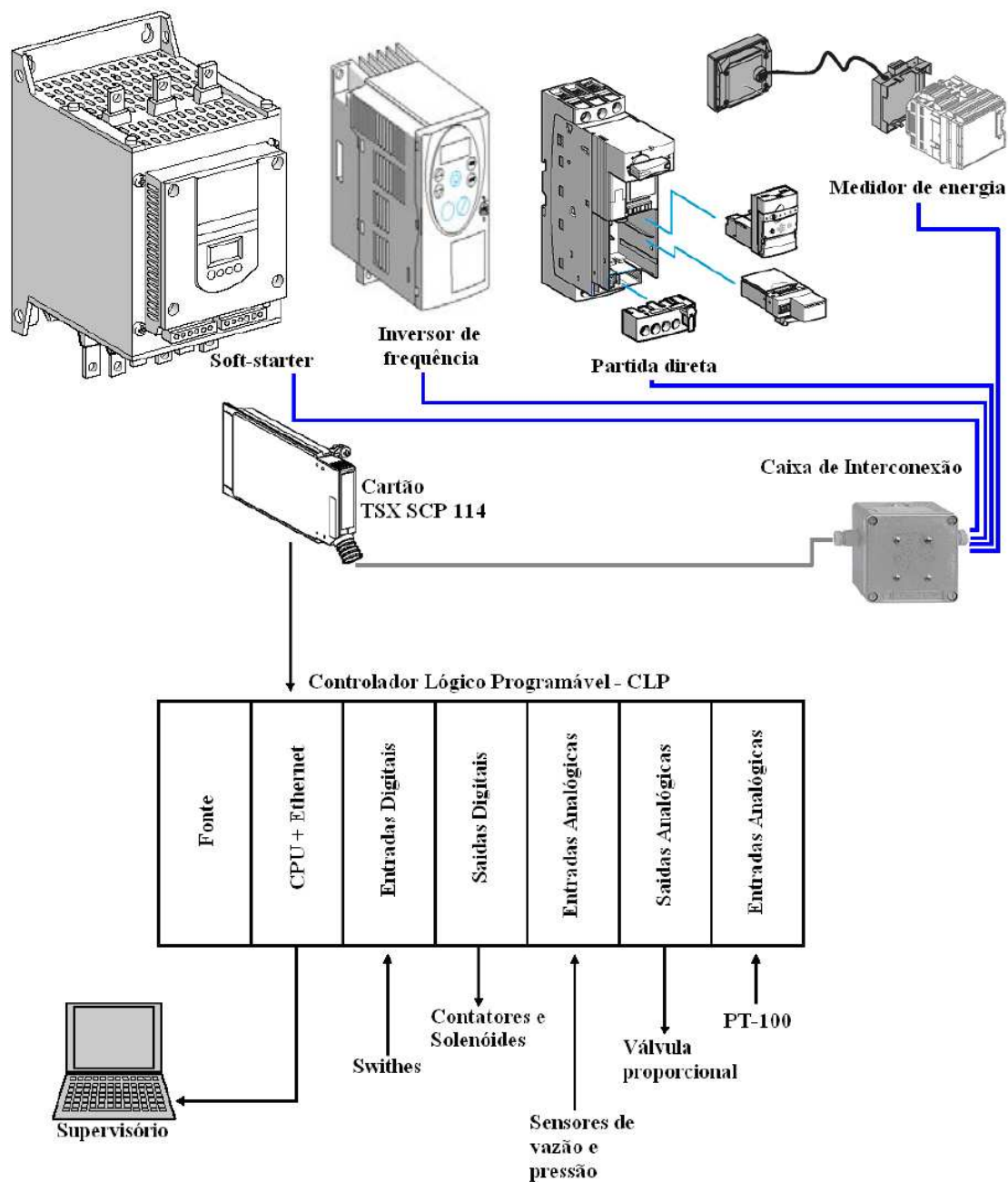


Figura 2.3 – Esquema de controle

2.2.2. Ventilador

Os ventiladores são definidos como máquinas geradoras de fluxo que trabalham com fluido em estado gasoso, provocando uma diferença de pressão inferior a 0,2 kgf/cm².

Os dados do fabricante do ventilador utilizado para a execução dos ensaios podem ser observados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Dados do fabricante do ventilador

Fabricante	DELTRA Equipamentos Industriais Ltda.
Modelo	VC-310
Tensão	220/380 V
Potência	3 CV
Corrente	8,3/4,8 A
Rotação	3480 rpm
Carcaça	90S (ABNT)
Conjugado nominal	6,058864 N.m
Vazão	19 m ³ /min
Pressão máxima	3350 mmca

O modelo utilizado pode ser usado para aplicações em: canhões e anéis de extrusoras, banheiros de residências, barcos, cortina de ar, transportes pneumáticos, aeração de ambientes, forjas, máquinas flexográficas, refrigeração, motores de corrente contínua (CC), rebobinadeiras, secagem, painéis, e estufas. A Figura 2.4 mostra o ventilador instalado no laboratório.



Figura 2.4 – Ventilador utilizado nos ensaios – visão frontal e da entrada de ar

A Figura 2.5 ilustra as dimensões e na Figura 2.6 são apresentadas as curvas de desempenho do ventilador utilizado, modelo VC-310.

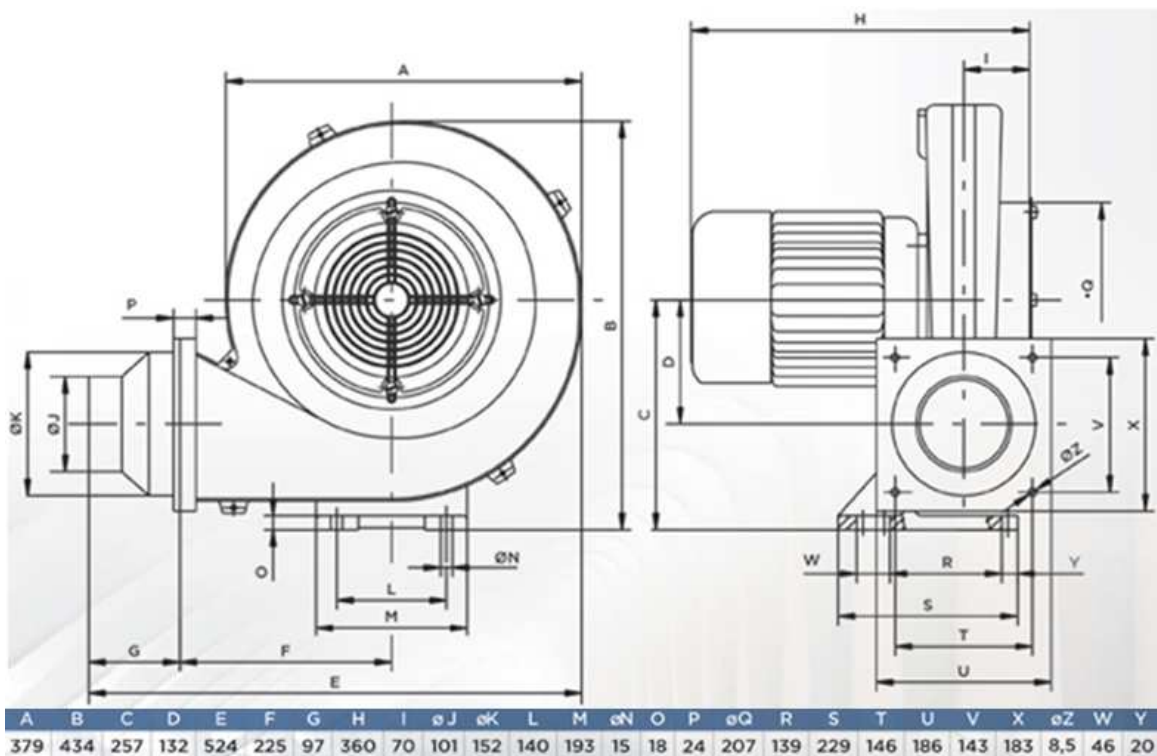


Figura 2.5 – Dimensões do ventilador

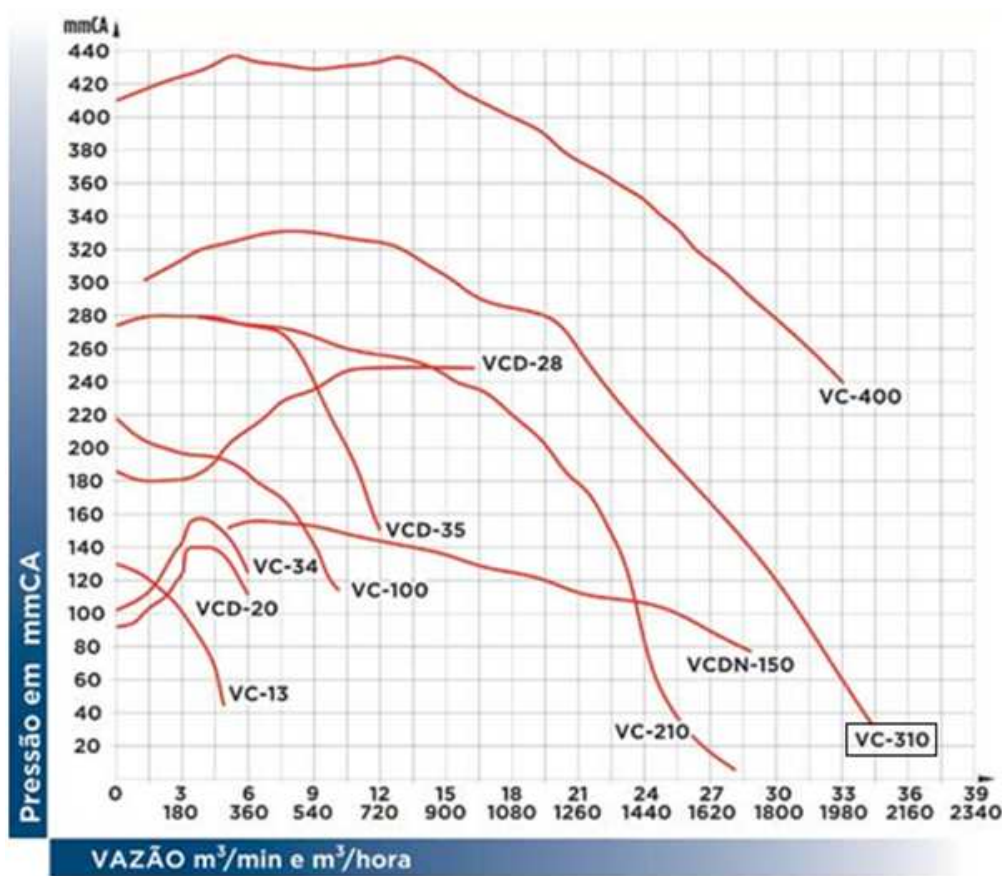


Figura 2.6 – Curvas de desempenho do ventilador

De acordo com os critérios de classificação enunciados no Capítulo 3, o ventilador utilizado para a execução dos ensaios tem sua classificação definida na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Classificação do ventilador do laboratório

Critério	Classificação
Pressão de operação	Baixa pressão
Forma do rotor	Centrífugo (ou radial)
Modo de entrada de fluido	Simplex sucção
Posição das pás do rotor	Pás curvadas para trás

2.2.3. Motores

Os motores de indução trifásicos processam grande parte da energia elétrica consumida no Brasil. A importância destes equipamentos na matriz energética induziu o governo brasileiro, através do PROCEL a realizar uma avaliação dos motores de indução trifásicos nacionais de 1988 a 1990. Esta avaliação sugeriu que os projetos destes motores fossem aperfeiçoados. A melhoria de rendimento naquela época estava associada ao uso de materiais magnéticos melhores e mais caros, implicando em altos custos [1].

Estes resultados evidenciaram a necessidade de abertura de uma linha de pesquisa de aperfeiçoamento de projeto de motores de indução trifásicos, dentro do contexto tecnológico brasileiro. Após vários estudos, surgiram os motores de alto rendimento. Suas principais alterações são [7]:

- Chapas Magnéticas: as chapas que compõem o rotor e o estator são de melhor qualidade, resultando em perdas por histerese e por correntes induzidas menores que as chapas utilizadas nos motores normais. Alterações nas chapas também podem incluir redução da espessura e tratamento térmico para redução de perdas.
- Enrolamentos do rotor e do estator: os enrolamentos de cobre do estator e de alumínio do rotor possuem um volume maior de material, fazendo com que a resistência elétrica dos mesmos seja menor, desta forma reduzindo as perdas por efeito *joule*. Alguns fabricantes também utilizam materiais com menor resistividade.
- Ventilador: são aperfeiçoados de forma a ter uma maior eficiência, reduzindo as perdas por ventilação. Uma vez que o motor possui menos perdas, a necessidade

de ventilação também diminui, contribuindo para a redução da potência necessária para o ventilador.

- Rolamentos: são empregados rolamentos especiais com menor coeficiente de atrito que os normalmente empregados. Desta forma, a vida útil dos rolamentos é em geral maior que os rolamentos comuns.
- Dimensões principais: o diâmetro do rotor, as ranhuras, o entreferro e o comprimento axial do motor são especialmente dimensionados para proporcionar um rendimento elevado para o motor.
- Tolerâncias mecânicas melhores: utilizando-se ferramentas de maior precisão, as tolerâncias de fabricação podem ser sensivelmente reduzidas, diminuindo desbalanços e imperfeições, as quais contribuem para as perdas adicionais. Desta forma, máquinas com entreferro menores podem ser fabricadas, as quais necessitam de menores correntes de magnetização, apresentando melhor fator de potência e rendimento. Menores tolerâncias também resultam em menor nível de ruído e menor vibração.

Como resultado das alterações acima, os motores de alto rendimento em geral apresentam menor temperatura de trabalho resultando numa vida útil maior, menor necessidade de manutenção e menor nível de ruído devido ao melhor balanceamento e menores tolerâncias de fabricação. A Figura 2.7 mostra essas principais alterações realizadas nos motores.

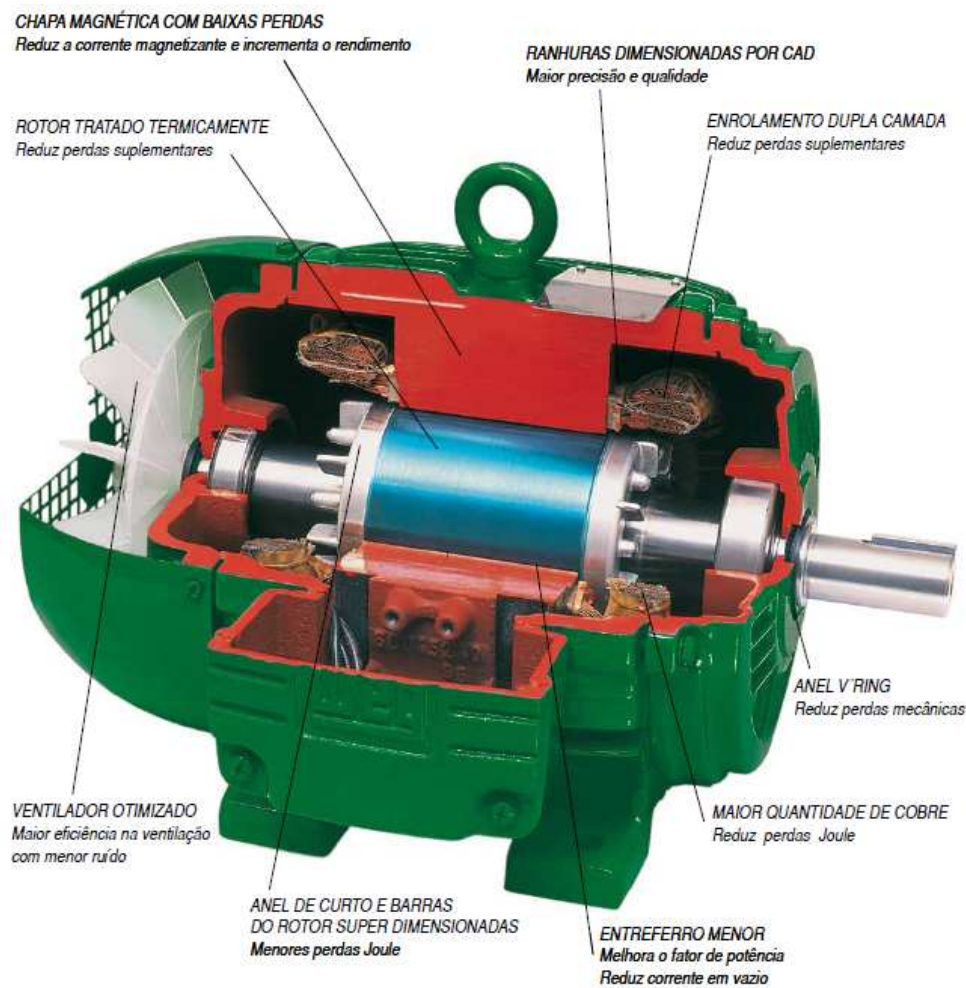


Figura 2.7 – O motor de alto rendimento

Os motores de alto rendimento apresentam essas características específicas que fazem com que acionem a mesma carga, porém absorvendo uma potência elétrica menor da rede. Essa comparação pode ser observada na Figura 2.8.

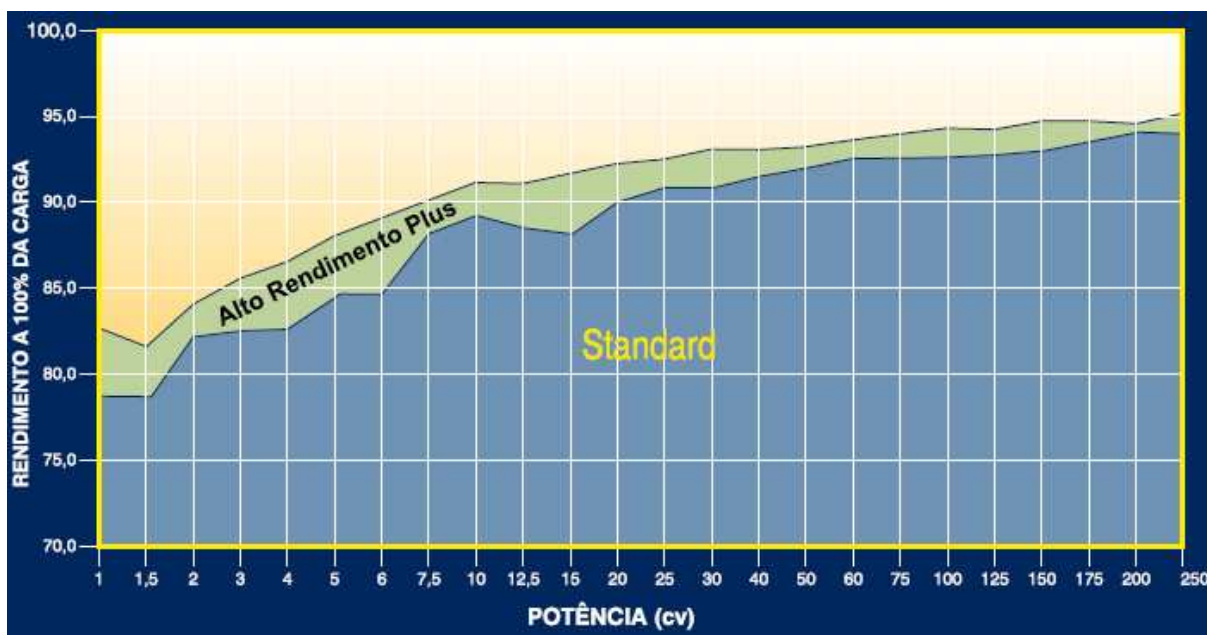
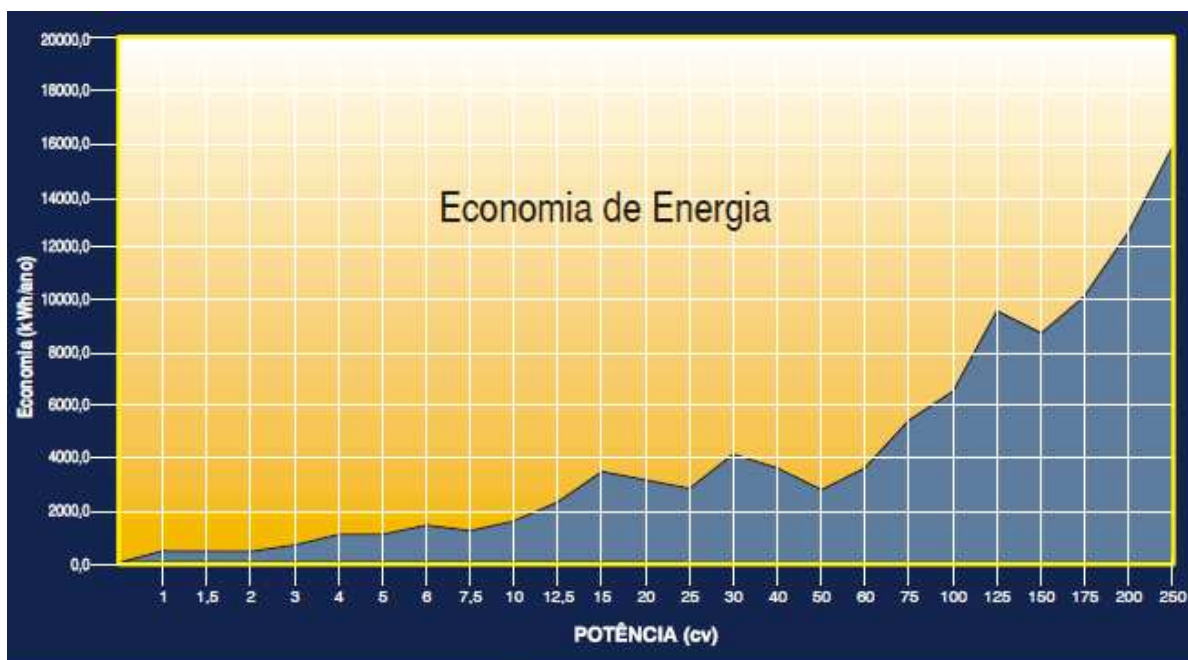


Figura 2.8 – Comparativo de rendimentos

Observa-se que para os motores de menor potência é possível conseguir maiores diferenças de rendimento, porém, nem sempre isso significa que será vantajosa uma substituição de motores. Quando analisada a energia consumida pela máquina durante um longo período de tempo, por exemplo um ano, percebe-se que a substituição de máquinas é mais vantajosa para os motores de maiores potência e que operam em maior tempo.

Teoricamente, qualquer substituição de motor da linha padrão por alto rendimento traz economia de energia, mas nem sempre a troca é viável economicamente. Quanto maior o tempo de funcionamento e maior a potência, mais rápido acontecerá o retorno dos investimentos. Entretanto, haverá casos em que o retorno acontecerá em um tempo muito grande, maior do que a vida útil do equipamento, caracterizando assim a inviabilidade da troca. A Figura 2.9 ilustra a economia de energia dos motores em função da potência.



Considerando custo médio de energia a R\$ 0,15/kWh e o motor operando 24 horas por dia, em regime contínuo

Figura 2.9 – Economia de energia anual

As principais causas do uso ineficiente de um motor elétrico são: super dimensionamento, reparo inadequado do motor, utilização de motores de baixo rendimento e acoplamento motor/carga de baixa eficiência [8]. Em relação aos custos relacionados aos motores elétricos, deve-se ressaltar o custo de aquisição, referentes ao preço de compra do motor no mercado, e ao custo operacional, relativo ao custo da energia elétrica necessária para o funcionamento do motor. Um fato importante é que o custo operacional do motor pode chegar a 100 vezes o valor do custo de aquisição, o que reforça a necessidade de se criar boas condições de funcionamento para o motor elétrico. As causas do uso ineficiente dos motores são os aspectos que, quando levados em conta, podem reduzir esse custo operacional.

O super dimensionamento dos motores, situação na qual o motor aciona uma carga muito inferior à sua capacidade nominal, é um dos problemas mais comuns nas indústrias. Para cargas abaixo de 35% da nominal os motores apresentam rendimento consideravelmente menor.

Nos ensaios realizados foram utilizados dois motores de indução trifásicos de 1,5 CV, sendo um da linha padrão (azul), e outro de alto rendimento (verde).

Algumas características dos motores podem ser verificadas a seguir [7]:

- **Motor da linha padrão**

- Modelo: HE36350;
- Grau de proteção: IP55;
- Isolação: B;
- Regime: S1;
- Potência nominal: 1,5 CV;
- Tensões nominais: 220/380;
- Correntes nominais: 4,27/2,47;
- Frequência nominal: 60 Hz;
- Velocidade de rotação nominal: 3370 rpm;
- Razão entre corrente de partida e corrente nominal (I_p/I_n): 7,5;
- Categoria de desempenho: N;
- Fator de serviço: 1,15;
- Rendimento nominal: 78,6;
- Fator de potência nominal: 0,86.

- **Motor de alto rendimento:**

- Modelo: G192961;
- Grau de proteção: IP55;
- Isolação: F;
- Regime: S1;
- Potência nominal: 1,5 CV;
- Tensões nominais: 220/380;
- Correntes nominais: 4,02/2,33;
- Frequência nominal: 60 Hz;
- Velocidade de rotação nominal: 3390;
- Razão entre corrente de partida e corrente nominal (I_p/I_n): 7,5;
- Categoria de desempenho: N;
- Fator de serviço: 1,15;
- Rendimento nominal: 82,5;
- Fator de potência nominal: 0,87.

O grau de proteção (IP) indica o nível de segurança que a carcaça do motor apresenta contra penetração de elementos sólidos e líquidos que prejudicam o seu

funcionamento, além disso, está relacionado à segurança do usuário, pois indica a proteção contra contatos acidentais de pessoas [9]. O grau de proteção é definido através de normas por dois algarismos sendo que o primeiro está relacionado ao grau de proteção contra a penetração de objetos sólidos e o segundo contra a penetração de água.

No caso dos motores em ensaio, o grau de proteção IP55 indica que o motor está protegido contra poeira prejudicial ao motor (primeiro algarismo) e protegido contra jato de água em qualquer direção (segundo algarismo) [9].

A isolação do motor indica a classe de isolante utilizado na fabricação do motor. A temperatura limita o valor de isolamento em regime contínuo para cada material isolante sem que seja reduzida sua vida útil. No caso dos motores da bancada, a classe do isolante é B para o motor da linha padrão 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.

O regime de serviço indica como se comporta a carga ao longo do tempo. No caso, o regime é S1, que corresponde a uma carga constante no eixo do motor, com duração suficiente para que o equilíbrio térmico seja atingido [9].

O fator de serviço indica uma potência adicional contínua, ou seja, a carga que pode efetivamente ser acionada pelo motor em regime contínuo, em condições previstas em norma. Esse valor não está relacionado à capacidade de sobrecarga temporária dos motores, situados geralmente entre 140% e 160% da carga nominal. Para que esse valor seja obtido, basta multiplicar o fator de serviço pela potência nominal do motor. Como no caso dos motores apresentados o fator de serviço é 1,15 e a potência nominal é 1,5CV, pode-se determinar que a potência disponível é de aproximadamente 1,725CV.

As Figuras 2.10 e a Figura 2.11 representam respectivamente as curvas de desempenho dos motores da linha padrão e de alto rendimento [10]. Observa-se que o superdimensionamento dos motores provoca a redução do rendimento e do fator de potência.

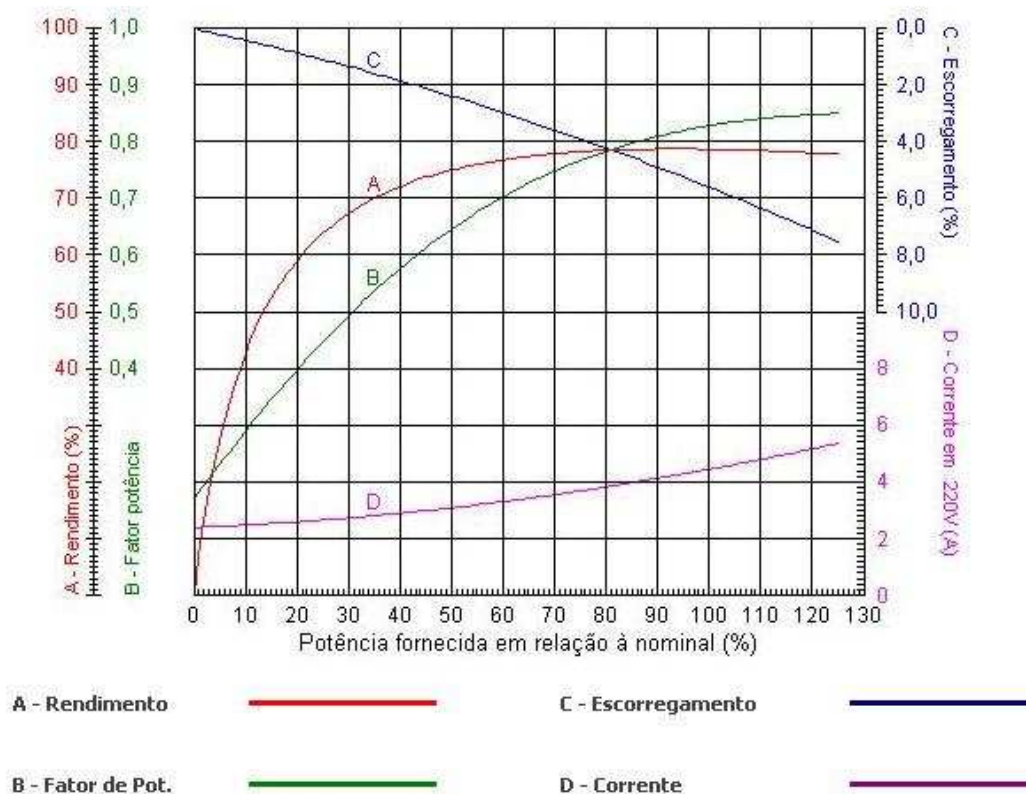


Figura 2.10 – Curvas características do motor da linha padrão

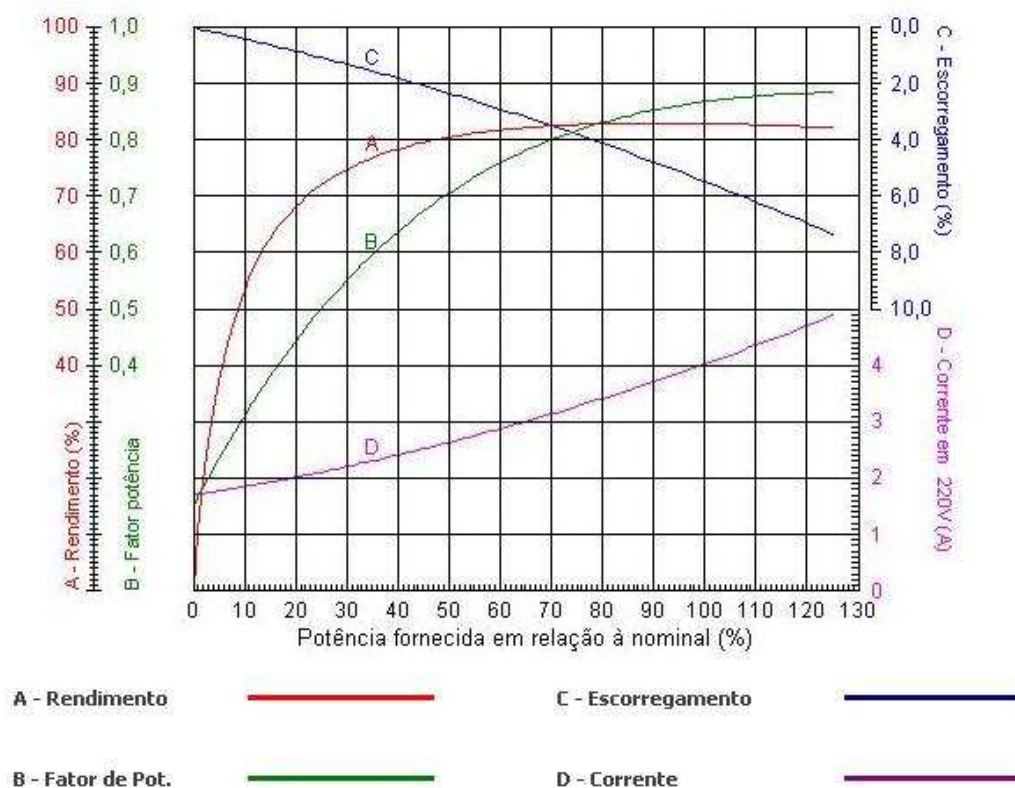


Figura 2.11 – Curvas características do motor de alto rendimento.

2.2.4. Partida direta

É a forma mais simples e econômica de acionamento de motores, consistindo em aplicar a tensão nominal nos terminais do motor conectando-o diretamente à rede elétrica [9]. Porém, essa modalidade de partida pode causar a atuação da proteção, caso ela não esteja adequada ao alto valor de corrente. Além disso, pode causar diversos danos às instalações elétricas, por exigir uma corrente de partida muito elevada, cerca de 6 a 7 vezes o valor da corrente nominal. A partida direta fornece ainda alto torque de partida e é muito simples de ser implementada. O comportamento da corrente e do conjugado durante a partida direta podem ser observados na Figura 2.12.

