

**INVESTIGAÇÃO DOS PARÂMETROS DE
DESEMPENHO ENERGÉTICO DE UM
VENTILADOR CENTRÍFUGO INDUSTRIAL TIPO
SIROCO**

NADYA KALACHE

CAMPO GRANDE

2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

INVESTIGAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO
ENERGÉTICO DE UM VENTILADOR CENTRÍFUGO
INDUSTRIAL TIPO SIROCO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, sob a orientação do Prof. Dr. Amâncio Rodrigues da Silva Júnior.

Área de Concentração: Energia.

NADYA KALACHE

CAMPO GRANDE

2011

INVESTIGAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DE UM VENTILADOR CENTRÍFUGO INDUSTRIAL TIPO SIROCO

NADYA KALACHE

‘Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Energia, Planejamento, Operação e Controle de Sistemas Elétricos, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campo Grande-MS.

Prof. Dr. Amâncio Rodrigues da Silva Júnior
Orientador
CCET/UFMS

Prof^ª. Dr^ª. Luciana Cambraia Leite
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
CCET/UFMS

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Amâncio Rodrigues da Silva Júnior
Presidente
CCET/UFMS

Prof. Dr. Valmir Machado Pereira
CCET/UFMS

Prof. Dr. Peter Batista Cheung
CCET/UFMS

Dedico primeiramente esse trabalho a Deus por iluminar o meu caminho e me dar forças para seguir sempre em frente.

Aos meus pais Jorge e Zora, que sempre me incentivaram na luta pelos meus sonhos e sempre me ofereceram carinho, conforto e amor.

Aos meus irmãos Theodossi, Salma e Katharina pelos vários anos de convivência, amor, amizade e companheirismo.

E em especial à minha avó Minerva Kalache (*in memorian*), na qual me espelhei em toda sua espiritualidade, humildade e sabedoria.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pois esteve comigo o tempo todo.

Ao meu orientador, Professor Doutor Amâncio Rodrigues da Silva Jr., por todo apoio e conhecimento passado durante o curso e especialmente pela confiança depositada ao assumir a orientação.

Ao professor e amigo Saulo Gomes Moreira, por ter sido tão presente num momento muito especial na construção deste trabalho por meio de suas críticas e sugestões, tendo participado de forma determinante para que ele acontecesse.

Ao professor Rafael Nishimura pelas opiniões e contribuições dadas e à equipe de estagiários do Laboratório de Eficiência Energética Murilo Frigo, Henrique Lima, André Secatto e Ricardo Rodrigues.

Aos Professores Doutores Valmir Machado Pereira e Evandro Mazina Martins pelas críticas e valiosas contribuições dadas durante o exame de qualificação da dissertação.

Aos professores e funcionários do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CCET), em especial a Letícia Carvalho, Maria Isabel Coelho, Prof. Dr. Edson Antônio Batista e Prof^a. Dr^a. Luciana Cambraia Leite pela disponibilidade de sempre ajudar.

À CAPES pelo apoio financeiro.

A toda minha família e meus amigos, pelo carinho e apoio constantes.

Dissertação apresentada a UFMS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

INVESTIGAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DE UM VENTILADOR CENTRÍFUGO INDUSTRIAL TIPO SIROCO

NADYA KALACHE

Outubro / 2011

Orientador: Dr. Amâncio Rodrigues da Silva Jr.

Área de Concentração: Energia.

Palavras-chave: Eficiência energética, sistema de ventilação, acionamento eletrônico.

Número de Páginas: 93

RESUMO:

A maior parte da energia elétrica utilizada no setor industrial brasileiro tem seu consumo associado aos motores elétricos e 12% dessa energia corresponde ao acionamento de ventiladores. Dessa forma percebe-se a importância de se realizar estudos e medidas voltadas à eficiência energética em sistemas de ventilação industrial. Este trabalho tem como objetivo estudar o desempenho de um sistema de ventilação e avaliar seu potencial de eficiência energética. Através da utilização da estrutura do LAMOTRIZ da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul foi realizado um estudo visando à investigação dos potenciais de eficiência energética de um ventilador centrífugo industrial tipo siroco através da análise das curvas características do sistema obtidas experimentalmente e de análises comparativas, que apontaram em uma economia de até 93,3% nesses sistemas. Foi realizada uma simulação de carga típica industrial, na qual se observou que a utilização do motor W21 *Plus* proporcionou uma economia de 3,5% em substituição ao modelo W21. E com a substituição conjunta do motor menos eficiente por outro de melhor rendimento e do *damp*er pelo conversor de frequência no controle de vazão obteve-se a economia de 79%. Realizou-se uma análise econômica de investimento, utilizando o método do Valor Presente Líquido, e verificou-se que a utilização do conversor de frequência para controle de vazão associado ao uso de um motor mais eficiente é economicamente atrativa, com tempo retorno de investimento em pouco mais de um ano.

Abstract of Dissertation presented to UFMS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

**INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF ENERGY
PERFORMANCE OF
A CENTRIFUGAL FAN TYPE INDUSTRIAL SIROCO**

NADYA KALACHE

October/ 2011

Advisor: Amâncio Rodrigues da Silva Jr., Dr.

Area of Concentration: Energy.

Keywords: Energy Efficiency, Industrial Fan System, Frequency Inverter

Number of Pages:93

ABSTRACT

Most of the electricity used in the Brazilian industrial sector has its consumption associated with electric motors and 12% of this energy corresponds to drive fans. So the importance of conducting studies and actions aimed at energy efficiency in industrial ventilation systems it is realized. This work purpose to study the performance of an industrial ventilation system and evaluate its potential for energy efficiency. By using the LAMOTRIZ structure of the Federal University of Mato Grosso do Sul, a study was made to the intent at investigation of the energy efficiency potential of an industrial centrifugal fan siroco type by analyzing the system curves experimentally obtained and comparative analysis, which pointed in a savings of up to 93.3% in these systems. It was performed a typical industrial load simulation, in which was noted that the use of the W21 Plus motor providing a saving of 3.5% to replace the W21 model. And by the joined replacement of the less efficient motor by a best performance one and the damper by a frequency converter to control flow, a 79% saving was obtained. It was performed an economic analysis of investment, using the Net Present Value method, and it was found that the use of the drive to control flow associated with the use of a more efficient engine is economically attractive, with return on investment just over a year.

LISTA DE FIGURAS

2.1 - Consumo de energia por setor no ano de 2009	17
2.2 - Distribuição média do consumo de energia elétrica na indústria brasileira	17
2.3 - Triângulo de potências	20
2.4 - Curva de eficiência do motor de indução.....	22
2.5 - Participação dos motores elétricos nos acionamentos industriais	23
2.6 - Diagrama de blocos de um conversor de frequência.....	27
2.7 - Esquema de um conversor de frequência trifásico.....	27
2.8 - Tipos de rotores: (a) radial, (b) misto e (c) axial.....	30
2.9 - Rotores: (a) simples sucção, (b) dupla sucção	30
2.10 - Esquema construtivo e curva característica do ventilador centrífugo de pás retas ...	32
2.11 - Esquema construtivo e curva característica do ventilador centrífugo de pás curvadas para trás	32
2.12 - Esquema construtivo e curva característica do ventilador de pás curvadas para frente.....	33
2.13 - Relação entre o diâmetro interno da tubulação e o diâmetro do <i>damp</i> er tipo borboleta	37
2.14 - Curva característica do ventilador e da instalação	38
2.15 - Curva do sistema de ventilação com controle de vazão através de válvulas.	39
2.16 - Comparação das curvas características do ventilador funcionando com velocidade constante e velocidade variável.	40
2.17 - Conjunto motor-ventilador.....	42
3.1 - Arquitetura da rede do LAMOTRIZ	48
3.2 - Fluxograma simplificado do ventilador	49
3.3 - Estação de simulação do ventilador centrífugo do LAMOTRIZ	50
3.4 - Painel de Comando e Proteção.....	50
3.5 - Diagrama esquemático da estação do ventilador centrífugo do LAMOTRIZ	51
3.6 - Curva característica do motor W21 WEG.....	52
3.7 - Curva característica do motor W21 <i>plus</i> WEG.....	53
3.8 - Conversor de Frequência Altivar 31	54
3.9 - Tela principal do sistema de ventilação	54
4.1 - Potência Mecânica do Ventilador versus Vazão	60

4.2 - Rendimento do Ventilador <i>versus</i> Vazão.....	62
4.3 - Rendimento do Conjunto Motor-Ventilador <i>versus</i> Vazão.....	62
4.4 - Curva da instalação com 100% de abertura do <i>damper</i>	63
4.5 - Curvas da instalação calculada com o <i>damper</i> em diferentes ângulos de abertura.....	64
4.6 - Curva do ventilador centrífugo	65
4.7 - Pontos de funcionamento do sistema de ventilação calculados	66
4.8 - Curvas da instalação medidas para diferentes aberturas do <i>damper</i>	67
4.9 - Campo básico de funcionamento do ventilador	68
4.10 - Potência ativa requerida pelo sistema <i>versus</i> vazão.....	69
4.11 - Potência ativa <i>versus</i> vazão para os 4 conjuntos de operação.....	70
4.12 - Economia de energia proporcionada pelo conversor de frequência.....	71
4.13 - Comparação entre a potência ativa medida e calculada	72
4.14 - Comparação entre a utilização do motor W21 e W21 plus.....	74
4.15 - Comportamento do fator de potência para cada conjunto.....	75
4.16 - Janela pop up da função de variação da vazão.....	77
4.17 - Curva simulada da variação de carga de um sistema de ventilação	77
4.18 - Curvas de potência para os conjuntos: “Motor W21+ <i>Damper</i> ” e “MotorW21 <i>plus+Damper</i> ”	78
4.19 – Comparação entre o consumo dos motores W21 e W21 <i>plus</i>	79
4.20 - Curvas de potência para os dois conjuntos.....	80
4.21 - Comparação entre o consumo dos conjuntos mais e menos eficiente.....	80
4.22 - Representação do Tempo de Retorno do Investimento.....	83

LISTA DE TABELAS

2.1 – Níveis de eficiência mínimos	25
2.2 – Valores da rugosidade absoluta de alguns materiais	36
2.3 – Valores da rugosidade absoluta de alguns materiais	36
2.4 – Coeficiente de perda de carga para o <i>damper</i> tipo borboleta	38
3.1. Descrição dos componentes da bancada do ventilador	49
3.2. Dados de placa dos motores da bancada de ventilação	52
4.1. Valores medidos e calculados de vazão, carga, potências e rendimentos	61
4.2 - Valores medidos e calculados de vazão, rotação e potência	72
4.3 - Valores medidos de potência ativa dos motores W21e W21 <i>plus</i>	73
4.4 - Valores de rendimento dos Motors W21 e W21 <i>plus</i>	74
4.5 - Método do Valor Presente Líquido	82

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. Justificativa	13
1.2. Objetivos.....	14
1.2.1. Objetivos Gerais	14
1.2.2. Objetivos Específicos	14
1.3. Organização do Trabalho.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. Panorama Energético Brasileiro	15
2.2. Motor de Indução Trifásico	18
2.2.1. Caracterização dos Sistemas Motrizes.....	22
2.2.2. Motores de Alto Rendimento.....	24
2.3. Métodos de Partida	25
2.3.1. Partida Direta	26
2.3.2. Conversor de Frequência	26
2.4. Sistemas de Ventilação Industrial.....	29
2.4.1. Curvas Características dos Ventiladores.....	31
2.4.2. Curva Característica do Sistema	34
2.4.3. Ponto de Operação	38
2.4.4. Métodos de Controle de Vazão em Sistemas de Ventilação Industrial	39
2.4.5. Leis de Similaridade do Sistema de Ventilação.....	41
2.4.6. Balanço Energético no Conjunto Motor-Ventilador.....	42
2.4.7. Eficiência Energética em Sistemas Motrizes	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
3.1. Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes	47
3.2. Estação de Simulação do Ventilador Centrífugo	49
3.3. Motores	52
3.4. Acionamentos	53
3.5. Sistema Supervisório	54
3.6. Medidor de Energia	55

3.7. Sensores e Atuadores	55
3.8. Controladores Lógicos Programáveis	56
3.9. Ventilador	56
3.10. Metodologia	56
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	59
4.1. Obtenção das Curvas Características do Sistema de Ventilação	59
4.1.1. Balanço de Energia no Conjunto Motor-Ventilador com <i>Damper</i>	60
4.1.2. Obtenção das Curvas do Sistema e do Ventilador	63
4.1.3. Obtenção do Campo Básico de Funcionamento do Ventilador	66
4.1.4. Obtenção da Potência Ativa Requerida pelo Sistema.....	68
4.2. Comparação entre o Uso do <i>Damper</i> e Conversor de Frequência.....	69
4.3. Comparação entre o Uso do Motor W21 e W21 <i>plus</i>	73
4.4. Comportamento do Fator de Potência	75
4.5. Simulação de um Sistema de Ventilação com Curva de Carga Variável	76
4.5.1. Comparação entre o Motor W21 e W21 <i>plus</i>	78
4.5.2. Comparação entre o Conjunto Mais Eficiente e Menos Eficiente.....	79
4.5.3. Análise Econômica de Investimento.....	81
4.6. Considerações Finais	83
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	85
5.1. Conclusões.....	835
5.2. Recomendações para Trabalhos Futuros	837
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	888
APÊNDICE.....	92

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O presente trabalho propõe um estudo de um ventilador centrífugo industrial tipo siroco, sob o ponto de vista da eficiência energética, através da análise das curvas características do sistema obtidas experimentalmente em bancada de ensaios, da comparação entre dois métodos de controle de vazão que são o *damper* e o conversor de frequência, além da comparação da utilização de um motor por outro de melhor rendimento.

1.1 Justificativa

Diante das sucessivas crises que o setor energético tem passado recentemente, surgiu a necessidade de estudos e metodologias voltados à eficiência energética. As medidas adotadas de racionalizar o consumo de energia mostraram que os estímulos à conservação de energia contribuíram efetivamente no esforço de se equilibrar a oferta e a demanda de energia elétrica.

Do total da energia consumida no Brasil, o consumo no setor industrial é o mais significativo representando aproximadamente 44%, segundo BEN (2010). Os sistemas motrizes representam um consumo de aproximadamente 55% do total de energia elétrica consumida no setor industrial, de acordo com Correia (2010). E segundo Brown (2001), cerca de 20% dessa energia é desperdiçada por mecanismos de controle, como válvulas e *dampers*.

Os ventiladores são equipamentos muito utilizados na indústria nas mais variadas aplicações, como em siderúrgicas nos altos-fornos e em sinterização, em instalações com caldeiras, em pulverizadores de carvão, em queimadores, em certos transportes pneumáticos e em muitas outras aplicações, de acordo com Procel (2004). Segundo Correia (2010), do total de motores instalados na indústria, 12% corresponde ao acionamento de ventiladores.

O presente trabalho mostra-se importante para avaliar as oportunidades de economia de energia em sistemas de ventilação industriais, auxiliando na realização de investimentos para a utilização do acionamento por conversor de frequência e na substituição dos motores antigos pelos eficientes existentes no mercado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo estudar o desempenho de um sistema de ventilação industrial e avaliar seu potencial de eficiência energética.

1.2.2 Objetivos Específicos

Analisar experimentalmente o comportamento das curvas características de um ventilador centrífugo industrial do tipo siroco e determinar o ponto de operação de máximo rendimento.

Avaliar a economia de energia proporcionada pela substituição de um motor por outro de maior rendimento e a economia proporcionada pelo controle de vazão através do conversor de frequência. E também analisar o desempenho do fator de potência para os métodos de acionamento partida direta e conversor de frequência.

1.3 Organização do Trabalho

A estrutura deste trabalho é composta de 05 capítulos conforme a seqüência:

- Capítulo 1 - Destaca o tema do trabalho e enfatiza os objetivos gerais e específicos.
- Capítulo 2 - Apresenta a revisão bibliográfica relacionada à eficiência energética, consumo de energia na indústria, motores elétricos de indução, acionamento eletrônico de motores e sistemas de ventilação industrial.
- Capítulo 3 - Apresenta o Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes – LAMOTRIZ, especificamente a estação de simulação do ventilador centrífugo e descreve a metodologia adotada para o estudo dos potenciais de economia de energia para o sistema de ventilação industrial.
- Capítulo 4 - Apresenta a análise e discussão dos resultados obtidos durante as simulações.
- Capítulo 5 - São apresentadas as conclusões sobre os resultados obtidos durante a metodologia desenvolvida.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Panorama Energético Brasileiro

A energia tem um papel fundamental para a sociedade. É o elemento chave para a inclusão social, desenvolvimento sustentável e melhoria da qualidade de vida das pessoas.