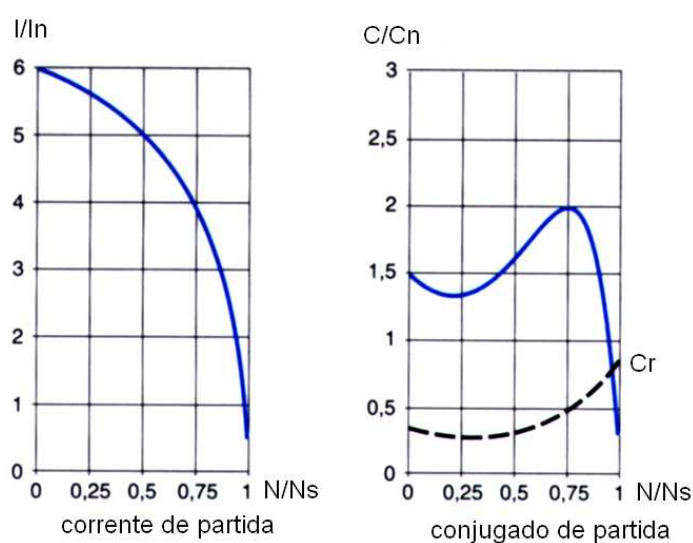


Figura 2.12 – Corrente e conjugado de partida durante a partida direta

Por esse motivo, as concessionárias de energia limitam o valor da potência do motor que pode ser acionado de forma direta, que geralmente é de 5CV.

Quando a carga permitir, a partida direta pode ser realizada a vazio, o que diminui o tempo de sobrecorrente no motor.



Figura 2.13 – Módulo TeSys U

O dispositivo de partida direta utilizado no laboratório é o *TeSys U*, fabricado pela *Telemecanique*, e consiste em um conceito de partida integrada com funções inteligentes de potência e controle em um único módulo. É composto por uma base de potência, por uma unidade de controle e por um módulo de comunicação [11] e pode ser observado na Figura 2.13.

2.2.5. Partida suave

Os *soft-starters* são dispositivos eletrônicos tiristorizados que proporcionam uma partida menos danosa ao sistema e ao motor, ajustando a tensão aplicada, e realizando um controle efetivo do conjugado [12]. É útil também para atividades nas quais se deseja aplicar desacelerações suaves, paradas controladas, reduzir quedas de tensões de linha e aperfeiçoar o funcionamento da máquina. É mais indicado para aplicações que não exijam controle de velocidade [13].

A Figura 2.14 ilustra o diagrama de funcionamento de um *soft-starter* [14], no qual um circuito de potência constituído por seis SCR's (*Silicon Controlled Rectifier*) controlam a tensão aplicada no motor.

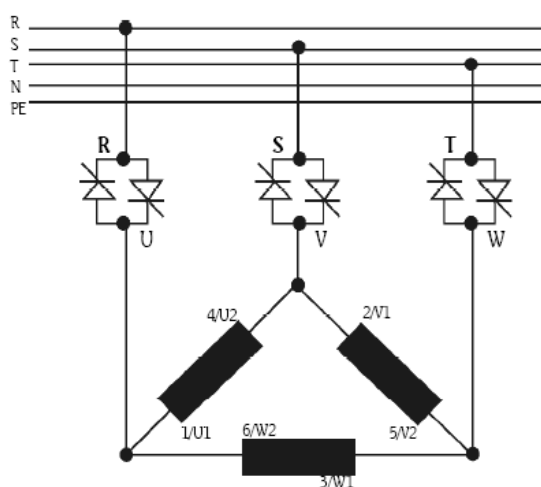


Figura 2.14 – Diagrama de funcionamento do *soft-starter*

O controle realizado pelo circuito de potência atua na variação do ângulo de disparo dos SCR's e na tensão aplicada nos terminais do motor (Figura 2.15), o que consequentemente limita a corrente de partida e o torque e evita quedas bruscas de tensão na rede de alimentação.

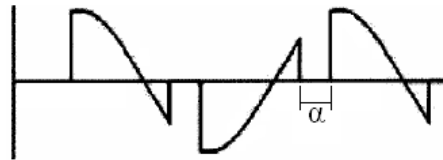


Figura 2.15 – Saída de tensão do SCR individual

O disparo do SCR não acontece imediatamente na passagem da tensão negativa para positiva, há um intervalo até que o SCR conduza efetivamente. Esse atraso é conhecido como “*phasing back*”.

Como o motor é indutivo, a corrente induz a tensão, o SCR permanece ligado e conduz até a corrente chegar a zero. Isto acontece após a tensão passar de negativo. A tensão e a corrente aplicadas nos terminais do motor apresentam forma não senoidal e a mesma frequência da tensão da rede [1], conforme pode ser observado na Figura 2.16.

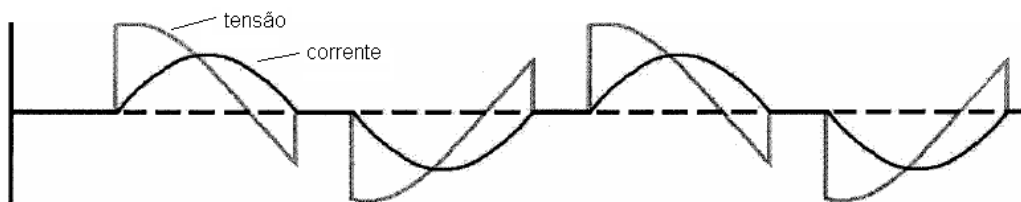


Figura 2.16 – Tensão e corrente aplicadas no motor – partida suave

Na Figura 2.17 é possível observar a comparação do comportamento da corrente durante a partida entre o *soft-starter* e a partida direta. É ilustrado também, em caráter ilustrativo, o comportamento da corrente para a partida com chave estrela triângulo, um dispositivo que altera a configuração das bobinas na partida a fim de reduzir a tensão em cada bobina.

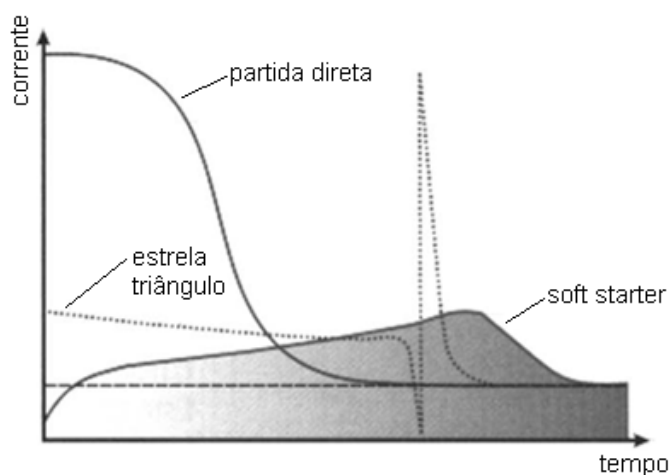


Figura 2.17 – Comparação do comportamento da corrente durante a partida

É possível observar a curva limitada pela área em cinza, correspondente à partida suave, na qual se percebe que a corrente pode atingir valor cerca de seis vezes menor ao da partida direta. Quando a partida é finalizada, o *soft-starter* pode então ser desconectado e a tensão nominal da rede é aplicada ao motor. Esse processo é conhecido como *by-pass*.

A partida utilizando-se *soft-starter* na bancada do ventilador é realizada através de um equipamento do fabricante *Telemecanique*, modelo *Altistart 48 – ATS 48D17Q* [15].

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

A seguir, a Figura 2.18 ilustra o modelo de *soft-starter* utilizado nos ensaios.



Figura 2.18 – Soft-starter utilizado nos ensaios

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.

2.2.6. Inversor de frequência

O crescente desenvolvimento de dispositivos comandados através de microprocessadores e microcomputadores, atrelado à necessidade de controle de velocidade em diversos setores da indústria proporcionou a utilização dos inversores de frequência. Esses dispositivos têm por objetivo realizar o controle de velocidade dos motores de indução trifásicos dentro de uma ampla faixa, mantendo as características de torque e corrente em condições ótimas [1].

A Figura 2.19 ilustra o funcionamento básico de um módulo inversor de frequência. Um retificador não controlado é alimentado pela tensão alternada da rede trifásica. Um filtro composto por capacitores promoverá o fluxo de potência reativa com o motor, além de diminuir as ondulações na tensão que foi retificada. Com o sinal CC (Corrente Contínua) proveniente do filtro, o inversor conectado ao retificador gera então uma onda de tensão com frequência variável. Esse processo é controlado por técnicas digitais, geralmente um PWM (*Pulse Wide Modulation*) que recebe os sinais de referência, compara com os sinais dos sensores e comanda os sinais de gatilho, controlando o tempo de condução dos semicondutores, e proporcionando a frequência adequada [1].

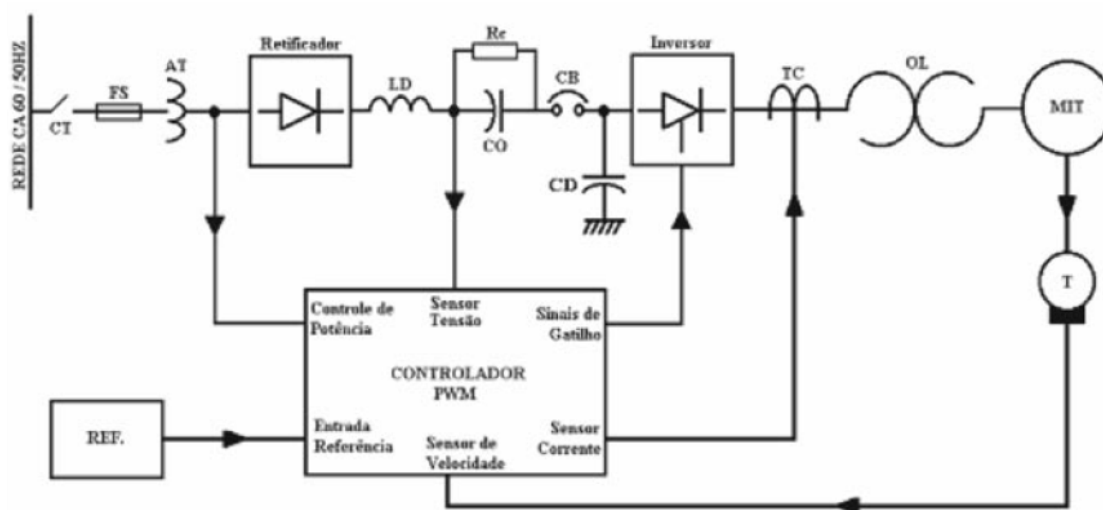


Figura 2.19 – Diagrama do inversor de frequência

A tensão aplicada nos terminais do motor poderá assumir diversos valores de frequência, que serão determinados de acordo com o PWM, e terá a forma de onda semelhante à ilustração da Figura 2.20.



Figura 2.20 – Formas de onda típicas de saída do inversor

Uma aplicação típica de eficiência energética através de inversores de frequência se dá no controle do fluxo de vazão de fluídos. Conforme pode ser observado no gráfico “pressão x vazão” presente na Figura 2.21, a partir de um mesmo valor de vazão, pode-se chegar a dois pontos de pressão distintos.

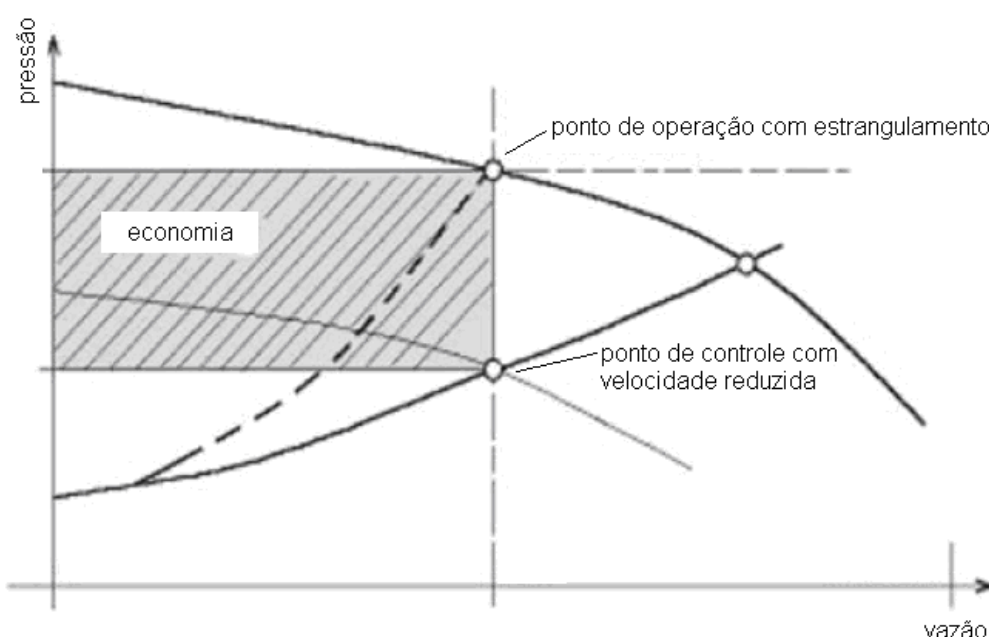


Figura 2.21 – Área proporcional à economia de energia

O ponto com maior valor de pressão corresponde à ausência de controle de velocidade (válvula de estrangulamento), enquanto que o ponto com menor valor de pressão corresponde ao uso do inversor de frequência.

A economia de energia é proporcional à área em cinza, na qual é possível observar que seu valor é considerável.

Além da vantagem no aspecto econômico, a utilização deste dispositivo de controle pode ser feita também na partida do motor, o que elimina a instalação de *soft-starter*, limita a corrente de partida, reduz os esforços mecânicos na tubulação e, conseqüentemente, aumenta a vida útil de todo o sistema.

O inversor de frequência utilizado na bancada de ensaios é o *Telemecanique* da linha *Altivar 31* – ATV 31HU11M3XA [16]. A Figura 2.22 ilustra o modelo do inversor de frequência utilizado.



Figura 2.22 – Inversor de frequência utilizado nos ensaios

2.3. Componentes do sistema supervisório

O sistema supervisório é o responsável por controlar e monitorar através de um computador todo o processo envolvido no funcionamento das bancadas. Pretende-se assim detalhar os procedimentos de manipulação do sistema, restringindo-se apenas aos aspectos operacionais, considerando-se que todas as configurações estejam adequadas.

2.3.1. Descrição do sistema supervisório

O controle de todo o processo das bancadas de ensaio é realizado pelo sistema supervisório *Indusoft Web Studio 6.1*. Cada bancada dispõe de um computador que permite o acesso a qualquer um dos sistemas industriais disponíveis, através da rede de dados *Ethernet* [17]. A Figura 2.23 mostra a tela inicial do sistema supervisório.



Figura 2.23 – Tela inicial do sistema supervisório

Quando o *log on* é efetuado, o *software* oferece ao usuário a entrada a todos os sistemas industriais disponíveis no laboratório. A Figura 2.24 ilustra a tela de escolha.



Figura 2.24 – Tela de escolha de sistemas industriais

Escolhendo-se a opção “ventilador”, o programa disponibilizará na tela todos os dispositivos de acionamento, controle e monitoramento do sistema de ventilação, conforme ilustra a Figura 2.25.

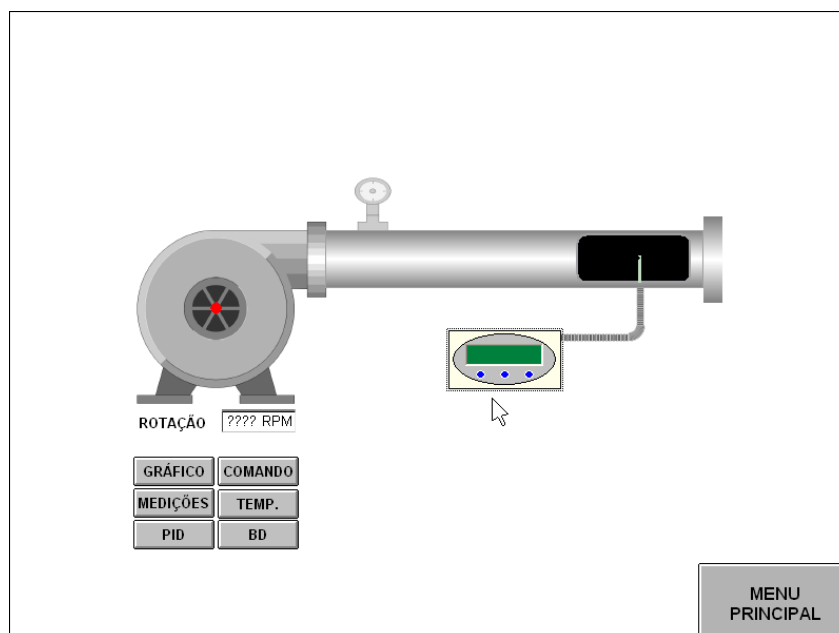


Figura 2.25 – Tela inicial da bancada do ventilador

Percebe-se, nessa tela, um indicador de rotação do motor, expresso em rpm; e um indicador dos parâmetros físicos do ar na saída do ventilador (vazão, temperatura e velocidade), que são mostrados ao se clicar no indicador, conforme Figura 2.26.



Figura 2.26 – Indicador de velocidade, temperatura e vazão do ar

Além disso, há seis botões que disponibilizam as funcionalidades mostradas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Funcionalidades da tela da bancada do ventilador

Botão	Ação
COMANDO	Abre a tela “Comando do Ventilador”
MEDIÇÕES	Abre a tela “Grandezas Elétricas – Ventilador”
TEMP	Abre a tela “Temperatura do Motor – Ventilador”
GRÁFICO	Abre a tela “Gráfico do Ventilador”
BD	Abre a tela “Banco de Dados”
PID	Abre a tela PID

Botão “Gráfico”

O botão “Gráfico” disponibiliza as curvas de vários parâmetros do ventilador, como tensões de fase, correntes e pressão. A Figura 2.27 ilustra essa funcionalidade.

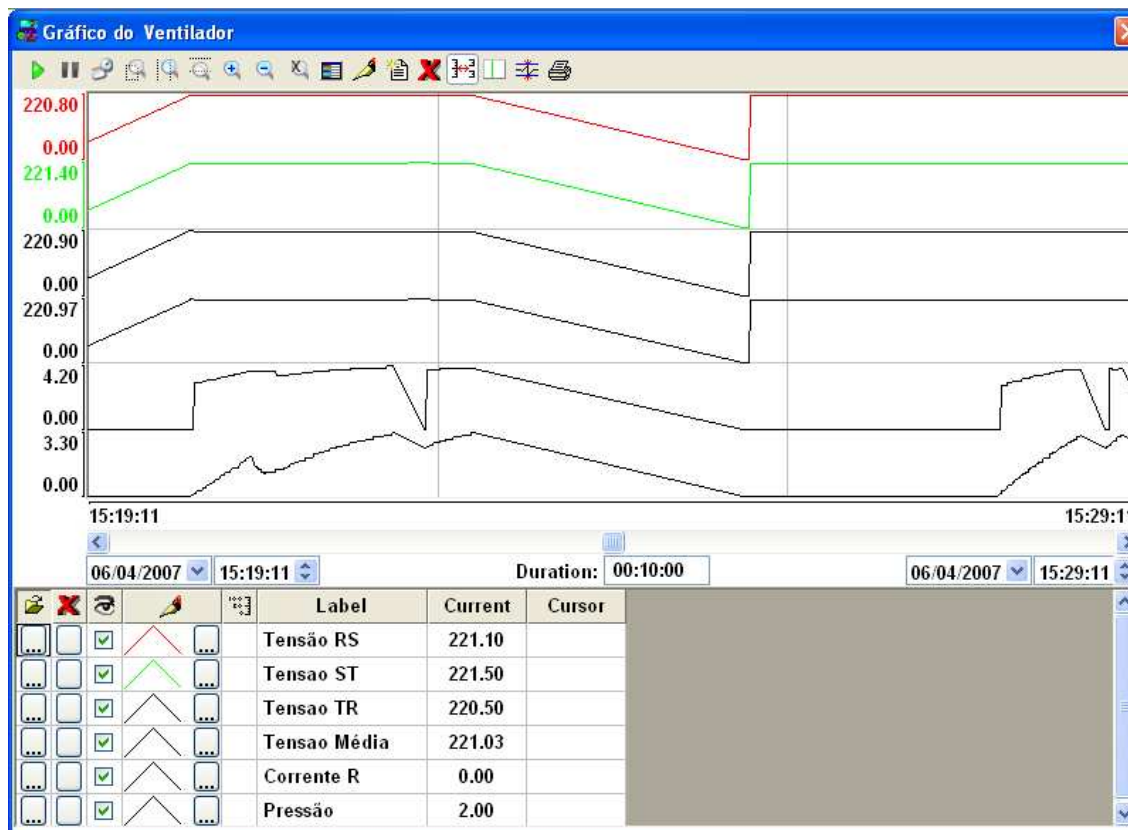


Figura 2.27 – Funcionalidade do botão “Gráfico”

Botão “Comando”

O botão “Comando” disponibiliza as seguintes funcionalidades:

- Escolha da Partida: *TeSys* (partida direta), *soft-starter*, ou inversor de frequência;
- Comando: LIGA, DESLIGA e RESET;
- ACC: Tempo da partida em segundos (disponível apenas para acionamento com inversor de frequência ou *soft-starter*);
- DCC: Tempo de desaceleração em segundos (disponível apenas para acionamento com inversor de frequência ou *soft-starter*);
- VELOCIDADE: Frequência do inversor de frequência (disponível apenas para acionamento com inversor de frequência).

A Figura 2.28 ilustra essas funcionalidades:



Figura 2.28 – Funcionalidade do botão “Comando”

Botão “Medições”

O botão “Medições” disponibiliza a leitura das seguintes grandezas:

- Tensão: Tensão de linha das três fases;
- Corrente: Corrente das três fases, do neutro e a corrente média;
- Demanda;
- Fator de Potência: Fator de Potência nas três fases e a média;
- Harmônicos: THD (*Total Harmonic Distortion*) de tensão entre fases e fase-neutro, THD de corrente nas fases e neutro.
- Potências: Potência ativa, reativa e aparente por fase e total;
- Energia: Energia ativa, reativa e aparente;
- Frequência: Frequência da tensão de alimentação.

A Figura 2.29 ilustra essas funcionalidades:



Figura 2.29 – Funcionalidade do botão “Medições”

Botão “Temp”

O botão “Temp.” Disponibiliza a leitura das temperaturas das bobinas do motor (cada fase individualmente) e a temperatura da carcaça. A temperatura indicada é corresponde ao motor acoplado no sistema.

A Figura 2.30 ilustra essas funcionalidades:

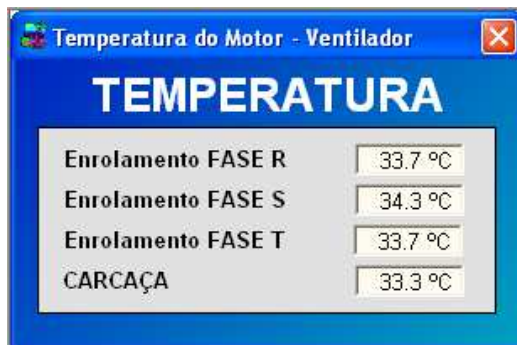


Figura 2.30 – Funcionalidade do botão “Temp.”

Botão “PID”

O botão “PID” disponibiliza as seguintes funções:

- Automático: este item sendo selecionado, o controlador PID irá buscar a velocidade do ar pré-determinada no sistema no item SP (*Set Point*) controlando a abertura e fechamento do *damper* automaticamente;
- Manual: este item sido selecionado, o *damper* poderá ser aberto ou fechado conforme determinado no espaço MV (*Manipulated Variable*);
- P: determina a 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* indica o valor da velocidade do ar pré-determinado pelo usuário. Este espaço só irá interferir no sistema se o controle do *damper* for automático;
- PV-1: *Process Variable* indica o valor atual da velocidade do ar no sistema;
- PV-2: *Process Variable* indica o valor atual da vazão de ar no sistema;
- MV: *Manipulated Variable* indica o valor atual da abertura do *damper* em porcentagem.

A Figura 2.31 ilustra essas funcionalidades:



Figura 2.31 – Funcionalidade do botão “PID”

Botão “BD”

O botão “BD” disponibiliza a consulta a todos os parâmetros que são coletados pelos medidores do sistema, e enviados a um banco de dados. A aquisição de dados é feita a cada 250 ms, ou seja, há 4 medições de cada parâmetro para cada segundo de operação do sistema.

A Figura 2.32 ilustra essas funcionalidades:

ID	Data	Hora	Tensão RS	Tensão ...△	Tensão TR	Tensão Média	Corrente R	Co
1	04/06/2007	15:03:07	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
2	04/06/2007	15:03:07	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
3	04/06/2007	15:03:07	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
4	04/06/2007	15:03:07	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
5	04/06/2007	15:03:08	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
6	04/06/2007	15:03:08	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
7	04/06/2007	15:03:09	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
8	04/06/2007	15:03:09	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
9	04/06/2007	15:03:09	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
10	04/06/2007	15:03:10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
11	04/06/2007	15:03:10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
12	04/06/2007	15:03:10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
13	04/06/2007	15:03:10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
14	04/06/2007	15:03:11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
15	04/06/2007	15:03:11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
16	04/06/2007	15:03:11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
17	04/06/2007	15:03:11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
18	04/06/2007	15:03:12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
19	04/06/2007	15:03:12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	

Figura 2.32 – Funcionalidade do botão “BD”

2.3.2. Medidor de energia

O medidor de energia utilizado no laboratório é um equipamento multifuncional. É um instrumento digital e possui dispositivo de controle e aquisição de dados. Ele é equipado com comunicação RS 485 para integrar sistemas de controle e monitoramento.

A Figura 2.33 indica cada componente do *display* do medidor. Através desse *display*, várias informações poderão ser acessadas. A maioria delas será acessada via supervisorio.

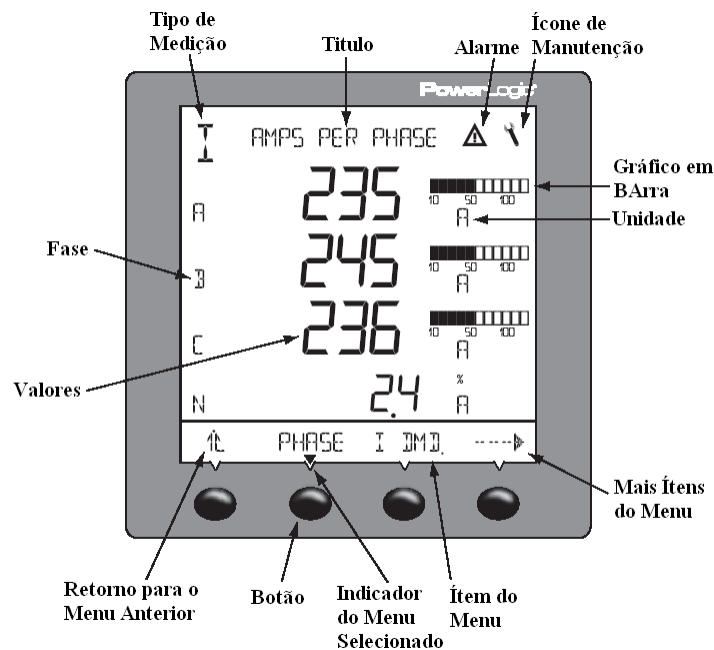


Figura 2.33 – Detalhes do *display* do medidor

2.3.3. Sensores e atuadores

Sensores

Os sensores são dispositivos responsáveis por detectar um sinal de uma grandeza física e convertê-la em um sinal de corrente ou tensão elétrica. O sistema de ventilação possui dois sensores e suas características básicas podem ser observadas a seguir:

- Velocidade e temperatura do ar: Fabricante KIMO, modelo CTV 200. Esse é um sensor que indica e transmite para o CLP o valor da velocidade e temperatura do ar na saída da tubulação. A transmissão é realizada através de corrente elétrica no padrão 4 a 20 mA. O intervalo de medição de velocidade está configurado para medição de 0 a 20 m/s e o intervalo de medição de temperatura é de 0 a 50°C.
- Encoder: Hohner - TH22R4500. Esse é um sensor de velocidade de rotação. Ele transmite o valor para o CLP no padrão 4-20mA.

Atuadores

Os atuadores realizam alguma interferência em uma grandeza física a partir de um comando elétrico, geralmente um movimento mecânico. O sistema de ventilação possui um atuador no *damper* e suas características básicas podem ser observadas a seguir:

- *Damper*: Fabricante BELIMO, modelo LM24-SR-T-2.0 US. Esse equipamento é responsável pelo controle de fluxo de ar na tubulação através da sua abertura e fechamento. Ele é controlado pelo CLP através do padrão de alimentação de 2 a 10 V CC.

2.4. Conclusões parciais

Dessa forma, a partir do detalhamento do ventilador, dos motores, equipamentos, bancada de ensaios e do *software* apresentado neste capítulo é possível observar que o conjunto de dispositivos apresentados consiste em um sistema de ventilação completo semelhante aos existentes nas indústrias, no qual é possível realizar com segurança seu controle, verificar seu comportamento e armazenar todo o banco de dados dos ensaios. Logo, verifica-se que é possível iniciar a investigação no sistema de ventilação disponível no laboratório.

3. Análise de sistemas de ventilação

3.1. Introdução

Os ventiladores surgiram devido a necessidades pertinentes às mais diversas atividades industriais e comerciais, como: aeração de ambientes (banheiros, elevadores, barcos, canhões e anéis de extrusoras), transportes pneumáticos, cortina de ar, rebobinadeiras, secagem e estufas. Podem também ser utilizados para eliminação de agentes poluentes e contaminantes que podem ser prejudiciais ou afetar o conforto dos indivíduos que operam nesses ambientes. Além disso, um sistema de ventilação adequado pode realizar a troca de elementos gasosos e atuar na umidade e na temperatura do ambiente [18]. Nesse contexto, pretende-se apresentar os sistemas de ventilação, a classificação dos ventiladores, suas curvas características e os fatores que influenciam no comportamento desses equipamentos.

3.2. Princípios de funcionamento

O princípio básico de funcionamento de um ventilador é o deslocamento de elementos gasosos através de uma transformação de energia. Os principais componentes de um ventilador são o rotor e a carcaça. O rotor corresponde ao elemento dinâmico, no qual se encontram as pás que promovem o deslocamento do fluido realizando um movimento circular dentro da carcaça. A carcaça é o elemento estático que guia o ar antes e depois do rotor. As principais estruturas de um ventilador podem ser observadas na Figura 3.1.

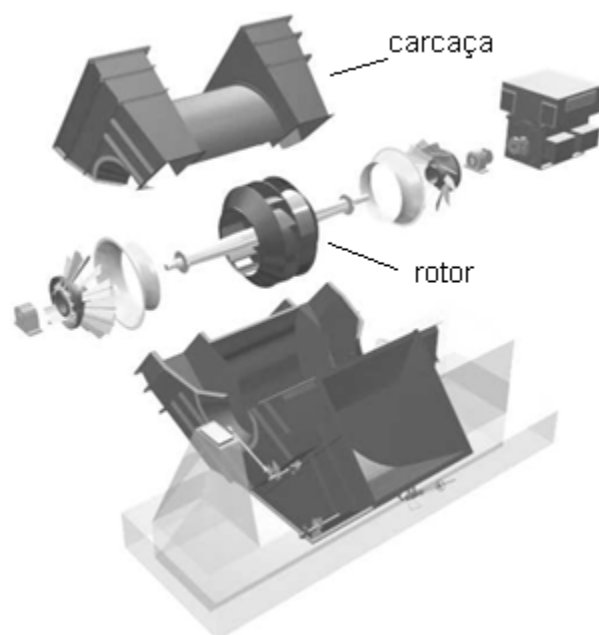


Figura 3.1 – Principais componentes de um ventilador

Um motor conectado à rede elétrica aciona o rotor do ventilador, transformando a energia mecânica fornecida ao eixo do rotor em energia potencial de pressão e cinética, que ocasionará na movimentação fluido. A Figura 3.2 ilustra esse processo.

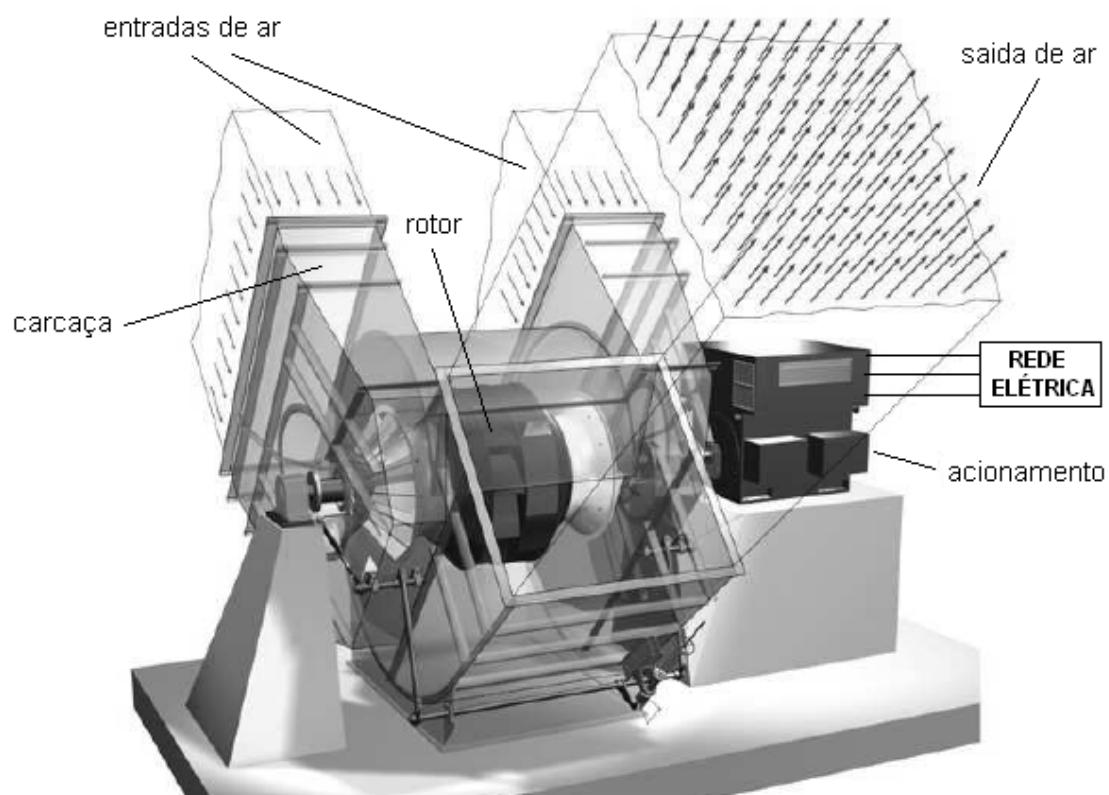


Figura 3.2 – Princípio de funcionamento de um ventilador

3.3. Critérios de classificação

Os ventiladores são classificados de acordo com diversos critérios, conforme descrito a seguir [1]:

- **A pressão de operação**

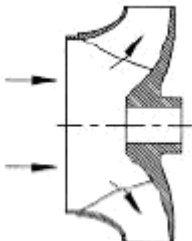
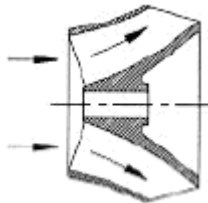
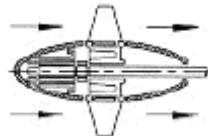
Tabela 3.1 – Classificação dos ventiladores de acordo com a pressão de operação

Classificação	Característica
Baixa pressão	Até 0,02 kgf/cm ²
Média pressão	Entre 0,02 kgf/cm ² e 0,08 kgf/cm ²
Alta pressão	Entre 0,08 kgf/cm ² e 0,2 kgf/cm ²

Obs. Equipamentos que operam com valores de pressão acima de 0,2 kgf/cm² são turbocompressores e não serão abordados neste trabalho.

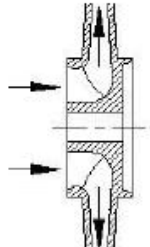
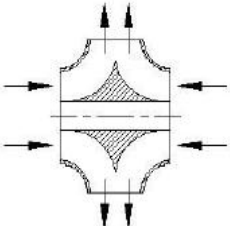
- **A forma do rotor**

Tabela 3.2 – Classificação dos ventiladores de acordo com a forma do rotor

Classificação	Característica	Diagrama de fluxo	Ilustração
Centrífugos	Baixas vazões Altas pressões		
Fluxo misto	Médias pressões Médias vazões		
Axiais	Grandes vazões Baixas pressões		

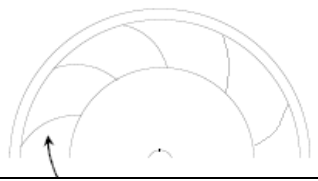
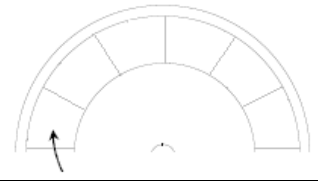
▪ **O modo de entrada do fluido no rotor**

Tabela 3.3 – Classificação dos ventiladores de acordo com o modo de entrada de fluido

Classificação	Característica	Diagrama de fluxo	Ilustração
Simples sucção	Uma entrada de fluido		
Dupla sucção	Duas entradas de fluido Opera o dobro da vazão Opera com um motor		

▪ **A posição das pás do rotor**

Tabela 3.4 – Classificação dos ventiladores de acordo com a posição das pás do rotor

Classificação	Característica	Ilustração
Pás curvadas para trás	Pás aerodinâmicas Estabilidade Baixo ruído Rendimento entre 80% e 90%	
Pás retas	Construção simples Rendimento inferior a 70% Médias pressões	
Pás curvadas para frente	Baixo ruído Rendimento de até 70% Baixa rotação Elevadas pressões Utilizado em ar condicionado	

3.4. Características dos ventiladores

As principais características inerentes ao funcionamento dos ventiladores são a vazão e a pressão e estão ligadas diretamente à potência do ventilador.

3.4.1. Vazão

A vazão é uma grandeza definida pela relação entre o volume de fluido deslocado e o tempo de deslocamento do fluido. No Sistema Internacional – SI, a unidade utilizada para a vazão é m³/s. A vazão pode ser alterada ou controlada a partir de diversos dispositivos durante o funcionamento do ventilador, como *damper* e inversor de frequência, porém, o maior rendimento é obtido apenas para a vazão nominal especificada para o ventilador [1], [19].

3.4.2. Pressão

A pressão é uma grandeza definida pela relação entre uma força qualquer e a área de atuação dessa força. No sistema internacional, a unidade utilizada para a pressão é N/m², equivalente a Pa (Pascal). Entretanto, para os ventiladores, as pressões geralmente aparecem em milímetros de coluna d'água (mmca) ou em metros de coluna d'água (mca) [1].

A pressão total pode ser dada pela Equação 3.1.

$$P_t = P_e + P_d \quad (3.1)$$

Onde,

P_t [N/m²] Pressão total;
 P_e [N/m²] Pressão estática;
 P_d [N/m²] Pressão dinâmica.

A pressão estática é a pressão manométrica em um determinado ponto de escoamento. A pressão dinâmica é a pressão devido à velocidade média de escoamento em uma determinada posição [20] e pode ser dada pela Equação 3.2.

$$P_d = \rho \frac{v^2}{2} \quad (3.2)$$

Onde,

ρ [kg/m³] Massa específica do ar;
 v [m/s] Velocidade média de escoamento.

Existem dois cenários em que é relevante a observação da diferença de pressão. O primeiro é sob o ponto de vista do ensaio e o segundo sob o ponto de vista da instalação [19]. Considera-se o seguinte sistema de ventilação:

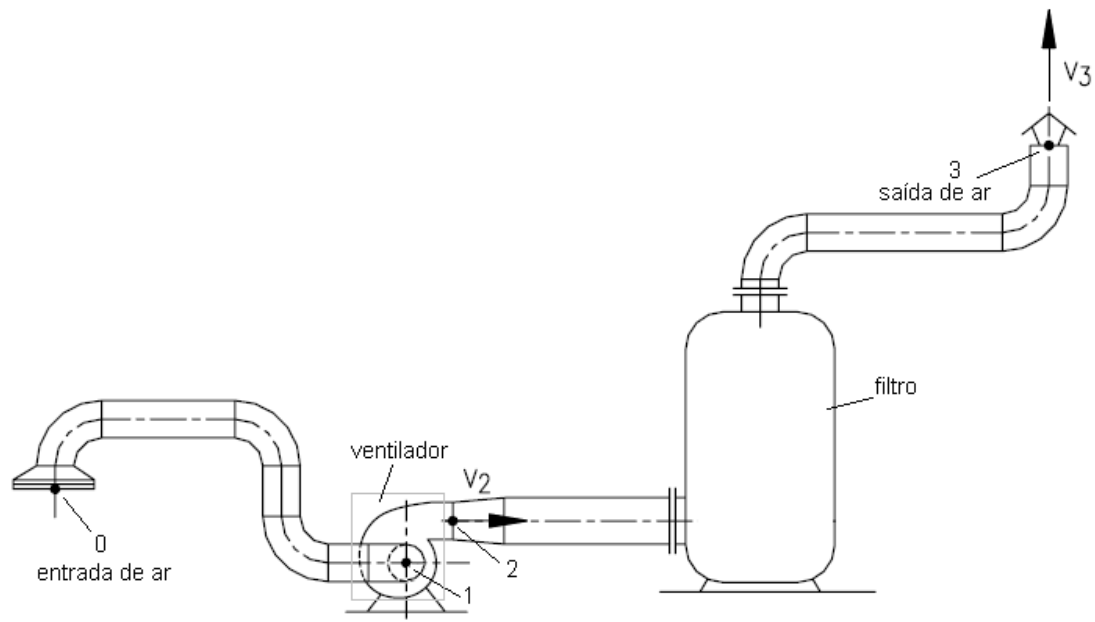


Figura 3.3 – Sistema de ventilação típico

O ar entra na tubulação, passa pelo ventilador e, em seguida, é direcionado ao filtro, no qual posteriormente será eliminado pela saída da tubulação.

A Equação 3.3 do ventilador está relacionada unicamente com os aspectos de especificação do ventilador sob o ponto de vista do ensaio [1] e compreende os pontos de entrada e saída de ar do ventilador (pontos 1 e 2).

$$\Delta p_t = p_{t2} - p_{t1} = \Delta p_e + \Delta p_d \quad (3.3)$$

Onde,

Δp_t [N/m²] Diferença de pressão total do ventilador;

p_{t1}, p_{t2} [N/m²] Pressões totais na entrada e saída, respectivamente;

Δp_e [N/m²] Diferença de pressão estática entre saída e entrada do ventilador;

Δp_d [N/m²] Diferença de pressão dinâmica entre saída e entrada do ventilador.

A Equação 3.4 está relacionada aos aspectos construtivos da instalação do ventilador sob o ponto de vista da instalação e compreende os pontos de entrada e saída (pontos 0 e 3).

$$\Delta p_t = \rho \cdot \frac{v_3^2}{2} + \Delta p_d + \Delta p_l \quad (3.4)$$

Onde,

ρ	[Kg/m ³]	Massa específica do fluído;
v_3	[m/s]	Velocidade média de escoamento no ponto 3;
Δp_d	[N/m ²]	Perda de carga distribuída;
Δp_l	[N/m ²]	Perda de carga localizada.

As perdas de carga distribuídas ocorrem devido ao atrito entre as partículas fluidas com as paredes do tubo, em um trecho reto de tubulação [19]. Assim, a perda de carga distribuída é calculada através da Equação 3.5.

$$\Delta p_d = \rho \cdot g \cdot H_p = \rho \cdot g \cdot \left(f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \right) \quad (3.5)$$

Onde,

H_p	[m]	Perda de carga distribuída;
g	[m/s ²]	Aceleração da gravidade;
f	[-]	Coefficiente de atrito;
L	[m]	Comprimento da tubulação;
D	[m]	Diâmetro interno do conduto circular;
v	[m/s]	Velocidade média de escoamento.

O fator f é um coeficiente sem dimensões, que é determinado em função do número de Reynolds (Re), conforme a Tabela 3.5 [19].

Tabela 3.5 – Determinação do coeficiente de atrito

Característica	Coefficiente de atrito
Escoamento laminar, tubo de qualquer rugosidade $0 < Re < 2.000$	$f = \frac{64}{Re}$
Escoamento turbulento, tubo liso Re até 105	$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$
Escoamento turbulento, tubo de rugosidade comercial $Re > 4.000$	$f = \left[2 \cdot \log \left(0,27 \cdot \frac{\varepsilon}{D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{0,4 \cdot (Re)^{-0,3} + 0,0053}} \right) \right]^{-2}$

Onde,

Re	[-]	Número de Reynolds;
------	-----	---------------------

ε [m] Rugosidade absoluta da parede do conduto;

Os valores de rugosidade das paredes dos condutos para alguns materiais são apresentados na Tabela 3.6 [19].

Tabela 3.6 – Rugosidade absoluta para alguns materiais novos

Material	Rugosidade absoluta – ε[m]
Chapa de aço galvanizado	0,00015 – 0,00020
Chapa de aço soldada	0,00004 – 0,00006
Ferro fundido	0,0004
Plástico e vidro	Lisos

O número de Reynolds está relacionado com o perfil de escoamento do fluido e para condutos circulares pode ser determinado através da Equação 3.6.

$$Re = \frac{\rho \cdot D \cdot v}{\mu} = \frac{D \cdot v}{\nu} \quad (3.6)$$

Onde,

μ [Pa.s] Viscosidade absoluta;

ν [m²/s] Viscosidade cinemática;

Os valores de massa específica, viscosidade absoluta e viscosidade relativa do ar entre as temperaturas de 0°C e 50°C pode ser observado na Tabela 3.7 [19].

Tabela 3.7 – Massa específica, viscosidade absoluta e viscosidade relativa do ar

Temperatura [°C]	Massa específica [kg/m³]	Viscosidade absoluta 10⁵[Pa.s]	Viscosidade Cinemática 10⁻⁵[m²/s]
0	1,293	2,299	1,778
10	1,247	2,208	1,771
20	1,204	2,189	1,818
30	1,164	2,172	1,865
40	1,127	2,155	1,912
50	1,092	2,140	1,959

As perdas de carga localizadas são perdas de pressão pelas peças e singularidades ao longo do conduto, tais como curvas, válvulas, derivações, reduções e expansões. Uma das maneiras de se determinar as perdas localizadas é através do coeficiente k determinado experimentalmente para cada peça ou acessório do conduto

[19]. Os dispositivos mais utilizados possuem os valores de k definidos na literatura relacionada ao assunto. Assim, a perda de carga localizada de um acessório é calculada através da Equação 3.7.

$$\Delta p_l = k \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (3.7)$$

Onde,

k [-] Coeficiente de perda.

3.4.3. Potência hidráulica

A potência hidráulica é determinada através do produto entre a vazão e a diferença de pressão total do ventilador, conforme Equação 3.8 [1].

$$Ph = \Delta p_t \cdot V \cdot 10^{-3} \quad (3.8)$$

Onde,

Ph [kW] Potência hidráulica;

V [m³/s] Vazão volumétrica.

3.4.4. Rendimento total do sistema

A relação entre a potência hidráulica útil e a potência elétrica de entrada do sistema de ventilação fornece o rendimento total do sistema. Dessa forma, estão incluídas na determinação do rendimento todas as perdas do sistema, como as perdas no motor, no acoplamento e no ventilador. Este é um indicador essencial para o estudo de eficiência energética e pode ser determinado pela Equação 3.9.

$$\eta_t = \frac{Ph}{Pel} \quad (3.9)$$

Onde,

η_t [%] Rendimento total do sistema;

Ph [kW] Potência hidráulica;

Pel [kW] Potência elétrica de entrada.

3.5. Rotação específica

A rotação específica define qual será o tipo de rotor do ventilador mais adequado. Dessa forma, a rotação específica pode ser dada pela Equação 3.10 [1].

$$nq_A = \frac{10^3 \cdot n \cdot \sqrt{Q}}{\left(\frac{\Delta p_t}{\rho}\right)^{3/4}} \quad (3.10)$$

Onde,

nq_A	[-]	Rotação específica;
n	[rps]	Rotação;
Q	[m³/s]	Vazão;
ρ	[Kg/m³]	Massa específica do fluído;
Δp_t	[N/m²]	Diferença de pressão total do ventilador.

A Figura 3.4 ilustra as rotações específicas para os ventiladores de acordo com a forma do rotor.

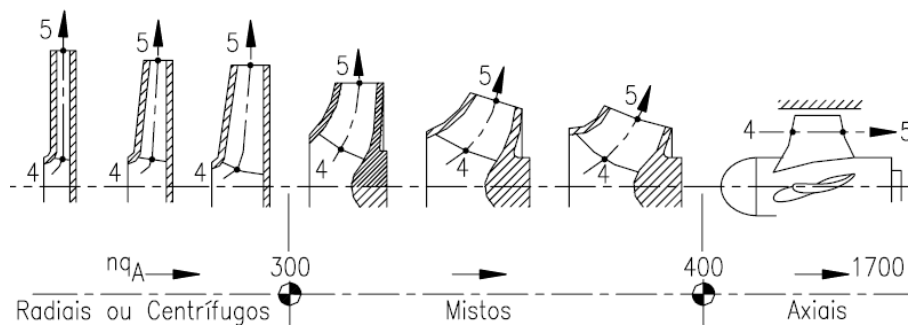


Figura 3.4 – Rotações específicas para os ventiladores

3.6. Curvas características

3.6.1. Curvas características dos ventiladores

As curvas características dos ventiladores devem ilustrar o comportamento de grandezas como a potência elétrica, rendimento do ventilador e pressão, além de mostrar a curva característica da instalação. Um sistema de ventilação típico apresenta as curvas de características observadas na Figura 3.5.

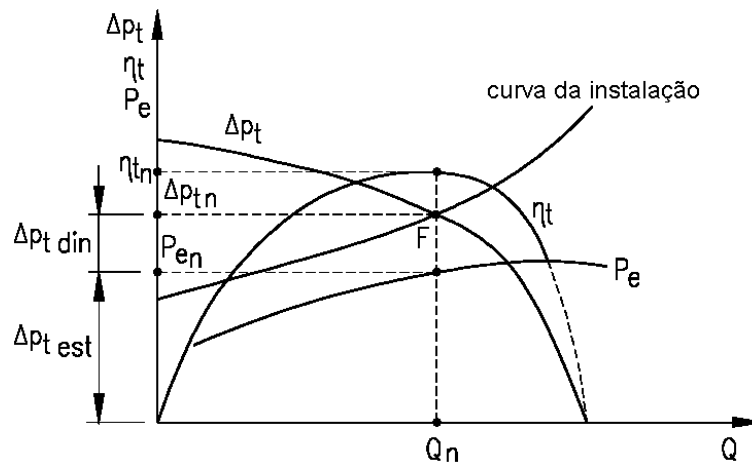


Figura 3.5 – Curvas características para um sistema de ventilação típico

O ponto F indica o ponto de funcionamento nominal do ventilador que coincide com a condição de máximo rendimento e também com todas as condições nominais de funcionamento. Para casos em que há variação de vazão durante a operação do ventilador, cabe ao projetista estudar a instalação na qual será aplicado o ventilador e verificar qual o valor de vazão operará por maior período [1]. O máximo rendimento do ventilador especificado deverá estar próximo da operação para esse valor de vazão. Considera-se que a rotação do ventilador mantenha-se constante durante as observações, pois alterações na rotação ocasionam variações nas curvas características. Os fatores que modificam as curvas características serão abordados nos tópicos seguintes.

As curvas de comportamento dos ventiladores apresentam características diferenciadas em função da forma construtiva. Na Figura 3.6 é possível observar o comportamento da diferença de pressão, potência no eixo e rendimento do ventilador em função da vazão volumétrica.

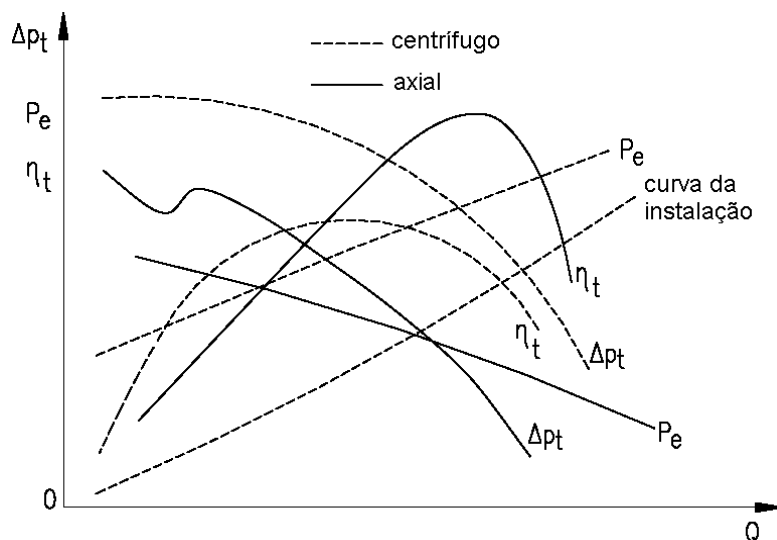


Figura 3.6 – Curvas características dos ventiladores para rotação constante

Observando-se o comportamento da potência percebe-se que: para ventiladores centrífugos, seu valor aumenta de acordo com o aumento da vazão; para ventiladores axiais, a potência decresce com o aumento da vazão. No que diz respeito ao momento da partida, é preferível a situação em que consumir da fonte alimentadora a menor quantidade de potência, a fim de evitar um grande consumo de energia na partida e danos à instalação devido à corrente elevada. Sendo assim, infere-se que para ventiladores centrífugos a menor potência é verificada para menores valores de vazão, o que sugere que a partida seja executada com a válvula fechada. No entanto, para ventiladores axiais a partida deverá ser executada com a válvula aberta, o que proporciona maiores valores de vazão e menor valor de potência consumida, reduzindo os danos da partida do motor [19].

Além dos aspectos relacionados à potência consumida, é possível verificar nessas curvas o comportamento do rendimento. Para os ventiladores centrífugos, a curva de rendimento permanece quase constante para um grande intervalo de vazão. Grandes variações são observadas nos pontos de vazão muito baixos (próximos de zero) ou muito altos. Para os ventiladores axiais, há apenas uma pequena região de rendimento máximo. Para qualquer valor de vazão distante desse valor o rendimento será comprometido consideravelmente. A Tabela 3.8 sintetiza essas conclusões.

Tabela 3.8 – Características dos ventiladores

Ventilador	Comportamento	Válvula de saída na partida	Curvas características
Centrífugo	Baixa potência para baixos valores de vazão	Fechada	
Misto	Potência mantém comportamento praticamente constante	Fechada ou aberta	
Axial	Baixa potência para elevados valores de vazão	Aberta	

3.6.2. Curva característica da instalação

Observando-se a Figura 3.5, é possível verificar que a curva da instalação apresenta uma característica quadrática em função da vazão, ou seja, é proporcional ao quadrado da vazão (ou também da velocidade). A Equação 3.11 representa a diferença de pressão total.

$$\Delta p_t = \rho \cdot \frac{V^2}{2A^2} + \rho \cdot g \cdot H_p = f(v^2) \quad (3.11)$$

Onde,

- Δp_t [N/m²] Diferença de pressão total do ventilador;
- ρ [Kg/m³] Massa específica do fluído;
- V [m/s] Velocidade média de escoamento no ponto 3;
- A [m²] Área da seção;
- g [m/s²] Aceleração da gravidade;
- H_p [m] Perda de carga na linha.

3.7. Fatores que modificam as curvas características

3.7.1. Fatores que modificam a curva do ventilador

Operação com rotação variável

As Equações 3.12(a), 3.12(b) e 3.12(c), conhecidas como leis de afinidade, podem ser utilizadas para pontos homólogos (de mesmo rendimento) e representam a variação da vazão, da diferença de pressão e da potência no eixo de um ventilador em função da variação da rotação.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} \text{ (a); } \frac{\Delta p_{t2}}{\Delta p_{t1}} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \text{ (b); } \frac{P_{e2}}{P_{e1}} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \text{ (c).} \quad (3.12)$$

A Figura 3.7 ilustra o gráfico da diferença de pressão, rendimento e potência no eixo do ventilador em função da vazão.

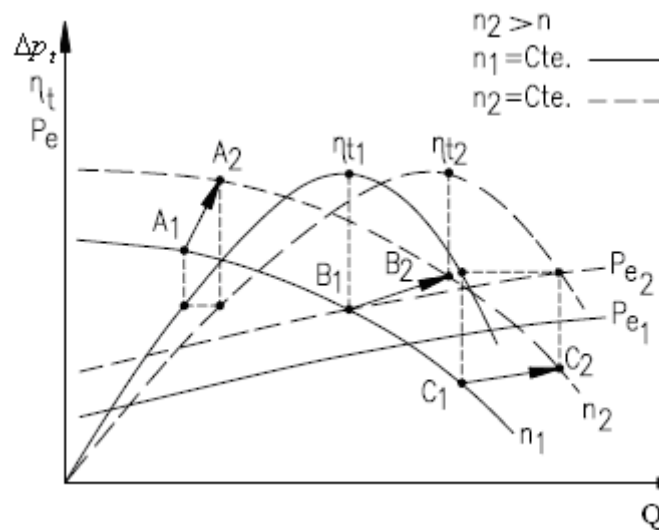


Figura 3.7 – Influência da rotação nas curvas características de um ventilador

Dentro de certos limites de variação de rotação, as Equações 3.12 podem prever o comportamento do ventilador, considerando que o rendimento não varia de ponto para ponto, como foi mostrado na Figura 3.7. Entretanto, no projeto de ventiladores, a alteração da rotação acarreta a mudança da velocidade tangencial em qualquer raio entre entrada e saída do rotor dos mesmos. Esta modificação faz-se alterar outras velocidades envolvidas no escoamento e a queda de rendimento existe. Desta forma, para se ter um resultado de um ventilador com variação de rotação, ele deve ser obtido através de ensaios em bancadas de testes em laboratórios especializados. Os diagramas obtidos em laboratório representam o campo de um determinado ventilador com uma faixa de rotação, mostrando as curvas de mesmo rendimento. Esses diagramas são denominados

campos básicos de funcionamento. A Figura 3.8 representa o campo básico de um ventilador centrífugo e a Figura 3.9 representa o campo básico de um ventilador axial.

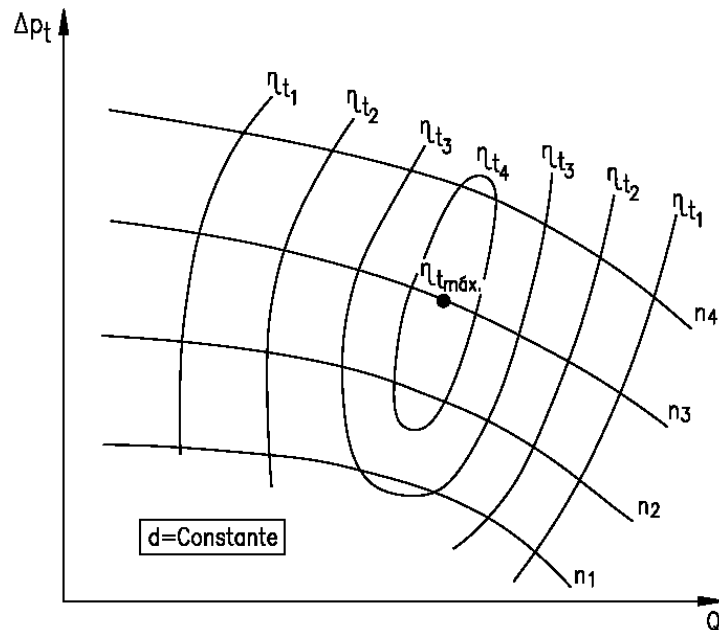


Figura 3.8 – Campo básico de funcionamento de um ventilador centrífugo.

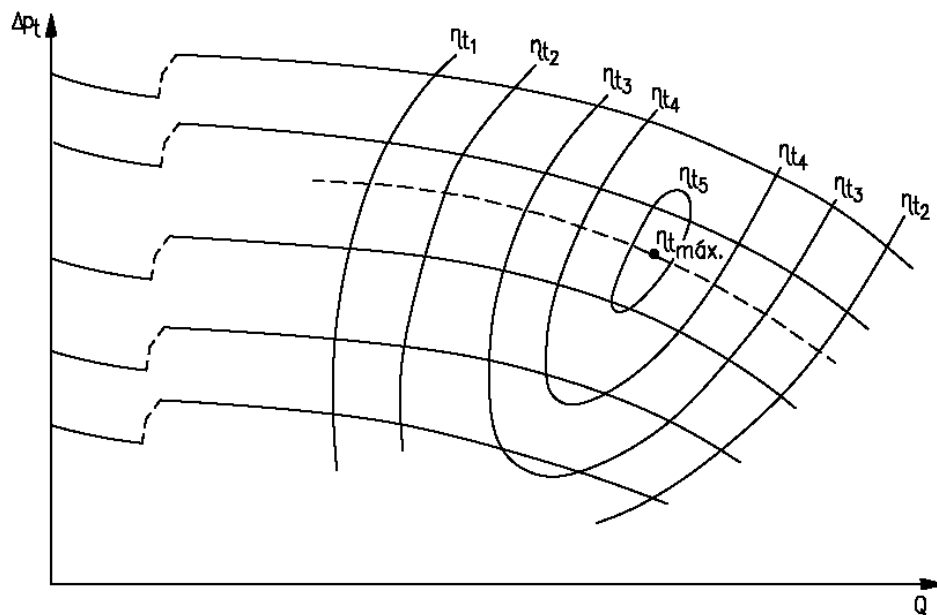


Figura 3.9 – Campo básico de funcionamento de um ventilador axial.

As curvas n_1 , n_2 , n_3 , n_4 e n_5 representam as curvas de mesma rotação, enquanto as curvas de η_{t1} , η_{t2} , η_{t3} , η_{t4} e η_{t5} representam as curvas de mesmo rendimento. O rendimento máximo ocorre no centro da elipse. Este ponto representa o melhor ponto de operação do ventilador.

Variação do diâmetro do rotor do ventilador

Para ventiladores centrífugos operando com rotação constante e com variação de diâmetro, têm-se as relações obtidas experimentalmente descritas na Equação 3.13 [1].

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{d_2}{d_1} ; \frac{\Delta p_{t2}}{\Delta p_{t1}} = \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 ; \frac{Pe_2}{Pe_1} = \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^3 \quad (3.13)$$

Onde,

d_1 [m] Diâmetro na saída do rotor do ventilador para a situação 1;

d_2 [m] Diâmetro na saída do rotor do ventilador para a situação 2.

Os ventiladores são fabricados de forma que possam receber rotores com diâmetros diferenciados, de forma que atenda aos intervalos operacionais de acordo com a necessidade da aplicação. A Figura 3.10 mostra um campo básico de funcionamento de um ventilador centrífugo de um determinado fabricante, com rotores de diâmetro variável operando dentro de uma mesma carcaça de rotação constante.

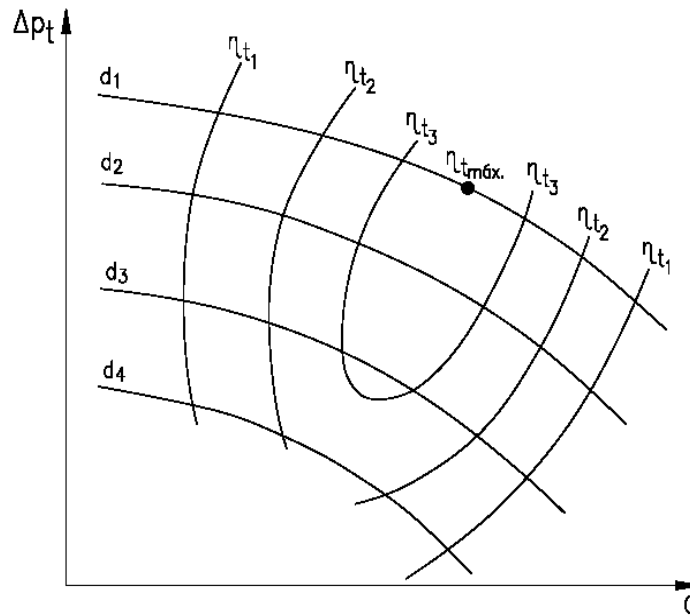


Figura 3.10 – Campo de um ventilador com variação no diâmetro do rotor

3.7.2. Fatores que modificam a curva da instalação

Um dos fatores que modifica a curva da instalação dos ventiladores é a utilização de *damper* (válvula) como controle de vazão e com rotação constante. O ventilador mantém suas características e sua curva de desempenho; entretanto, ao se alterar a posição do *damper*, a fim de promover o controle de vazão, as características

da instalação são alteradas. Com a redução da vazão, há um acréscimo na variação da pressão e para cada valor de vazão há uma curva da instalação.

A Figura 3.11 ilustra essa situação, onde ao se reduzir a vazão de Q_1 para Q_2 há uma elevação na variação de pressão.

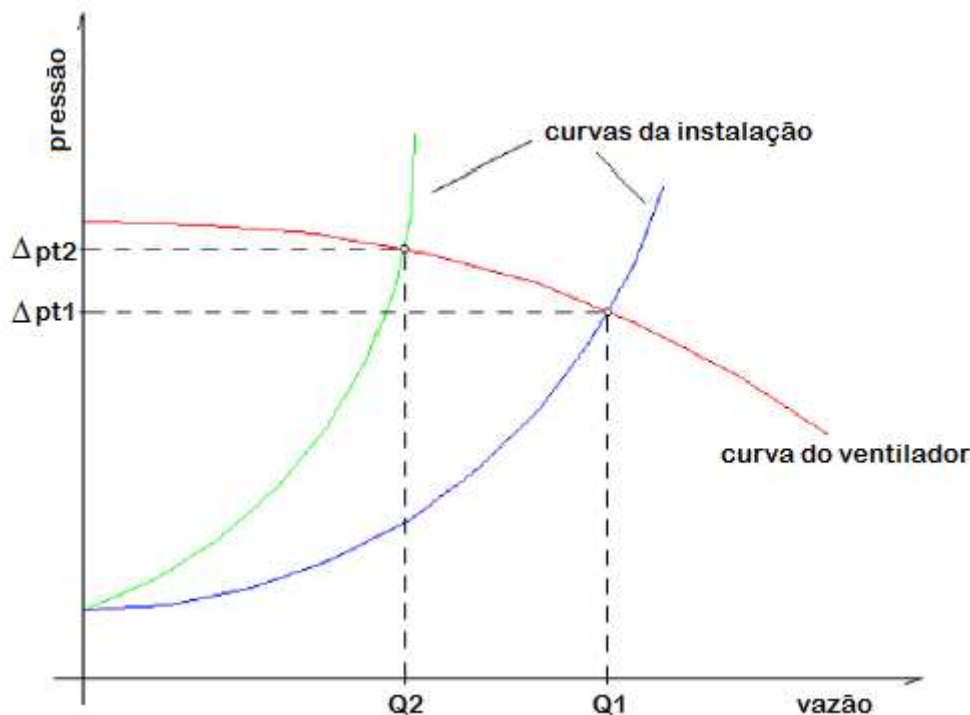


Figura 3.11 – Curvas da instalação de um ventilador

Nesse caso, a variação de abertura faz variar a perda de carga na válvula, a curva do ventilador se manterá constante e a curva da instalação será definida de acordo com a condição do *damper*. Com o aumento da perda de carga na válvula, grande parte da potência fornecida pelo motor é perdida sem produzir trabalho útil.

3.7.3. Controle de vazão por inversor de frequência

O controle de vazão pode ser realizado de maneira mais eficiente com o fornecimento apenas da potência solicitada e com perda de carga insignificante. Para isso, o controle de vazão é realizado através do controle de velocidade do motor, acionado por um inversor de frequência.

Nesse caso, as características da instalação se mantêm inalteradas e as características do ventilador variam de acordo com a velocidade aplicada. Dessa forma, os valores de vazão podem ser controlados e para cada valor de vazão há uma curva do ventilador. A Figura 3.12 ilustra essa situação, onde ao se reduzir o valor de vazão de

Q1 para Q2 ou Q3, há uma redução na variação de pressão, e consequentemente uma redução na potência do sistema.