O acesso à energia elétrica é hoje requisito básico de cidadania, sem o qual o indivíduo fica marginalizado do que se entende por desenvolvimento. A eletricidade engloba diversos atores e componentes em uma cadeia que vai desde a captura dos recursos naturais necessários para sua produção até a destinação final dos diversos componentes, equipamentos e eletrodomésticos que fornecem os serviços elétricos. É uma enorme cadeia, que gera empregos e desenvolvimento, mas que afeta o meio ambiente das mais diversas formas (REIS, 2006).

A conservação de energia não é um tema novo. A necessidade de se diminuir o uso da energia elétrica ocorreu após a crise do petróleo na década de 1970, onde a prática da redução de energia era aplicada à mudança de hábitos e rotina diária de empresas e indústrias, o que muitas vezes proporcionava a perda do conforto do ambiente. Posteriormente surgiu o conceito de eficiência energética com o princípio do uso racional da energia, voltado para a possibilidade de aumentar o rendimento do sistema, aumentando sua eficiência (OLIVEIRA, 2007).

A demanda pela energia vem crescendo continuamente e, conseqüentemente, surgem problemas ambientais, como o desmatamento e a poluição. Uma das soluções para atenuar e manter limites aceitáveis deste problema é a utilização racional das fontes primárias de energia e em geral a eficiência energética em todas as etapas do uso da energia (PROCEL, 2006).

Eficiência energética pode ser entendida como redução de custos e maior economia com a energia elétrica sem a perda da qualidade e segurança do sistema que se analisa. Pode ser

obtida tanto pela inovação tecnológica como por novas formas de gestão no processo produtivo (PROCEL, 2007).

Segundo Pires *et al.* (2006) do ano de 1995 até o racionamento ocorrido em meados de junho de 2001, o consumo de eletricidade no Brasil cresceu a uma taxa média de 4,5% ao ano. O racionamento interrompeu esse ciclo de crescimento, causando uma queda no consumo de 7,9%. Com o término do racionamento, em Fevereiro de 2002, a demanda de eletricidade voltou a crescer a uma taxa média de 5% ao ano.

O Brasil tem capacidade de economia de energia em torno de US\$ 2,5 bilhões por ano se fosse utilizado todo o seu potencial de eficiência energética, segundo um estudo do Banco Mundial. O Brasil é o décimo maior consumidor mundial de energia e seu consumo deverá dobrar até 2030. Caso não haja um aperfeiçoamento da eficiência energética, as conseqüências para o meio ambiente serão consideráveis, uma vez que o consumo de energia está associado a uma alta emissão de gases causadores do efeito-estufa (TAYLOR *et al.*, 2008).

O constante aumento do consumo de energia elétrica causado pelo crescimento populacional e pelo crescimento da produção industrial exige um planejamento antecipado e execução de políticas econômicas governamentais. Assim, essas políticas governamentais podem suprir a tempo as necessidades de expansão da produção de energia (PROCEL, 2007).

O Balanço Energético Nacional – BEN é um estudo realizado pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE de fundamental importância para as atividades de planejamento e acompanhamento do setor energético nacional.

Segundo o BEN 2010 o consumo de energia no setor industrial é o mais significativo, representa aproximadamente 44% de toda energia consumida no Brasil. A figura 2.1 mostra o consumo final de energia elétrica por setor.

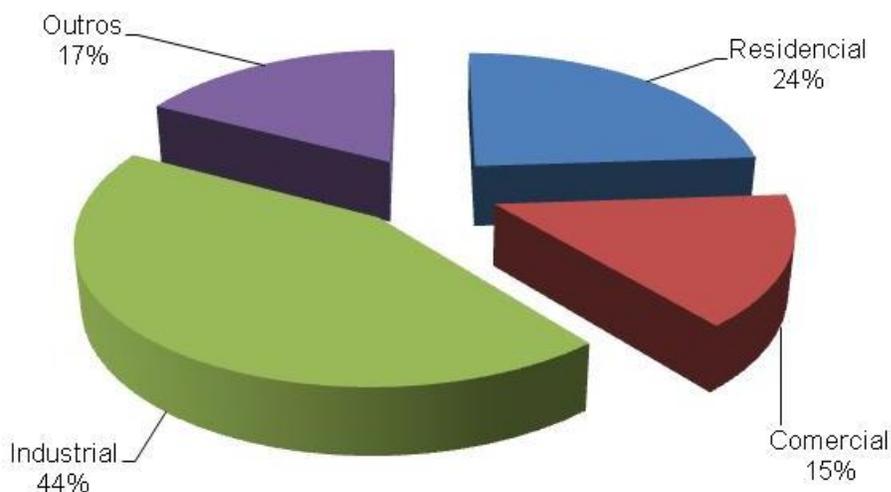


Figura 2.1 - Consumo de energia por setor no ano de 2009

Fonte: BEN (2010)

A maior parte da energia elétrica utilizada na indústria brasileira tem seu consumo associado aos motores elétricos, segundo Correia (2010). A figura 2.2 ilustra a distribuição média do consumo de energia elétrica no setor industrial.

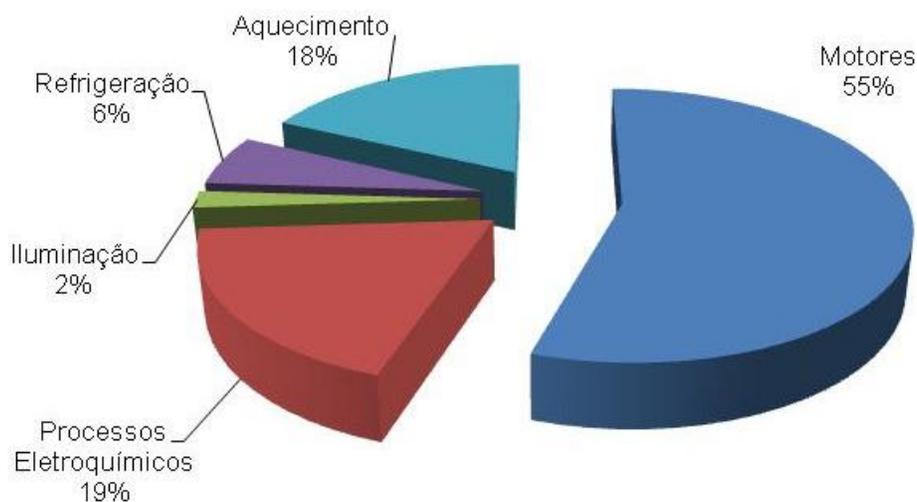


Figura 2.2 - Distribuição média do consumo de energia elétrica na indústria brasileira

Fonte: Correia (2010)

O gerenciamento e a conservação de energia elétrica na indústria desempenham um papel cada vez mais importante no planejamento do setor elétrico brasileiro, pois os custos dos projetos

para conservar a energia são significativamente inferiores que os custos de expansão do sistema elétrico, bem como tempo de retorno do investimento e o prazo de maturação dos projetos (RAMOS, 2009).

2.2. Motor de Indução Trifásico

O motor de indução é constituído basicamente por duas partes principais: estator e rotor. O estator é a parte estacionária da máquina e o rotor é a parte girante.

O motor de indução trifásico é uma máquina robusta, sem partes faiscantes, com rendimento na casa de 90%, exige pouca manutenção, é de baixo custo. Possui as seguintes desvantagens: não varia a velocidade, baixo rendimento e fator de potência quando operado com baixa carga e possui alta corrente de partida (FITZGERALD *et al*, 2006).

Está presente na grande maioria dos sistemas industriais com a função de fornecer energia mecânica necessária aos equipamentos e, conseqüentemente, ao processo. As bombas, ventiladores, pontes rolantes, esteiras, elevadores são alguns exemplos de sistemas largamente utilizados pela indústria (RODRIGUES, 2007).

O motor de indução com rotor gaiola de esquilo é o mais utilizado nas indústrias. Esse nome se deve ao fato da ligação dos condutores do rotor parecer uma gaiola de esquilo. O rotor é formado por um conjunto de barras interligadas através de anéis condutores. Sua velocidade é praticamente constante, variando ligeiramente de acordo com a carga solicitada ao eixo (FITZGERALD *et al*, 2006).

O funcionamento do motor de indução trifásico com rotor gaiola baseia-se no princípio de formação do campo magnético girante produzido no estator devido à passagem de corrente elétrica em suas bobinas, cujo fluxo se desloca em torno de seu rotor, gerando neste correntes induzidas que tendem a se opor ao campo girante, sendo no entanto, arrastado por ele (FITZGERALD *et al*, 2006).

Neste tipo de motor, o rotor teria velocidade bem próxima à síncrona, operando em vazio e sem perdas. No entanto, seu rotor diminuirá a velocidade proporcionalmente e de forma oposta ao conjugado externo (FITZGERALD *et al*, 2006).

A potência que o motor consome da rede é diferente da potência que é entregue à carga, em consequência das perdas que ocorrem no interior da máquina. Assim, a potência entregue à carga é igual à potência que o motor consome da rede menos as perdas.

A potência absorvida da rede é obtida através da equação (2.1).

$$S_{3\phi} = \sqrt{3}.U.I \quad (2.1)$$

Onde:

U = tensão de linha (V);

I = corrente de linha (A);

$S_{3\phi}$ = potência aparente trifásica absorvida pela rede (VA).

A potência aparente (S) é formada pela soma vetorial das potências ativa e reativa, ou seja, é a potência total absorvida pelo sistema. A potência ativa (P) é a potência que efetivamente produz trabalho. A potência reativa (Q) não produz trabalho, mas é transferida aos elementos reativos (indutores e capacitores). A composição da potência aparente pode ser observada na equação (2.2).

$$S = P + jQ \quad (2.2)$$

Onde:

P = potência ativa (W);

Q = potência reativa (var).

O motor elétrico consome tanto a potência ativa que é convertida em trabalho mecânico quanto a potência reativa, necessária para a criação do fluxo magnético nas bobinas do motor.

O triângulo de potências, mostrado na figura 2.3, representa a soma vetorial das potências ativa (P) e reativa (Q) que resulta na potência aparente (S), segundo um ângulo ϕ de defasagem da corrente em relação à tensão.

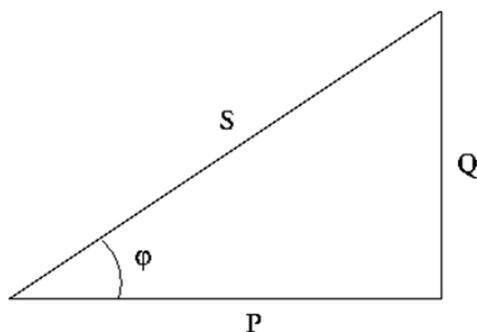


Figura 2.3 - Triângulo de potências

O $\cos(\varphi)$, chamado de fator de potência, é a relação entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S), mostrada na equação (2.3).

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad (2.3)$$

Onde:

P = potência ativa (W);

S = potência aparente (VA).

Quando a carga é puramente resistiva o fator de potência é unitário. Para cargas com características indutivas existe um atraso da corrente em relação à tensão e diz-se que o fator de potência é atrasado. Já para cargas com características capacitivas a corrente está adiantada em relação à tensão e diz-se que o fator de potência é adiantado.

As potências ativas e reativas podem ser obtidas pelas equações (2.4) e (2.5), respectivamente.

$$P = S \cdot \cos(\varphi) \quad [\text{W}] \quad (2.4)$$

$$Q = S \cdot \sin(\varphi) \quad [\text{var}] \quad (2.5)$$

De acordo com a Resolução 456 da ANEEL (2000), as empresas consumidoras devem operar com fator de potência mínimo de 0,92, sendo que abaixo deste valor existem penalizações financeiras.

O baixo fator de potência implica em grande quantidade de problemas, como sobrecarga de equipamentos, desgaste dos equipamentos de proteção e manobra, queima de motores causada

pela flutuação de tensão, aumento de investimentos em condutores e equipamentos entre outros. Em vista disso, a correção do fator de potência é de fundamental importância.

O motor de indução trifásico é um equipamento que converte energia elétrica em energia mecânica. Esta conversão não é perfeita devido à série de perdas que ocorrem no interior da máquina. Segundo Procel (2007), as perdas podem ser agrupadas da seguinte forma:

- **Perdas Joule no estator:** são as perdas que resultam da passagem de corrente elétrica pelos enrolamentos do estator.

- **Perdas Joule no rotor:** são as perdas que resultam da passagem de corrente elétrica pelos enrolamentos do rotor.

- **Perdas no ferro:** são constituídas pelas perdas por histerese e Foucault. A perda por histerese resulta da constante reorientação do campo magnético sobre o pacote de lâminas de aço-silício. Já as perdas de Foucault são devidas às correntes induzidas no interior do material magnético que, circulando, produzem perdas na forma de calor. As perdas por histerese e Foucault ocorrem tanto na parte estacionária como na parte girante do motor.

- **Perdas por atrito e ventilação:** são as perdas que ocorrem devido ao atrito nos rolamentos da máquina e pelo arrasto aerodinâmico provocado pela geometria irregular do rotor e pelo próprio ventilador por vezes instalado na ponta do eixo.

- **Perdas adicionais:** incluem as demais perdas não classificadas anteriormente e normalmente crescem com o carregamento da máquina.

Segundo Garcia (2003) as perdas no ferro representam um percentual de 15 a 25% do total de perdas. As perdas mecânicas contribuem com um percentual de 5 a 15%. As perdas no estator significam uma parcela de 25 a 45%. As perdas no rotor têm uma contribuição significativa de 15 a 25%. As perdas adicionais representam uma parcela de 10 a 20%.

A eficiência do motor de indução é dada pela relação entre a potência que é entregue à carga e a potência que é absorvida pela rede. A equação (2.6) descreve essa relação.

$$\eta = \frac{P_{\text{saida}}}{P_{\text{entrada}}} \quad (2.6)$$

O rendimento do motor de indução varia de acordo com a potência nominal, segundo Andrade (2009). A figura 2.4 ilustra a curva de eficiência para três diferentes potências.

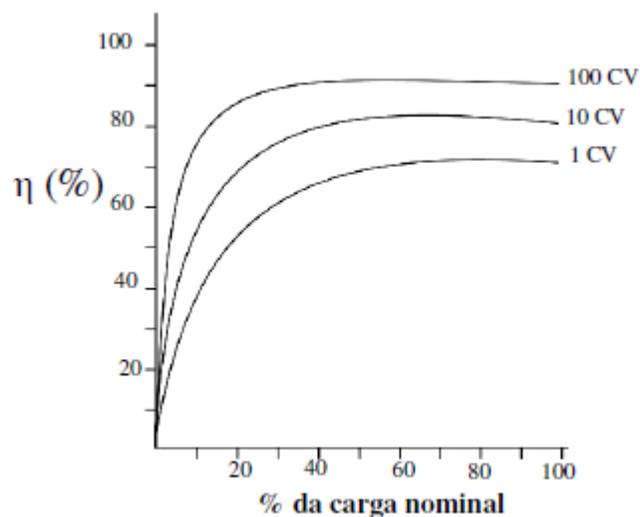


Figura 2.4 - Curva de eficiência do motor de indução
Fonte: Andrade (2009)

Na figura 2.4 pode-se observar que para motores de maior de potência o valor da eficiência é maior e a sua curva característica permanece em seu valor máximo em uma faixa maior.

2.2.1 Caracterização dos Sistemas Motrizes

Os sistemas motrizes em um ambiente industrial acionam tipicamente quatro tipos de cargas mecânicas, sendo elas: cargas do tipo conjugado constante (pontes rolantes, esteiras, guinchos, elevadores), cargas de elevação linear (moinhos de rolos, bombas de pistão, plainas e serras), cargas de variação quadráticas (ventiladores, misturadores, bombas centrífugas, exaustores e compressores) e cargas de variação inversa com a rotação (máquinas operatrizes, frezadoras, mandriladoras e bobinadeiras) (PROCEL, 2006). A figura 2.5 mostra a participação dos motores na indústria.