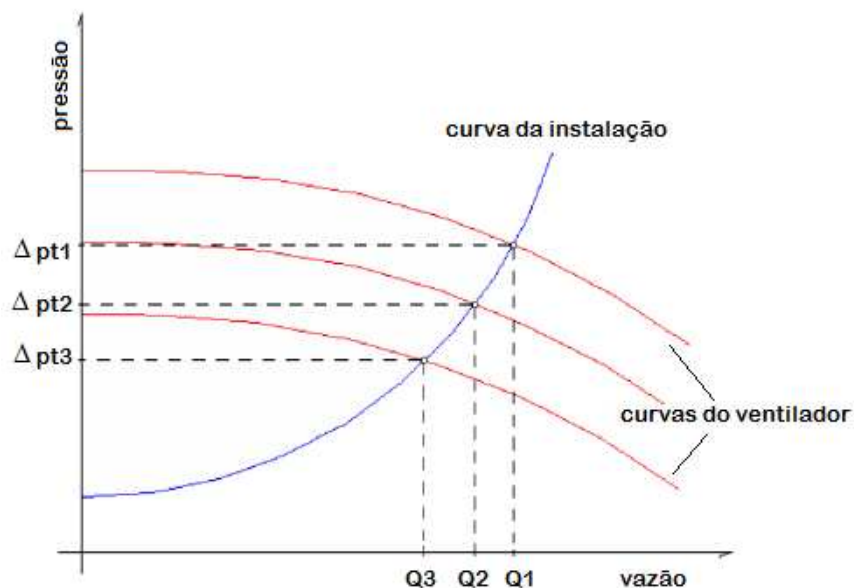


Figura 3.12 – Curvas de um ventilador controlado por inversor de frequência

É importante ressaltar que a operação com controle de velocidade altera o rendimento do ventilador, e que esse fator deve ser levado em consideração pelo projetista.

A Figura 3.13 ilustra a economia de energia proporcionada nessa aplicação.

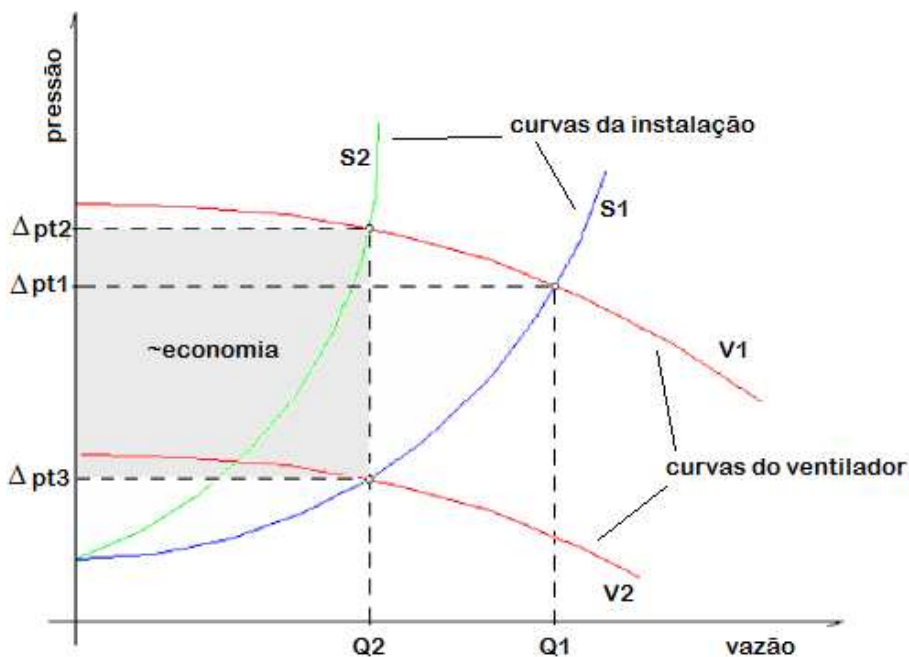


Figura 3.13 – Economia de energia em um sistema de ventilação controlado por inversor

A interseção entre a curva da instalação S1 e a curva do ventilador V1 indica o ponto de operação inicial do sistema, com a vazão Q1. Deseja-se reduzir a vazão para Q2.

Com a variação no *damper*, a curva da instalação é alterada para S2, e sua interseção com a curva do ventilador V1 indica o ponto de operação do sistema para a vazão desejada Q2.

Partindo-se para o controle através do inversor de frequência, com a redução da velocidade do motor, a curva da instalação S1 é mantida, e a curva do ventilador é alterada de V1 para V2. A interseção entre as curvas S1 e V2 indica o ponto de operação do sistema para a vazão desejada Q2.

Observa-se que apesar de a vazão apresentar o mesmo valor em ambos os casos, a diferença de pressão na segunda situação é inferior, e consequentemente a potência também é inferior. Dessa forma, a economia de energia proporcionada nessa aplicação é proporcional à área destacada em cinza na Figura 3.13.

3.8. Conclusões parciais

Dessa forma, verifica-se que a partir dos conceitos abordados neste capítulo é possível observar com detalhes o funcionamento dos ventiladores, as grandezas envolvidas e os fatores que podem influenciar no comportamento desses equipamentos. Essas observações são fundamentais para a determinação dos valores de pressão, de potência hidráulica, e consequentemente para o estudo do sistema na abordagem da eficiência energética.

CAPÍTULO IV

4. Análise de eficiência energética

4.1. Introdução

Foram realizados ensaios no sistema de ventilação a fim de observar seu comportamento nos aspectos relacionados à eficiência energética. Para isso, foram observados: a comparação do consumo entre o motor da linha padrão e o de alto rendimento com variação da vazão através do *damper*; e a comparação de consumo entre a utilização de *damper* e inversor de frequência. O detalhamento dos procedimentos e os resultados podem ser observados a seguir.

4.2. Comparação de consumo entre o motor da linha padrão e o motor de alto rendimento

Este ensaio deve ser realizado submetendo-se os dois motores às mesmas condições de carga. Como os ventiladores operam vários processos que necessitam de controle de vazão, será construída a curva “vazão x potência” para cada motor, observando que as condições impostas não devem ultrapassar os limites nominais de cada motor. O controle será realizado através do *damper*. Para a análise de consumo, procede-se da seguinte maneira:

- Acopla-se o motor da linha padrão ao sistema;
- Fecha-se o *damper* totalmente e aciona-se o motor com a partida direta ou *soft-starter*. A partida deve ser realizada com o *damper* fechado, pois como será acionado o ventilador centrífugo, essa condição solicita da fonte menor quantidade de energia na partida, evitando danos à instalação;
- Com o sistema acionado, regula-se o *damper* para cada valor de vazão desejado. Nesse caso, valores de zero até a vazão que solicita a corrente nominal do motor.

- Para cada valor de vazão, aguarda-se a estabilização do sistema e através do banco de dados fornecido pelo supervisor calcula-se a média dos valores de potência elétrica ativa total para o período.

A determinação desses valores para o motor de alto rendimento é realizada de forma análoga.

A partir desses valores é possível construir a tabela de dados, a curva “vazão x potência” para os dois casos e fazer uma observação do comportamento do consumo de energia no sistema. Esses indicadores podem ser observados na Tabela 4.1 e na Figura 4.1.

Tabela 4.1 – Ensaio comparativo entre motor de alto rendimento e da linha padrão

Vazão (m ³ /min)	Ensaio comparativo entre motor de alto rendimento e da linha padrão	
	Linha padrão (W)	Alto rendimento (W)
2	670	612
4	690	646
6	724	688
8	778	741
10	849	867
12	990	939
14	1057	1016
16	1250	1202
18	1357	1313

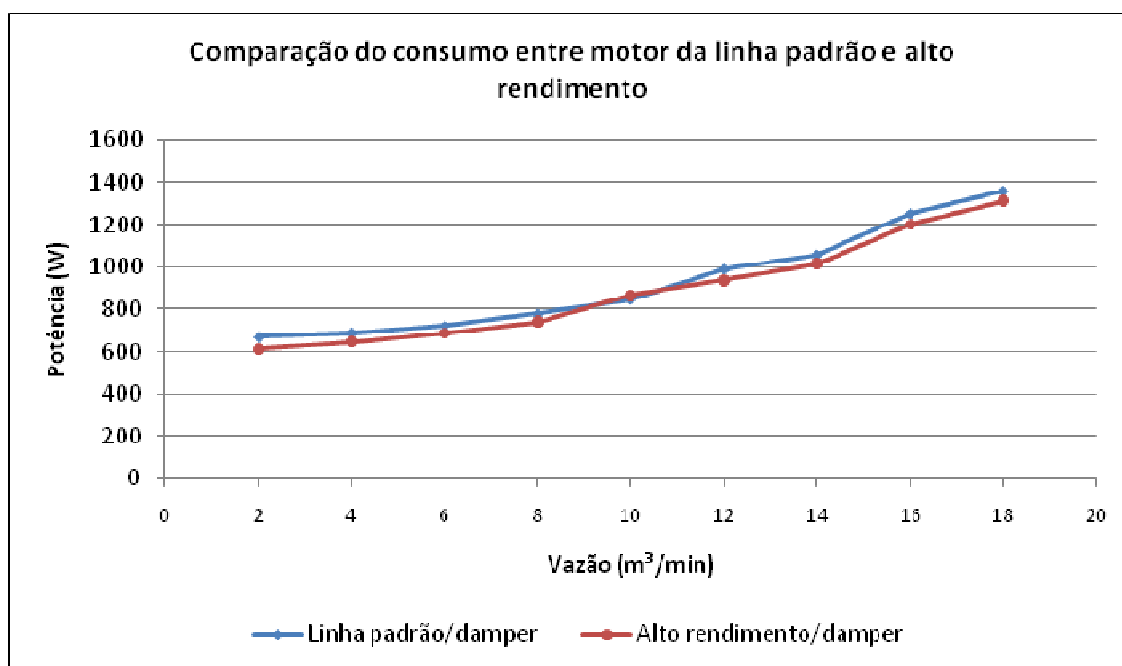


Figura 4.1 – Comparação do consumo entre motor da linha padrão e alto rendimento

Percebe-se que ao longo da curva o motor da linha padrão consome maior quantidade de energia, exceto para um ponto próximo a 10m³/min, no qual as curvas se cruzam e o motor de alto rendimento consome mais energia. Esse acontecimento pode ser decorrente de vários fatores. O mais provável é que seja um erro inerente aos instrumentos de medição, principalmente relacionado à medição da vazão. Além disso, existe uma faixa de rendimento aceitável, denominada de Índice de Afastamento de Resultado – IAR, definida pela Portaria Inmetro N°.243 [21]. Dessa forma, é possível que ambos estejam operando dentro da faixa de rendimento aceitável, entretanto um operando abaixo do valor de referência, e outro operando acima, o que ocasionaria o cruzamento das curvas.

No Capítulo VII pode ser verificado um estudo de caso que compara o consumo e os aspectos econômicos durante a operação de um sistema de ventilação acionado por motor padrão e de alto rendimento.

4.3. Comparação de consumo entre o controle de vazão através de *damper* e inversor de frequência

Neste ensaio pretende-se verificar a eficiência do sistema de ventilação quando submetido ao controle de vazão de ar por meio de inversor de frequência em substituição ao *damper*. Para a realização do ensaio procede-se da seguinte forma:

- Fecha-se o *damper* manualmente através da janela PID;
- Aciona-se o sistema (motor da linha padrão ou alto rendimento) através da partida direta;
- Abre-se o *damper* numa primeira posição e anota-se o valor da potência elétrica ativa no sistema;
- Repete-se o item anterior para várias aberturas do *damper*;
- Para cada abertura do *damper* verificar se o sistema não está operando em sobrecarga, caso esteja, coloca-se o *damper* numa posição em que isso não ocorra;
- Traça-se um gráfico “vazão x potência”. Os pontos para a construção do gráfico são obtidos através do banco de dados que armazena todos os dados necessários durante o ensaio;
- Ainda com partida direta, varia-se a posição do *damper* até que o motor opere com corrente nominal;

- Com o *damper* na posição estabelecida no item anterior, aciona-se o sistema com o inversor de frequência;
- Verifica-se a potência ativa no sistema para cada valor de vazão no sistema;
- Para a obtenção dos diferentes valores de vazão, varia-se a frequência do inversor de frequência na janela “Comando do Ventilador” do sistema supervisorio. É possível então construir o gráfico “vazão x potência” agora utilizando o inversor de frequência.

Para esse ensaio, o sistema será acionado através do motor de alto rendimento.

A Tabela 4.2 e a Figura 4.2 indicam os resultados obtidos.

Tabela 4.2 – Ensaio comparativo entre *damper* e inversor de frequência

Vazão (m ³ /min)	Ensaio comparativo entre <i>damper</i> e inversor de frequência	
	<i>Damper</i> (W)	Inversor (W)
2	612	36
4	646	50
6	688	77
8	741	130
10	867	262
12	939	452
14	1016	771
16	1202	1110
18	1313	1290

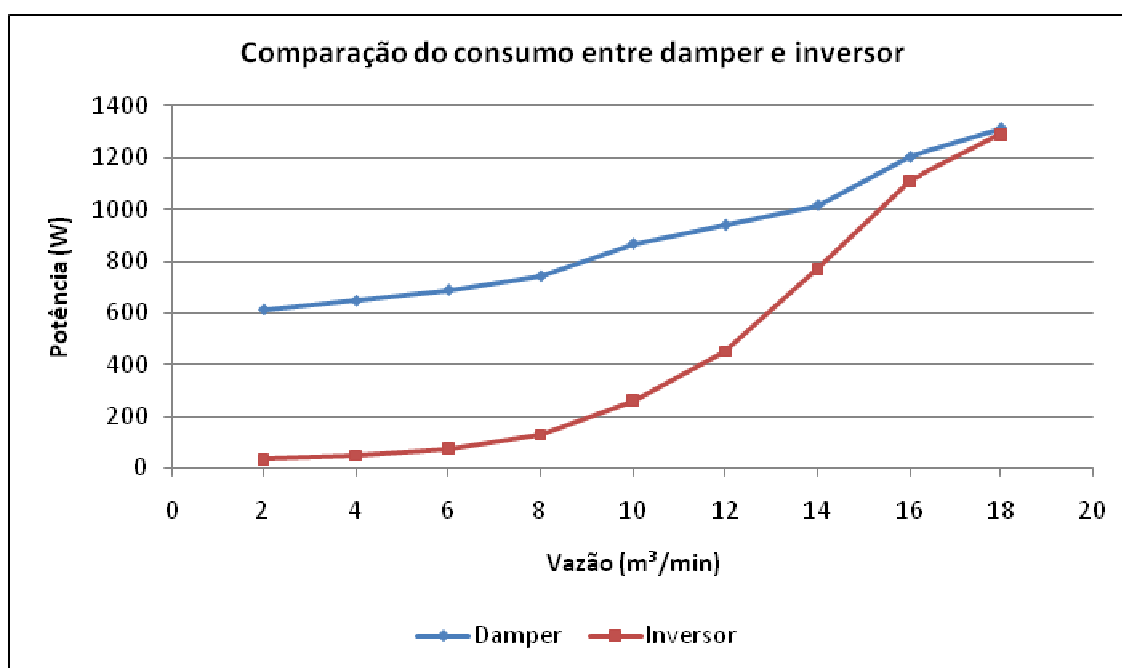


Figura 4.2 – Comparação do consumo entre *damper* e inversor

Com os dados obtidos do ensaio descrito anteriormente pode-se verificar a maior eficiência do sistema quando utilizado o inversor de frequência.

Também para essa situação, no Capítulo 7, pode ser verificado um estudo de caso que compara o consumo e os aspectos econômicos durante a operação de um sistema de ventilação utilizando *damper* e inversor de frequência.

4.4. Análise dos resultados

A Figura 4.3 ilustra simultaneamente a relação entre vazão e potência para quatro situações distintas, sendo: acionamento com motor da linha padrão e *damper*; acionamento com motor de alto rendimento e *damper*; acionamento com motor da linha padrão e inversor; e acionamento com motor de alto rendimento e inversor.

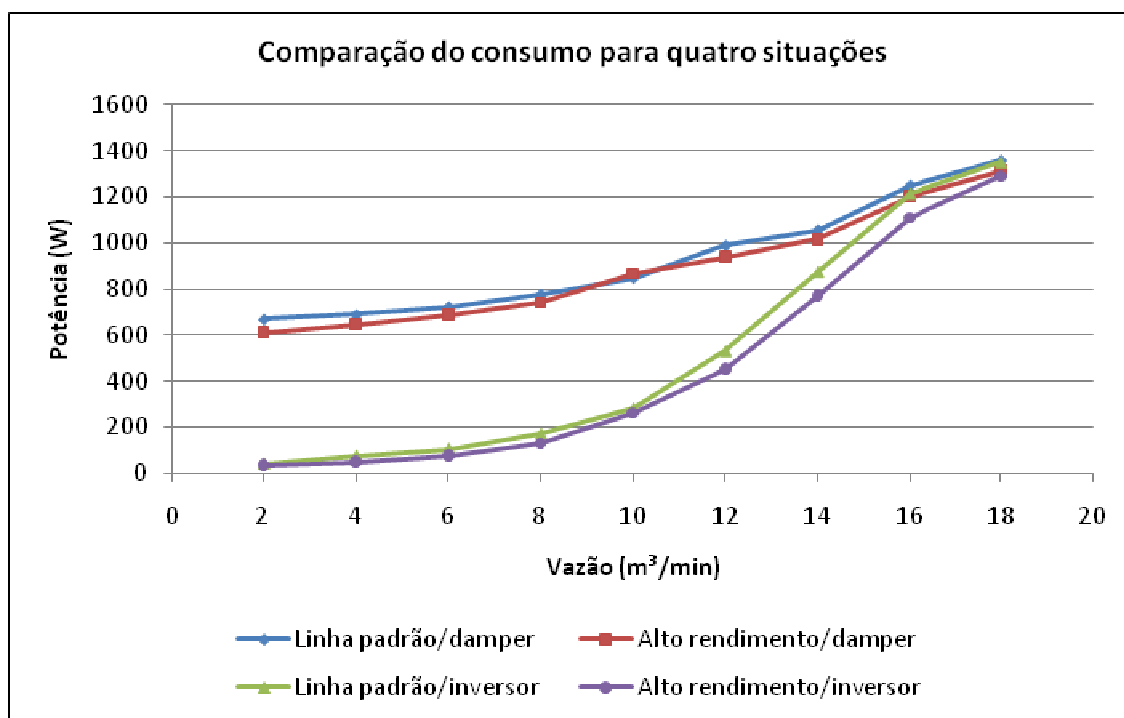


Figura 4.3 – Comparação do consumo para quatro situações

É possível observar que para uma mesma situação de controle de vazão, o consumo do sistema para acionamento como motor da linha padrão ou de alto rendimento mantém um perfil semelhante, dentro de uma faixa praticamente constante. Entretanto, com a utilização do inversor de frequência em relação ao *damper*, observa-se que a diferença de consumo se apresenta bastante elevada para menores valores de vazão (baixa velocidade) e insignificante para valores de vazão próximos das condições

nominais. A seguir observa-se a Tabela 4.3, com os dados utilizados para construção das curvas.

Tabela 4.3 – Comparação do consumo para quatro situações

Vazão (m³/min)	Damper (W)		Inversor de frequência (W)	
	Linha padrão	Alto rendimento	Linha padrão	Alto rendimento
2	670	612	40	36
4	690	646	75	50
6	724	688	105	77
8	778	741	170	130
10	849	867	280	262
12	990	939	530	452
14	1057	1016	875	771
16	1250	1202	1215	1110
18	1357	1313	1352	1290

A Tabela 4.4 e a Figura 4.4 mostram os valores de economia percentual no consumo do sistema de ventilação para utilização do motor de alto rendimento e inversor de frequência em relação à utilização de damper e motor de linha padrão, em função da vazão.

Tabela 4.4 – Economia em relação à utilização de *damper* e motor da linha padrão

Vazão (m³/min)	Economia percentual		
	Alto rendimento e <i>damper</i>	Linha padrão e inversor	Alto rendimento e inversor
2	8,66%	94,03%	94,63%
4	6,38%	89,13%	92,75%
6	4,97%	85,50%	89,36%
8	4,76%	78,15%	83,29%
10	-2,12%	67,02%	69,14%
12	5,15%	46,46%	54,34%
14	3,88%	17,22%	27,06%
16	3,84%	2,80%	11,20%
18	3,24%	0,37%	4,94%

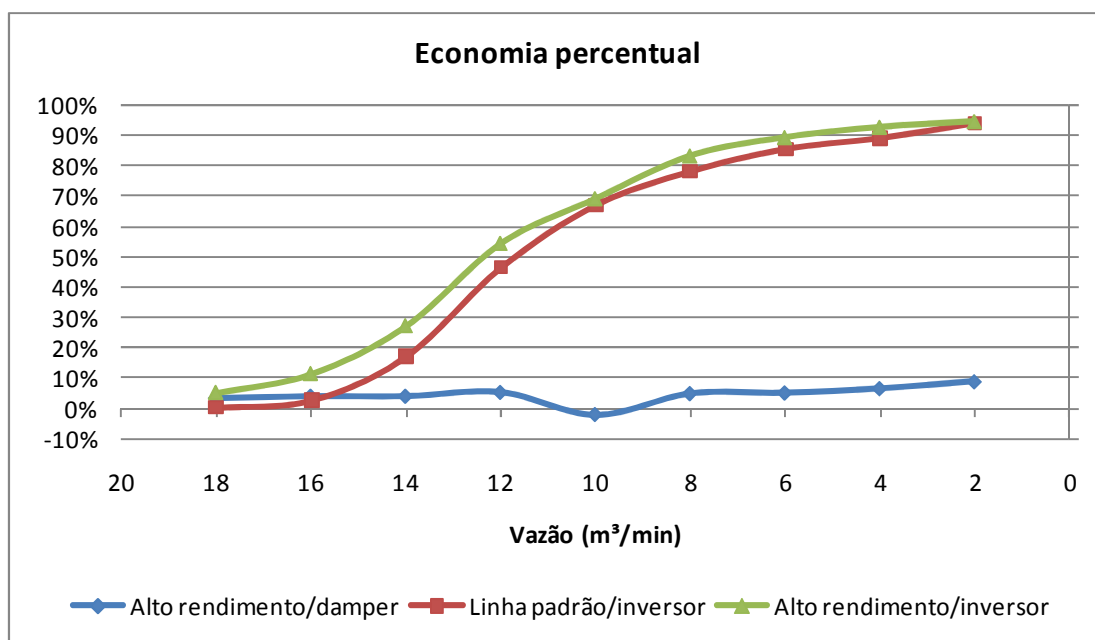


Figura 4.4 – Economia em relação à utilização de *damper* e motor da linha padrão

Evidencia-se novamente que a utilização do inversor de frequência produz elevados valores de economia, principalmente para baixos valores de vazão, onde podem ser verificados valores de economia em torno de 90%.

4.5. Conclusões parciais

Verifica-se que o menor consumo de energia ocorre quando o sistema é acionado pelo motor de alto rendimento e o controle é realizado através do inversor de frequência e que o maior consumo ocorre quando o sistema é acionado pelo motor da linha padrão e o controle é realizado através do *damper*.

Considerando-se que há diversos processos industriais que exigem o controle de vazão em sistemas de ventilação, conclui-se que a utilização de inversores de frequência e motores de alto rendimento é de grande importância no que tange à eficiência energética.

5. Análise de qualidade da energia elétrica

5.1. Introdução

Em um sistema elétrico trifásico ideal, as tensões em qualquer ponto deveriam ser, de forma permanente, perfeitamente senoidais, equilibradas, e com amplitude e frequência constantes [22].

Entretanto, com o crescimento das cargas não lineares no sistema elétrico, o estudo sobre a qualidade da energia elétrica tem se tornado cada vez mais necessário e significativo. As principais medidas adotadas para a conservação de energia como a utilização de inversores de frequência, controladores de intensidade luminosa e lâmpadas fluorescentes compactas provocam elevados distúrbios no sistema elétrico. Esses distúrbios comprometem a qualidade da energia e podem causar danos e prejuízos aos consumidores e à concessionária [1].

Sempre que ocorre um desvio na forma de onda da tensão de alimentação, pode existir um problema de qualidade da energia elétrica. Dessa forma, a qualidade das fontes de tensão e corrente pode ser definida através de quatro parâmetros principais, que são: frequência, forma de onda, amplitude da tensão, assimetria em sistemas trifásicos, e duração do evento [1], [22].

Apesar de existir a necessidade e a tendência de regulamentação efetiva de limites dos distúrbios relacionados à qualidade da energia elétrica, atualmente não há um consenso internacional nesse sentido. No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL publicou recentemente o documento “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica - Prodist” [23], que trata de questões pertinentes à imposição de limites de distúrbios, enquanto que nas publicações internacionais verifica-se maior menção à norma IEEE 519/92 [24].

Dessa forma, pretende-se apresentar a relação de um sistema de ventilação com a qualidade da energia elétrica onde será analisado o comportamento do sistema de ventilação quando submetido à alimentação com presença de Variações de Tensão de Longa Duração – VTLD's.

5.2. Variações de Tensão de Longa Duração – VTLD's

As variações de tensão de longa duração consistem na alteração do valor eficaz da tensão à frequência fundamental por intervalos superiores a um minuto [25].

São classificadas internacionalmente de acordo com a tabela a seguir:

Tabela 5.1 – Classificação das variações de tensão de longa duração

Classificação	Amplitude da tensão	Duração
Sobretensão	$> 1,1 \text{ p.u.}$	$\geq 1 \text{ min.}$
Subtensão	$< 0,9 \text{ p.u.}$ $> 0,1 \text{ p.u.}$	
Interrupção	$< 0,1 \text{ p.u.}$	

As principais causas desses fenômenos estão relacionadas a grandes variações de cargas, partidas de motores, e chaveamento de banco de capacitores. Tem como consequência uma alteração na velocidade dos motores de indução, podem causar falhas em equipamentos eletrônicos, e redução da vida útil de equipamentos [25]. As VTLD's podem ser solucionadas com a utilização de reguladores de tensão ou com a entrada de fontes de energia reserva. Na Figura 5.1 pode ser observada a forma de onda de uma VTLD, na qual a amplitude da tensão é reduzida a 0,8 p.u..

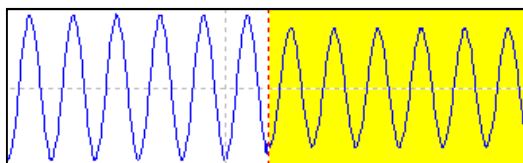


Figura 5.1 – Forma de onda de uma VTLD

As interrupções são causadas por curto-circuito, operação de disjuntores, ou por manutenção do sistema, e causam falhas em equipamentos eletrônicos, desligamento de equipamentos, e interrupção de processos produtivos.

A comunidade internacional tende a não considerar as VTLD's como sendo um problema de qualidade da energia elétrica [1].

5.3. Comportamento do sistema de ventilação submetido à alimentação com presença de VTLD's

Pretende-se observar o comportamento das características elétricas e mecânicas do sistema de ventilação quando submetido à carga nominal e à alimentação com presença de VTLD's.

Além disso, deseja-se determinar através dos conceitos teóricos apresentados a potência hidráulica na saída do ventilador e compará-la com a potência elétrica de entrada da bancada, determinando assim o rendimento total do sistema de ventilação, já que um dos enfoques do presente trabalho é a eficiência energética.

Para isso, os valores de velocidade média de escoamento e vazão são obtidos através do sistema de aquisição de dados, e os demais parâmetros utilizados para o cálculo do rendimento total do sistema são mostrados a seguir:

Massa específica do fluido

$$\rho = 1,204 \text{ kg/m}^3$$

Aceleração da gravidade

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Comprimento da tubulação

$$L = 1,7 \text{ m}$$

Diâmetro interno do conduto circular

$$D = 0,199 \text{ m}$$

Rugosidade absoluta da parede do conduto

$$\varepsilon = 0,000175 \text{ m}$$

Viscosidade cinemática

$$\nu = 1,818 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

A tubulação do sistema de ventilação utilizado não possui cotovelos, derivações ou expansões. A única perda localizada encontra-se no *damper*. O coeficiente de perda (k) utilizado para cálculo da perda localizada é função do ângulo α de abertura do *damper*, conforme Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Coeficiente de perda do *damper*

α	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
k	670	145	47	18	7	3	1,4	0,7	0,36

Utilizou-se uma fonte programável, capaz de fornecer alimentação com diversos distúrbios. A fonte foi conectada em série com a rede trifásica, conforme ilustrado na Figura 5.2.

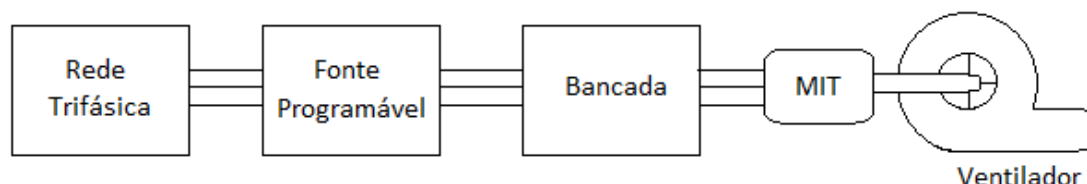


Figura 5.2 – Esquema de conexões utilizadas para o ensaio

A fonte utilizada para fornecer a alimentação trifásica com distúrbios é a HP AC Power Source 6834A, 300 V rms, 4500VA, que pode ser observada na Figura 5.3.



Figura 5.3 – Fonte programável utilizada durante o ensaio

Foi utilizado ainda um analisador de energia capaz de realizar o registro de tensões, correntes, potências, energia, harmônicas, e oscilografia (registro das formas de onda da tensão e corrente) de perturbações em sistemas elétricos. O analisador utilizado foi fabricado pela RMS Sistemas Eletrônicos, modelo MARH-21993, e pode ser observado na Figura 5.4.



Figura 5.4 – Analisador de energia RMS MARH-21993

Tanto o analisador de energia que foi utilizado para fornecer as formas de onda, quanto o multimedidor que forneceu o banco de dados utilizado para o estudo recebem os valores de tensão e corrente da entrada bancada, conforme detalhado na Figura 5.5.

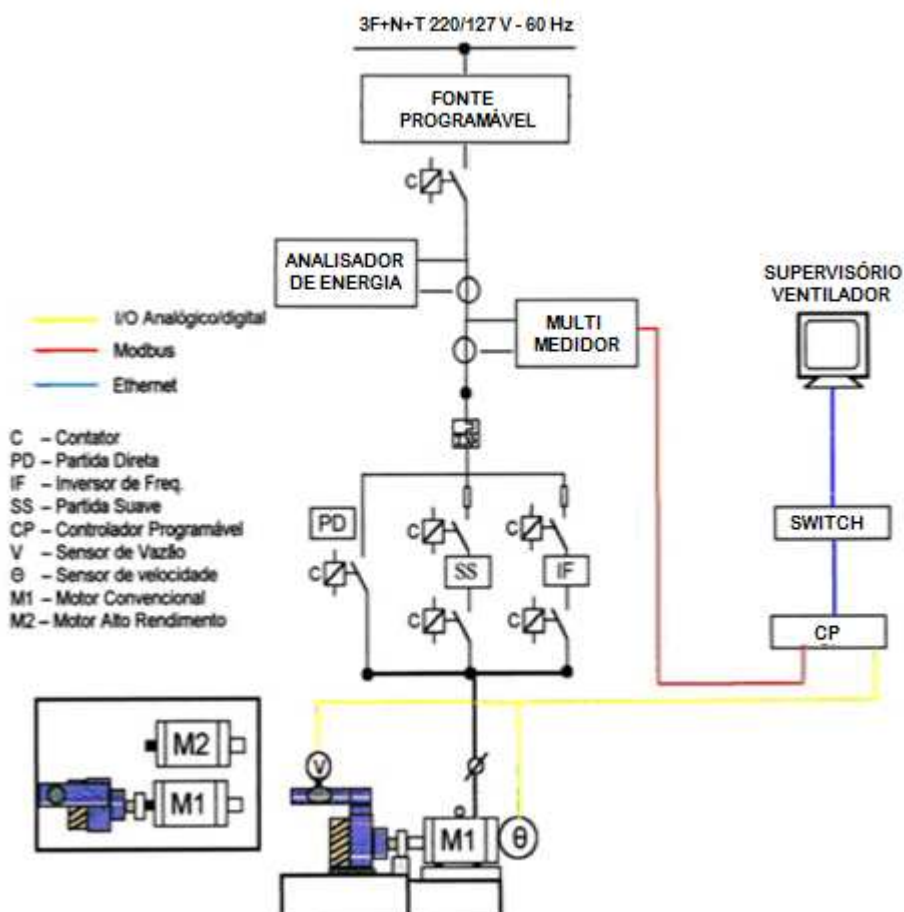


Figura 5.5 – Esquema detalhado de conexão do analisador de energia e da fonte

Utilizam-se os níveis de tensão e corrente da entrada do sistema de ventilação a fim de verificar o comportamento energético sob a influência de todos os equipamentos conectados.

Assim, pretende-se analisar e discutir o comportamento da tensão, corrente, potência ativa, fator de potência, temperatura no enrolamento e na carcaça do motor, rotação, vazão, velocidade do ar, e rendimento total do sistema.

O sistema de ventilação foi acionado em tensão nominal, e em seguida foi submetido à alimentação com presença de variações de tensão em níveis de 0.95, 0.90, 0.85, e 0.80 pu, sendo que cada um desses eventos teve duração aproximada de 16 minutos. O sistema foi acionado pelo motor da linha padrão e alimentado através do inversor de frequência. Pretende-se discutir e apresentar os aspectos mais relevantes observados nesses eventos, já que se obteve grande quantidade de informações.

Na Figura 5.6 são apresentadas as formas de onda da tensão e da corrente verificadas para a variação de 0.8 pu de tensão.

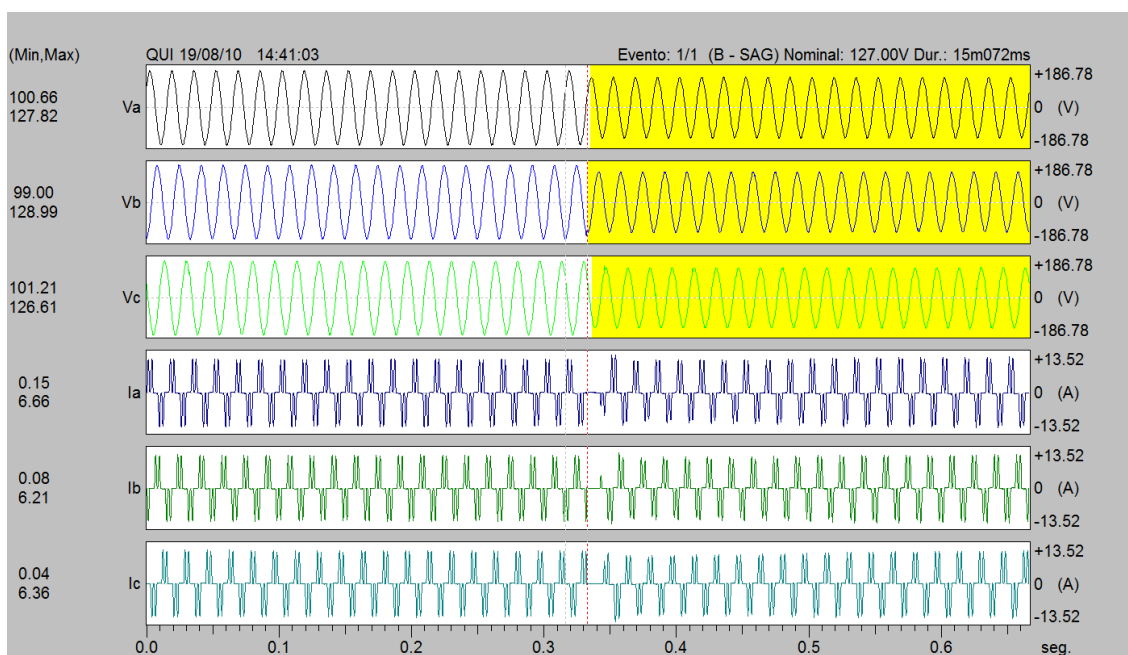


Figura 5.6– Formas de onda da tensão e da corrente - VTL D com 0.8 pu

Na Figura 5.7 é possível observar o comportamento da tensão eficaz e da corrente eficaz durante a realização de todos os eventos.

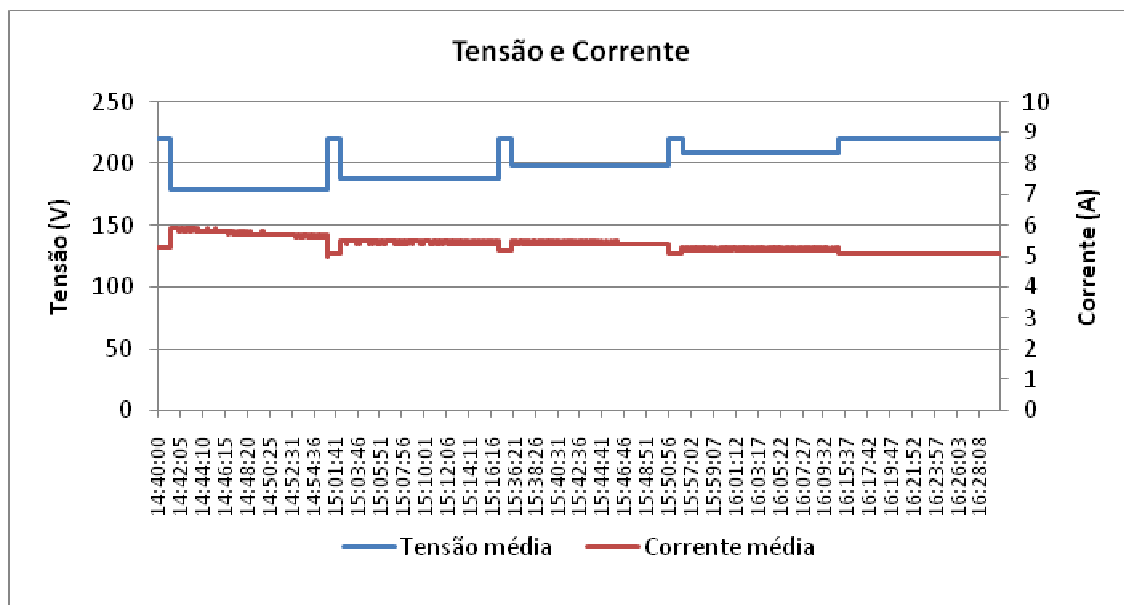


Figura 5.7 - Tensão e corrente do sistema submetido à alimentação com VTLD's

A curva superior nos gráficos seguintes representa os degraus de tensão aplicados, que correspondem respectivamente a 0,8, 0,85, 0,90, 0,95, e 1,00 pu. É possível verificar que há um aumento bastante significativo da corrente para níveis mais baixos da tensão eficaz aplicada, ou seja, a tensão e a corrente neste caso são inversamente proporcionais.

Entretanto, observa-se que há uma redução significativa da potência ativa, que apresenta comportamento diretamente proporcional ao comportamento da tensão aplicada, conforme pode ser verificado na Figura 5.8.

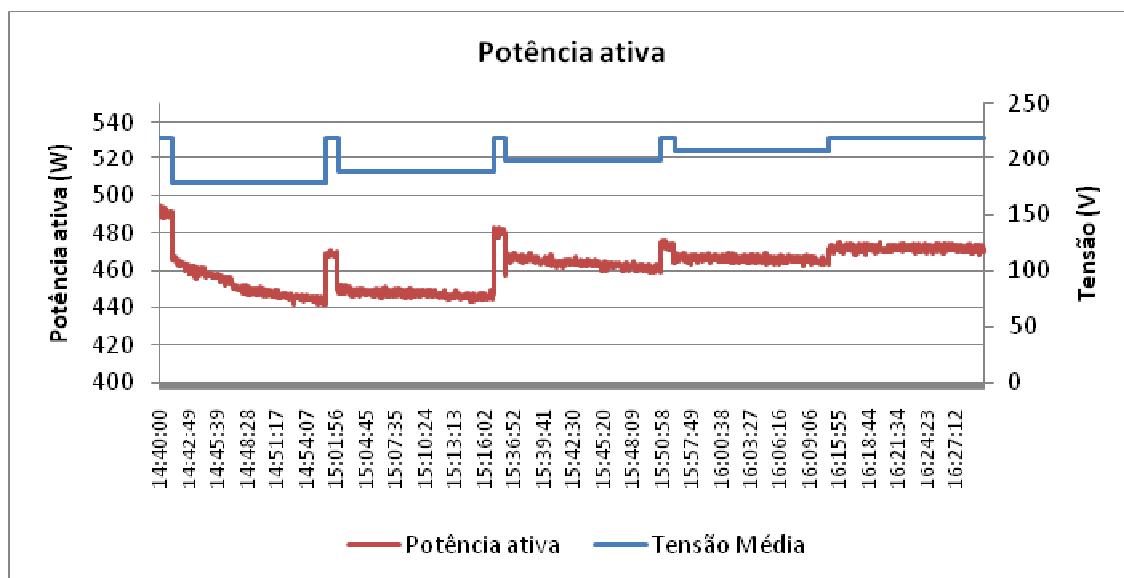


Figura 5.8 - Potência ativa do sistema submetido à alimentação com VTLD's

A curva do fator de potência indica uma ligeira elevação para valores de tensão com maiores afundamentos.

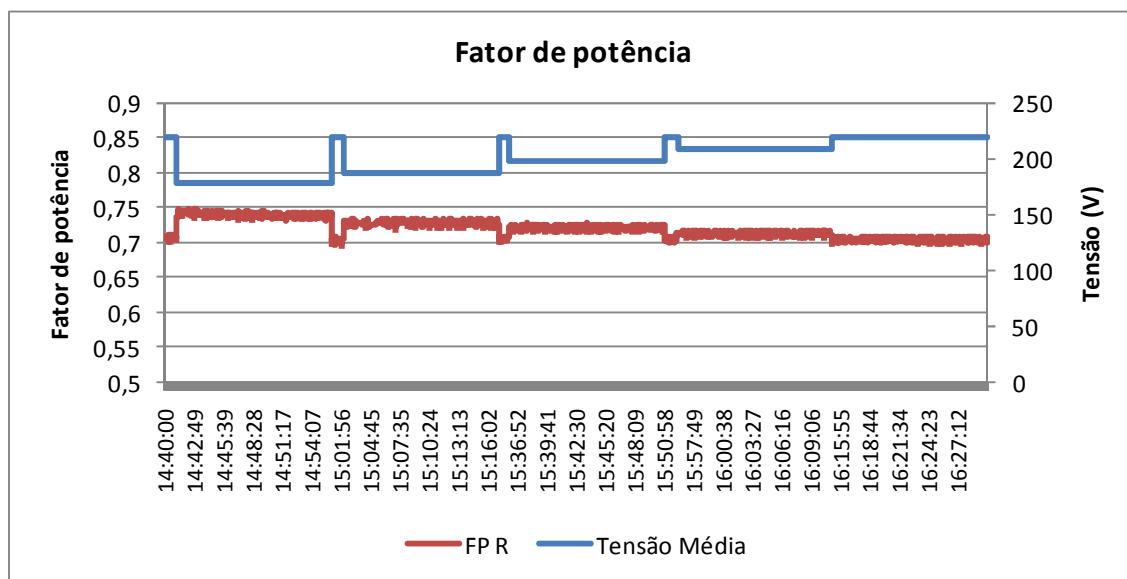


Figura 5.9 - Fator de potência do sistema submetido à alimentação com VTLD's

Essa ligeira elevação ocorre porque se verifica que a potência ativa sofre variação relativa menor do que a potência reativa. Uma justificativa para esse comportamento pode estar relacionada às perdas *joule* no sistema, que tem relação quadrática com a corrente e que contribuem para o aumento da potência ativa mensurada.

Sendo assim, observa-se na Figura 5.10 o comportamento da temperatura no enrolamento e na carcaça do motor, tendo como referência a mesma curva de degraus da tensão eficaz:

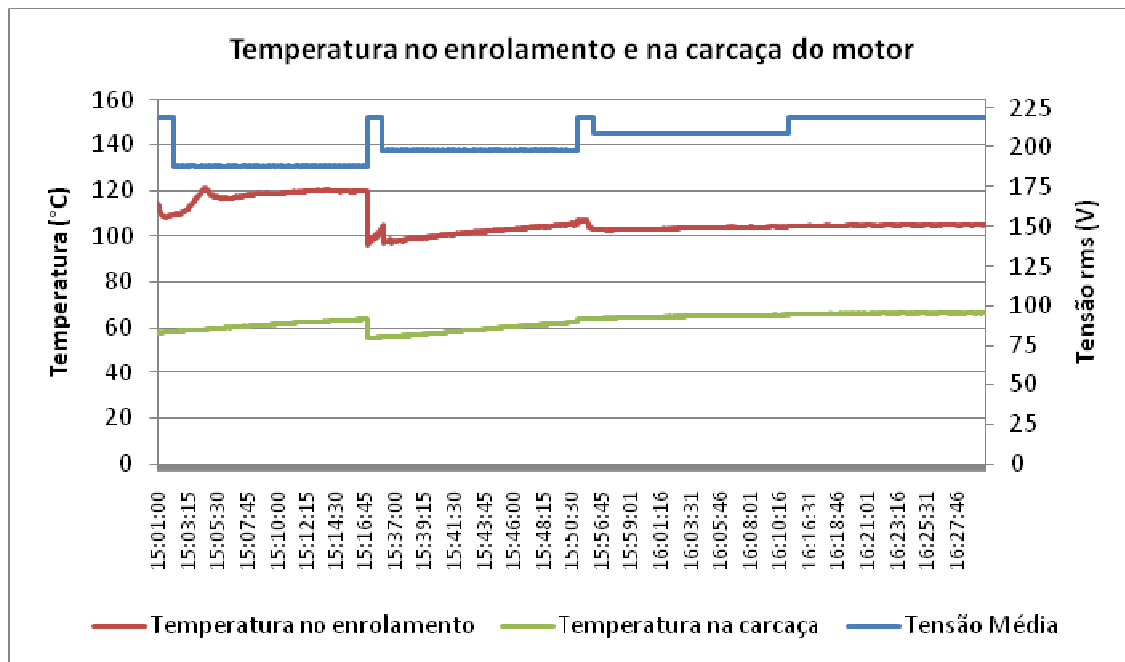


Figura 5.10 – Temperatura no enrolamento e na carcaça do motor submetido à alimentação com VTLD's

Já que se verificou um aumento da corrente no motor, consequentemente observa-se também uma elevação da temperatura no enrolamento, que mantém a relação inversamente proporcional com a tensão. Apesar de a temperatura no enrolamento não ter atingido seu valor de regime permanente em todos os degraus, é possível observar através da inclinação da curva que a redução da tensão projeta valores mais elevados de temperatura. Já na carcaça do motor, a temperatura não apresenta variações significativas causadas pelas variações de tensão.

Da mesma forma, observa-se na Figura 5.11 o comportamento da rotação do motor durante a aplicação dos eventos:

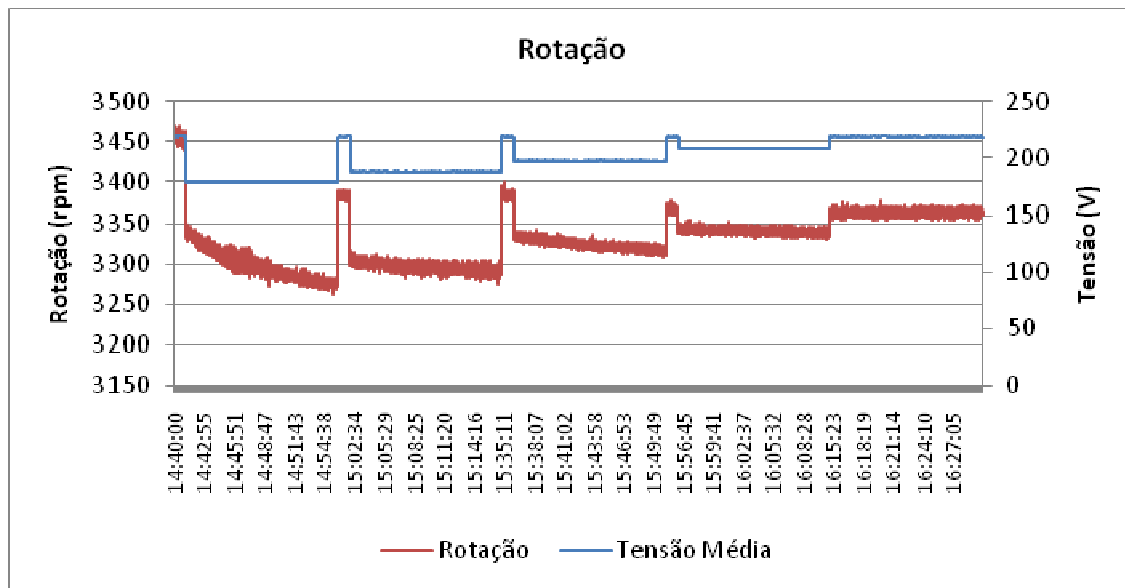


Figura 5.11 – Rotação do motor submetido à alimentação com VTLD's

É possível verificar que há redução brusca na rotação do motor, proporcional à variação de tensão eficaz aplicada. Observa-se ainda a sua tendência de redução com o passar do tempo para cada um dos eventos. Dessa forma, é possível dizer que a rotação é uma grandeza bastante sensível à variação de tensão.

A seguir são apresentados indicadores da vazão e da velocidade do ar durante a aplicação dos eventos, conforme Figura 5.12 e Figura 5.13.

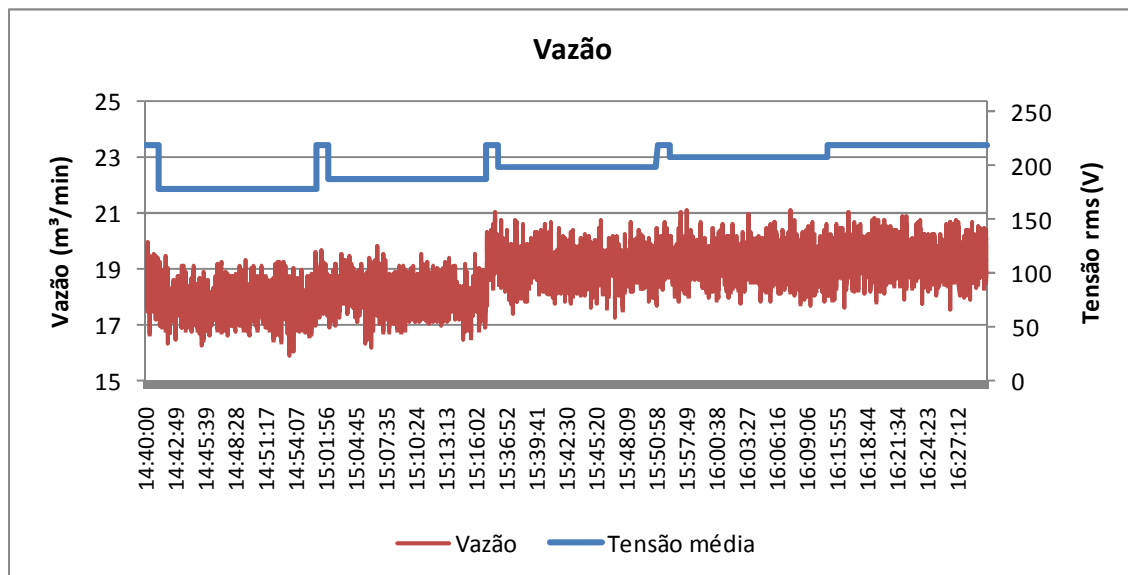


Figura 5.12 – Vazão do sistema quando submetido à alimentação com VTLD's

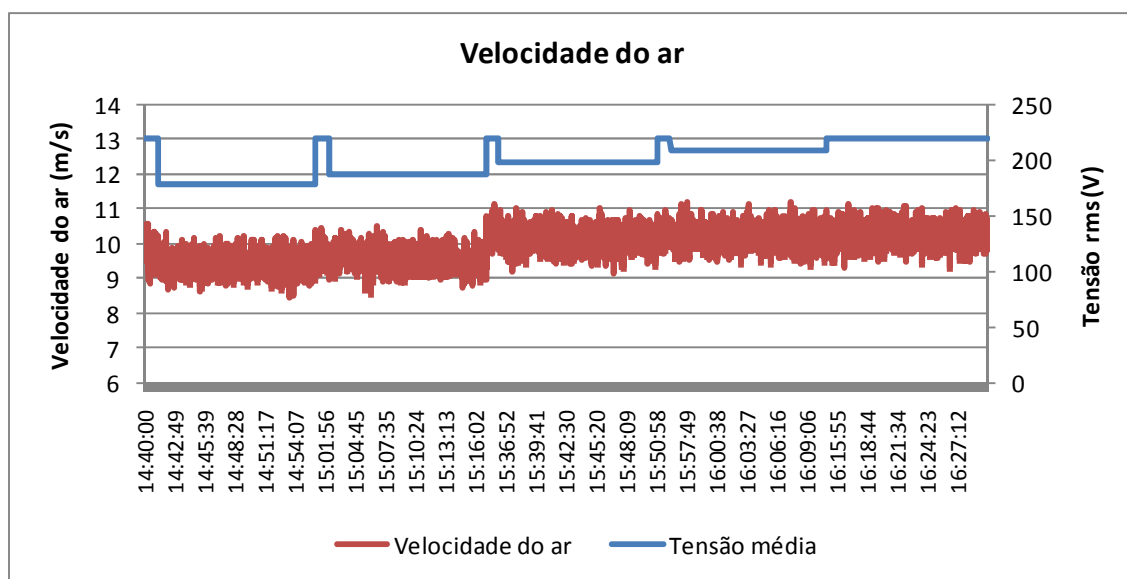


Figura 5.13 – Velocidade do ar do sistema quando submetido à alimentação com VTLD's

De forma semelhante, é possível verificar que há redução significativa da vazão e da velocidade do ar de acordo com a redução da tensão, sendo que a variação mais notável acontece na mudança do degrau de 0,85 para 0,90 p.u.

A partir dos dados obtidos do banco de dados do ensaio, e da metodologia de cálculo da potência hidráulica apresentada anteriormente, é possível determinar o rendimento total do sistema de ventilação ao ser submetido às variações de tensão. O rendimento total relaciona a potência elétrica de entrada e a potência hidráulica na saída do sistema, e pode ser observado na Figura 5.14.

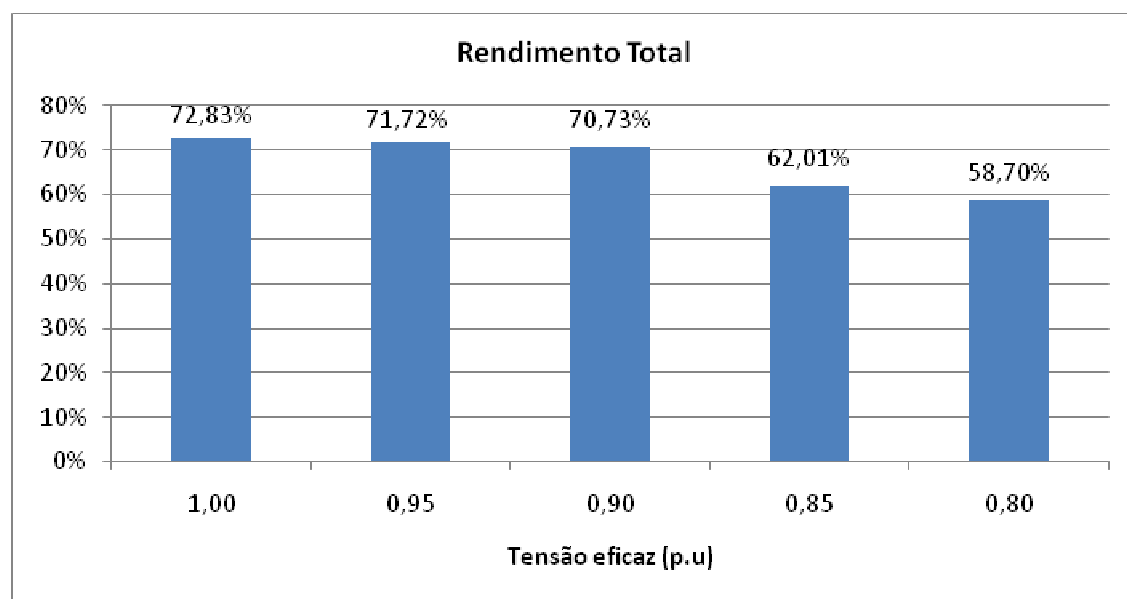


Figura 5.14 – Rendimento total do sistema submetido à alimentação com VTLD's

5.4. Conclusões parciais

É possível verificar que há uma queda bastante significativa do rendimento total do sistema, principalmente quando se compara a operação do sistema em condições nominais e a operação com VTLD de 0.80 pu. Há uma redução de 14,13% no rendimento do sistema, e caso esse evento seja frequente pode ocasionar elevados prejuízos, tanto pela redução da vida útil dos equipamentos, quanto pela elevação do consumo de energia do sistema.

6. Simulações computacionais

6.1. Introdução

As simulações computacionais são realizadas a fim de se verificar o comportamento eletrodinâmico do sistema de ventilação, visualizar suas curvas de corrente, torque e velocidade, e verificar soluções adequadas de acordo com as condições de carga aplicadas. A análise pode ser feita em regime transitório ou permanente, sem a necessidade da implementação física dos ensaios. É um recurso importante e vantajoso, principalmente ao se considerar que os ensaios podem solicitar diversos recursos que elevarão os custos financeiros, além de criarem o risco de danificar os equipamentos utilizados.

As simulações foram realizadas no aplicativo *Simulink*, do *MatLab*. O ambiente do *Simulink* é composto, de um conjunto de bibliotecas, com blocos que representam elementos dinâmicos com dados de entrada e saída, sendo que a simulação envolve a integração numérica dos sinais ao longo do tempo, a qual é executada por um conjunto de equações diferenciais ordinárias. O *Simulink* oferece um conjunto de opções de métodos numéricos para resolução de equações diferenciais. A modelagem de circuitos de potência utiliza o conjunto de bibliotecas denominado *SimPowerSystems*, na qual os elementos presentes em circuitos de potência, tais como fontes, linhas de transmissão, elementos passivos (resistência, capacitância e indutância), dispositivos semicondutores de potência e máquinas elétricas podem ser encontrados, na forma representativa de um bloco, disponível em uma biblioteca específica [26], [27].

6.2. Considerações sobre as simulações

Pretende-se simular a operação do sistema de ventilação para o acionamento com a partida direta, partida suave, e com a variação de velocidade. Uma descrição sobre os procedimentos e as considerações utilizadas para a simulação podem ser observadas a seguir.

Parâmetros do circuito equivalente

O motor utilizado nas simulações é o motor de 1.5CV da linha padrão do laboratório, e pretende-se determinar os seus parâmetros do circuito equivalente.

Os parâmetros do circuito equivalente podem ser obtidos através dos ensaios à vazio, ensaio com rotor bloqueado e ensaio de medição da resistência do enrolamento do estator. Abaixo seguem os dados do motor utilizado, os resultados dos ensaios, bem como os parâmetros obtidos para o circuito equivalente.

Tabela 6.1 – Dados do motor

Marca	Weg	I_p/I_n	7,5
Modelo	W21 Standard	C_n	3,1392 N.m
Categoria	N	C_p/C_n	3
Classe de isolamento	B	C_{max}/C_n	3
Potência	1,5 CV	J	0,00079 kg.m ²
Rotação	3370 rpm	η	78,5%
Tensão	220/380 V	$\cos\phi$	0,86
Corrente	4,27/2,47 A		

Tabela 6.2 – Ensaio à vazio

	Medições	Linha padrão
Corrente à vazio - I ₀ (A)	Fase A (Linha)	2,102
	Fase B (Linha)	2,126
	Fase C (Linha)	2,125
	Corrente média por fase	1,2226
Potência à vazio - P ₀ (W)	Fase A	59
	Fase B	53
	Fase C	51,13
	Potência trifásica	163,13
Tensão à vazio - V ₀ (V)	Fase A	219,49
	Fase B	220,01
	Fase C	219,2
	Tensão média	219,5667

Tabela 6.3 – Ensaio com rotor bloqueado

Medições		Linha padrão
Corrente com rotor bloqueado - I_{RB} (A)	Fase A (Linha)	4,295
	Fase B (Linha)	4,259
	Fase C (Linha)	4,318
	Corrente média por fase	2,4772
Potência com rotor bloqueado - P_{RB} (W)	Potência trifásica	172,5
Tensão com rotor bloqueado - V_{RB} (V)	Fase A	40,46
	Fase B	40,42
	Fase C	40,38
	Tensão média	40,42

Tabela 6.4 – Ensaio de medição da resistência do estator

Resistências medidas	Linha padrão
Fases AB (Ω)	2,8
Fases BC (Ω)	2,8
Fases CA (Ω)	2,8
Resistência por fase (Ω)	4,2
Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)	25
Temperatura de referência ($^{\circ}\text{C}$)	75
Resistência corrigida (Ω)	5,009

Tabela 6.5 – Parâmetros do circuito equivalente do motor

Parâmetros do motor		Linha padrão
Estator	Resistência do enrolamento (Ω)	4,798264558
	Indutância de dispersão do estator (H)	0,01771667
	Reatância de dispersão (Ω)	6,679027066
Rotor	Resistência das barras (Ω)	6,425138966
	Indutância de dispersão do rotor (H)	0,01771667
	Reatância de dispersão (Ω)	6,679027066
Ramo magnetizante	Resistência de perdas no ferro (Ω)	1235,507729
	Indutância de magnetização (H)	0,465186374
	Reatância de magnetização (Ω)	175,3711316

Modelagem da carga do ventilador

O ventilador centrífugo é uma carga cuja característica de conjugado em função da velocidade é quadrática, isto é, o conjugado varia com o quadrado da velocidade. Genericamente, a equação que rege o conjugado para cargas centrífugas pode ser escrita como:

$$C_{ventilador} = k_2 \omega^2 + k_1 \omega + k_0 \quad (6.1)$$

Onde,

$C_{ventilador}$ [N/m] Conjugado mecânico;

ω [rad/s] Velocidade angular;

Na equação acima k_2 , k_1 e k_0 são incógnitas, que podem ser obtidas através da resolução de um sistema que tenha no mínimo três equações. Desta forma, realizou-se um ensaio na bancada do ventilador centrífugo onde a velocidade do motor era variada e grandezas elétricas eram lidas. Utilizou-se o inversor de frequência e o motor da linha padrão, com a abertura do damper de forma que a corrente aplicada ao motor fosse a nominal. No caso, a abertura do damper ajustada é de 20%. Variou-se a frequência de alimentação pelo inversor de 10 Hz a 60 Hz e foram lidos valores de tensão de linha (uma vez que a carga está ligada em delta), corrente de linha e potência ativa, através do qualímetro Embrasul RE6000.

Ao se alimentar motores utilizando inversores de frequência, o fabricante recomenda a redução do conjugado útil do motor devido à redução da ventilação em baixas velocidades e também devido à presença de correntes harmônicas devido à onda de tensão PWM produzida pelo inversor. Dessa forma pode-se obter uma aproximação do rendimento de motores alimentados por inversores de frequência de acordo com a Equação 6.2:

$$\eta_c = \frac{DFH^2}{\frac{1}{\eta} + DFH^2 - 1} \quad (6.2)$$

Onde,

DFH [-] Fator de redução de torque;

η [-] Rendimento nominal do motor para alimentação senoidal.

Desta forma, obteve-se para cada frequência de alimentação o valor aproximado da potência mecânica do motor e, conseqüentemente, o valor do conjugado. Com os dados obtidos, pode-se obter a equação do conjugado do ventilador em função da velocidade através de interpolação por um polinômio do 2º grau, mostrada a seguir:

$$C_{ventilador} = 2.75E - 5. \omega^2 - 1E - 3. \omega - 2.586E - 2$$

Outra característica importante da carga é seu momento de inércia. É possível se estimar esta grandeza se parâmetros como o conjugado médio da carga, o tempo de aceleração, e o conjugado médio do motor forem obtidos [28]. Os conjugados do motor e da carga variam em função do escorregamento e assim, um valor médio constante para cada uma destas grandezas pode ser determinado.

O conjugado médio do motor pode ser dado como:

$$C_{mm} = k \left(\frac{C_p}{C_n} + \frac{C_{max}}{C_n} \right) C_n \quad (6.3)$$

Onde,

C_{mm}	[N.m]	Conjugado médio do motor;
k	[-]	Constante que depende da classe de isolamento do motor. Para classe B, $k = 0,45$;
$\frac{C_p}{C_n}$	[-]	Relação entre o conjugado de partida e o conjugado nominal do motor;
$\frac{C_{max}}{C_n}$	[-]	Relação entre o conjugado máximo e o conjugado nominal do motor.

Calculando para os dados fornecidos anteriormente, tem-se que:

$$C_{mm} = 0,45 \cdot (3 + 3) \cdot 3,1392$$
$$C_{mm} = 8,44 \text{ N.m}$$

O conjugado médio da carga do ventilador pode ser dado por:

$$C_{mc} = \frac{2C_0 + C_C}{3} \quad (6.4)$$

Onde,

C_{mc}	[N.m]	Conjugado médio da carga;
C_0	[N.m]	Conjugado inicial da carga;
C_C	[N.m]	Conjugado de carga.

Estima-se o valor de C_0 em 10% do conjugado nominal da carga. Através da potência e velocidade nominal do ventilador obtidos do fabricante, pode-se obter o conjugado nominal:

$$C_{nc} = \frac{P_n}{\omega_n}$$
$$C_{nc} = \frac{3.736}{3480 \cdot \frac{2\pi}{60}} = 6,05 \text{ N. m}$$

O conjugado médio é então obtido:

$$C_{mc} = \frac{2.0,1C_{nc} + 1C_{nc}}{3}$$
$$C_{mc} = \frac{1,2 \cdot C_{nc}}{3} = \frac{1,2 \cdot 6,05}{3}$$
$$C_{mc} = 2,42 \text{ N. m}$$

Considerando um tempo de aceleração verificado em laboratório, utilizando-se partida direta, de aproximadamente 3s, o momento de inércia pode ser estimado como:

$$J_C = \left(\frac{C_{mm} - C_{mc}}{n} \right) t_a - J_m$$
$$J_C = \left(\frac{8,44 - 2,42}{3480 \cdot \frac{2\pi}{60}} \right) 3 - 0,00079$$
$$J_C = 0,048791 \text{ kg. m}^2$$

O momento de inércia total do sistema é dado pela soma do momento de inércia da carga com o momento de inércia do motor:

$$J_T = J_C + J_m$$

$$J_T = 0,048791 + 0,00079 = 0,049581 \text{ kg. m}^2$$

A partir da determinação desses dados, pode-se iniciar a entrada de parâmetros no simulador. A Figura 6.1 ilustra a tela de entrada desses parâmetros.