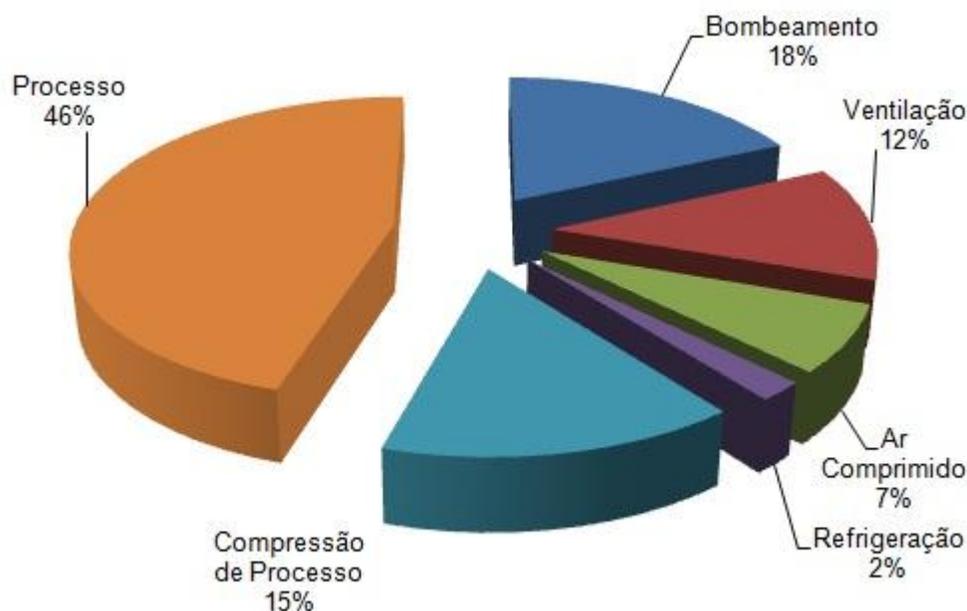


Figura 2.5 - Participação dos motores elétricos nos acionamentos industriais
Fonte: Correia (2010)

O dimensionamento incorreto, desequilíbrio entre as fases e variação da tensão de alimentação em relação à tensão nominal são alguns dos fatores que influenciam o desempenho do motor de indução. Outros fatores que influenciam diretamente no rendimento do motor são: motor rebobinado, instalação inadequada, alimentação elétrica e manutenção (PROCEL, 2006).

O superdimensionamento, ou seja, o uso de um motor com potência muito superior à necessária para o acionamento da carga, conta com uma considerável parcela dos problemas de eficiência encontrados na maioria das aplicações. A prática do superdimensionamento é um problema ocasionado pela falta de informação. O completo desconhecimento das características dinâmicas da carga usualmente conduz à adoção de fatores de segurança generosos e especificações incorretas (PROCEL, 2007).

A utilização de motores superdimensionados leva ao aumento de custos de aquisição, maior consumo de energia elétrica e baixo fator de potência. Assim, o motor deve adequar-se à máquina operando entre 75% e 100% em condições normais de funcionamento (RAMOS, 2009).

O rebobinamento do motor, ou seja, o processo que substitui as bobinas e isolação danificadas por outras é um fator que leva à perda de rendimento do motor.

Para Passos *et al.* (2009) algumas práticas no processo de rebobinamento de motores podem afetar o seu desempenho: como retirar as bobinas queimadas do estator do motor com o maçarico pode danificar a isolamento entre as chapas do núcleo, aumentando as perdas no ferro; utilizar fios de seção diferente da original pode aumentar as perdas no cobre e alterar o número de espiras das bobinas.

Uma inspeção periódica quanto a níveis de isolamento, elevação de temperatura, desgastes excessivos, correta lubrificação dos rolamentos e eventuais exames no ventilador, para verificar o direcionamento correto do fluxo de ar são fundamentais para garantir a operação adequada do motor (PASSOS *et al.*, 2009).

2.2.2 Motores de Alto Rendimento

Os motores de alto rendimento se apresentam como uma alternativa para a economia de energia em sistemas motrizes. Devido ao seu projeto de construção, possuem características que fazem com que ele tenha uma melhor eficiência que os motores convencionais (GUALBERTO, 2010).

As principais características construtivas destes motores são:

- O aumento da quantidade de cobre nos enrolamentos do estator;
- A diminuição da intensidade de campo magnético e utilização de chapas magnéticas de boa qualidade para reduzir as perdas no ferro e a corrente de magnetização;
- Emprego de rolamentos adequados e otimização do projeto dos ventiladores para diminuir as perdas por atrito e ventilação;
- Regularidade do entreferro, melhoria no isolamento e tratamento térmico das chapas do estator e do rotor para reduzir as perdas adicionais.

O motor de alto rendimento tem um custo mais elevado que o motor padrão, devido as suas melhorias construtivas. No entanto, a sua utilização pode ser economicamente viável em função do custo de energia economizado ao longo de sua vida útil (GARCIA, 2003).

O Decreto nº 4.508 de 11 de dezembro de 2002 estabelece os níveis mínimos de eficiência energética de motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola, da linha padrão e de alto rendimento, para comercialização no Brasil. A tabela 2.1 apresenta uma comparação entre esses níveis para os motores de 4 pólos.

Tabela 2.1 – Níveis de Eficiência Mínimos

Potência (cv)	Eficiência Mínima (%)	
	Padrão	Alto Rendimento
1	78	80,5
1,5	79	81,5
2	81,5	84
5	85	87,5
7,5	87	89,5
10	87,5	89,5
50	92,4	93
100	93,2	94,5
150	93,5	95
200	94,5	95
250	94,5	95

Fonte: Adaptado de (Ministério das Minas e Energia, 2010)

Pode-se observar, através da análise da tabela 2.1, que quanto maior a potência do motor, maior será o nível de rendimento mínimo exigido.

Em dezembro de 2005 foi publicada a Portaria Interministerial nº 533 que estabelece os níveis mínimos de eficiência de motores para comercialização ou uso nacional. De acordo com esta portaria, os índices mínimos de eficiência nominal devem seguir os índices estabelecidos para os motores de alto rendimento do Decreto 4.508, de 2002. Na prática, isso significa que desde o ano de 2010 todos os motores fabricados ou comercializados no Brasil devem ser de alto rendimento.

2.3 Métodos de Partida

Os motores elétricos solicitam, durante a partida, uma corrente elevada do sistema de alimentação, cerca de 6 a 10 vezes a sua corrente nominal de funcionamento. A escolha de um

sistema de acionamento adequado além de evitar distúrbios na rede elétrica pode prolongar a vida útil do motor e reduzir os custos de operação e manutenção (MAMEDE, 2007).

Os principais tipos de partidas são: Partida Direta, Partida Estrela-Triângulo, Partida com Chave Compensadora, Partida *Softstarter*, conversor de frequência. Neste estudo serão analisadas a partida direta e por conversor de frequência.

2.3.1 Partida Direta

A partida direta é o método de partida mais simples, no qual o motor é alimentado diretamente pela rede elétrica. Neste acionamento podem ser utilizados contatores, disjuntores ou chaves interruptoras.

A partida direta não pode ser utilizada no caso de motores com potência superior ao máximo permitido pela concessionária de energia local e quando a carga no motor necessitar de acionamento lento e progressivo (MAMEDE, 2007).

2.3.2 Conversor de Frequência

Com a necessidade de um controle mais eficaz aliado ao desenvolvimento da eletrônica de potência foi possível tornar o conversor de frequência em uma boa alternativa para o controle da velocidade dos motores elétricos. Os conversores de frequência são equipamentos eletrônicos cuja função é de acionamento e controle da velocidade de rotação dos motores de indução (RODRIGUES, 2007).

O conversor de frequência possui quatro componentes principais que são: retificador (conversor CA-CC), filtro, bloco conversor e por fim, a unidade microprocessada que permite controlar a amplitude e a frequência da tensão fundamental de saída. Na figura 2.6 mostra-se o diagrama de blocos do conversor de frequência.

O retificador é composto por pontes de diodo trifásicas ou monofásicas e tem a função de retificar a tensão e a frequência da rede e transformar em corrente contínua. O filtro é constituído por capacitores eletrolíticos com a função de diminuir as ondulações na tensão que

foi retificada e garantir o fornecimento de tensão contínua para o inversor. O inversor tem a função de transformar a tensão contínua em tensão alternada com frequência variável.

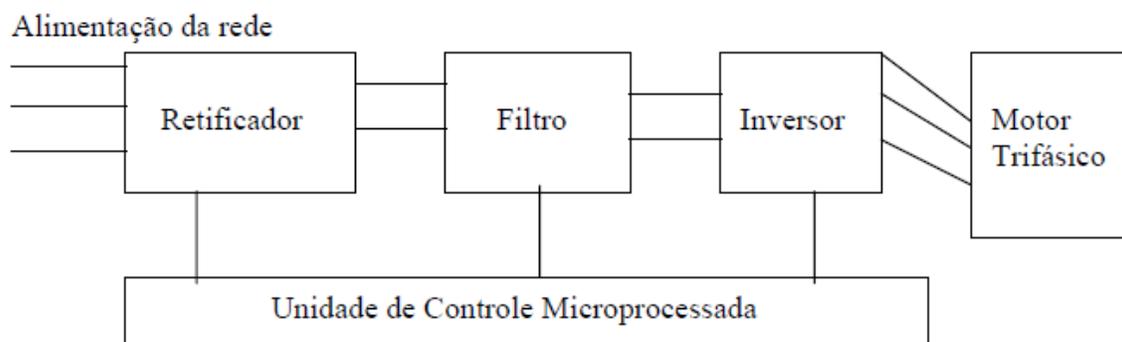


Figura 2.6 - Diagrama de blocos de um conversor de frequência

A figura 2.7 ilustra, através de diagrama simplificado, o conversor de frequência para motores trifásicos.

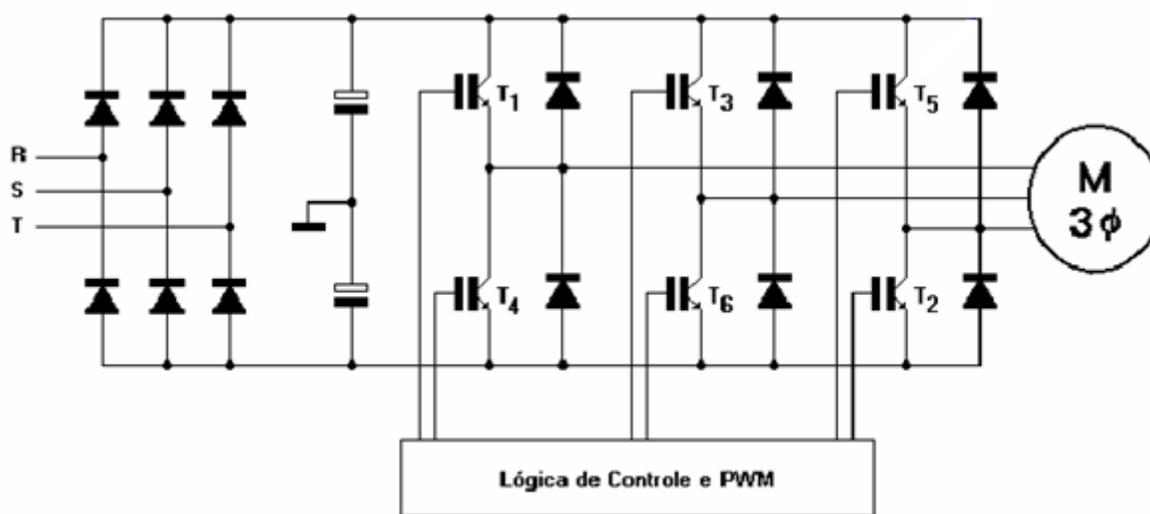


Figura 2.7 - Esquema de um conversor de frequência trifásico

Fonte: Rodrigues (2007)

Dependendo da combinação das chaves abertas ou fechadas podem-se obter na saída do conversor diferentes formas de ondas. Os conversores utilizam a técnica de chaveamento denominada PWM (*Pulse Width Modulation*) ou modulação por largura de pulso. Essa técnica permite a geração de ondas de tensão de frequência variável.

Os conversores de frequência podem ser divididos de acordo com o tipo de controle, que são: Controle Escalar e Controle Vetorial.

O funcionamento do conversor de frequência com controle escalar baseia-se na estratégia de comando denominada “V/f” constante, que mantém o fluxo do entreferro constante, igual ao nominal, para qualquer velocidade de funcionamento do motor.

O controle vetorial é feito através da decomposição vetorial, possibilitam a variação independente do torque e do fluxo. Possuem alta precisão de controle da velocidade e de torque do motor. Podem ser do tipo normal, que necessita de um motor com sensor de velocidade, e do tipo *sensorless*, que não necessita do sensor. Sua precisão é considerada satisfatória, mas com algumas limitações, principalmente em baixas rotações.

Para Gonella (2007) os conversores de frequência com controle escalar são utilizados em sistemas que não requerem muita dinâmica e nem elevada precisão no controle de torque. A precisão para este tipo de controle é de até 0,5% para sistemas sem variação de carga e de 3% a 5% com variação de carga de 0% a 100% do torque nominal.

O circuito de potência do conversor de frequência vetorial não difere do conversor com controle escalar (V/f constante), pois são compostos dos mesmos blocos funcionais, mas possuem estratégias diferentes. No caso escalar a referência de velocidade é usada como sinal para gerar parâmetros de tensão e frequência apropriados e disparar os semicondutores de potência. No caso vetorial, o modelo do motor de indução permite a utilização de técnicas de controle utilizadas em máquinas de corrente contínua, através da transformação do modelo polifásico para o modelo bifásico, tornando a máquina de indução dinamicamente equivalente a uma máquina de corrente contínua com excitação separada (GONELLA, 2007).

Os conversores de frequência são classificados como cargas não lineares, ou seja, cargas que distorcem a forma de onda da tensão e/ou da corrente. Nesses equipamentos a deformação da corrente é oriunda da não-linearidade dos componentes eletrônicos (WEG, 2011).

As harmônicas têm sua principal origem na instalação de cargas não-lineares cuja forma de onda da corrente não acompanha a forma de onda senoidal da tensão de alimentação (WEG, 2011).

Quando há distorção harmônica na instalação elétrica o triângulo de potências sofre uma alteração, recebendo uma terceira dimensão provocada pela potência aparente necessária para sustentar a distorção da frequência fundamental.

O fator de potência real leva em consideração a defasagem entre a corrente e a tensão, os ângulos de defasagem de cada harmônica e a potência reativa para produzi-las. Seu valor é sempre menor que o fator de potência de deslocamento sendo que a correção deverá ser feita pelo fator de potência real.

O fator de potência de deslocamento considera apenas a defasagem entre a corrente e a tensão na frequência fundamental. Em regime permanente senoidal o fator de potência é entendido como sendo um fator que representa o quanto da potência aparente é transformada em potência ativa cobrado pela concessionária (WEG, 2011).

Assim, o cálculo do fator de potência considerando as harmônicas é calculado através da equação (2.7).

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1+THD^2}} \cdot \cos\varphi \quad (2.7)$$

Onde:

FP – Fator de potência;

THD – Distorção harmônica total;

φ – Ângulo do fator de potência.

2.4 Sistemas de Ventilação Industrial

Os ventiladores são turbo máquinas que se destinam a produzir o deslocamento dos gases. Convertem a energia mecânica de rotação, aplicada em seus eixos, em um aumento de pressão do fluido. Com este aumento de pressão, o fluido de ar torna-se capaz de escoar em dutos, vencendo as resistências em seu deslocamento, proporcionando a vazão de ar para a finalidade desejada (FOGAL, 2009).

Neste estudo o ventilador será considerado como máquina de fluxo incompressível, uma vez que o grau de compressão é desprezível. Não é objetivo deste trabalho analisar seu comportamento como máquina térmica.

A classificação dos ventiladores pode ser de acordo com seus rotores: radiais ou centrífugos, axiais e fluxo misto; com o modo de entrada do fluido no rotor: simples sucção e dupla sucção; com a posição das pás do rotor: pás curvadas para trás, pás retas e pás curvadas para frente (MACINTYRE, 1990).

Os ventiladores centrífugos operam pequenas vazões e grandes pressões; os mistos operam médias pressões e médias vazões; os axiais operam grandes vazões e pequenas pressões (PROCEL, 2004).

A figura 2.8 ilustra os rotores dos ventiladores radial, misto e axial.

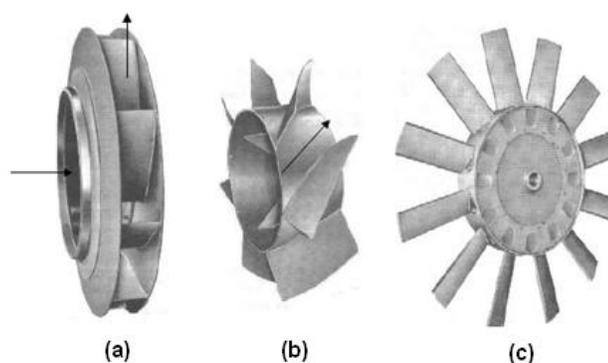


Figura 2.8 - Tipos de rotores: (a) radial, (b) misto e (c) axial
Fonte: (PROCEL, 2007)

O rotor de simples sucção tem apenas uma entrada de fluido, enquanto o de dupla sucção apresenta duas entradas e opera o dobro da vazão (MACINTYRE, 1990).