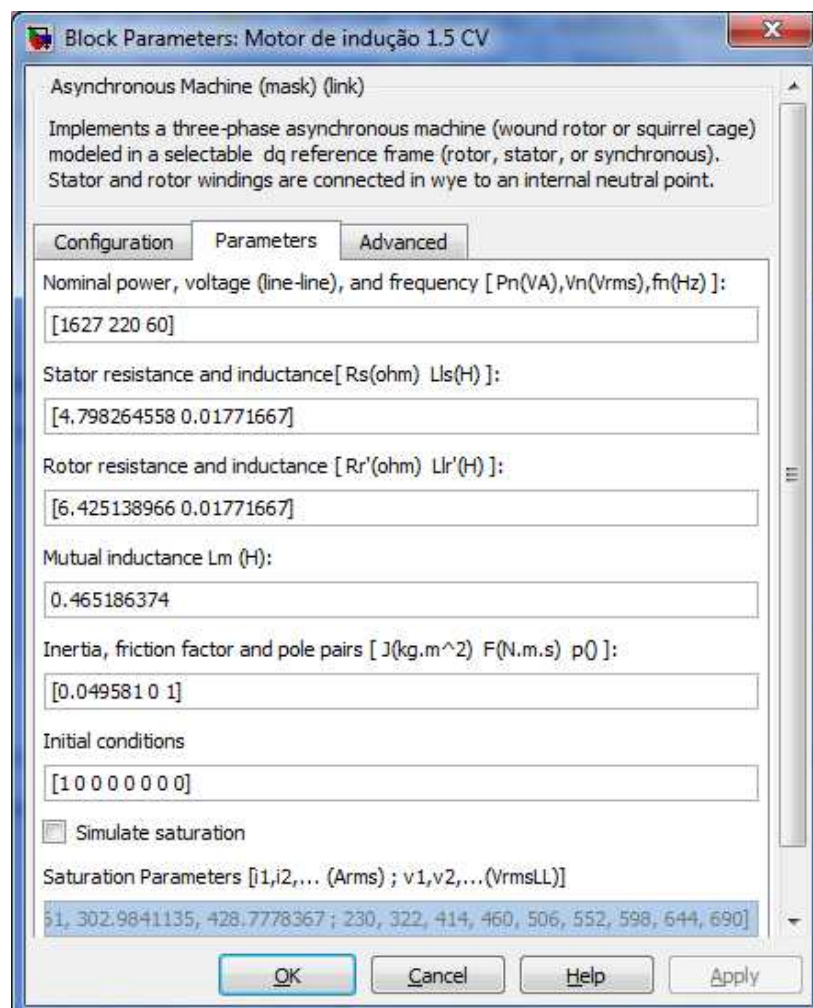


Figura 6.1 – Entrada dos parâmetros do motor

6.3. Simulações realizadas

6.3.1. Partida direta

A Figura 6.2 ilustra o circuito implementado no simulador com a partida direta para obtenção dos resultados:

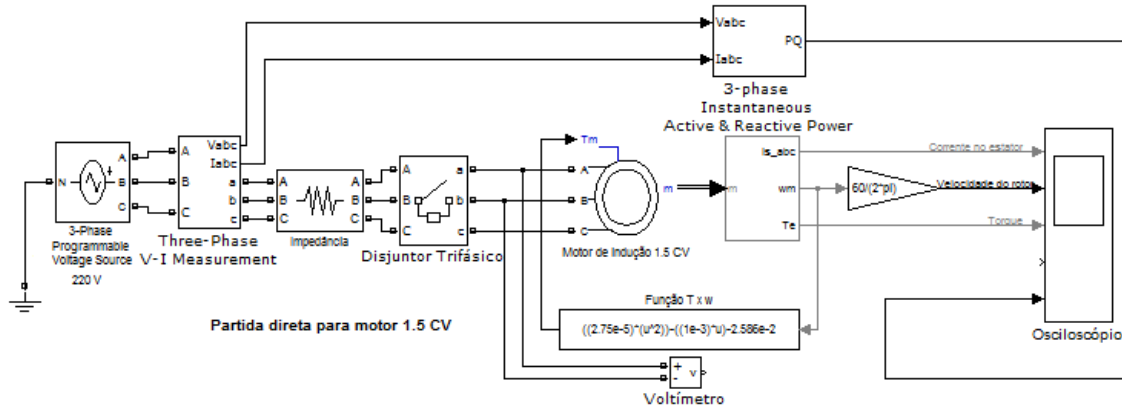


Figura 6.2 – Partida direta para motor 1.5 CV

A partida direta é representada pelo disjuntor trifásico, de forma que o motor é conectado diretamente à rede elétrica ao fechamento do disjuntor. O bloco conectado à porta *m* (*measurement*) do motor permite que sejam enviados os sinais do motor para blocos de medição. O osciloscópio mede os sinais conectados no domínio do tempo. Esses sinais são: a corrente no estator, a velocidade do rotor, o torque, e a tensão de linha. O bloco *Gain* (conectado entre a saída *wm* do bloco *m* e o osciloscópio) apresenta uma variável de saída que é igual ao produto da variável de entrada pelo valor numérico estabelecido para o bloco. Pode ser observado que o bloco *Gain* apresenta o valor $60/2\pi$, o qual é o fator de conversão da velocidade em radianos por segundo (rad/s) para rotações por minuto (rpm) [27].

O bloco “Função T x w” modifica a variável de entrada, em função de uma expressão matemática estabelecida. No caso do diagrama da figura apresentada, ele relaciona o torque mecânico (torque da carga) com a velocidade do eixo do motor, através da constante *k* determinada inicialmente.

Os resultados verificados podem ser observados nas figuras a seguir.

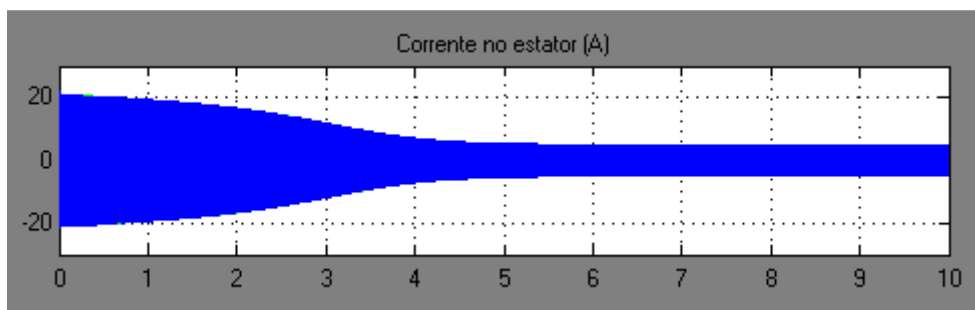


Figura 6.3 – Corrente no estator para partida direta

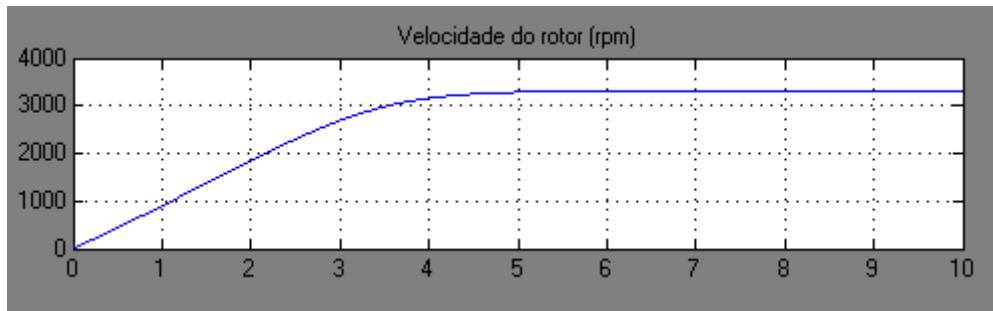


Figura 6.4 – Velocidade do rotor para partida direta

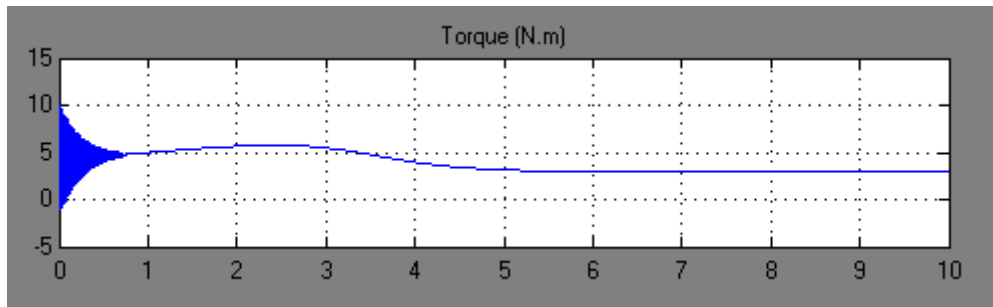


Figura 6.5 – Torque para partida direta

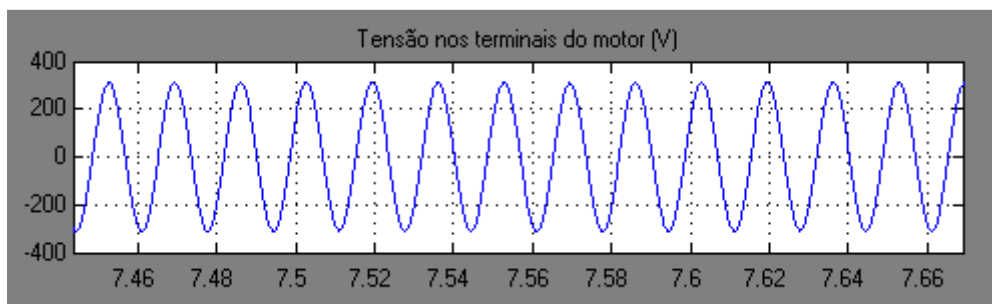


Figura 6.6 – Tensão nos terminais do motor para partida direta

Observa-se que a corrente apresenta grande elevação no período transitório, entretanto estabilizando-se logo em seguida. De forma semelhante, a velocidade e o torque também variam durante o período transitório, e encontram-se constantes a partir do início do regime permanente, apresentando assim o comportamento adequado.

6.3.2. Partida suave

Em um dispositivo de partida suave, os intervalos entre os níveis de tensão são tão pequenos, estabelecidos pela mudança dos ângulos de disparo, que a curva de tensão eficaz de saída assume praticamente um formato de rampa, a partir de um valor inicial (nesse caso de 30% da tensão nominal) até atingir o valor nominal de alimentação do motor. Se o objetivo do experimento é simplesmente observar o comportamento do

motor, e fornecer a ele um sinal de saída que possa representar, com mais precisão, o sinal gerado por uma partida suave no ambiente industrial, então um diagrama de blocos pode ser utilizado para representar essa partida em rampa, para que o seu comportamento eletrodinâmico esteja mais próximo do encontrado na prática [27]. A Figura 6.7 ilustra o circuito implementado no simulador com a partida suave para obtenção dos resultados:

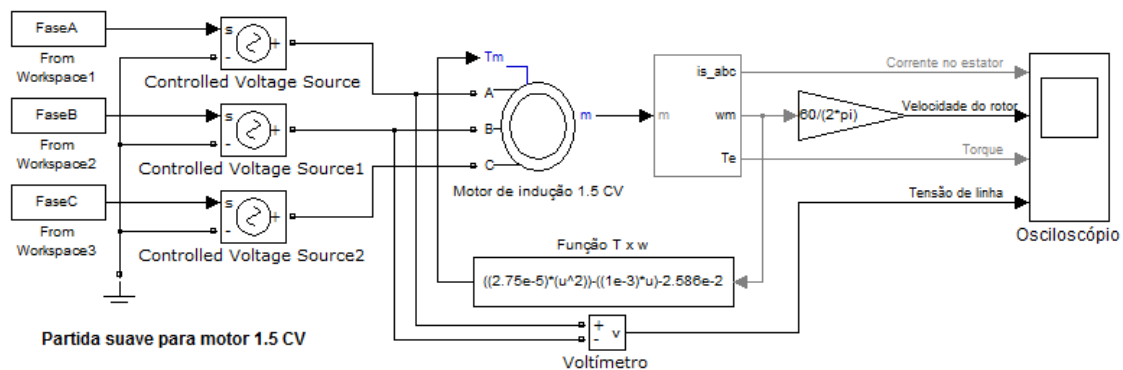


Figura 6.7 – Partida suave para motor 1.5 CV

Os resultados verificados podem ser observados a seguir:

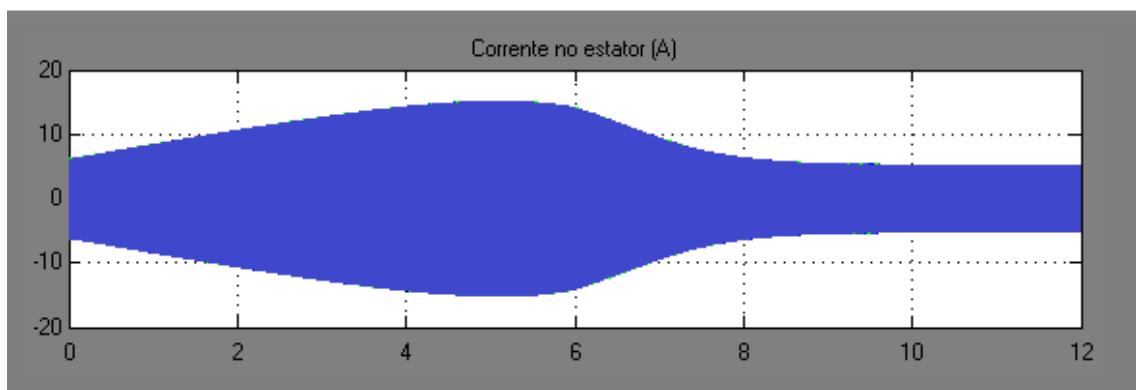


Figura 6.8 – Corrente no estator para partida suave

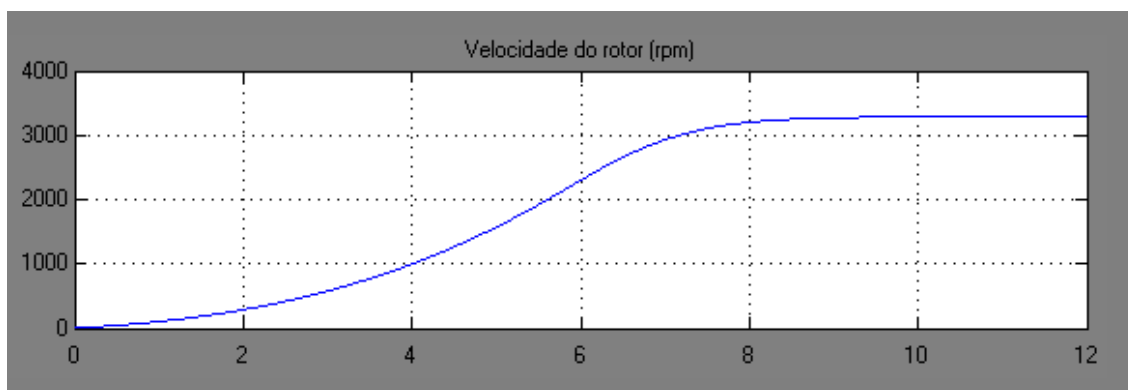


Figura 6.9 – Velocidade do rotor para partida suave

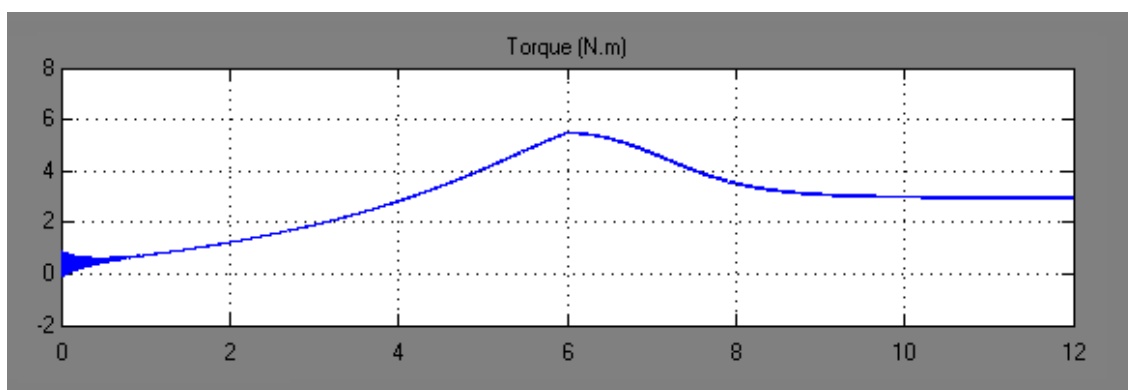


Figura 6.10 – Torque para partida suave

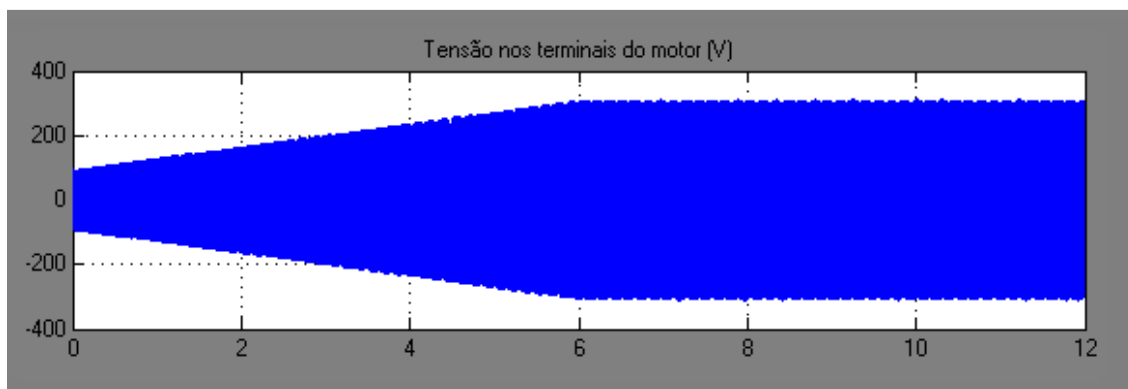


Figura 6.11 – Tensão nos terminais do motor para partida suave

É possível perceber que há uma elevação da corrente durante a partida, estabilizando-se no seu valor de regime permanente, entretanto atingindo valores menores, e com maior duração. De forma semelhante, o torque e a velocidade do motor apresentam variações menos bruscas durante a partida, estabilizando-se no regime permanente. A Figura 6.11 ilustra o comportamento da tensão eficaz durante a partida, que mantém perfil de rampa, entre 30% e 100% da tensão nominal.

6.3.3. Inversor de frequência

Para a operação com inversor de frequência, há um bloco pré-definido de inversor que fornece as condições para o funcionamento adequado, conforme Figura 6.12.

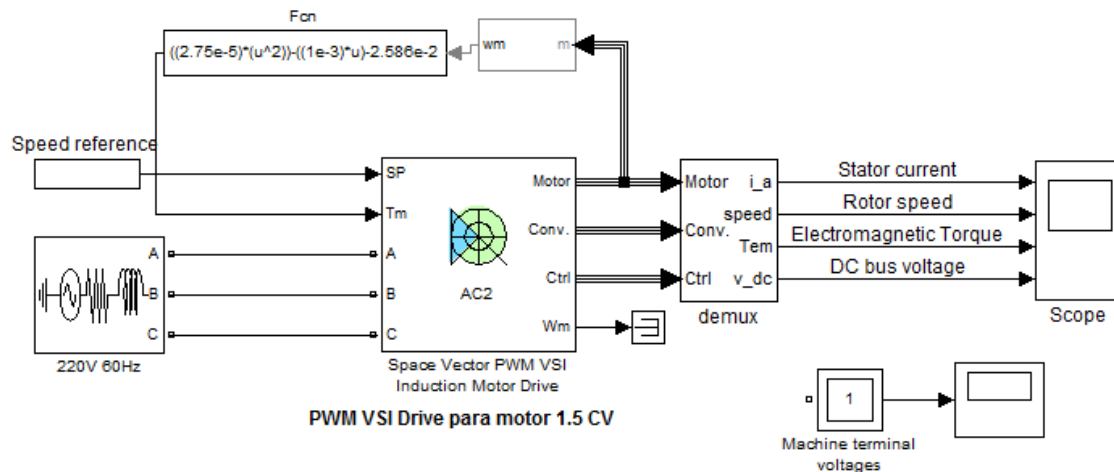


Figura 6.12 – Inversor de frequência para motor 1.5 CV

Na simulação o motor foi programado para operar com 1900 rpm, e em seguida ($t = 6$ s) com 2300 rpm, como pode observado no gráfico da velocidade. Os resultados podem ser observados a seguir.

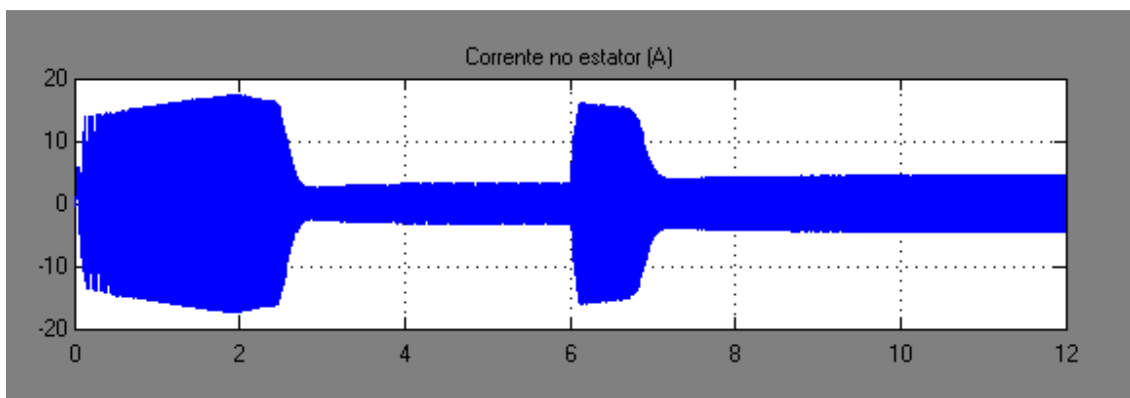


Figura 6.13 – Corrente no estator para operação com inversor de frequência

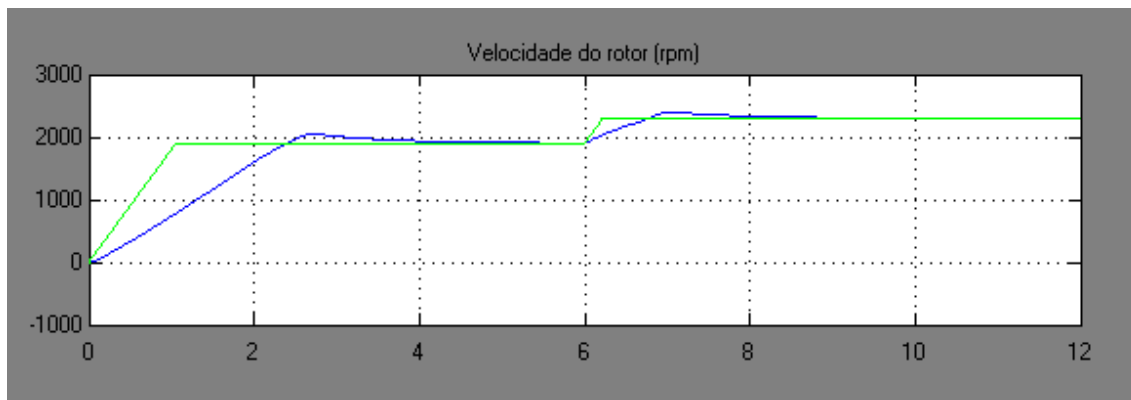


Figura 6.14 – Velocidade do rotor para operação com inversor de frequência

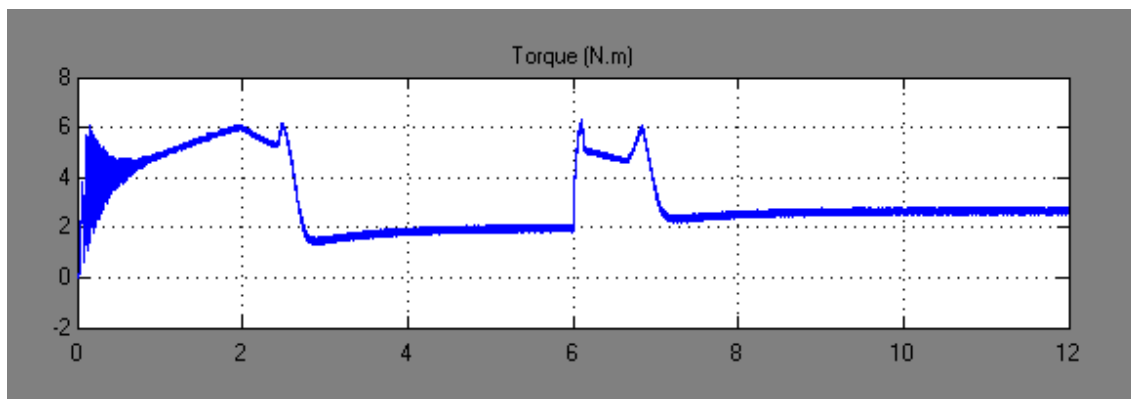


Figura 6.15 – Torque para operação com inversor de frequência

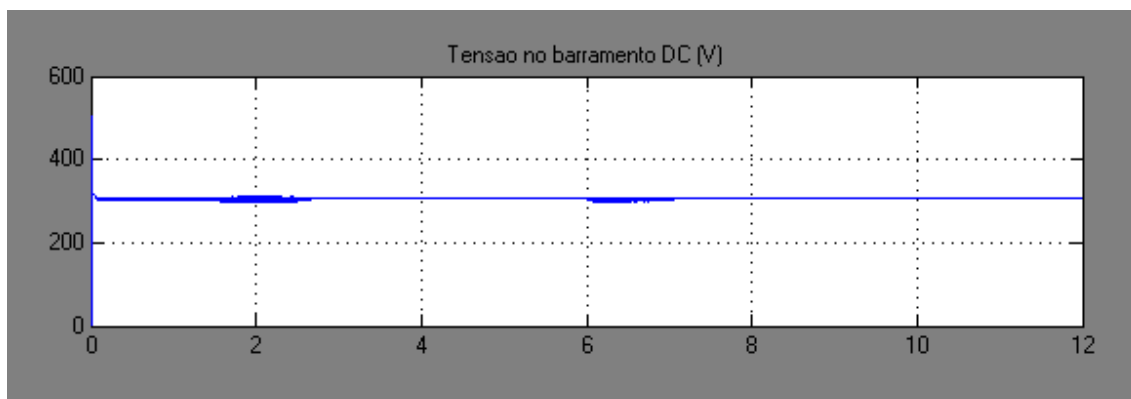


Figura 6.16 – Tensão no barramento DC para operação com inversor de frequência

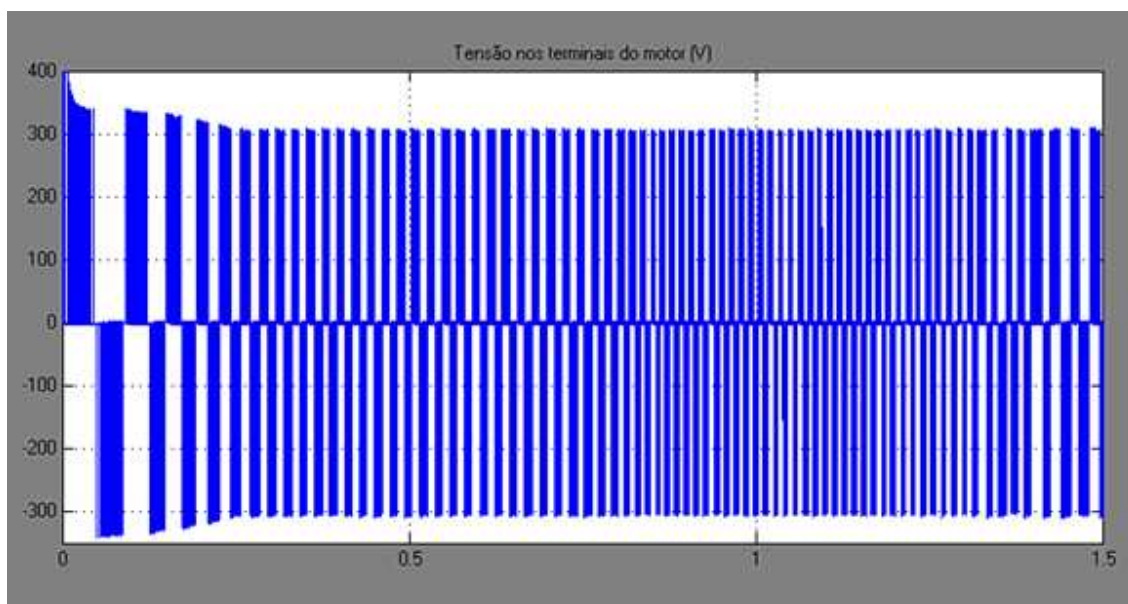


Figura 6.17 – Tensão nos terminais do motor

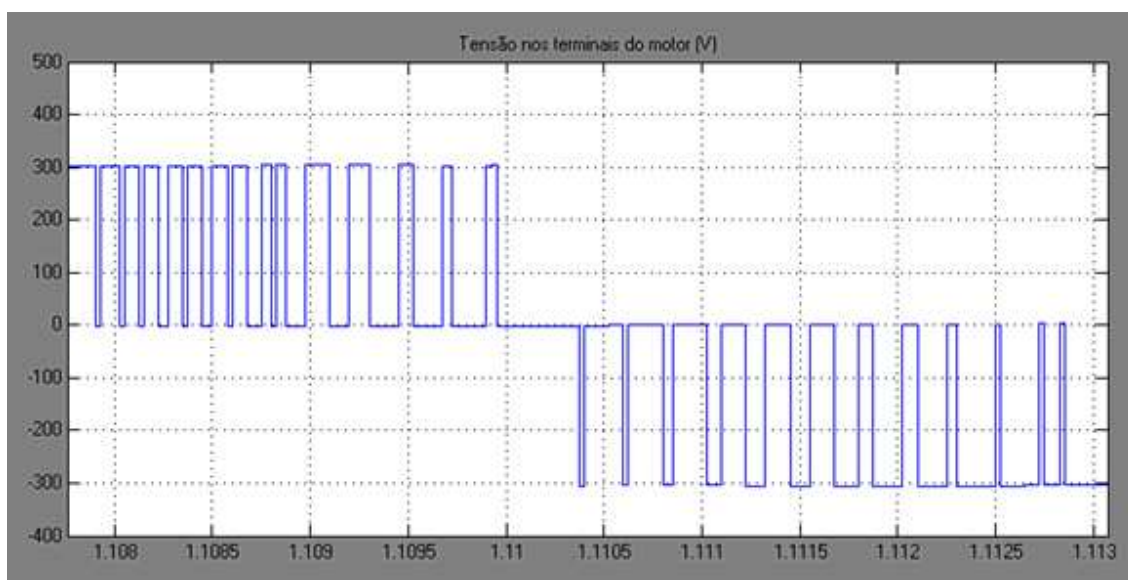


Figura 6.18 – Detalhe da forma de onda da tensão nos terminais do motor

Observa-se que a corrente apresenta valores elevados para os intervalos de variação de velocidade, tanto na partida quanto na alteração de rotação, entretanto, menores do que os valores para a partida direta. A corrente estabiliza-se no regime permanente em valores proporcionais à potência solicitada pelo motor. Na Figura 6.14 observa-se o comportamento da velocidade, onde a curva em rampa ilustra a velocidade de referência aplicada pelo sistema de controle, e a outra curva representa a rotação do motor. Observa-se que a rotação busca a velocidade de referência durante o regime permanente e estabiliza-se em seguida. Da mesma forma, o torque do motor varia no período transitório e estabiliza-se no regime permanente. A Figura 6.16 ilustra que a

tensão no barramento de corrente contínua se mantém praticamente constante. Na Figura 6.17 e 6.18 é possível observar em detalhes o comportamento da tensão aplicada pelo inversor nos terminais do motor.

6.4. Conclusões parciais

A partir dos resultados observados neste capítulo, verifica-se que as simulações consistem em ferramentas importantes e necessárias, já que os dispositivos verificados comportam-se adequadamente, sendo possível a observação de características como torque, velocidade e corrente tanto em regime permanente quanto transitório. Verifica-se também que a utilização de simulações computacionais pode trazer diversos benefícios para a análise de sistemas industriais, como economia de recursos e de tempo, como por exemplo, na utilização de fonte programável para injeção de harmônicos, já que não exige a implementação física dos componentes evitando inclusive danos aos equipamentos.

CAPÍTULO VII

7. Análise da viabilidade financeira

7.1. Introdução

Todo projeto necessita de recursos para ser implantado. Profissionais de engenharia sempre se deparam com situações nas quais precisam mostrar definitivamente que um projeto trará bons resultados, o que exige conhecimento e técnicas adequadas de análise de viabilidade financeira. Os investidores providenciam os recursos para implantação de projetos, e exigem em troca retornos adequados, que envolvem lucros, riscos, prazos, garantias e taxas de retorno [29].

A finalidade da análise da viabilidade financeira é, portanto, determinar se o projeto tem condições de atender às expectativas dos investidores para que possam então tomar a decisão de investir ou não [30], [31]. No estudo que será apresentado, o projeto consiste na substituição de equipamentos ineficientes e obsoletos por equipamentos mais modernos e eficientes, em particular a troca de motores da linha padrão por motores de alto rendimento, e a modernização de controle de vazão com a introdução de inversores de frequência. Dessa forma, pretende-se apresentar habilidades necessárias à implantação de projetos com sucesso.

7.2. Critérios para análise e classificação de projetos

7.2.1. Projeção de resultados

A projeção de resultados deve mostrar de forma objetiva os rendimentos esperados na implantação de um projeto [29], [31]. Pode ser apresentada em R\$/ano, ou R\$/mês, por exemplo.

No caso de projetos em sistemas industriais de ventilação, esse valor está diretamente ligado ao perfil de consumo e de potência do sistema, ou seja, esperam-se

maiores resultados de sistemas que disponham de maior potência instalada e que operem na maior parte do tempo.

Substituição de motores

Quando há a substituição de motores da linha padrão por motores da linha de alto rendimento, a projeção de resultados pode ser determinada a partir da economia de energia alcançada através da substituição multiplicada pelo valor específico da energia em R\$, como pode ser observado na Equação 7.1.

$$Eco_{Energia} = \sum_{i=1}^n \left[(P_i^{Conv} - P_i^{AR}) \cdot t_i^{op} \right] \quad (7.1)$$

Onde,

$Eco_{Energia}$	[kWh]	Economia de energia;
P_i^{Conv}	[kW]	Potência com motor da linha padrão para uma situação i;
P_i^{AR}	[kW]	Potência com motor de alto rendimento para uma situação i;
t_i^{op}	[h]	Tempo de operação do ventilador para uma situação i;
n	[-]	Número de valores de vazão do perfil de carga observados.

Dessa forma, a projeção de resultados para o tempo de operação t_i^{op} pode ser determinada pela Equação 7.2.

$$Eco_{R\$} = Eco_{Energia} \cdot V_{esp} \quad (7.2)$$

Onde,

V_{esp}	[R\$/kWh]	Valor específico da energia elétrica;
-----------	-----------	---------------------------------------

A economia de energia também pode ser expressa em forma percentual:

$$Eco_{Energia} \% = \frac{Eco_{Energia}}{\sum_{i=1}^n P_i^{Conv} \cdot t_i^{op}} \cdot 100 \quad (7.3)$$

Onde,

$Eco_{Energia} \%$ [%] Economia de energia percentual.

É possível verificar que a economia de energia percentual terá valores mais elevados para casos em que o sistema de ventilação opere com grande potência instalada (pois a diferença de potência dos motores também será maior) e que apresente elevado tempo de operação. Consequentemente nessa situação a projeção de resultados também terá valores mais elevados.

Controle de velocidade

De forma semelhante, a projeção de resultados para aplicação de inversor de frequência pode ser dada pela Equação 7.4.

$$Eco_{Energia} = \sum_{i=1}^n \left[(P_i^{damper} - P_i^{inversor}) \cdot t_i^{op} \right] \quad (7.4)$$

Onde,

$Eco_{Energia}$	[kWh]	Economia de energia;
P_i^{damper}	[kW]	Potência com <i>damper</i> para uma situação i;
$P_i^{inversor}$	[kW]	Potência com inversor de frequência para uma situação i;
t_i^{op}	[h]	Tempo de operação do ventilador para uma situação i;
n	[-]	Número de valores de vazão do perfil de carga observados.

Dessa forma, a projeção de resultados para o tempo de operação t_i^{op} pode ser determinada pela Equação 7.5.

$$Eco_{R\$} = Eco_{Energia} \cdot V_{esp} \quad (7.5)$$

Onde,

V_{esp} [R\$/kWh] Valor específico da energia elétrica;

A economia de energia também pode ser expressa em forma percentual:

$$Eco_{Energia} \% = \frac{Eco_{Energia}}{\sum_{i=1}^n P_i^{damper} \cdot t_i^{op}} \cdot 100 \quad (7.6)$$

Onde,

$Eco_{Energia} \%$ [%] Economia de energia percentual.

É possível verificar que a economia de energia percentual terá valores mais elevados para casos em que o sistema de ventilação opere com diferenças de vazão por um tempo maior, pois são nessas situações em que se encontram os maiores valores de economia de energia, e nas quais consequentemente a projeção de resultados também terá valores mais elevados.

7.2.2. Indicadores da viabilidade financeira

Existem diversos critérios para análise de decisões em projetos, e não se pode dizer que um critério é melhor que outro. Existem critérios conceitualmente corretos e errados [32], [33]. Dessa forma, pretende-se apresentar os principais critérios para análise de projetos e foco de resultados econômicos [34].

Valor presente líquido

O critério do valor presente líquido – VPL é o mais utilizado e mais conhecido para análise de investimentos, pois considera o valor do dinheiro no tempo, sendo assim, conceitualmente correto [32].

Primeiramente pretende-se diferenciar os conceitos de valor presente – VP e valor presente líquido – VPL. O valor presente de um ativo determina qual o seu valor no tempo, e para a aplicação na análise dos motores pode ser determinado pela Equação 7.7.

$$VP = \sum_{t=0}^n \frac{Eco_{R\$}}{(1+i)^t} \quad (7.7)$$

Onde,

VP	[R\$]	Valor presente líquido;
$Eco_{R\$}$	[R\$]	Economia em R\$ para um período t ;
i	[%]	Taxa de juros;

t	[-]	Período t ;
n	[-]	Data desejada a se determinar o VPL.

Já o VPL consiste simplesmente na diferença entre o valor presente do projeto e o custo do projeto, ambos calculados para uma mesma data.

O valor investido será recuperado periodicamente através da economia de energia. Esse processo de retorno em parcelas pode ser observado através de um fluxo de caixa, no qual o investimento é representado por uma seta apontada para baixo, e os retornos periódicos desse investimento são representados por setas apontadas para cima, conforme Figura 7.1.

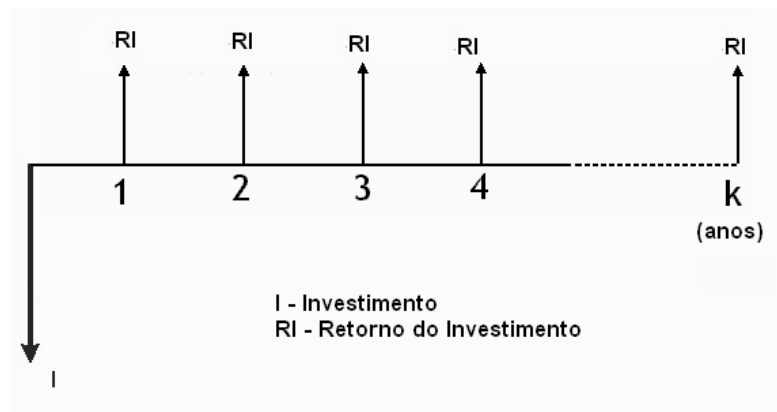


Figura 7.1 – Fluxo de caixa

Considerando-se a data referência como sendo a data do investimento, o VPL pode ser dado pela Equação 7.8.

$$VPL = \left(\sum_{t=0}^n \frac{Eco_{R\$}}{(1+i)^t} \right) - \Delta C \quad (7.8)$$

Onde,

VPL	[R\$]	Valor presente líquido;
ΔC	[R\$]	Custo do investimento;

A economia em R\$ refere-se ao fluxo de caixa, que é exatamente o valor que será retornado periodicamente durante a vida útil do equipamento. É possível observar que o VPL varia de acordo com o tempo, pois inclui periodicamente os fluxos de caixa

provenientes da economia de energia. Na Tabela 7.1 verifica-se o critério decisório do VPL.

Tabela 7.1 – Critério decisório do VPL

VPL = 0	O projeto remunera exatamente a taxa i ;
VPL < 0	O projeto não atinge a rentabilidade da taxa i .
VPL > 0	O projeto remunera acima da taxa i , ou seja, gera riqueza;

De um modo geral, observa-se que o VPL indica a situação do projeto em qualquer momento desejado. Dessa forma, a quantidade de períodos n a ser considerada depende da aplicação do critério, podendo ser o tempo esperado de retorno dos investidores, ou o período de vida útil do equipamento, por exemplo.

Taxa interna de retorno

A Taxa interna de retorno – TIR, é a taxa de retorno intrínseca ao projeto, ou seja, determina o retorno efetivo do projeto considerando todos os investimentos e fluxos de caixa. Por essa razão, quando se calcula o VPL utilizando como taxa de desconto a TIR, o VPL será nulo. Em outras palavras, a TIR é a taxa que anula o VPL [29] [32].

Sendo assim, a partir da expressão do VPL, admite-se que $VPL=0$, e que $i=TIR$.

$$0 = \left(\sum_{t=0}^n \frac{Eco_{R\$}}{(1 + TIR)^t} \right) - \Delta C \quad (7.9)$$

Onde,

TIR [%] Taxa interna de retorno.

Dessa forma é possível determinar a expressão que fornece o valor da TIR:

$$\sum_{t=0}^n \frac{Eco_{R\$}}{(1 + TIR)^t} = \Delta C \quad (7.10)$$

É possível observar que a determinação da TIR envolve cálculos complexos, já que para um ativo que apresente t períodos de operação, haverá uma equação de grau t

para ser solucionada, podendo inclusive haver raízes imaginárias. Dessa forma, a melhor maneira de se determinar a TIR é através de recursos computacionais. Felizmente, quando há apenas uma inversão no fluxo de caixa, existe apenas uma TIR, e é essa situação que se verifica na aplicação dos motores.

O critério decisório é simples. A TIR deve ser maior do que a taxa mínima de atratividade estabelecida pelo investidor para que a aplicação seja viável.

Em algumas comparações de rentabilidade pode ser necessária a conversão de taxas de juros, nas quais se deseja obter a equivalência de taxas com capitalização composta para diferentes períodos, como será observado no estudo de caso. Para essas comparações utiliza-se a Equação 7.11.

$$(1 + i_1)^{p_1} = (1 + i_2)^{p_2} \quad (7.11)$$

Onde,

i_1	[%]	Taxa de juros a ser convertida;
p_1	[unid. tempo]	Período da taxa de juros a ser convertida;
i_2	[%]	Taxa de juros desejada;
p_2	[unid. tempo]	Período da taxa de juros desejada.

Índice de lucratividade líquida

O índice de lucratividade líquida – ILL mostra a relação entre o custo do investimento e o valor presente do projeto. Em outras palavras, esse índice indica quantas unidades monetárias serão retornadas para cada unidade monetária investida [29].

$$ILL = \frac{VP}{\Delta C} \quad (7.12)$$

Onde,

ILL	[-]	Índice de lucratividade líquida.
-------	-----	----------------------------------

O critério decisório consiste na observação do valor do ILL. Para valores de ILL maiores que 1, a aplicação é viável, entretanto, para valores de ILL menores que 1 a aplicação é inviável.

Tempo de retorno simples ou *payback* simples

É o tempo necessário para que o capital investido na aquisição de um equipamento mais eficiente seja retornado na forma de parcelas mensais que deixarão de ser pagas na conta de energia (economia mensal). Em outras palavras, pretende-se determinar qual o momento em que os montantes do fluxo de caixa se anulam [29] [32].

O tempo de retorno adequado é estabelecido de acordo com as necessidades e características de cada projeto. Equipamentos eficientes apresentam custos mais elevados, e uma análise do tempo de retorno permite verificar se o investimento será recuperado no curto, médio, ou longo prazo, ou ainda, se esse investimento não será recuperado durante a vida útil do equipamento. Não existem indicadores de retorno de investimento aplicáveis a todos os projetos. Cada investidor define os parâmetros que lhes são convenientes. Deve-se ter também em mente que a partir do momento em que o investimento é recuperado, o equipamento adquirido passará a proporcionar uma economia mensal de energia, a qual do ponto de vista econômico pode ser considerada como um ganho de capital, o qual se estenderá por toda a vida útil do equipamento.

Com base na economia mensal proporcionada pelo motor de alto rendimento, pode-se determinar qual o tempo de retorno do investimento adicional feito na aquisição do equipamento mais eficiente. O tempo de retorno simples não considera a capitalização do valor da economia mensal (taxa de juros zero) e é dado pela Equação 7.13.

$$t_{RS} = \frac{\Delta C}{Eco_{R\$mensal}} \quad (7.13)$$

Onde,

t_{RS}	[meses]	Tempo de retorno simples;
ΔC	[R\$]	Custo do investimento;
$Eco_{R\$mensal}$	[R\$]	Economia por mês em R\$.

Por não considerar a taxa de desconto nem o valor do dinheiro no tempo, esse não é um critério de análise de investimentos adequado.

Tempo de retorno capitalizado ou *payback* descontado

O tempo de retorno capitalizado considera uma taxa de desconto e o valor do dinheiro no tempo, ou seja, calcula-se o tempo de retorno descontando os valores projetados dos fluxos de caixa a seus valores presentes [29], [32].

Considerando uma taxa de juros i em valores percentuais e considerando k períodos obtêm-se o seguinte valor presente das parcelas mensais, conforme Equação 7.14.

$$\Delta P = \frac{\left[\left(1 + \frac{i}{100} \right)^k - 1 \right]}{\left[\frac{i}{100} \cdot \left(1 + \frac{i}{100} \right)^k \right]} \cdot Eco_{R\$mensal} \quad (7.14)$$

Onde,

ΔP	[R\$]	Valor presente das parcelas considerando capitalização;
i	[%]	Taxa de juros;
k	[meses]	Quantidade de meses considerando capitalização.

De acordo com a fórmula anterior, as parcelas de retorno de investimento aparecem multiplicadas pelo fator de valor atual. A fim de determinar o tempo de retorno capitalizado deve-se igualar o valor presente com o custo adicional e considerar o número de períodos como incógnita:

$$\Delta C = \frac{\left[\left(1 + \frac{i}{100} \right)^{t_{RC}} - 1 \right]}{\left[\frac{i}{100} \cdot \left(1 + \frac{i}{100} \right)^{t_{RC}} \right]} \cdot Eco_{R\$mensal} \quad (7.15)$$

Onde,

t_{RC}	[meses]	Tempo de retorno capitalizado
----------	---------	-------------------------------

Através da aplicação de logaritmos em ambos os lados da Equação 7.15, pode-se determinar o tempo de retorno capitalizado.

$$t_{RC} = \frac{\log \left(\frac{Eco_{R\$mensal}}{Eco_{R\$mensal} - \Delta C \cdot \frac{i}{100}} \right)}{\log \left(1 + \frac{i}{100} \right)} \quad (7.16)$$

Deve ser observado que o tempo de retorno simples é menor que o tempo de retorno capitalizado, pois agora se considera o valor do dinheiro no tempo, e o investimento inicial será recuperado em parcelas periódicas.

Tempo de retorno capitalizado considerando aumento do custo da energia

Para se calcular o tempo de retorno pode ser incluído o aumento no custo da energia elétrica. Primeiro se deve encontrar uma taxa líquida de juros, utilizando a Equação 7.17.

$$i_L = \left(\frac{\left(1 + \frac{i}{100} \right)}{\left(1 + \frac{ie}{100} \right)} - 1 \right) \cdot 100 \quad (7.17)$$

Onde,

i_L	[%]	Taxa líquida de juros;
ie	[%]	Taxa de aumento no custo da energia.

De acordo com a expressão acima é possível observar que quando se considera a inclusão da taxa de aumento do custo da energia elétrica, a taxa de juros equivalente será menor. Dessa forma, o tempo de retorno também será reduzido, e pode ser obtido através da Equação 7.18.

$$t_{RC} = \frac{\log \left(\frac{Eco_{R\$mensal}}{Eco_{R\$mensal} - \Delta C \cdot \frac{i_L}{100}} \right)}{\log \left(1 + \frac{i_L}{100} \right)} \quad (7.18)$$

Energia economizada ao longo da vida útil

Como a economia de energia será alcançada durante toda a vida útil do equipamento, é importante estimar qual a quantidade de energia deixará de ser consumida com a substituição de equipamento. Para isso é preciso conhecer a vida útil média do equipamento. No caso específico dos motores, e considerando uma operação em condições nominais, se conhece uma estimativa de vida útil, obtida através de observações estatísticas [1], e que pode ser observada na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Vida útil média dos motores de indução

Potência (HP)	Tempo de vida (anos)	Vida média (anos)
Menor que 1	10 a 15	12,9
1 a 5	13 a 19	17,1
5 a 20	16 a 20	19,4
21 a 50	18 a 26	21,8
51 a 125	24 a 33	28,5
Maior que 125	25 a 38	29,3

Observa-se que a vida útil dos motores varia de acordo com sua potência nominal. Entretanto, esse mesmo estudo indica que a vida útil média dos motores em geral pode ser considerada como sendo de 13,3 anos. Este valor pode ser utilizado para fins de análise de viabilidade financeira.

Já para o caso dos inversores de frequência, seus fabricantes estimam uma vida útil média entre 50 e 100 mil horas, ou seja, algo entre 5,7 e 11,4 anos, de acordo com suas características. Pode ser adotado um valor de 10 anos para a vida útil média dos inversores de frequência.

Dessa forma, a energia economizada ao longo da vida útil do equipamento pode ser obtida através da Equação 7.19.

$$Eco_{VU} = Eco_{ano} \cdot V_U \quad (7.19)$$

Onde,

Eco_{vu} [kWh] Energia economizada ao longo da vida útil;
 Eco_{ano} [kWh] Energia economizada anualmente;
 V_U [anos] Vida útil do equipamento.

Valor líquido retornado

Utilizado para determinar qual o valor será retornado ao longo da vida útil. Este também não é um critério adequado, pois não considera a taxa de desconto. É determinado pela Equação 7.20.

$$V_{LS} = Eco_{vu} \cdot V_{esp} - \Delta C \quad (7.20)$$

Onde,

V_{LS} [R\$] Valor líquido simples retornado ao longo da vida útil.

Valor líquido retornado capitalizado

Utilizado para determinar qual o valor será retornado ao longo da vida útil do equipamento, agora admitindo a taxa de desconto. Considera-se que as parcelas periódicas de retorno serão aplicadas em um investimento que apresente uma taxa de retorno ir . A expressão que determina o valor líquido retornado capitalizado [35] pode ser observada a seguir.

$$V_{LC} = \left(1 + \frac{ir}{100}\right) \frac{\left[\left(1 + \frac{ir}{100}\right)^m - 1\right]}{\frac{ir}{100}} \cdot Eco_{R\$mensal} \quad (7.21)$$

Sendo que:

$$m = Vu' - t_{RC} \quad (7.22)$$

Onde,

V_{LC} [R\$] Valor líquido retornado capitalizado;

ir	[%]	Taxa de rendimento mensal;
m	[meses]	Diferença entre a vida útil e o tempo de retorno capitalizado;
Vu'	[meses]	Vida útil do equipamento.

7.2.3. Árvores de decisão

Muitos projetos apresentam projeções de resultados dependentes de eventos futuros internos ou externos que podem mudar substancialmente os rumos da aplicação em análise. Alguns desses eventos são absolutamente exógenos, e não dependem de decisões operacionais. A árvore de decisão é uma ferramenta bastante útil quando há a necessidade de se tomar decisões no presente para eventos que apresentem a possibilidade de enfrentar diferentes cenários futuros [29], [34].

Ao se solucionar a árvore de decisão, deve-se calcular o resultado de cada decisão e optar pela que leva ao melhor resultado.

Por exemplo, uma indústria pretende investir na modernização de seus equipamentos, substituindo o controle de vazão dos ventiladores do tipo *dampers* por inversores de frequência. Entretanto, para que se tenha retorno, esses motores terão que operar por certo período que justifique o investimento. Dessa forma, o retorno está ligado a diversos fatores como demanda de mercado do produto fabricado nessa indústria e a cotação do dólar [29]. Percebe-se que o comportamento do mercado é absolutamente exógeno às decisões do gerente. Fica a questão: Investir ou não investir?

Para essa situação, a árvore de decisão pode ser uma adequada ferramenta de análise.

Suponham-se as seguintes situações:

A implantação dos inversores de frequência exige o investimento de R\$60.000,00.

Consultorias especializadas declaram que o mercado para este setor está otimista para os próximos dois anos, e projeta dois cenários diferentes: no primeiro há a probabilidade estimada em 80% de a demanda estar elevada no primeiro ano e se manter; e no segundo cenário, de a demanda estar baixa no primeiro ano e se manter, com uma probabilidade de 20%.

Engenheiros da empresa observam os dados históricos e os custos fixos e variáveis da produção, chegando à seguinte conclusão: quando a demanda está elevada, o valor referente à energia economizada fica em torno de R\$45.000,00/ano, enquanto

que quando a demanda está baixa, o valor referente à energia economizada fica em torno de R\$5.000,00/ano.

A taxa do custo do capital (taxa de juros) da indústria é de 15% ao ano.

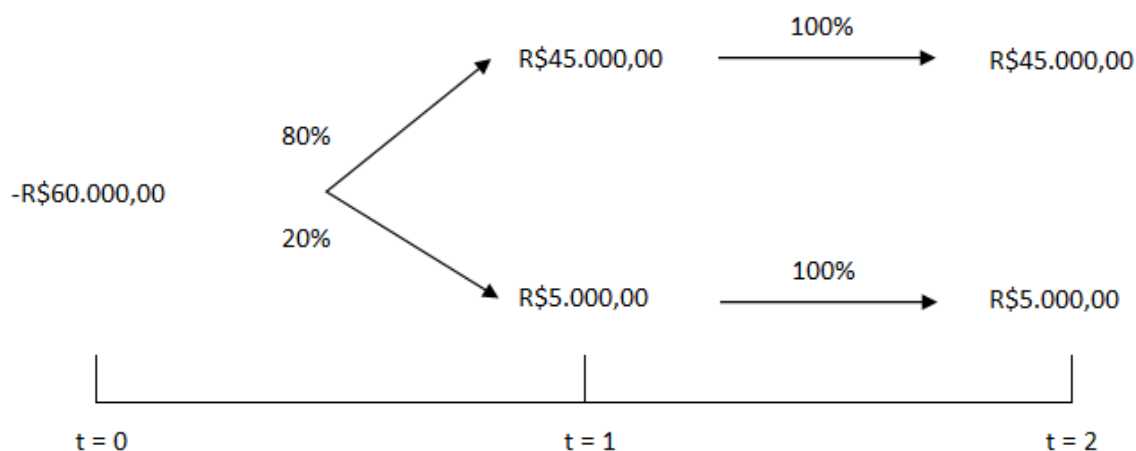


Figura 7.2 – Exemplo de árvore de decisão

Para que o projeto seja viável, o VPL (diferença entre o fluxo de caixa esperado e o investimento, comparados em referência a uma mesma data) deve ser positivo.

Para a determinação do fluxo de caixa esperado, procede-se da direita para a esquerda, multiplicando-se o fluxo de caixa pela probabilidade e trazendo os valores para a data referência (t=0). Dessa forma, o VPL pode ser determinado da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} VPL &= \frac{45.000}{(1 + 0,15)^2} \times 1 \times 0,8 + \frac{45.000}{(1 + 0,15)^1} \times 0,8 + \frac{5.000}{(1 + 0,15)^2} \times 1 \times 0,2 \\ &\quad + \frac{5000}{(1 + 0,15)^1} \times 0,2 - 60.000 \\ VPL &= R\$151,23 \end{aligned}$$

Verifica-se que o VPL é positivo, e corresponde a R\$151,23, logo, a implantação do projeto é viável.

7.3. Estudo de caso

Pretende-se realizar um estudo de caso aplicando conceitos do ensaio realizado anteriormente, os indicadores abordados neste capítulo, e discutir a viabilidade financeira da implantação do projeto para três situações distintas. A primeira consiste apenas na substituição do motor da linha padrão por alto rendimento, a segunda consiste

na utilização de inversor de frequência para controle de rotação, e finalmente, uma análise abordando as duas situações simultaneamente.

7.3.1. Apresentação da metodologia e do sistema do estudo de caso

Pretende-se analisar um sistema acionado pelos motores ensaiados anteriormente que trabalha durante 4.000 horas por ano, em um processo que exige variação dos valores de vazão em quatro etapas, conforme descrito na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Valores de vazão e tempo para os ensaios.

Etapa	Vazão (m³/min)	Tempo (h)
1	6	800
2	10	1.000
3	14	1.000
4	18	1.200
Total		4.000

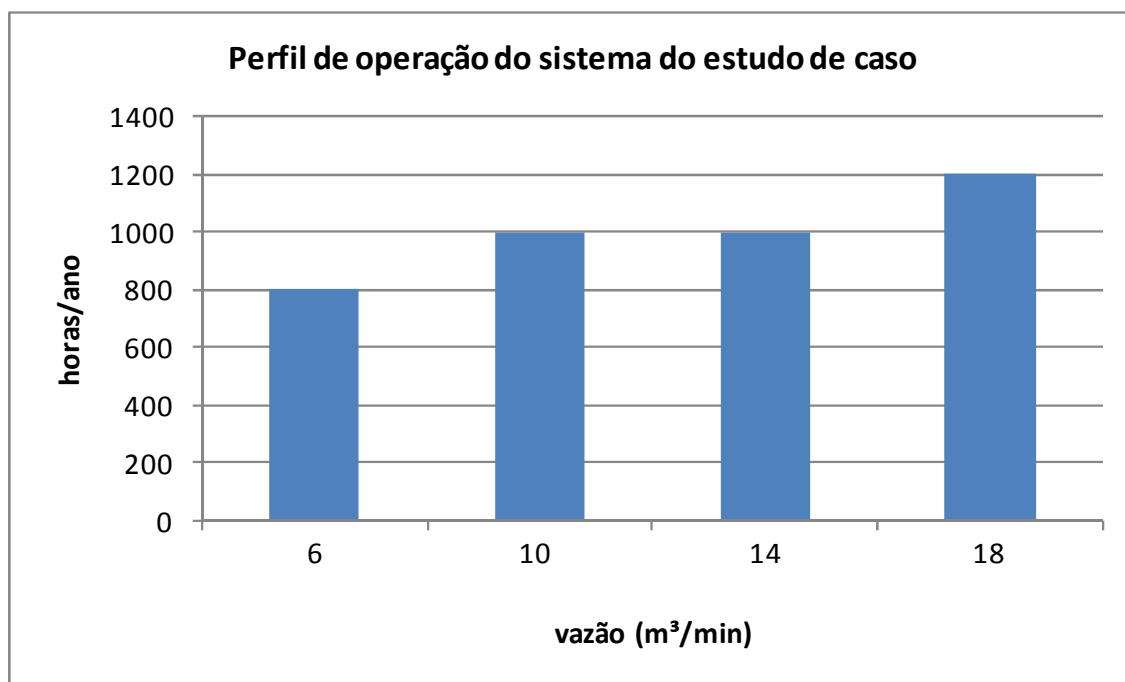


Figura 7.3 – Perfil de operação do sistema do estudo de caso

Considera-se que o sistema esteja adequadamente especificado. É possível observar que a operação ocorre em grande parte na região próxima ou nas condições nominais de funcionamento (18m³/min).

De acordo com comportamento de mercado, admitem-se ainda os seguintes valores:

- Valor específico da energia elétrica: R\$0,35/kWh;
- Motor da linha padrão de 1,5CV: R\$220,00;
- Motor de alto rendimento de 1,5CV: R\$286,00;
- Inversor de frequência compatível com os motores do ensaio: R\$770,00;
- Taxa de juros: 1% ao mês, equivalente a 12,68% ao ano;
- Taxa de aumento do custo da energia: 0,2% ao mês.

Os procedimentos a serem utilizados para a determinação dos valores de economia de energia e indicadores de viabilidade partem da metodologia apresentada anteriormente no trabalho. Observa-se novamente na Figura 7.4 as curvas para as quatro situações ensaiadas, e que serão utilizadas para cada uma das análises.

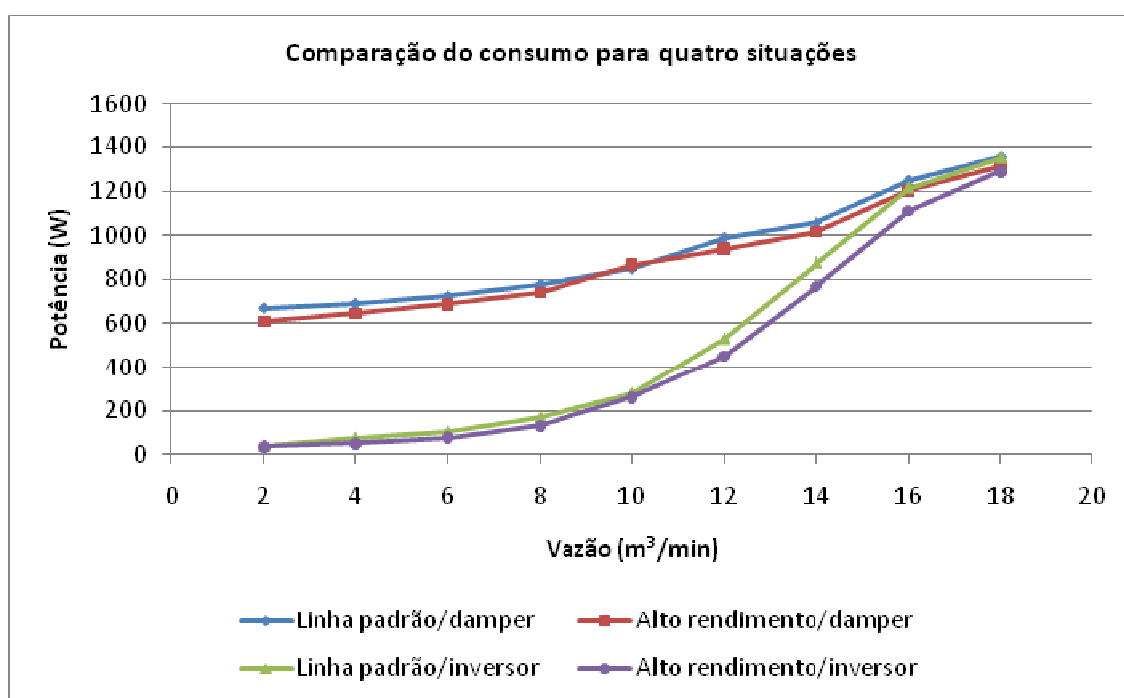


Figura 7.4 – Comparação do consumo para quatro situações

A partir dos dados do estudo de caso é possível iniciar a análise da viabilidade financeira.

7.3.2. Substituição do motor da linha padrão por alto rendimento

A Tabela 7.4 indica as condições que serão comparadas na análise, as condições iniciais e mais baratas, e as condições que envolvem custos adicionais, denominadas de condições projetadas.

Tabela 7.4 – Condições da análise 1

Condições iniciais		Condições projetadas	
Motor	Controle de vazão	Motor	Controle de vazão
Linha padrão	<i>Damper</i>	Alto rendimento	<i>Damper</i>

Inicialmente determinam-se os valores médios de potência para cada situação e etapa de operação, a partir dos dados de ensaio apresentados.

Tabela 7.5 – Economia de energia para a análise 1

Etapa	P_i^{Conv} (kW)	P_i^{AR} (kW)	t_i^{op} (h)	$Eco_{Energia}$ (kWh)	$Eco_{Energia} \%$
1	0,724	0,688	800	28,8	4,97
2	0,849	0,867	1000	-18	-2,12
3	1,057	1,016	1000	41	3,88
4	1,357	1,313	1200	52,8	3,24
Total			4000	104,6	2,54

Dessa forma, determina-se a projeção de resultados:

$$Eco_{R\$anual} = Eco_{Energia} \cdot V_{esp} = 104,6 \cdot 0,35 = R\$36,61$$

$$Eco_{R\$mensal} = \frac{Eco_{Energia} \cdot V_{esp}}{12} = \frac{104,6 \cdot 0,35}{12} = R\$3,05$$

O que diferencia as duas situações desta análise é o motor, alto rendimento ou linha padrão. Sendo assim, o investimento necessário é dado pela diferença de custo entre os motores.

Logo:

$$\Delta C = 286 - 220 = R\$66,00$$

Valor presente líquido

O cálculo do VPL será realizado a partir da expressão apresentada anteriormente, e de recursos computacionais do *Microsoft Excel*.

A curva do VPL no tempo pode ser observada na Figura 7.5. Será determinado o VPL para um tempo de 13 anos, período mais próximo da estimativa de vida útil do equipamento.

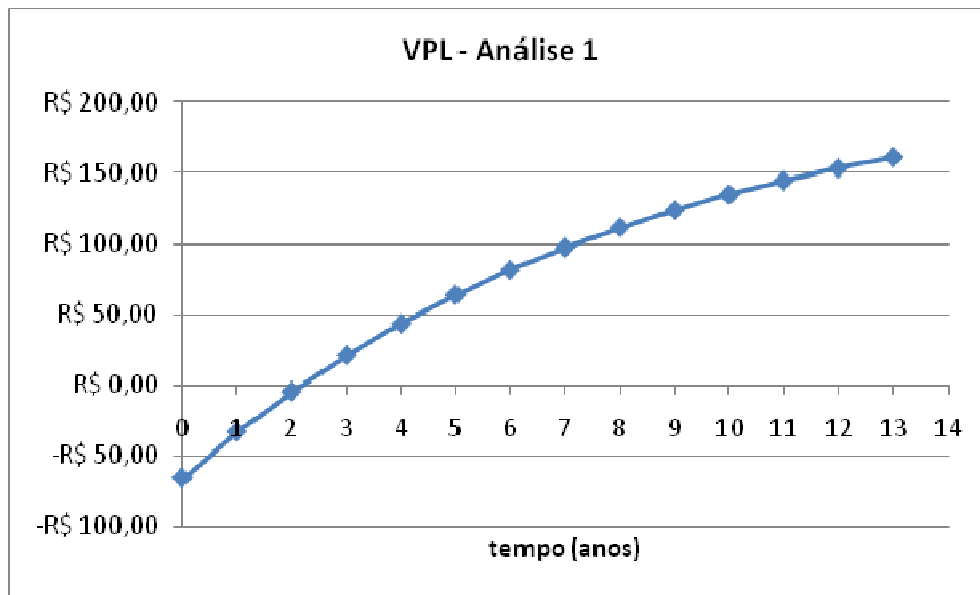


Figura 7.5 – VPL para a análise 1

Verificou-se que considerando o período de vida útil do equipamento o VPL corresponde a:

$$\text{VPL} = \text{R\$}161,56.$$

Taxa interna de retorno

A partir da expressão apresentada anteriormente, considerando o período de análise de 13 anos, e utilizando recursos computacionais, determina-se o valor da TIR:

$$\text{TIR} = 55,29\% \text{ a.a.}$$

Índice de lucratividade líquida

$$ILL = \frac{VP}{\Delta C} = \frac{VPL + \Delta C}{\Delta C} = \frac{161,56 + 66}{66}$$
$$ILL = 3,45$$

Tempo de retorno simples ou *payback* simples

$$t_{RS} = \frac{\Delta C}{Eco_{R\$mensal}} = \frac{66}{3,05}$$
$$t_{RS} = 21,64 \text{ meses}$$

Tempo de retorno capitalizado ou *payback* descontado

$$t_{RC} = \frac{\log \left(\frac{Eco_{R\$mensal}}{Eco_{R\$mensal} - \Delta C \cdot i / 100} \right)}{\log (1 + i / 100)}$$

$$t_{RC} = \frac{\log \left(\frac{3,05}{3,05 - 66 \times 0,01} \right)}{\log (1 + 0,01)}$$

$$t_{RC} = 24,05 \text{ meses}$$

Tempo de retorno capitalizado considerando aumento do custo da energia

$$i_L = \left[\left(\frac{1 + \frac{i}{100}}{1 + \frac{ie}{100}} \right) - 1 \right] \cdot 100$$

$$i_L = \left[\left(\frac{1 + \frac{1}{100}}{1 + \frac{0,2}{100}} \right) - 1 \right] \cdot 100$$

$$i_L = 0,7984\%$$

$$t_{RC} = \frac{\log \left(\frac{Eco_{R\$mensal}}{Eco_{R\$mensal} - \Delta C \cdot i_L / 100} \right)}{\log (1 + i_L / 100)}$$

$$t_{RC} = \frac{\log \left(\frac{3,05}{3,05 - 66 \times 0,007984} \right)}{\log (1 + 0,007984)}$$

$$t_{RC} = 23,85 \text{ meses}$$

Energia economizada ao longo da vida útil

$$Eco_{VU} = Eco_{ano} \cdot V_U$$

$$Eco_{VU} = 104,6 \times 13,3$$

$$Eco_{VU} = 1391,18 \text{ kWh}$$

Valor líquido retornado

$$V_{LS} = Eco_{VU} \cdot V_{esp} - \Delta C$$

$$V_{LS} = 1391,18 \times 0,35 - 66$$

$$V_{LS} = R\$420,91$$

Valor líquido retornado capitalizado

$$m = Vu' - t_{RC}$$

$$m = (13,3 \times 12) - 23,85$$

$$m = 135,75$$

$$V_{LC} = \left(1 + \frac{ir}{100}\right) \cdot \frac{\left[\left(1 + \frac{ir}{100}\right)^m - 1\right]}{\frac{ir}{100}} \cdot Eco_{R\$mensal}$$

$$V_{LC} = \left(1 + \frac{1}{100}\right) \cdot \frac{\left[\left(1 + \frac{1}{100}\right)^{135,75} - 1\right]}{\frac{1}{100}} \cdot 3,05$$

$$V_{LC} = R\$881,13$$

7.3.3. Substituição do damper por inversor de frequência

Da mesma forma, observam-se na Tabela 7.6 as condições da segunda análise.