A figura 2.9 mostra os desenhos dos rotores de simples e dupla sucção.

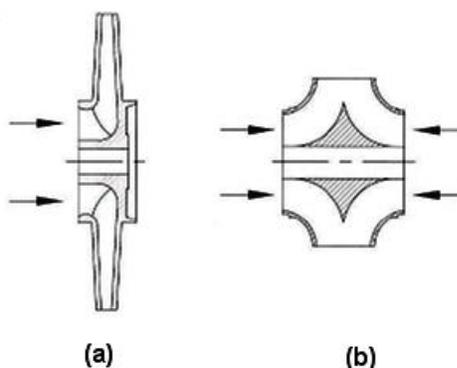


Figura 2.9 - Rotores: (a) simples sucção, (b) dupla sucção
Fonte: (PROCEL, 2007)

O rotor de pás curvadas para trás possui pás aerodinâmicas, tem estabilidade em seu funcionamento, é silencioso e tem bom rendimento. O rotor de pás retas tem construção simples, mas tem rendimento baixo. O rotor de pás curvadas para frente apresenta também um baixo rendimento, mas quando é construído com muitas pás permite operar vazões de ar maiores, com baixa rotação, tendo como consequência um ruído pequeno (PROCEL, 2004).

2.4.1 Curvas Características dos Ventiladores

As curvas características dos ventiladores têm um comportamento diferente para cada tipo. Essas curvas representam o comportamento da diferença de pressão total, da potência do eixo e do rendimento total do ventilador versus a vazão volumétrica, operando com rotação constante.

No aspecto de curvas características o comportamento da potência de eixo em função da vazão, na rotação constante, é diferente para os ventiladores centrífugos, mistos e axiais. No caso dos centrífugos, a potência aumenta com o aumento da vazão e, para os mistos, a potência é praticamente constante com o aumento da vazão, enquanto que, para os axiais, a potência decresce com o aumento da vazão (PROCEL, 2004).

O ventilador centrífugo de pás retas é um tipo comum, geralmente de custo mais baixo. Opera médias pressões, até 500 mmH₂O, e tem capacidade de exaurir ou insuflar material com particulado sólido. Possui baixa eficiência e nível elevado de ruído, produzido por turbulência, alta velocidade do escoamento e aerodinâmica das aletas não-favorável.

O ventilador centrífugo de pás curvadas para trás é o que apresenta melhor rendimento entre os centrífugos. O ruído produzido é menos intenso e tem custo mais elevado que o rotor radial. São muito utilizados em sistemas de condicionamento de ar (FRANÇA, 2010).

As figuras 2.10 e 2.11 ilustram o esquema construtivo e a curva característica do ventilador centrífugo de pás retas e do ventilador centrífugo de pás curvadas para trás.

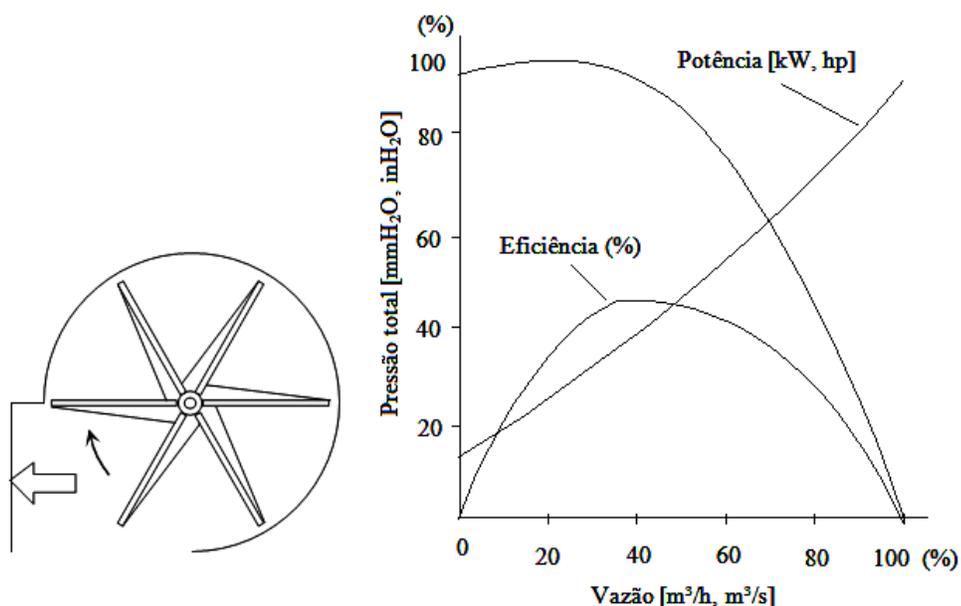


Figura 2.10 - Esquema construtivo e curva característica do ventilador centrífugo de pás retas
Fonte: (França, 2010)

Na figura 2.10 observa-se que a potência do rotor de pás retas é crescente com a vazão e que sua eficiência máxima ocorre para valores menores que 50% da vazão máxima.

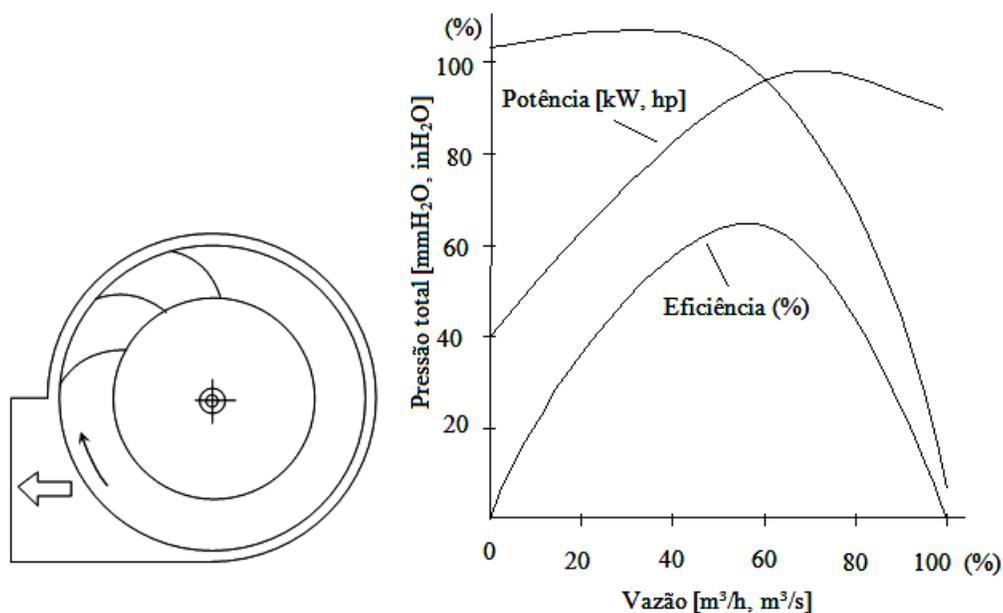


Figura 2.11 - Esquema construtivo e curva característica do ventilador centrífugo de pás curvadas para trás .
Fonte: (França, 2010)

Observa-se na figura 2.11 que o valor máximo da curva de potência ocorre entre 70 e 80% da vazão máxima. Pode-se concluir que o ventilador de pás curvadas para trás não apresenta problemas de sobrecarga por projeto incorreto ou operação inadequada do sistema de ventilação.

O ventilador centrífugo de pás curvadas para frente apresenta em sua curva característica uma extensa faixa de pressão praticamente constante e um ramo instável na faixa de baixas vazões. Possui aplicação em sistemas onde se deseja minimizar a influência de alterações de dispositivos, como *dampers* para controle de vazão. Esse ventilador requer cuidado na determinação do ponto de operação do sistema e na seleção do motor de acionamento, pois a potência cresce constantemente com o aumento da vazão, característica que pode “queimar” o motor se a vazão resultante for muito superior àquela projetada (FRANÇA, 2010).

O ventilador Siroco é um tipo comum de ventilador centrífugo de pás viradas para frente. Possui rotor largo e muitas aletas curtas. O Siroco é o menor entre os ventiladores centrífugos, opera em uma rotação mais baixa e possui eficiência menor que a do centrífugo de aletas curvadas para trás. A figura 2.12 apresenta o esquema construtivo e a curva característica do ventilador centrífugo de pás curvadas para frente, respectivamente (FRANÇA, 2010).

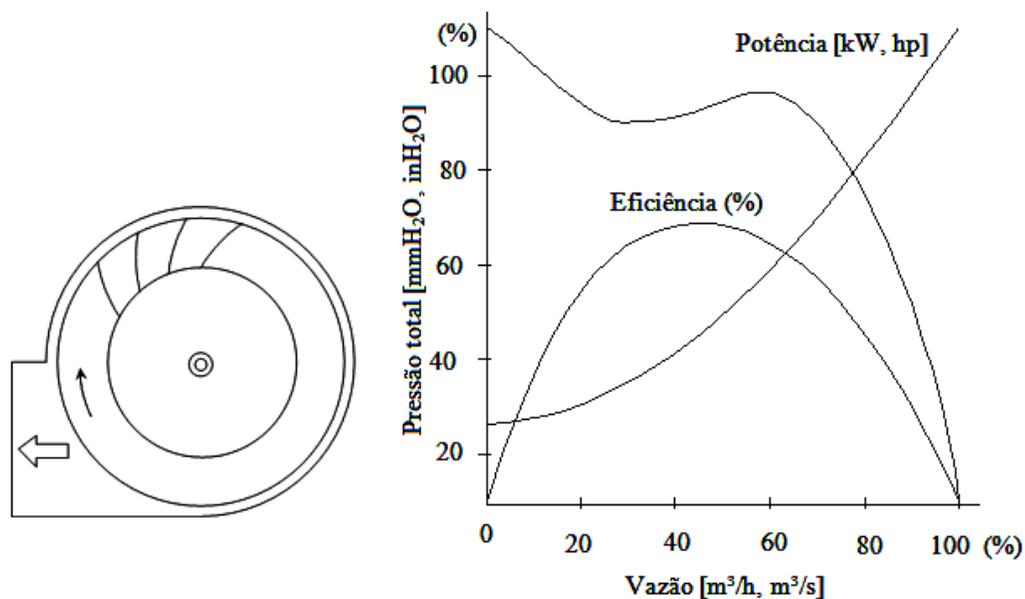


Figura 2.12 - Esquema construtivo e curva característica do ventilador de pás curvadas para frente.
Fonte: (França, 2010)

O ventilador de pás curvadas para frente é preferido quando um baixo custo inicial de instalação e tamanho reduzido são importantes e o serviço é intermitente. As pás curvadas para frente requerem menores velocidades nas suas extremidades para produzir uma altura de carga específica, uma menor velocidade periférica nas pás significa ruído reduzido. Assim, pás curvadas para frente podem ser especificadas para aplicações em aquecimento e resfriamento de materiais e em condicionamento de ar de modo a minimizar o ruído (FOX *et al.*, 2006).

2.4.2 Curva Característica do Sistema

As instalações de ventilação industrial são compostas por dutos e acessórios como filtros e *dampers*, constituindo assim um sistema de dutos. Esse sistema oferece resistência ao escoamento e provoca perda de carga (energia), de modo que à medida que o gás escoar no duto, sua linha energética vai reduzindo. Para que o escoamento se possa realizar ao longo do duto o ventilador deverá fornecer essa energia que será dissipada (MACINTYRE, 1990).

A curva que representa as perdas de carga em função da vazão denomina-se curva característica do sistema e pode ser obtida através da equação (2.8) (FOX *et al.*, 2006).

$$\Delta p_t = \rho \cdot \frac{Q^2}{2A^2} + \rho \cdot g \cdot H_p \quad (2.8)$$

Onde:

Δp_t – diferença de pressão total (N/m²);

Q - vazão volumétrica (m³/s);

ρ – massa específica do fluido (kg/m³);

A – área da seção (m²);

g – aceleração da gravidade (m/s²);

H_p – perda de carga (m).

A perda de carga é uma perda de energia ou de pressão entre dois pontos do escoamento de um fluido e se classifica como distribuída e localizada.

A perda de carga distribuída ocorre em trecho reto da tubulação. A equação universal ou de Darcy-Weisback é a fórmula mais tradicional para a determinação de perdas distribuídas e está representada na equação (2.9) (FOX *et al.*, 2006).

$$\Delta p_d = \rho \cdot g \cdot \left(f \cdot \frac{L}{D_e} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \right) \quad (2.9)$$

Onde:

Δp_d – perda de carga distribuída (N/m²);

g – aceleração da gravidade (m/s²);

f - coeficiente de atrito;

L – comprimento da tubulação (m);

D_e – diâmetro interno do conduto circular ou equivalente (m);

V – velocidade média de escoamento do fluido (m/s).

O coeficiente de atrito f não possui dimensões, é função do número de Reynolds e da rugosidade relativa do conduto, como mostra a equação (2.10) (FOX *et al.*, 2006).

$$f = F \left(R_e, \frac{\varepsilon}{D_e} \right) \quad (2.10)$$

Onde:

R_e – número de Reynolds;

ε – rugosidade absoluta da parede do conduto (m);

$\frac{\varepsilon}{D_e}$ – rugosidade relativa.

O número de Reynolds R_e é definido pela equação (2.11).

$$R_e = \frac{\rho \cdot D \cdot v}{\mu} = \frac{D \cdot v}{\nu} \quad (2.11)$$

Onde:

v – velocidade média do escoamento (m/s);

D – diâmetro interno da tubulação (m);

μ - viscosidade absoluta (Pa.s);

ν – viscosidade cinemática (m²/s).

A tabela 2.2 apresenta a massa específica e a viscosidade cinemática do ar à pressão atmosférica.

Tabela 2.2 – Valores da rugosidade absoluta de alguns materiais

Temperatura (°C)	Massa Específica ρ (kg/m³)	Viscosidade Dinâmica μ (N.s/m²)	Viscosidade Cinemática ν (m²/s)
0	1,29	1,72 10 ⁻⁵	1,33 10 ⁻⁵
10	1,25	1,76 10 ⁻⁵	1,41 10 ⁻⁵
20	1,21	1,81 10 ⁻⁵	1,50 10 ⁻⁵
30	1,17	1,86 10 ⁻⁵	1,59 10 ⁻⁵
40	1,13	1,91 10 ⁻⁵	1,69 10 ⁻⁵

Fonte: Adaptado de (Macintyre, 1990)

A tabela 2.3 mostra os valores de rugosidade absoluta da parede dos condutos de alguns materiais.

Tabela 2.3 – Valores da rugosidade absoluta de alguns materiais

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

Fonte: (PROCEL, 2004)

A determinação do coeficiente de atrito pode ser realizada por vários diagramas e fórmulas empíricas. Para escoamento laminar ($0 < Re < 2000$), tubo de qualquer rugosidade, utiliza-se a equação (2.12).

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.12)$$

Para escoamento turbulento (Re até 105), utilizando-se tubo liso, utiliza-se a equação (2.13).

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (2.13)$$

Para o escoamento turbulento ($Re > 4000$), utilizando tubo de rugosidade comercial, utiliza-se a equação (2.14), conhecida como fator de atrito para escoamento hidráulico misto (PROCEL, 2004).

$$f = \left[2 \log \left(0,27 \cdot \frac{\varepsilon}{De} + \frac{2,51}{Re \sqrt{0,4 \cdot (Re)^{-0,3} + 0,0053}} \right) \right]^{-2} \quad (2.14)$$

As perdas de carga localizadas são perdas de pressão ocasionadas pela peça e singularidades do conduto, tais como curvas, válvulas, derivações, reduções, expansões. A perda localizada de um acessório é calculada pela equação (2.15).

$$\Delta p_L = k \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (2.15)$$

Onde:

Δp_L - perda de carga localizada (N/m^2);

k - coeficiente de perda;

ρ - massa específica do fluido (kg/m^3);

v - velocidade média do escoamento (m/s).

A figura 2.13 ilustra a relação entre o diâmetro interno da tubulação e o diâmetro do *damper* tipo borboleta; a tabela 2.4 mostra os valores do coeficiente de perda k para o *damper* do tipo borboleta.

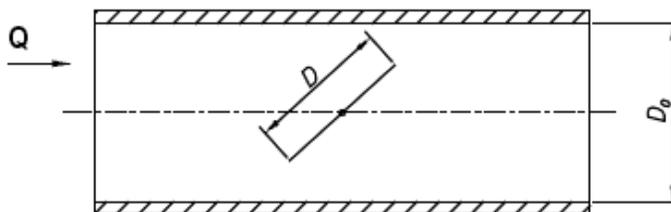


Figura 2.13 – Relação entre o diâmetro interno da tubulação e o diâmetro do *damper* tipo borboleta.
Fonte: (Lucato, 2009)

Tabela 2.4 – Coeficiente de perda de carga para o *damper* tipo borboleta

D/D ₀	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	85°	90°
0,8	0,19	0,45	0,87	1,55	2,6	4,13	6,14	8,38	10,3	10,8	15
0,9	0,19	0,05	1,22	2,51	4,97	9,57	17,8	30,5	45	50,1	100
1,0	0,19	0,07	1,76	4,38	11,2	32	113	619	10360	99999	99999

Fonte: ASHRAE Handbook, 1997

Em um sistema de ventilação operando em condições normais, o escoamento do ar se processa em regime turbulento, de modo que as perdas são proporcionais aproximadamente ao quadrado da velocidade e da vazão. Por isso, a curva das perdas de carga nesse regime tem conformação parabólica (MACINTYRE, 1990).

2.4.3 Ponto de Operação

Para se obter o ponto de operação do sistema é preciso confrontar a curva de pressão versus vazão do ventilador com a curva do sistema. O ponto de intersecção das curvas caracterizará os valores de vazão e pressão que o sistema deverá operar. As curvas características de um ventilador centrífugo e de uma instalação são mostradas na figura 2.14.

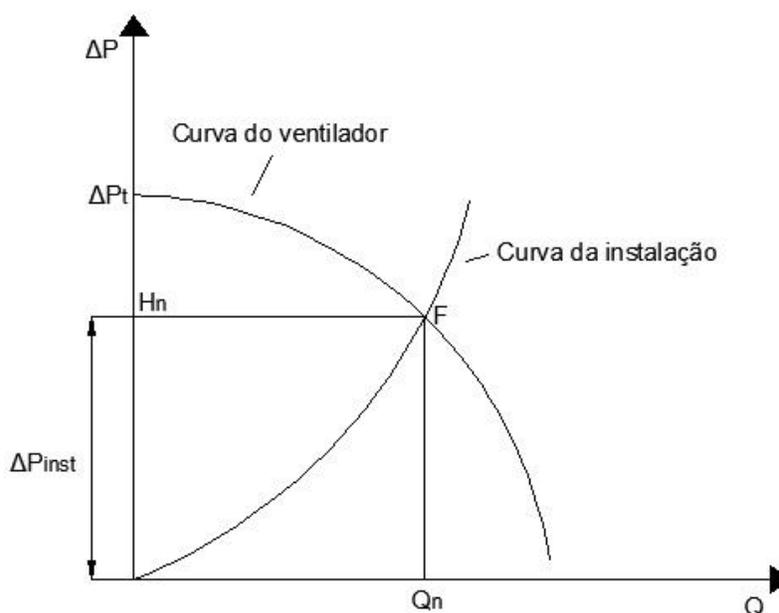


Figura 2.14 - Curva característica do ventilador e da instalação

Fonte: (PROCEL, 2007)

Pode-se observar na figura 2.14 o ponto do funcionamento F da instalação. Este ponto caracteriza-se como ponto nominal ou condições nominais de funcionamento.

2.4.4 Métodos de Controle de Vazão em Sistemas de Ventilação Industrial

Os sistemas de ventilação industrial operam normalmente com rotação constante e utilizam uma válvula na saída do ventilador para controlar a vazão de ar, ocasionando o aumento da pressão no ventilador com o aumento das perdas do sistema. (PROCEL, 2006)

PROCEL (2004) diz que essa válvula pode ser do tipo borboleta ou do tipo veneziana com lâminas paralelas, tradicionalmente conhecida como *damper*, cuja inclinação pode ser regulada manualmente ou automaticamente. Esta regulagem consiste em estrangular a passagem do fluido gasoso, sendo que quanto maior é o estrangulamento, maior será a perda de carga e menor será a vazão. A figura 2.15 apresenta as curvas do sistema de ventilação com controle de vazão através do *damper*.

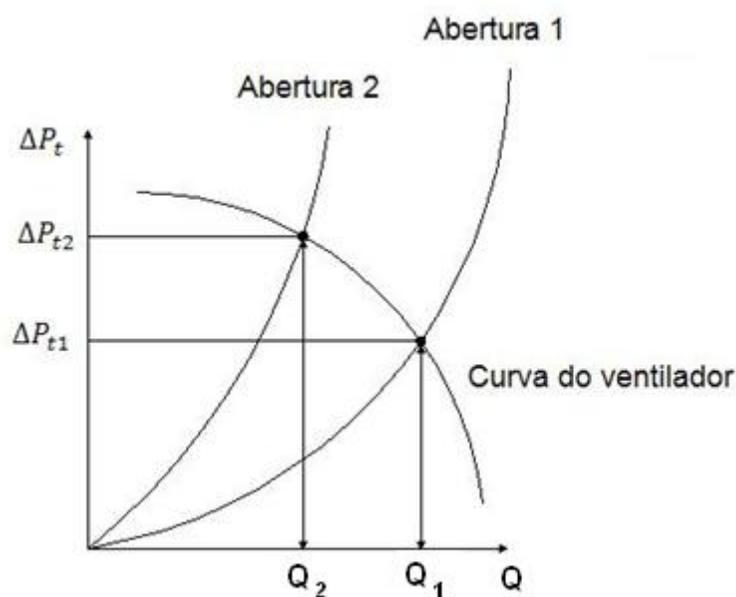


Figura 2.15 - Curva do sistema de ventilação com controle de vazão através de válvulas.
Fonte: (PROCEL, 2004)

A variação da abertura faz variar a perda de carga no sistema. No caso da figura 2.15, inicialmente o ventilador está funcionando no ponto Q_1 e em seguida o sistema requer uma vazão Q_2 . Para atender esta solicitação, o ventilador, na mesma rotação, aumenta a pressão

para vencer a perda de carga e passa a operar com ΔP_{t2} . Houve um fechamento do *damper* seguido de aumento da perda de carga.

A diminuição da vazão solicitada pela instalação pode ser realizada pela diminuição da rotação com a utilização do conversor de frequência, fazendo o ventilador operar no ponto de operação 3. A figura 2.16 apresenta a comparação das curvas características do ventilador funcionando com velocidade constante e velocidade variável.

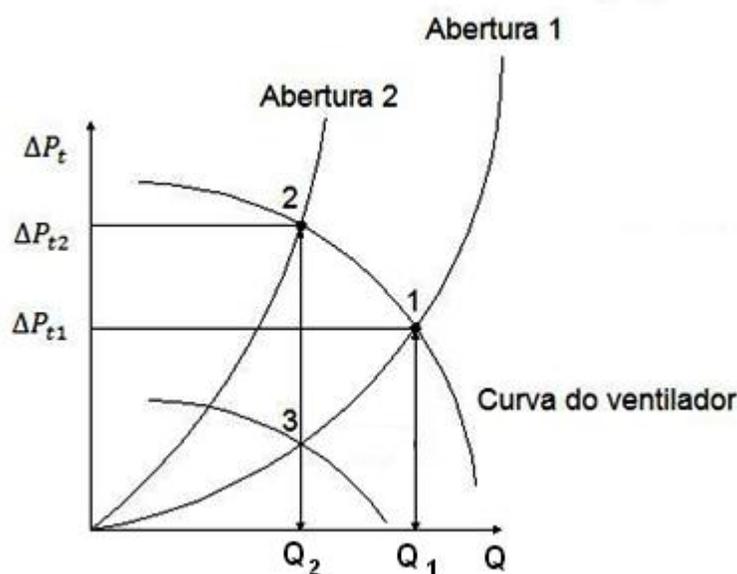


Figura 2.16 - Comparação das curvas características do ventilador funcionando com velocidade constante e velocidade variável.

Fonte: (PROCEL, 2004)

O método de variação de vazão convencional, com o ventilador operando com rotação constante penaliza energeticamente o sistema. Esta análise reflete sobre o aspecto da conservação de energia.

A opção pela utilização do ventilador operando com velocidade variável encontra resistência devido ao custo inicial do conversor ser maior se comparado com o sistema convencional.

Em razão disso, a análise do custo operacional e de manutenção do equipamento se faz necessário para verificar o menor consumo e desgaste do ventilador. Devem ser analisados também a variação de vazão solicitada pelo sistema e o tempo de permanência em um determinado ponto de operação, principalmente na diminuição da vazão.

2.4.5 Leis de Similaridade do Sistema de Ventilação

A variação da rotação, variação do diâmetro do rotor, utilização de aletas reguláveis na entrada do rotor, são alguns dos fatores que alteram a curva do ventilador. Entretanto, considerando o enfoque deste trabalho, será destacada a variação da rotação do ventilador.

O comportamento de um ventilador pode ser previsto pelas equações (2.16), (2.17) e (2.18), desde sejam respeitados certos limites de variação de rotação e também considerando um rendimento constante de ponto para ponto. Porém a alteração de rotação acarreta na mudança de velocidade tangencial em qualquer raio entre a entrada e a saída do rotor, alterando assim outras velocidades envolvidas no escoamento, causando a queda do rendimento.

Para a variação da rotação tem-se a variação de vazão (V), diferença de pressão total entrada e saída (Δp) e da potência no eixo (Pe) de um ventilador, em função da variação de rotação (N), sendo estas para pontos homólogos (MACINTYRE, 1990).

$$Q = Q_1 \left(\frac{N}{N_1} \right) \quad (2.16)$$

$$\Delta p = \Delta p_1 \left(\frac{N}{N_1} \right)^2 \quad (2.17)$$

$$Pe = Pe_1 \left(\frac{N}{N_1} \right)^3 \quad (2.18)$$

Onde:

Q e Q_1 – vazão obtida com a nova rotação e vazão antiga, respectivamente (m^3/s);

N e N_1 – nova rotação e rotação antiga, respectivamente (rpm);

Δp e Δp_1 – diferença de pressão entre a entrada e saída do ventilador nova e antiga, respectivamente (N/m^2);

Pe e Pe_1 – potência no eixo nas condições iniciais potência no eixo com a nova condição (W).

2.4.6 Balanço Energético no Conjunto Motor-Ventilador

As potências envolvidas em uma instalação de um conjunto motor-ventilador, ilustrada na figura 2.17, são: potência elétrica do motor, potência no eixo do motor, potência no eixo do ventilador e potência hidráulica do ventilador (PROCEL, 2004).

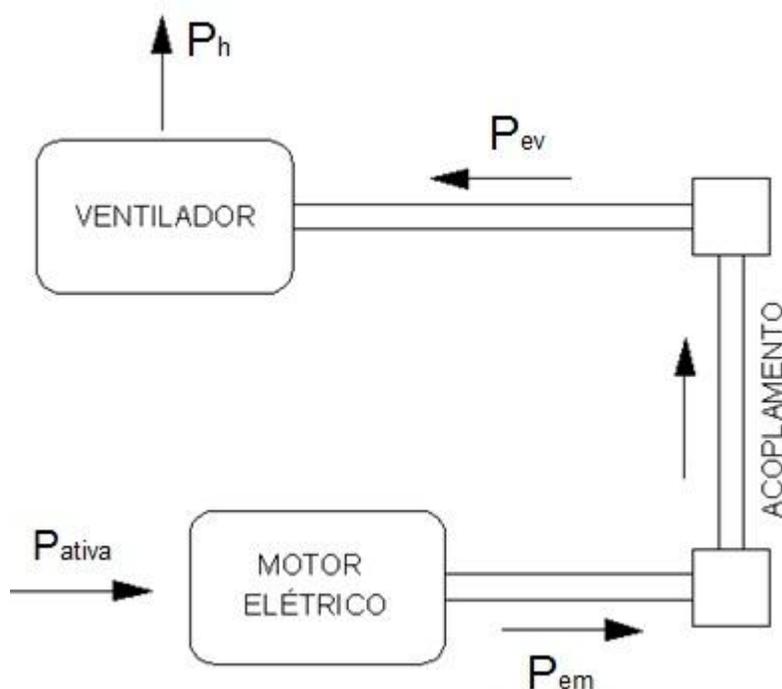


Figura 2.17 - Conjunto motor-ventilador

A potência hidráulica pode ser obtida através da equação (2.19).

$$P_h = \Delta p_t \cdot Q \cdot 10^{-3} \quad (2.19)$$

Onde:

P_h - potência hidráulica do ventilador (kW);

Δp_t - diferença de pressão total do ventilador (N/m²);

Q - vazão volumétrica (m³/s).

O rendimento do motor elétrico é obtido pela razão entre potência mecânica do ventilador e a potência ativa do motor, como mostra a equação (2.20).

$$\eta_{el} = \frac{P_{em}}{P_{ativa}} \quad (2.20)$$

O rendimento do acoplamento do ventilador é dado pela razão entre potência no eixo do ventilador e a potência no eixo do motor, como mostra a equação (2.21).

$$\eta_{ac} = \frac{P_{ev}}{P_{em}} \quad (2.21)$$

No caso de acoplamento direto, não ocorre perdas mecânicas e o rendimento é 100% no acoplamento (PROCEL, 2004).

O rendimento do ventilador é determinado pela razão entre potência hidráulica do ventilador e a potência no eixo ventilador, mostrado na equação (2.22).

$$\eta_{tv} = \frac{P_h}{P_{ev}} \quad (2.22)$$

O rendimento do conjunto motor-ventilador, mostrado na equação (2.23), é obtido através da razão entre potência hidráulica do ventilador e a potência ativa do motor.

$$\eta_{mv} = \frac{P_h}{P_{ativa}} \quad (2.23)$$

2.4.7 Eficiência Energética em Sistemas Motrizes

A substituição do motor padrão pelo de alto rendimento e a utilização do conversor de frequência em seu acionamento são as principais medidas para a redução do desperdício e aumento da eficiência energética em sistemas de ventilação industrial.

A utilização de conversores de frequência pode resultar em uma redução significativa do consumo de energia. Essa economia de energia traz benefícios para a conservação de recursos naturais e faz com que o capital investido para a compra do equipamento tenha um tempo de retorno financeiro reduzido (PROCEL, 2007).

Almeida (2005) estimou que a utilização de variadores eletrônicos de velocidade para o acionamento de cargas industriais, como bombas e ventiladores centrífugos, pode contribuir para uma redução de quase 47 TWh/ano até 2015 na indústria européia.

Grande parte da aplicação de motores elétricos na indústria é destinada à movimentação de fluídos. A substituição dos tradicionais métodos de controle de fluxo permite otimizar e

adequar as condições de operação, de bomba e ventiladores centrífugos, para cada valor de vazão desejado, reduzindo perdas, ruídos e desgastes mecânicos.

A substituição de motores por outros com melhores rendimento pode proporcionar economias que variam de 2 a 6%, segundo PROCEL (2006).

Rooks (2004) avaliou o potencial de economia de energia com a utilização de variadores de velocidade em sistemas motrizes com carga variável, entre elas as bombas centrífugas, e destacou que a economia dos variadores de velocidade é mais significativa do que a substituição de um motor em funcionamento por outro com rendimento maior. Entretanto, salientou que a substituição de um motor mais eficiente aliado a utilização de conversores de frequência proporcionará um maior potencial de economia de energia.

WEG (2010a) relatou as ações de eficiência energética na Cocelpa – Companhia de Celulose e Papel do Paraná. Foram implementadas medidas como substituição do motor padrão pelo de alto rendimento e a aplicação de conversores de frequência no acionamento de filtros circulares no processo de secagem, instalados na máquina de papel e outro no motor da bomba de captação. Com as alterações sugeridas verificou-se uma economia de 1.194 MWh/ano com tempo de retorno do investimento de 1 ano e 8 meses.

Em WEG (2010b) foi realizado um estudo de caso em uma mineradora que extrai e processa pedras para a construção civil. Foi substituído, no processo de britagem, o sistema de partida convencional por um conversor de frequência e foram realizados alguns testes, variando-se a velocidade nominal do motor durante o processo. A utilização do conversor de frequência permitiu uma economia de energia elétrica em torno de 20%, o que foi comprovado através da fatura de energia recebida da concessionária.

Em Silva Júnior (2004) foi verificado o potencial de economia de energia elétrica com a utilização de conversores de frequência em sistemas de aeração de silos verticais da empresa Indústria de Produtos Dallas Ltda., na cidade de Nova Alvorada do Sul (MS). O experimento foi realizado em dois silos de soja, um funcionando com a frequência da rede e outro com conversor de frequência para o controle de velocidade. Através da comparação entre os silos, verificou-se a economia de energia de 74,63% com a utilização do conversor de frequência.