Tabela 7.6 – Condições da análise 2

Condições iniciais		Condições projetadas	
Motor	Controle de vazão	Motor	Controle de vazão
Linha padrão	Damper	Linha padrão	Inv. De frequência

Novamente determinam-se os valores médios de potência para cada situação e etapa de operação, a partir dos dados de ensaio apresentados.

Tabela 7.7 – Economia de energia para a análise 2

Etapa	P_i^{damper} (kW)	$P_i^{inversor}$ (kW)	t_i^{op} (h)	$Eco_{Energia}$ (kWh)	$Eco_{Energia} \%$
1	0,724	0,105	800	495,2	85,5
2	0,849	0,280	1000	569	67,02
3	1,057	0,875	1000	182	17,22
4	1,357	1,352	1200	6	0,37
Total			4000	1252,2	30,44

Dessa forma, determina-se a projeção de resultados:

$$Eco_{R\$anual} = Eco_{Energia} \cdot V_{esp} = 1252,20,35 = R\$438,27$$

$$Eco_{R\$mensal} = \frac{Eco_{Energia} \cdot V_{esp}}{12} = \frac{1252,20,35}{12} = R\$36,52$$

O que diferencia as duas situações desta análise é o controle de vazão. Sendo assim, o investimento necessário deve ser o custo do inversor de frequência.

Logo:

$$\Delta C = R\$770,00$$

Valor presente líquido

De forma semelhante à análise 1, é possível observar na Figura 7.6 a curva do VPL no tempo para a análise 2, e o seu valor para o período de 13 anos, que corresponde a:

$$VPL = R\$1.954,22.$$

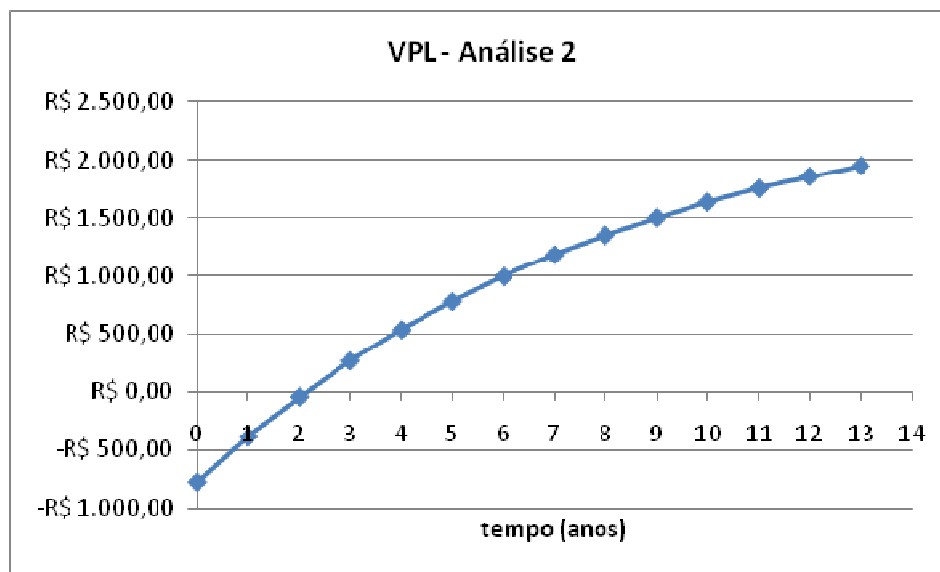


Figura 7.6 – VPL para a análise 2

Taxa interna de retorno

De forma semelhante, à análise 1, determina-se o valor da TIR para análise 2:

$$TIR = 56,75\% \text{ a.a.}$$

Índice de lucratividade líquida

$$ILL = \frac{VP}{\Delta C} = \frac{VPL + \Delta C}{\Delta C} = \frac{1954,22 + 770}{770}$$
$$ILL = 3,54$$

Tempo de retorno simples ou *payback* simples

$$t_{RS} = \frac{\Delta C}{Eco_{R\$mensal}} = \frac{770}{36,52}$$
$$t_{RS} = 21,08 \text{ meses}$$

Tempo de retorno capitalizado ou *payback* descontado

$$t_{RC} = \frac{\log \left(\frac{Eco_{R\$mensal}}{Eco_{R\$mensal} - \Delta C \cdot i/100} \right)}{\log (1 + i/100)}$$
$$t_{RC} = \frac{\log \left(\frac{36,52}{36,52 - 770 \times 0,01} \right)}{\log (1 + 0,01)}$$
$$t_{RC} = 23,8 \text{ meses}$$

Tempo de retorno capitalizado considerando aumento do custo da energia

$$i_L = \left[\left(\frac{1 + \frac{i}{100}}{1 + \frac{ie}{100}} \right) - 1 \right] \cdot 100$$

$$i_L = \left[\left(\frac{1 + \frac{1}{100}}{1 + \frac{0,2}{100}} \right) - 1 \right] \cdot 100$$
$$i_L = 0,7984\%$$

$$t_{RC} = \frac{\log \left(\frac{Eco_{R\$mensal}}{Eco_{R\$mensal} - \Delta C \cdot i_L/100} \right)}{\log (1 + i_L/100)}$$

$$t_{RC} = \frac{\log \left(\frac{36,52}{36,52 - 770 \times 0,007984} \right)}{\log (1 + 0,007984)}$$

$$t_{RC} = 23,18 \text{ meses}$$

Energia economizada ao longo da vida útil

$$Eco_{VU} = Eco_{ano} \cdot V_U$$

$$Eco_{VU} = 1252,2 \times 13,3$$

$$Eco_{VU} = 16654,26 \text{ kWh}$$

Valor líquido retornado

$$V_{LS} = Eco_{VU} \cdot V_{esp} - \Delta C$$

$$V_{LS} = 16654,26 \times 0,35 - 770$$

$$V_{LS} = R\$5.758,99$$

Valor líquido retornado capitalizado

$$m = Vu' - t_{RC}$$

$$m = (13,3 \times 12) - 23,18$$

$$m = 136,42$$

$$V_{LC} = \left(1 + \frac{ir}{100} \right) \cdot \frac{\left[\left(1 + \frac{ir}{100} \right)^m - 1 \right]}{\frac{ir}{100}} \cdot Eco_{R\$mensal}$$

$$V_{LC} = \left(1 + \frac{1}{100} \right) \cdot \frac{\left[\left(1 + \frac{1}{100} \right)^{136,42} - 1 \right]}{\frac{1}{100}} \cdot 36,52$$

$$V_{LC} = R\$10.645,70$$

7.3.4. Aplicação do motor de alto rendimento e do inversor de frequência

Da mesma forma, observam-se abaixo as condições da segunda análise. Neste caso e de acordo com os aspectos abordados, as condições projetadas configuram o sistema mais eficiente possível.

Tabela 7.8 – Condições da análise 3

Condições iniciais		Condições projetadas	
Motor	Controle de vazão	Motor	Controle de vazão
Linha padrão	Damper	Alto rendimento	Inv. de frequência

Novamente determinam-se os valores médios de potência para cada situação e etapa de operação, a partir dos dados de ensaio apresentados. Denomina-se $P_i^{inicial}$ como sendo a potência para a operação nas condições iniciais, e $P_i^{projeto}$ para a operação nas condições projetadas.

Tabela 7.9 – Economia de energia para a análise 3

Etapa	$P_i^{inicial}$ (kW)	$P_i^{projeto}$ (kW)	t_i^{op} (h)	$Eco_{Energia}$ (kWh)	$Eco_{Energia} \%$
1	0,724	0,077	800	517,6	89,36
2	0,849	0,262	1000	587	69,14
3	1,057	0,771	1000	286	27,06
4	1,357	1,290	1200	80,4	4,94
Total			4000	1471	35,76

Dessa forma, determina-se a projeção de resultados:

$$Eco_{R\$anual} = Eco_{Energia} \cdot V_{esp} = 1471 \cdot 0,35 = R\$514,85$$

$$Eco_{R\$mensal} = \frac{Eco_{Energia} \cdot V_{esp}}{12} = \frac{1471 \cdot 0,35}{12} = R\$42,90$$

A diferença entre as duas situações desta análise está tanto no motor quanto no sistema de controle de vazão. Sendo assim, o investimento necessário é dado pela soma dos custos entre a diferença dos motores e o inversor de frequência.

Logo:

$$\Delta C = (286 - 220) + 770 = R\$886,00$$

Valor presente líquido

De forma semelhante à análise 1, é possível observar na Figura 7.7 a curva do VPL no tempo para a análise 3, e o seu valor para o período de 13 anos, que corresponde a:

$$VPL = R\$2.314,22.$$

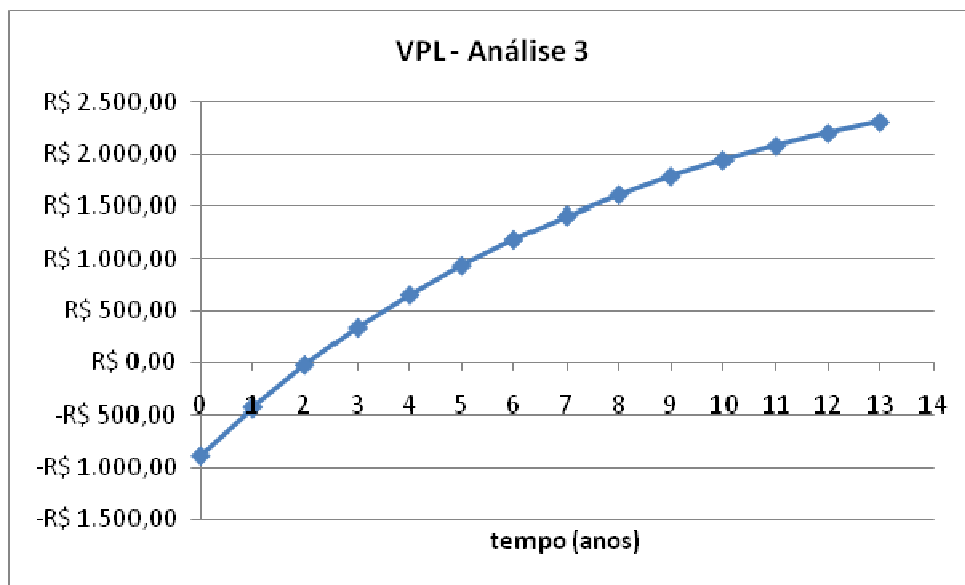


Figura 7.7 – VPL para a análise 3

Taxa interna de retorno

De forma semelhante, à análise 1, determina-se o valor da TIR para análise 3:

$$TIR = 57,96\% \text{ a.a.}$$

Índice de lucratividade líquida

$$ILL = \frac{VP}{\Delta C} = \frac{VPL + \Delta C}{\Delta C} = \frac{2314,22 + 886}{886}$$

$$ILL = 3,62$$

Tempo de retorno simples ou *payback* simples

$$t_{RS} = \frac{\Delta C}{ECO_{R\$mensal}} = \frac{886}{42,90}$$

$$t_{RS} = 20,65 \text{ meses}$$

Tempo de retorno capitalizado ou *payback* descontado

$$t_{RC} = \frac{\log \left(\frac{ECO_{R\$mensal}}{ECO_{R\$mensal} - \Delta C \cdot \frac{i}{100}} \right)}{\log \left(1 + \frac{i}{100} \right)}$$

$$t_{RC} = \frac{\log \left(\frac{42,90}{42,90 - 886 \times 0,01} \right)}{\log (1 + 0,01)}$$

$$t_{RC} = 23,24 \text{ meses}$$

Tempo de retorno capitalizado considerando aumento do custo da energia

$$i_L = \left[\left(\frac{1 + \frac{i}{100}}{1 + \frac{ie}{100}} \right) - 1 \right] \cdot 100$$

$$i_L = \left[\left(\frac{1 + \frac{1}{100}}{1 + \frac{0,2}{100}} \right) - 1 \right] \cdot 100$$

$$i_L = 0,7984\%$$

$$t_{RC} = \frac{\log \left(\frac{Eco_{R\$mensal}}{Eco_{R\$mensal} - \Delta C \cdot i_L / 100} \right)}{\log (1 + i_L / 100)}$$

$$t_{RC} = \frac{\log \left(\frac{42,90}{42,90 - 886 \times 0,007984} \right)}{\log (1 + 0,007984)}$$

$$t_{RC} = 22,66 \text{ meses}$$

Energia economizada ao longo da vida útil

$$Eco_{VU} = Eco_{ano} \cdot V_U$$

$$Eco_{VU} = 1471 \times 13,3$$

$$Eco_{VU} = 19564,3 \text{ kWh}$$

Valor líquido retornado

$$V_{LS} = Eco_{VU} \cdot V_{esp} - \Delta C$$

$$V_{LS} = 19564,3 \times 0,35 - 886$$

$$V_{LS} = R\$5.961,51$$

Valor líquido retornado capitalizado

$$\begin{aligned}
 m &= Vu' - t_{RC} \\
 m &= (13,3 \times 12) - 22,66 \\
 m &= 137 \\
 V_{LC} &= \left(1 + \frac{ir}{100}\right) \cdot \frac{\left[\left(1 + \frac{ir}{100}\right)^m - 1\right]}{\frac{ir}{100}} \cdot Eco_{R\$mensal} \\
 V_{LC} &= \left(1 + \frac{1}{100}\right) \cdot \frac{\left[\left(1 + \frac{1}{100}\right)^{137} - 1\right]}{\frac{1}{100}} \cdot 42,90 \\
 V_{LC} &= R\$12.602,95
 \end{aligned}$$

7.3.5. Discussão dos resultados

A partir dos dados obtidos nas análises acima, é possível construir a Tabela 7.10, com todos os indicadores, a fim de comparação. O tempo de retorno capitalizado apontado na tabela considera o aumento de energia.

Tabela 7.10 – Resultados do estudo de caso

	Análise 1	Análise 2	Análise 3
<i>Eco_{Energia}</i>	104,6 kWh/ano	1252,2 kWh/ano	1471 kWh/ano
<i>Eco_{R\$}</i>	R\$36,61/ano	R\$438,27/ano	R\$514,85/ano
<i>Eco_{Energia} %</i>	2,54%	30,44%	35,76%
<i>VPL</i>	R\$161,66	R\$1.954,22	R\$2.314,22
<i>TIR</i>	55,29% a.a.	56,75% a.a.	57,96 a.a.
<i>ILL</i>	3,45	3,54	3,62
<i>t_{RS}</i>	21,64 meses	21,08 meses	20,65 meses
<i>t_{RC}</i>	23,85 meses	23,18 meses	22,66 meses
<i>Eco_{VU}</i>	1391,18 kWh	16654,26 kWh	19564,3 kWh
<i>V_{LC}</i>	R\$881,13	R\$10.645,70	R\$12.602,95

Observa-se que para as três análises há economia de energia considerável, podendo chegar a 35,76%. O critério do VPL evidencia que para qualquer uma das análises, o projeto é viável, pois apresenta $VPL > 0$, entretanto a análise 3 é a que apresenta maior VPL. A Figura 7.8 compara os valores de VPL ao longo do tempo para as três análises.

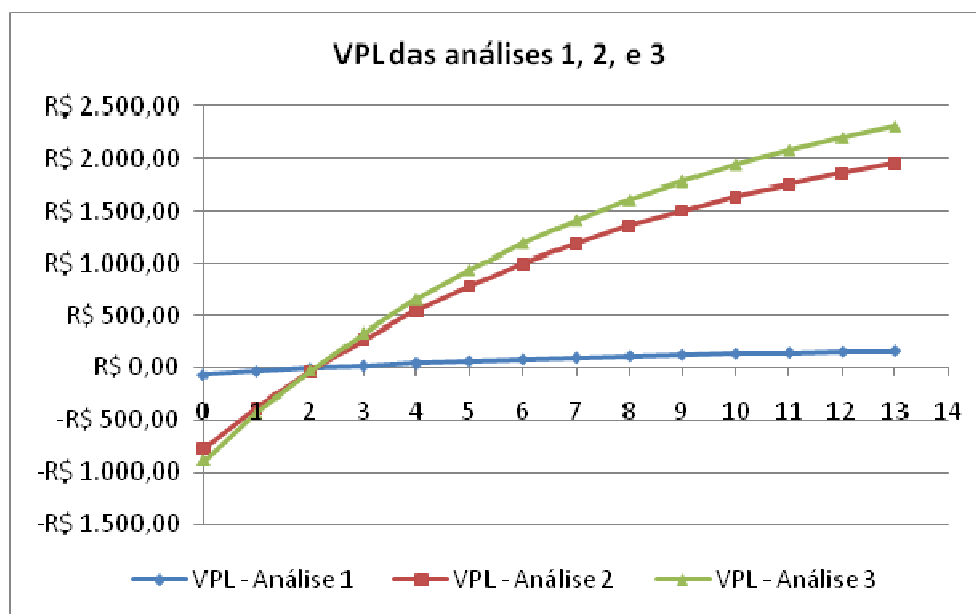


Figura 7.8 – VPL das análises 1, 2, e 3

A TIR apresenta valores bastante interessantes. Para a Análise 3, por exemplo, que apresenta o maior valor, a TIR atinge 57,96% a.a., o que corresponde a 3,88% a.m. Comparando com um investimento muito popular e seguro como a caderneta de poupança que rende em média 0,57% a.a., verifica-se que a Análise 3 rende 680% a mais que a poupança. Vale ressaltar que a aplicação das análises apresentadas também pode ser considerada como investimento de baixo risco, com perfil semelhante à renda fixa, pois a rentabilidade não está relacionada diretamente com o comportamento do mercado financeiro.

A Figura 7.9 compara a rentabilidade da Análise 3 com as principais alternativas de câmbio, renda fixa, e renda variável disponíveis no mercado como Caderneta de Poupança, CDB (Certificado de Depósito Bancário), CDI (Certificado de Depósito Interbancário), Ibovespa (Índice da bolsa de valores de São Paulo), Dólar, Euro, e Ouro para o mês de setembro de 2010.

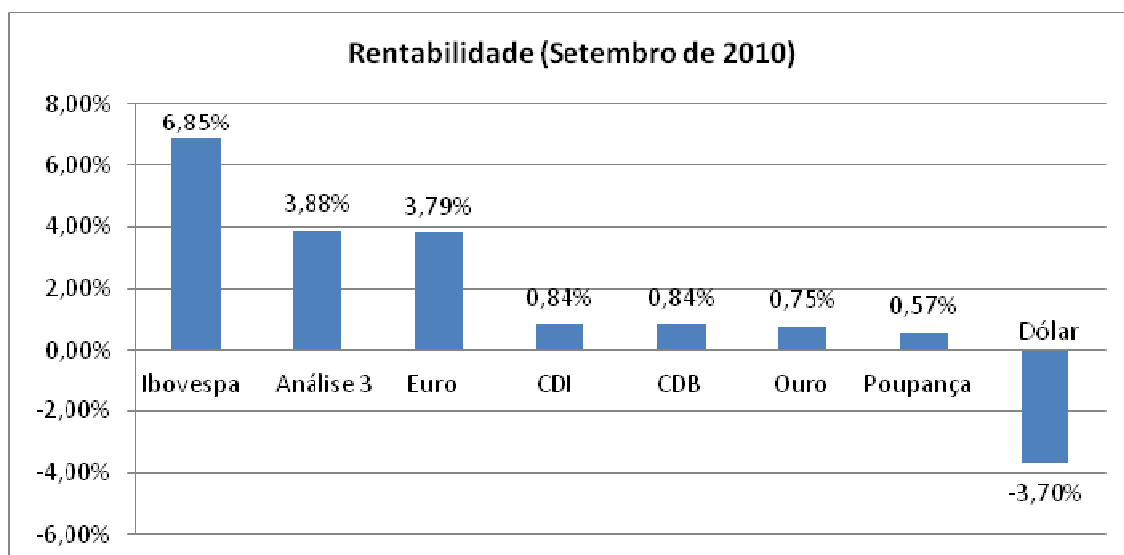


Figura 7.9 – Comparação de rentabilidades para setembro de 2010

Verifica-se que para o mês observado, a rentabilidade da Análise 3 atinge a segunda mais atrativa, ficando atrás apenas do índice Ibovespa. Entretanto, o índice da bolsa de valores de São Paulo está ligado diretamente ao comportamento do mercado financeiro, e constitui-se em um investimento de alto risco, podendo apresentar elevadas rentabilidades, ou prejuízo (rentabilidade negativa). A mesma comparação foi realizada para um período maior de tempo, acumulado entre os meses de janeiro e setembro de 2010, e pode ser observada na Figura 7.10.

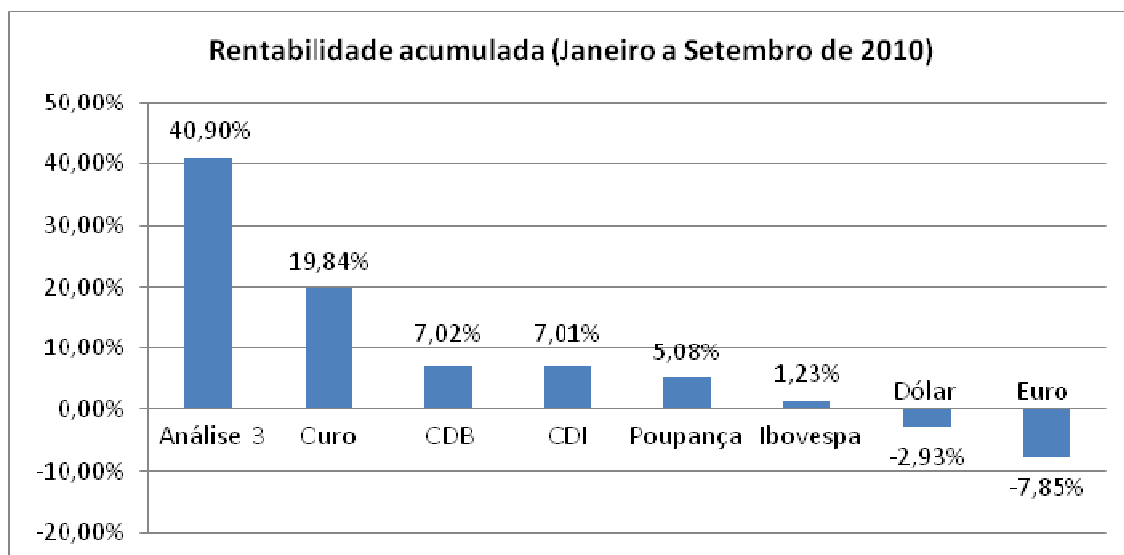


Figura 7.10 – Comparação de rentabilidades acumulada em 2010

Para o período observado, verifica-se que a rentabilidade da Análise 3 supera todas as outras alternativas, o que permite dizer que o risco envolvido é muito baixo, e essa é uma alternativa de investimento bastante atraente.

O ILL apresenta-se viável para as três análises, entretanto é para a terceira análise que apresenta os valores mais favoráveis, no qual se verifica, por exemplo, que para cada R\$1,00 investido, será retornado R\$3,62 ao final da vida útil do equipamento.

Verifica-se que o tempo de retorno mantém-se sempre próximo de 2 anos, um valor favorável, já que é bem menor que a vida útil do equipamento. Observando os valores líquidos retornados na vida útil percebe-se também que a última análise apresenta os resultados mais lucrativos.

7.4. Conclusões parciais

De um modo geral, é possível concluir que os indicadores financeiros constituem em importante ferramenta na tomada de decisão em projetos, pois evidencia a viabilidade econômica de aplicações em desenvolvimento. Verifica-se assim que qualquer uma das análises que venha a ser executada irá produzir resultados viáveis, entretanto, a análise 3 é a que apresenta os indicadores de rentabilidade mais favoráveis, maior índice de eficiência, mas em contrapartida, a que exige também maior investimento inicial. Vale ressaltar ainda que os critérios analisados neste trabalho consideram apenas um motor de 1,5CV. Quando se trabalha com um sistema mais complexo, como uma planta industrial com grande quantidade de motores e equipamentos, espera-se por resultados ainda mais atraentes.

CAPÍTULO VIII

8. Considerações finais

De acordo com os aspectos observados neste trabalho, é possível inferir conclusões de algumas premissas. Observando os indicadores de usos finais de energia elétrica conclui-se que os sistemas motrizes são responsáveis por considerável parcela no consumo de energia elétrica do país, e que a aplicação de processos de eficiência energética é uma alternativa fundamental à construção de novas fontes de energia.

No que diz respeito à bancada de ensaios, conclui-se que o conjunto de dispositivos apresentados consiste em um sistema de ventilação completo, no qual é possível realizar com segurança seu controle, verificar seu comportamento e armazenar todo o banco de dados dos ensaios. Esses aspectos são fundamentais para a validação dos resultados apresentados no trabalho.

Conclui-se também que a análise do comportamento dos ventiladores é essencial para o estudo do sistema na abordagem da eficiência energética, já que é através dessas verificações que é possível se determinarem os valores de potência hidráulica e consequentemente de rendimento total do sistema. Além disso, verifica-se que o sistema acionado por motor de alto rendimento e controlado através de inversor de frequência apresenta-se mais eficiente do que quando acionado por motor da linha padrão ou controlado através de damper.

Observando os aspectos relacionados com a qualidade da energia elétrica, verifica-se que para a aplicação de VTLD's o rendimento total do sistema é substancialmente alterado.

Além disso, verifica-se que a utilização de simulações computacionais pode trazer diversos benefícios para a análise de sistemas industriais, como economia de recursos e de tempo, e evita eventuais danos aos equipamentos.

É possível concluir ainda que os indicadores financeiros constituem em importante ferramenta na tomada de decisão em projetos, pois evidencia a viabilidade

econômica de aplicações em desenvolvimento. Verifica-se que o projeto que aplicar o controle de vazão por inversor de frequência e utilizar o motor de alto rendimento, apresentará os indicadores de rentabilidade mais favoráveis, maior índice de eficiência, mas em contrapartida, o que exigirá também maior investimento inicial. No entanto, quando se trabalha com um sistema mais complexo, como uma planta industrial com grande quantidade de motores e equipamentos, espera-se por resultados ainda mais atraentes.

De um modo geral considera-se que o objetivo de associar a eficiência energética, a qualidade da energia elétrica e os estudos de viabilidade financeira em um único contexto de aplicação foram alcançados através de ferramentas computacionais e utilizando referências multidisciplinares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ELETROBRAS / PROCEL. **Conservação de Energia:** Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações. 3. ed. Itajubá: Fupai, 2006. 597 p.
- [2] PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **Lei 10.295:** Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Brasília, 2001.
- [3] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica:** Dezembro. Rio de Janeiro, 2010.
- [4] SILVA, Sérgio Ferreira de Paula; DELAIBA, Antônio Carlos; BISPO, Décio. **Especificação para um Laboratório de Eficiência Industrial.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, II, 2007, Vitória.
- [5] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional.** Rio de Janeiro, 2010. 276 p.
- [6] ELETROBRAS / PROCEL. **Avaliação do Mercado de Energia Elétrica no Brasil:** Setor Industrial. Rio de Janeiro, 2006.
- [7] WEG. **Motores Elétricos de Corrente Alternada:** Catálogo de Características. São Paulo, 2005.
- [8] ELETROBRAS / PROCEL. **Gestão Energética:** Guia técnico. Rio de Janeiro, 2005. 188 p.
- [9] MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais.** 6. ed. Fortaleza: Ltc, 2002. 764 p.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [10] WEG. **Informações Técnicas:** motores. Disponível em: <www.weg.com.br>. Acesso em: 21 set. 2010.
- [11] SHNEIDER ELECTRIC. **TeSys U - Intelligent Motor Protection / Motor Management System.** Disponível em: <www.schneider-electric.co.uk>. Acesso em: 10 abr. 2010.
- [12] ZENGINOBUS, Gurkan et al. **Soft Starting of Large Induction Motors at Constant Current with Minimized Starting:** IEEE Transactions on Industry Application. 37. vol. Set./out, 2001.
- [13] TORO, V. Del. **Fundamentos de Máquinas Elétricas.** Rio de Janeiro: Atlas, 1994.
- [14] WEG. **Chave de Partida Suave:** Manual de instruções. Disponível em: <www.weg.com.br>. Acesso em: 10 set. 2010.
- [15] TELEMECANIQUE. **Conversores de Partida e Parada Progressivas.** Manual de operação. Disponível em: <www.schneider-electric.com.br>. Acesso em: 20 out. 2010.
- [16] TELEMECANIQUE. **Altivar 31 – Adjustable Speed AC drives.** Manual de operação. Disponível em: <www.schneider-electric.com.br>. Acesso em: 12 out. 2010.
- [17] INDUSOFT. **Users Guide and Technical Reference Manual:** Indusoft Web Studio. Version 6.1 SP2.
- [18] BERNAUER. **Ventiladores:** Catálogo geral. Disponível em: <www.bernauer.com.br>. Acesso em: 10 set. 2010.
- [19] VIANA, Augusto Nelson Carvalho. **Ventiladores e Exaustores:** Eficiência energética industrial. Rio de Janeiro: Eletrobras / Procel, 2004.
- [20] CLIFFORD, George E.. **Heating, ventilating, and air conditioning.** Orono, Maine, United States: Reston Publishing, 2001.

- [21] INMETRO. **Portaria 243:** Diretrizes e critérios para a atividade de avaliação da conformidade. Rio de Janeiro, 2009.
- [22] KUSKO, Alexander; T.THOMPSON, Marc. **Power Quality in Electrical Systems.** United States: Mcgrawhill, 2007.
- [23] ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST:** Módulo 8. Brasília, 2011.
- [24] BLOOMING, Thomas; CARNOVALE, Daniel J.. **Application of IEEE Std 519-1992 Harmonic Limits:** IEEE IAS Atlanta Section. United States, 2007.
- [25] DUGAN, Roger C. et al. **Electrical Power Systems Quality.** 2. ed. United States: Mcgraw-hill, 2004. 525 p.
- [26] SALERNO, Carlos Henrique; CAMACHO, José Roberto; OLIVEIRA FILHO, Antonio Santos. **Controle de Velocidade do Motor de Indução Trifásico utilizando Microcontroladores para Aplicações em Baixa Potência.** In: SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE A AUTOMAÇÃO, 3., 2003, Salvador. p. 105 - 110.
- [27] BRITO, Claudio Marzo Cavalcanti de. **Modelagem Computacional de Métodos de Partida de um Motor de Indução Trifásico no Simulink/Matlab.** In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 2., 2007, João Pessoa.
- [28] GUIMARÃES, Ronaldo et al. **Estimativa Do Momento De Inércia De Cargas Mecânicas Para Estudos Em Eficiência Energética.** In: Congresso Brasileiro De Eficiência Energética, 2009, Belém. Associação Brasileira De Eficiência Energética, 2009.
- [29] ABREU FILHO, José Carlos Franco et al. **Finanças Corporativas.** Rio de Janeiro: Fgv, 2003.
- [30] GITMAN, Lawrence. **Princípios de Administração Financeira.** São Paulo: Harbra, 2000.
- [31] KOPITTKKE, Casarotto. **Análise de Investimentos.** 9. ed. São Paulo: Atlas, 1998.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [32] MENDONÇA, Luiz Geraldo et al. **Matemática Financeira**. 9. ed. Rio de Janeiro: Fgv, 2008.
- [33] ROSS, Stephen. **Administração Financeira**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- [34] VARGAS, Ricardo Viana. **Análise de Valor Agregado em Projetos**. Rio de Janeiro: Brasport, 2002.
- [35] BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Metodologia da Aplicação com Depósitos Regulares**. Disponível em: <www.bcb.gov.br>. Acesso em: 20 abr. 2010.

Artigos publicados