Na indústria Cargill, unidade de Ponta Grossa (PR), foram realizados estudos e testes para verificar a melhor forma de economizar energia. Com a verificação *in loco* detectou-se oportunidades de melhoria como o redimensionamento e a instalação de conversor de frequência nos motores dos ventiladores de 200 cv e 60 cv. Com a utilização de conversores de frequência e a substituição dos motores pelos mais eficientes, obteve-se a economia de R\$ 26.076,00 com tempo de retorno de 11 meses para o motor de 60 cv e R\$ 76.412,00 com tempo de retorno do investimento de 7 meses para o motor de 200 cv. (WEG, 2010c)

Ramos (2009) realizou em um grupo industrial do ramo alimentício a substituição de 86 motores com potência compreendida entre 7,5 e 125 cv e investimento de R\$ 420.000,00, proveniente do Programa de Eficiência Energética da ANEEL. Todos os motores instalados foram pagos em 27 meses, sendo que o Valor Presente Líquido, determinado com taxa de juros de 10% ao ano, apresentou valor de R\$ 885.850,00.

Moreira (2008) elaborou estratégias de ensaio em uma bancada de simulação para verificar os potenciais de eficiência energética nos sistemas de bombeamento. O estudo foi realizado no Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Mortizes – LAMOTRIZ – da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Com a utilização do conversor de frequência, para variar a vazão em substituição da válvula de estrangulamento, verificou-se economia de energia de até 73%. A substituição do motor *standard* pelo modelo de alto rendimento proporcionou uma redução de 7,5% no consumo de energia elétrica.

Em Rodrigues e Junior (2002) foi avaliada a implantação de conversor de frequência no sistema de bombeamento do Centro de Reservação de Distribuição São Bernardo da SANASA – Campinas, analisando as mudanças operacionais, os ganhos com a inserção desse dispositivo e o potencial de economia de energia elétrica. A utilização do conversor de frequência proporcionou de 8.000 kWh no consumo de energia elétrica.

Karmouche (2009) analisou os potenciais de economia de energia de compressores a pistão em sistemas de ar comprimido utilizando motor padrão pelo de alto rendimento acionados por partida direta e softstarter. A substituição do motor padrão pelo de alto rendimento permitiu redução de 2% no consumo de energia elétrica.

Em Araujo (2003) avaliou-se o comportamento elétrico da bomba hidráulica em um sistema de irrigação por aspersão em condições de acionamento convencional com rotação constante e variável através do uso do conversor de frequência. Com a implantação do sistema em campo, pode-se avaliar e quantificar a economia de energia elétrica entre os dois sistemas avaliados. A utilização do conversor de frequência proporcionou uma economia de 30% energia elétrica.

Pauwels (2001) realizou estudos em uma indústria de aço inoxidável na Bélgica para verificar a economia de energia com a substituição da válvula de controle de fluxo de ar pelo conversor de frequência em dois ventiladores de 800 kW. A utilização do conversor de frequência implicou em uma redução do consumo anual de 4.188.277 kWh, com tempo de retorno do investimento de oito meses.

Bandara *et al.* (2008) fez um estudo em uma indústria no Sri Lanka para reduzir o consumo de energia elétrica de um ventilador que utiliza válvula para controle de fluxo de ar. A partir dos estudos, verificou-se que o método convencional para controlar a vazão não é eficiente. A utilização do conversor de frequência proporcionou uma economia mensal de 4.644 kWh no consumo de energia elétrica e tempo de retorno do investimento em 15 meses.

Hopper (2010) realizou um projeto de *retrofit* no moinho de uma fábrica de celulose nos Estados Unidos, visando à eficiência energética. Foi utilizado, para otimização do processo de produção de vapor da turbina, um conversor de frequência ajustável no acionamento do motor do ventilador, o que provocou o aumento de 0,8MW no consumo de energia. Entretanto, verificou-se um aumento de 2,3MW na geração de energia, diretamente atribuído à substituição do método de acionamento. O processo foi considerado um sucesso, com ganho econômico significativo.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos para a obtenção dos dados foram realizados no Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes (LAMOTRIZ), situado nas dependências do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas (CCET) da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS). O LAMOTRIZ foi implementado através de convênio firmado entre a Eletrobrás/Procel e a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul com o objetivo de pesquisar aspectos relacionados à Eficiência Energética em Sistemas Motrizes.

3.1 Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes

O LAMOTRIZ é composto por quatro bancadas que são:

- Bomba Centrífuga + Dinamômetro;
- Ventilador Centrífugo;
- Compressor de Ar;
- Correia Transportadora.

Os equipamentos e instrumentos utilizados nas estações do LAMOTRIZ são industriais, o que permite simular diversas condições operativas de cargas comumente utilizadas pela indústria.

As cargas são instaladas em bancadas de ensaio, independentes umas das outras. O sistema de acionamento completo é composto por: quadro de medição; sistemas de automação e medição integrados, capazes de controlar automaticamente a execução, a coleta de dados e a emissão de relatórios.

Em cada bancada há dois motores, um padrão e outro de alto rendimento, três tipos de acionamentos que são: partida direta, softstarter e conversor de frequência; Controlador Lógico Programável (CLP) e os equipamentos de acionamento e proteção tais como

contatores, disjuntores, chaves, botoeiras e sinaleiros. Todos os parâmetros elétricos da entrada dos motores são medidos através desta bancada que ainda armazena o sistema de aquisição dos dados mecânicos.

A medição dos parâmetros elétricos de entrada dos motores é realizada pelo medidor de energia multifunção, que registra os valores de tensão entre fases, fase e neutro, frequência, correntes, potências ativas, reativas, aparentes e fator de potência. Todos os parâmetros medidos podem ser visualizados e monitorados no computador na janela própria do *software* supervisório.

O CLP além de comandar a partida dos motores, realiza a leitura dos parâmetros de transmissores e sensores através de entradas e saídas digitais, entradas e saídas analógicas e comunicação *Modbus*, sendo que a comunicação com o computador é feita via porta de comunicação *Ethernet*.

Os quatro CLPs são interligados via *switch* formando uma rede de comunicação em padrão *Ethernet*, conforme o diagrama unifilar simplificado observado na figura 3.1.

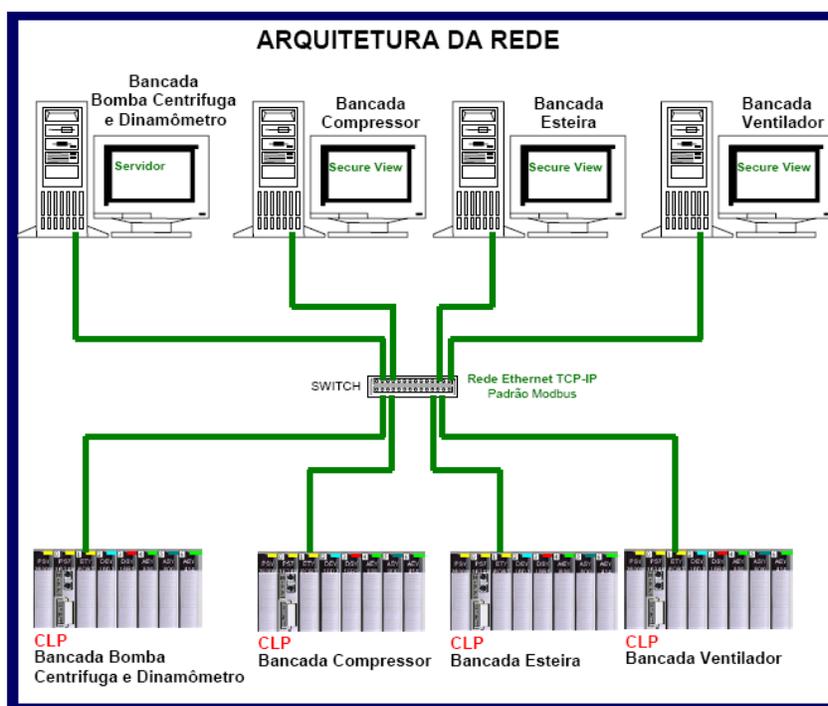


Figura 3.1 - Arquitetura da rede do LAMOTRIZ

3.2 Estação de Simulação do Ventilador Centrífugo

Neste trabalho, a estação de simulação utilizada do LAMOTRIZ foi a Bancada de Ventilação. O sistema é composto por um ventilador centrífugo que possui um manômetro, um *damper* para o controle de vazão e um transmissor de velocidade e temperatura.

Na figura 3.2 mostra-se o fluxograma simplificado da bancada do ventilador.

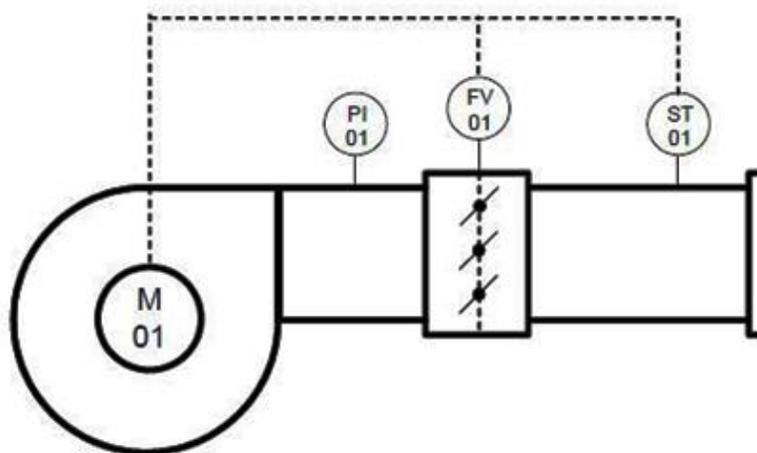


Figura 3.2 - Fluxograma simplificado do ventilador

O detalhamento dos componentes da bancada do ventilador encontra-se na tabela 3.1.

Tabela 3.1. Descrição dos componentes da bancada do ventilador

Tag	Descrição
PI-01	Manômetro
FV-01	<i>Damper</i> para controle de vazão
ST-01	Transmissor de temperatura e velocidade do ar

O acionamento é feito por dois tipos de motores, sendo um da linha W21 e o outro da linha W21 *plus*, fabricante *WEG*, ambos de 1,5 cv. O controle de vazão pode ser feito pelo conversor de frequência e pelo *damper*.

Nas figuras 3.3 e 3.4, são mostrados a bancada do sistema de ventilação e o painel de comando e proteção da bancada do ventilador do LAMOTRIZ da UFMS.

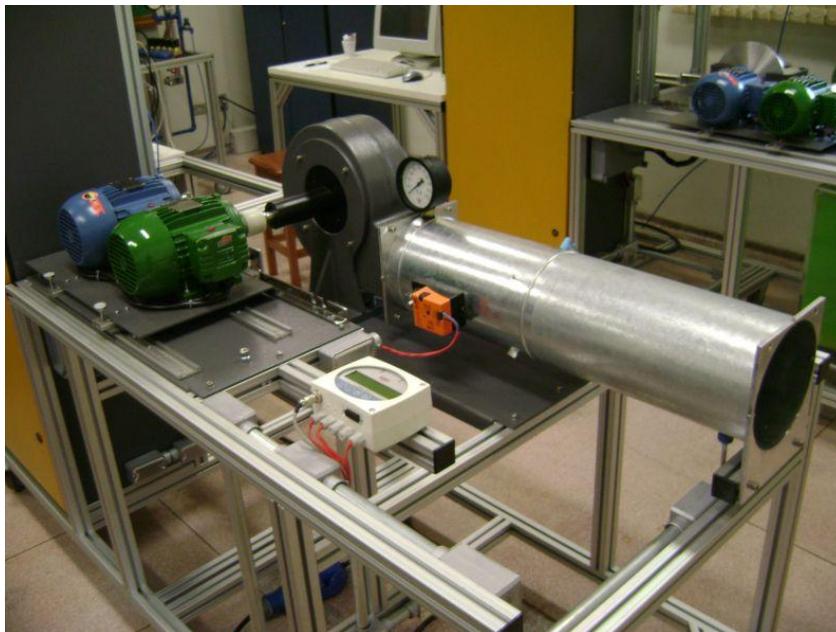


Figura 3.3 - Estação de simulação do ventilador centrífugo do LAMOTRIZ



Figura 3.4 - Painel de Comando e Proteção

Na figura 3.5 mostra-se o diagrama esquemático da estação de simulação do ventilador centrífugo.

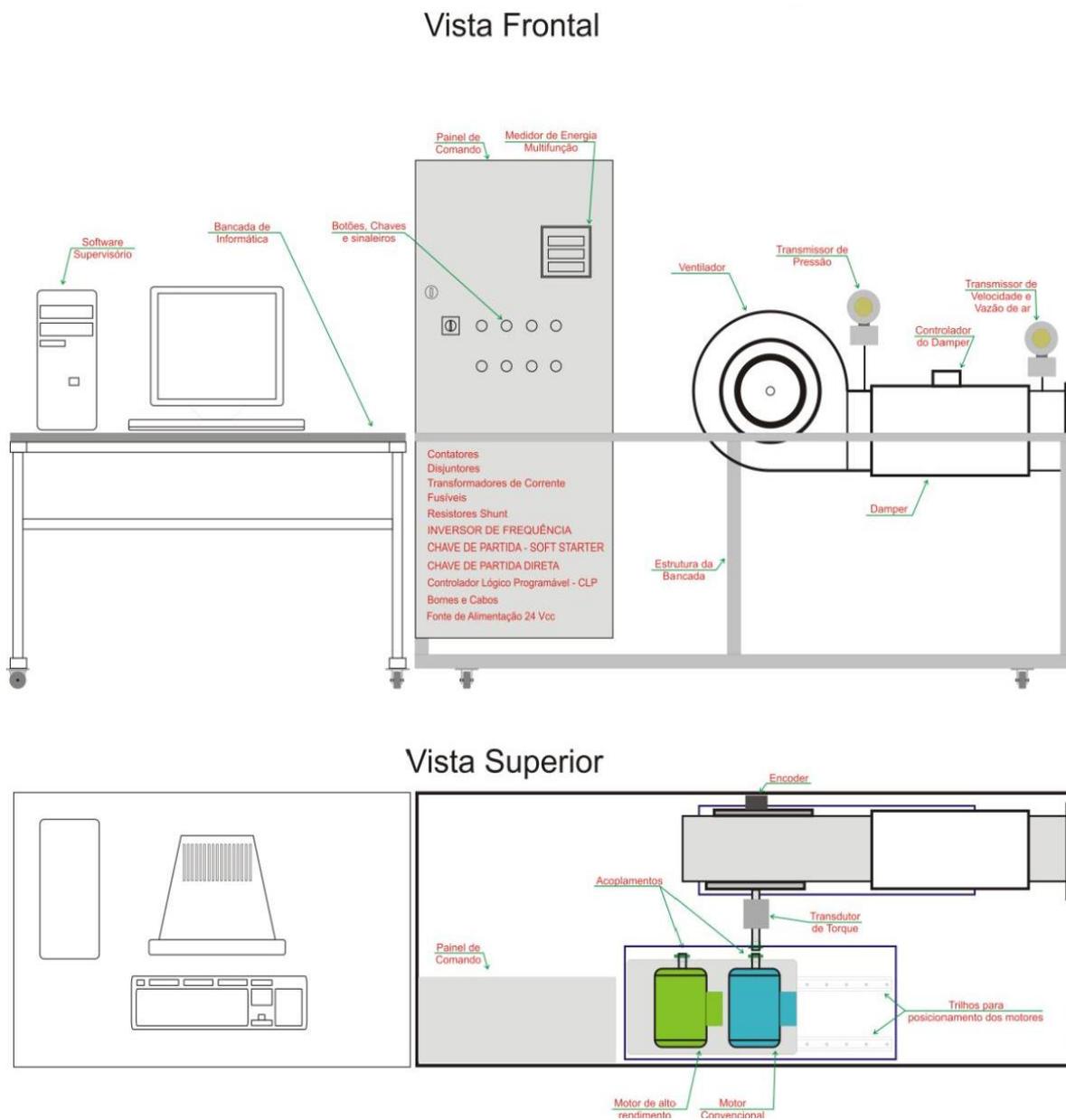


Figura 3.5 - Diagrama esquemático da estação do ventilador centrífugo do LAMOTRIZ

3.3 Motores

Na bancada do ventilador são utilizados dois motores de indução trifásicos. A a tabela 3.2 mostra os seus respectivos dados de placa.

Tabela 3.2. Dados de placa dos motores da bancada de ventilação

Dados	Motor W21	Motor W21 <i>plus</i>
Tensão (V)	220/380	220/380
Corrente Nominal (A)	4,4 / 3,0	4,0 / 2,32
Nº de pólos	2	2
Potência (cv)	1,5	1,5
Rendimento (%)	78,6	83,0
Frequência (Hz)	60	60
Fator de Potência	0,83	0,87

As figuras 3.6 e 3.7 ilustram as curvas de desempenho dos motores W21 e W21 *plus* utilizados no acionamento do ventilador.

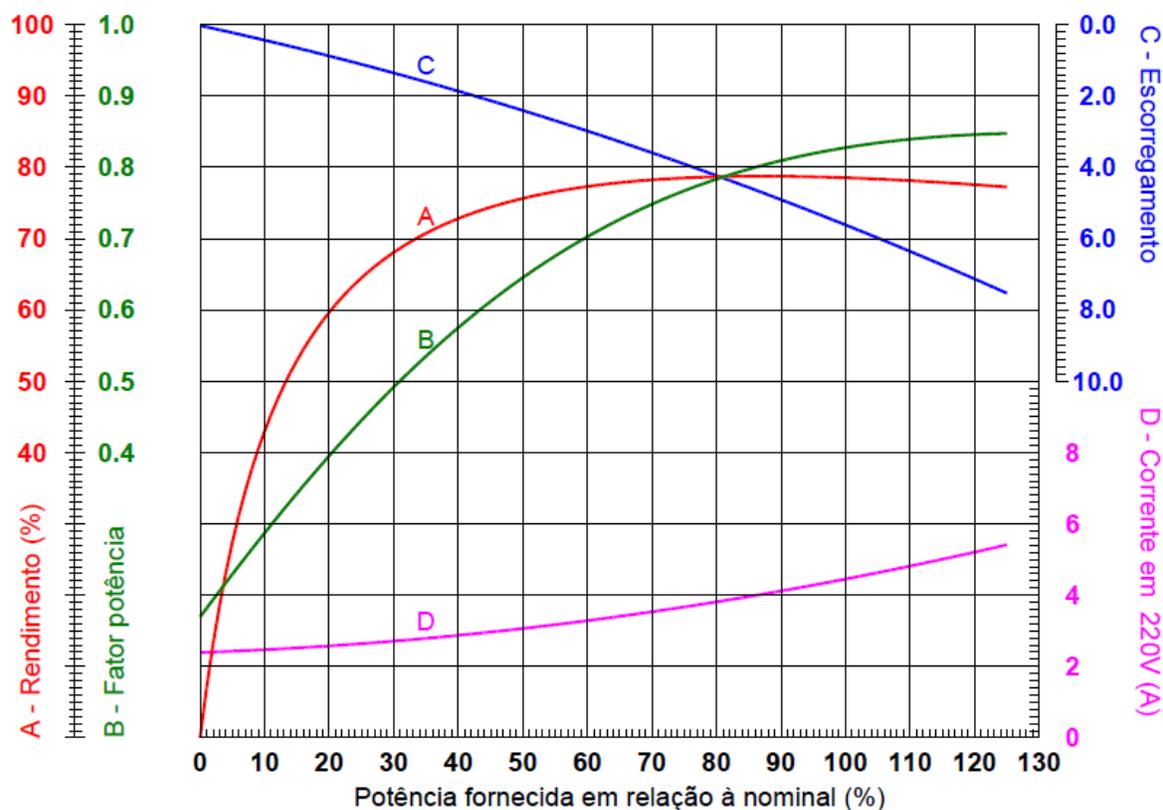


Figura 3.6 - Curva característica do motor W21 WEG.
Fonte: (WEG, 2010)

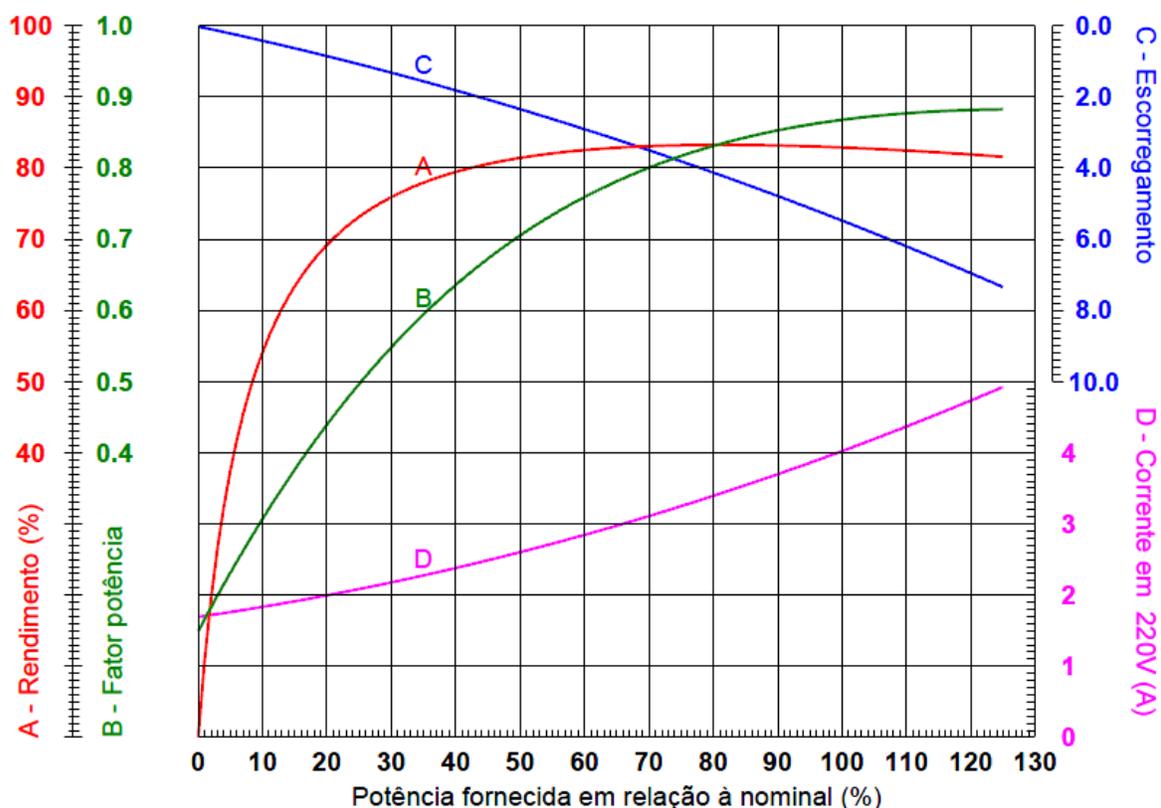


Figura 3.7 - Curva característica do motor W21 *plus* WEG.
Fonte: (WEG, 2010)

3.4 Acionamentos

O ventilador será acionado através do método de partida direta e com a utilização do conversor de frequência.

- **Chave de Partida Direta:** *TeSys U*, modelo LC1D09 (*Telemecanique*). Contatora tripolar; 9A, AC-3; bobina 220V AC.
- **Conversor de Frequência:** Altivar 31, de fabricação *Schneider*, conforme mostrado na figura 3.6, com as seguintes características: trifásico, 220V, frequência 60Hz, comunicação via rede *ModBus*, entrada para *encoder*, controle PID, entrada 0-10V analógica para controle de velocidade, ilustrado na figura 3.8.



Figura 3.8 - Conversor de Frequência *Altivar 31*

3.5 Sistema Supervisório

O sistema supervisório foi criado através do *software Web Studio* versão 6.1 e fornecido ao LAMOTRIZ com todas as configurações do sistema, incluindo todos os parâmetros elétricos e mecânicos de cada estação.

A bancada do ventilador possui seis telas de monitoramento que são: Comando, PID, Banco de Dados, Gráfico, Medições e Relatórios, nas quais se obtêm dados, leituras de grandezas elétricas, leituras de temperatura e gráficos. A figura 3.7 ilustra a tela principal do ventilador.

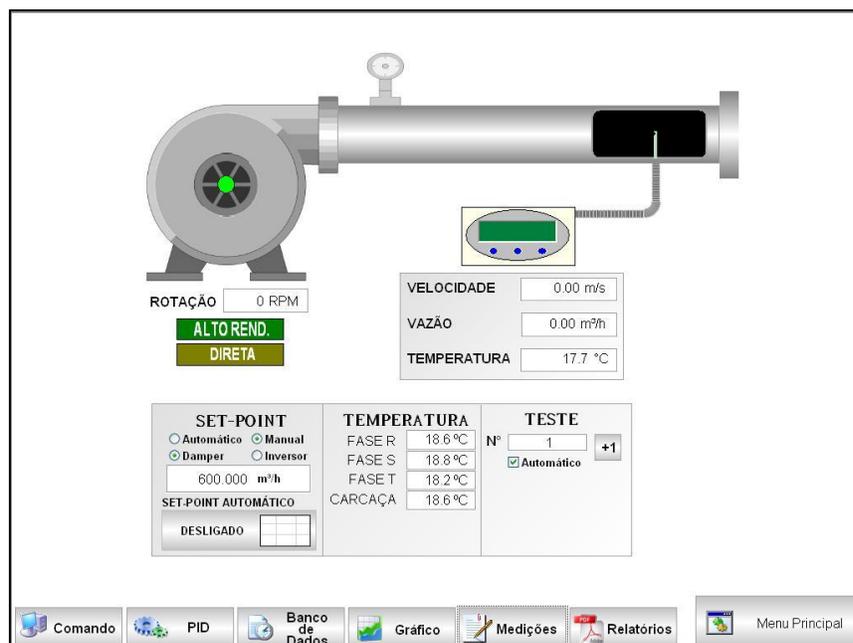


Figura 3.9 - Tela principal do sistema de ventilação

A tela de “Comando” possui os comandos básicos de operação, como: botão de liga/desliga, tipo de acionamento desejado (partida direta, *softstarter* e conversor de frequência), operação por tempo e controle de válvulas.

A tela “PID” possui os comandos complementares à tela “Comando”, como: controle de *set-point* e valores de PID.

A tela do Banco de Dados armazena todos os valores elétricos e mecânicos obtidos durante a realização dos testes. Os dados ficam armazenados em um arquivo do tipo *comma-separated values* (csv) e podem ser obtidos em intervalos de até 0,25 segundos.

A tela “Gráfico” mostra, em tempo real, gráficos dos valores elétricos e/ou mecânicos a serem escolhidos pelo usuário.

A tela “Medições” mostra todas as medidas elétricas importantes, como: tensão, corrente, demanda, fator de potência, as taxas de distorção harmônicas de tensão e corrente, potência ativa, reativa e aparente e o consumo de energia ativa, reativa e aparente, além da frequência.

3.6 Medidor de Energia

O equipamento responsável pela medição dos parâmetros elétricos da entrada do motor é o medidor de energia multifunção *Power Meter Series 800*, de fabricação *Schneider*.

O medidor realiza leituras de diferentes tipos de grandezas, como tensão, corrente, frequência, potências ativas, reativas e aparentes, fator de potência, distorção harmônica total (THD) de tensão e corrente, demanda, energia ativa, energia reativa indutiva e capacitiva. A comunicação é feita via porta RS232, protocolo *ModBus* RTU.

3.7 Sensores e Atuadores

A bancada do ventilador é constituída pelos seguintes sensores e atuadores:

- **Manômetro:** Tipo petroquímico com diâmetro de 4 1/2", conexão ao processo 1/2", faixa de 0 a 400 mmH₂O. Fabricante: *Modena*.

- **Sensor de velocidade:** opera na faixa de 0 a 20 m/s e temperatura 0 a 50°C, alimentação 24 VCC, sinal de saída 4 a 20 mA. Fabricante: *Kimo*.
- **Atuador elétrico para *damper*:** alimentação 24 VAC/VCC, sinal de entrada 2 a 10 VCC, 35 in.lb (4Nm), tempo de ação 95 s. Fabricante: *Belimo*.

3.8 Controladores Lógicos Programáveis

Os Controladores Lógicos Programáveis permitem que os ensaios sejam realizados automaticamente e que todos os parâmetros sejam visualizados e monitorados no computador, na janela do supervisor.

O CLP utilizado na bancada do ventilador é CPU *premium UNITY NI ETH 96KB*, de fabricação *Schneider*.

3.9 Ventilador

O sistema de ventilação é constituído por um ventilador centrífugo tipo siroco: compatível com motor de 1,5 cv, com vazão máxima 42 m³/min, pressão de trabalho máxima 150 mmCA e velocidade de 3600 rpm. Possui *damper* elétrico compatível com a vazão e pressão dos ventiladores, variação de 0 a 100%, com indicação da posição atual na tela do *software* supervisor.

3.10 Metodologia

No desenvolvimento deste trabalho foram realizados ensaios e medições dos parâmetros elétricos e mecânicos do sistema de ventilação como vazão, pressão e rotação (no eixo do motor), além da potência elétrica consumida pelo acionador.

A partir desses dados foi traçado o gráfico do campo básico de funcionamento do ventilador, que contém as curvas características da instalação e do ventilador *Carga versus Vazão*, com a finalidade de avaliar o desempenho do ventilador bem como a curva de rendimento.

Foram comparados, para cada vazão de ar, os valores do consumo de energia elétrica para os conjuntos “motor + controle de vazão”, descritos a seguir:

- Motor W21 + *damper*;
- Motor W21 + conversor de frequência;
- Motor W21 *plus* + *damper*;
- Motor W21 *plus* + conversor de frequência.

Após o levantamento das curvas para cada um dos quatro conjuntos, foi realizada uma comparação de forma a avaliar o melhor conjunto, sob o aspecto da eficiência energética. Foram apresentadas também outras curvas representando a economia de energia obtida pelos conjuntos e espera-se que os resultados contribuam com estudos de viabilidade econômica de investimentos em métodos de conservação de energia em sistemas motrizes.

A faixa de vazão utilizada nos ensaios será de 50 a 700 m³/h. Quando o motor for acionado pelo método de partida direta, entende-se que o controle de vazão será executado pelo *damper*. Quando o motor for acionado pelo conversor de frequência, este mesmo será o responsável pelo controle de vazão, através da variação da frequência de operação.

A condição operativa do sistema será repetida para os quatro conjuntos citados anteriormente, o que permite uma comparação precisa entre os conjuntos atuando sobre uma mesma característica de consumo.

Após a obtenção das curvas de carga (potência ativa) para os quatro conjuntos, estas foram colocadas em um mesmo gráfico com o intuito de facilitar a visualização das diferenças entre os métodos utilizados.

O consumo de energia (em kWh) de cada conjunto foi quantificado e os resultados foram exibidos em quadros comparativos.

Através da comparação entre o conjunto menos eficiente e o mais eficiente, foi realizada uma análise econômica de investimento, utilizando o método do Valor Presente Líquido, para uma curva de carga variável, típica do ambiente industrial, a fim de se determinar a média do consumo e o tempo de retorno do investimento.

Além do consumo de energia elétrica ativa, foi avaliado o comportamento do fator de potência, em vista dos problemas causados no sistema de distribuição e do custo adicional na fatura de energia ocasionado pelo excesso de energia reativa, ou seja, fator de potência com valores abaixo de 0,92.

Os ensaios foram controlados e acompanhados via *software* supervisor. Os dados foram armazenados em arquivos do tipo “csv”, sendo abertos no *software Microsoft Excel 2007*, onde foram elaborados os quadros comparativos. A taxa de aquisição de dados utilizada foi de 1 segundo.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são mostrados os resultados experimentais e de simulação propostos com o objetivo de se avaliar o desempenho do sistema de ventilação industrial e investigar seus potenciais de eficiência energética.

4.1 Obtenção das Curvas Características do Sistema de Ventilação

O estudo do comportamento dos ventiladores através das análises das curvas características, obtidas teórica e experimentalmente, tem a finalidade de se obter a condição de vazão e pressão com o máximo rendimento possível, avaliando as qualidades reais do sistema, bem como a obtenção dos dados que servirão para orientação e pesquisas de outros tipos de ventiladores.

Primeiramente, foi realizado o balanço de energia para o conjunto motor-ventilador utilizando o acionamento através da chave de partida direta, com o controle da vazão através do *damper*. Esta análise visou obter a curva de potência entregue ao eixo do ventilador, além das curvas de rendimento do ventilador e do conjunto em função da vazão, permitindo avaliar a condição de operação com melhor eficiência para este método de controle de vazão.

Em seguida, as curvas características do sistema foram calculadas, considerando diversos níveis de abertura do *damper*, sendo posteriormente confrontadas com a curva do ventilador siroco obtida experimentalmente, para que fossem avaliados os pontos de operação para cada porcentagem de abertura do *damper*.

Finalizando a análise das curvas características do sistema de ventilação, foi identificado o campo básico de funcionamento do ventilador, mostrando a relação de interdependência entre a vazão, carga, rotação e potência no eixo, que são grandezas típicas para caracterização do desempenho do conjunto. Essa abordagem possibilita que seja estabelecida qual a melhor condição de operação para o sistema.

4.1.1 Balanço de Energia no Conjunto Motor-Ventilador com *Damper*

A potência no eixo do motor foi obtida através das curvas do fabricante do motor elétrico (figura 3.6), que apresentam a potência no eixo em função da potência elétrica, mostrada na equação (4.1).

$$P_{em}(P_{ativa}) = -9,18 \cdot 10^{-5} \cdot (P_{ativa})^2 + 1,01 \cdot (P_{ativa}) - 141,18 \quad (4.1)$$

Como o ventilador está acoplado diretamente ao eixo do motor, a potência mecânica do ventilador será igual à potência mecânica entregue ao eixo do motor. Com os valores obtidos experimentalmente de vazão e potência elétrica e com a utilização da equação (4.1), obteve-se a curva da potência mecânica do ventilador em função da vazão mostrada na figura 4.1.

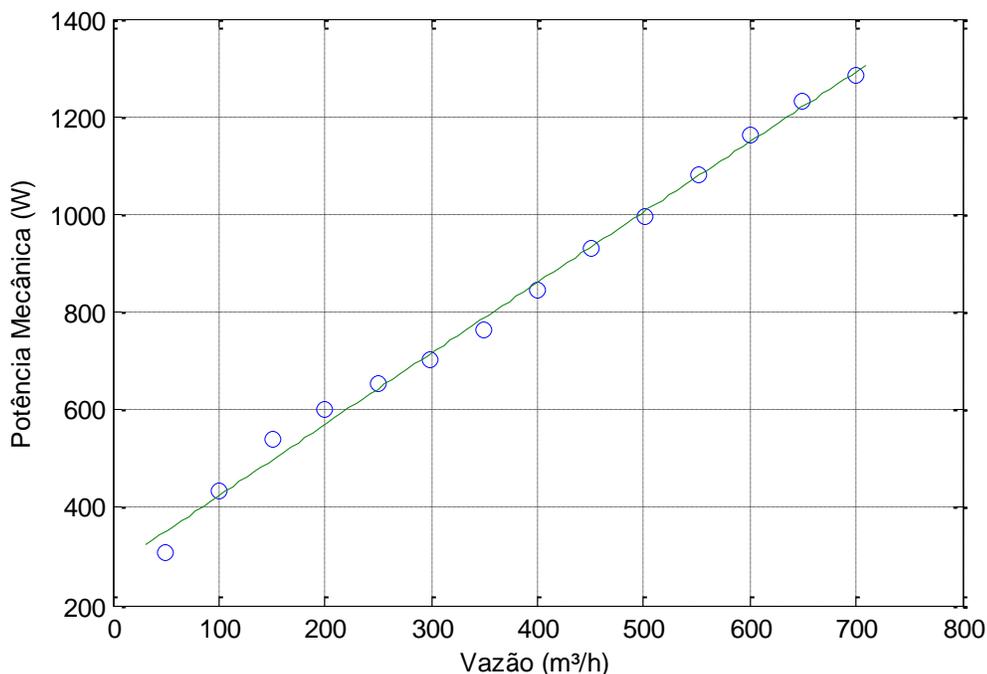


Figura 4.1 - Potência Mecânica do Ventilador versus Vazão

Foram calculados os rendimentos do ventilador e do conjunto motor-ventilador. O rendimento do ventilador foi obtido através da equação (2.21), e o rendimento do conjunto motor-ventilador foi calculado através da equação (2.22).

A tabela 4.1 mostra os valores de vazão (Q), carga (H), potência ativa (P_{ativa}), potência mecânica do ventilador (P_{em}), potência hidráulica do ventilador (P_h), rendimento do ventilador

e rendimento do conjunto, medidas e calculadas, utilizando o motor W21 e *damper* para o controle de vazão.

Tabela 4.1. Valores medidos e calculados de vazão, carga, potências e rendimentos

Q (medida) [m ³ /h]	H (medida) [N/m ²]	P_{ativa} (medida) [W]	P_{em} (calculada) [W]	P_h (calculada) [W]	Rendimento Ventilador (calculado)	Rendimento Conjunto (calculado)
50	1500	464,3	308,0	20,8	0,07	0,04
100	1450	601,8	433,3	40,3	0,09	0,07
150	1425	722,7	540,8	59,4	0,11	0,08
200	1425	792,4	601,5	79,2	0,13	0,10
250	1425	853,7	654,2	99,0	0,15	0,12
300	1425	909,0	701,0	118,8	0,17	0,13
350	1400	981,4	761,6	136,1	0,18	0,14
400	1350	1081,6	843,8	150,0	0,18	0,14
450	1300	1188,1	929,2	162,5	0,17	0,14
500	1150	1272,7	995,5	159,7	0,16	0,13
550	950	1382,2	1079,5	145,1	0,13	0,11
600	850	1494,8	1163,4	141,7	0,12	0,09
650	800	1588,1	1231,3	144,4	0,12	0,09
700	600	1661,2	1283,3	116,7	0,09	0,07

Pode-se observar na tabela 4.1 que a potência hidráulica aumenta com o aumento da vazão, possuindo valores na faixa de 28,8 W para a vazão de 50 m³/h e 116,7 W para a vazão de 700 m³/h. Observa-se também que a potência ativa aumenta significativamente com o aumento da vazão, possuindo valor de 464,3 W para a vazão de 50 m³/h e valor de 1661,2 W para a vazão de 700 m³/h, característica do ventilador centrífugo do tipo siroco. Conseqüentemente, o rendimento do ventilador é crescente para a faixa de vazão de 50 m³/h a 400 m³/h e decrescente para a faixa de vazão de 450 a 700 m³/h.

A figura 4.2 mostra a curva do rendimento do ventilador em função da vazão e a curva de tendência obtida pela equação (4.2).

$$R_{\text{vent}}(Q) = 5,96 \cdot 10^{-12} \cdot (Q)^3 - 8,73 \cdot 10^{-9} \cdot (Q)^2 + 3,26 \cdot 10^{-6} \cdot Q - 7,01 \cdot 10^{-6} \quad (4.2)$$

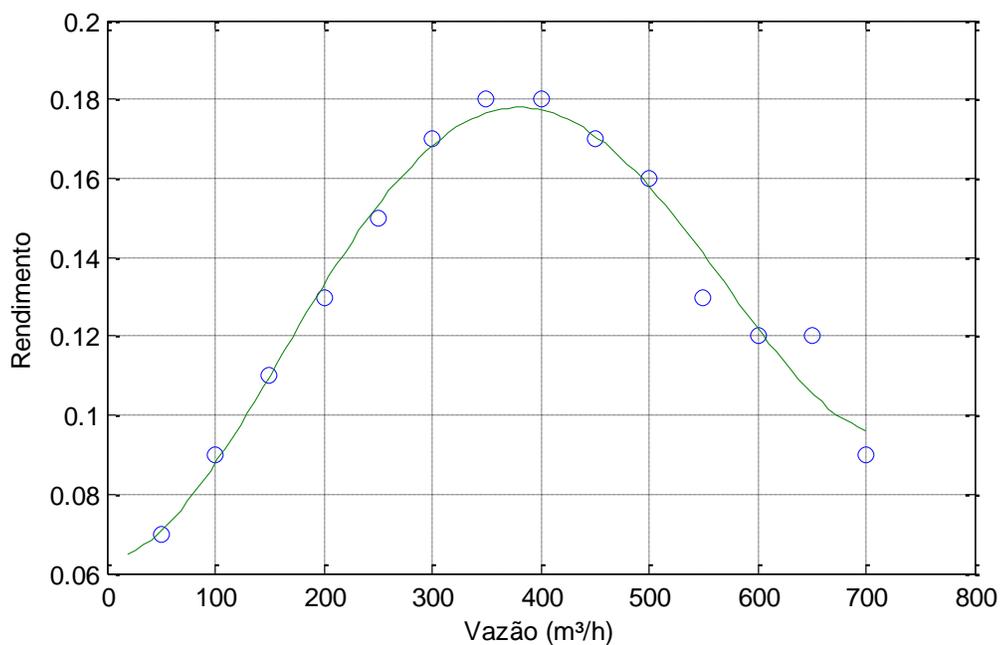


Figura 4.2 - Rendimento do Ventilador versus Vazão

A figura 4.3 mostra a curva de rendimento do conjunto motor-ventilador em função da vazão e a curva de tendência obtida pela equação (4.3).

$$R_{\text{conj}}(Q) = 3,87 \cdot 10^{-12} \cdot (Q)^3 - 5,63 \cdot 10^{-9} \cdot (Q)^2 + 1,87 \cdot 10^{-6} \cdot Q + 1,78 \cdot 10^{-4} \quad (4.3)$$

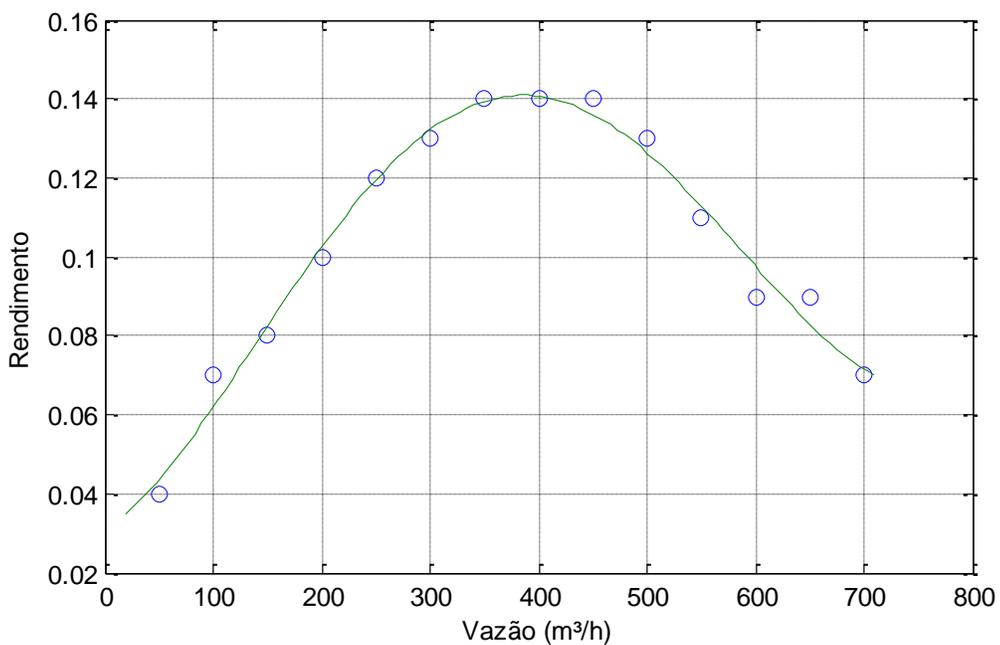


Figura 4.3 - Rendimento do Conjunto Motor-Ventilador versus Vazão

Através da análise das figuras 4.2 e 4.3, onde são mostradas as curvas de rendimento do ventilador e do conjunto motor-ventilador, respectivamente, pode-se observar que a eficiência máxima está na faixa de vazão de 350 a 400 m³/h, onde o rendimento do ventilador é de 18% e do conjunto é de 14%.

O ventilador centrífugo de pás curvadas para frente possui rendimento de até 65% no máximo, menor que o ventilador centrífugo de pás curvadas para trás, onde o rendimento pode chegar até 85%, segundo França (2010). Em Moreira (2006), realizou-se um estudo do rendimento de ventilador centrífugo de pás curvadas para frente, onde o rendimento máximo obtido foi de 60,4% na vazão de 3974 m³/h.

4.1.2 Obtenção das Curvas do Sistema e do Ventilador

A curva característica da instalação foi calculada em função da vazão volumétrica, utilizando-se a equação (2.7). Na figura 4.4 mostra-se a curva característica da instalação considerando a abertura do *damper* em 0°, ou seja, com 100% de abertura. Observa-se que a diferença de pressão total não ultrapassa o valor de 30 N/m².

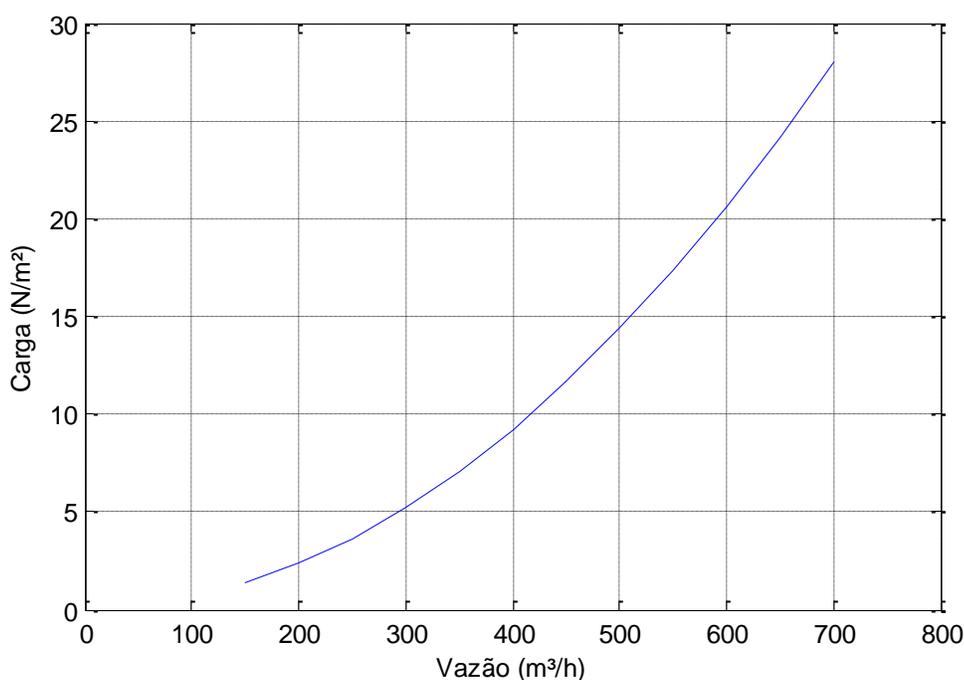


Figura 4.4 - Curva da instalação com 100% de abertura do *damper*

Através da variação da abertura do *damper*, obtêm-se diferentes curvas do sistema. Na figura 4.5 mostra-se as curvas da instalação calculada para os ângulos 40°, 50° e 60° de abertura do *damper*.

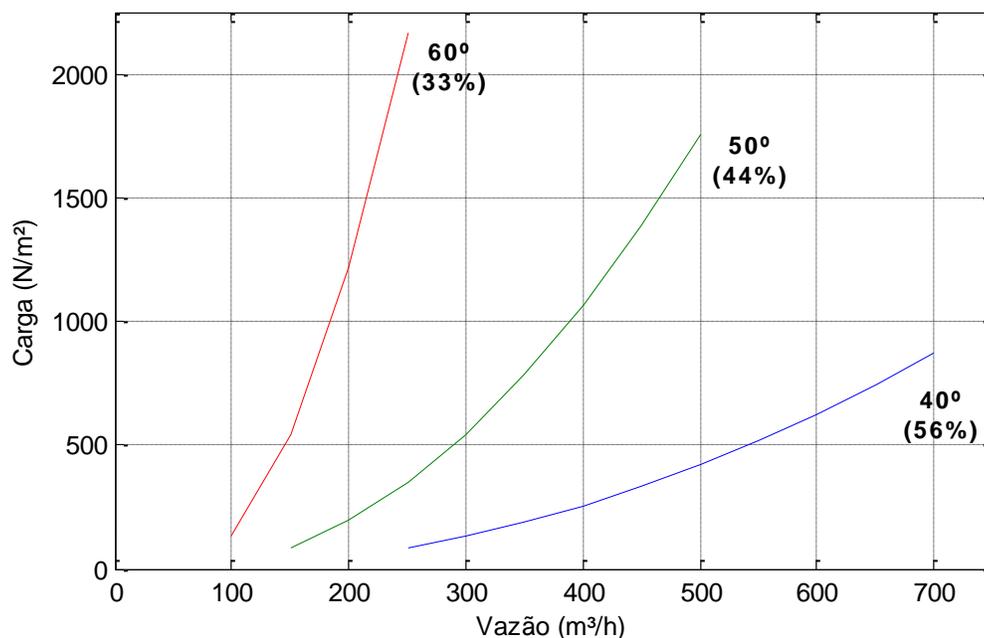


Figura 4.5 - Curvas da instalação calculada com o damper em diferentes ângulos de abertura

As curvas do sistema da figura 4.5 foram calculadas utilizando-se a tabela 2.4 de coeficiente de perda de carga para o *damper* tipo borboleta, considerando a relação $D/D_0=1$. Os ângulos 40°, 50° e 60° equivalem a 56%, 44% e 33% de abertura do *damper*, respectivamente. Pode-se observar que quanto maior é o estrangulamento do fluido de ar, maior será a perda de carga no *damper*.

A curva característica do ventilador foi obtida experimentalmente, acionando-se o motor pelo método partida direta e variando-se a posição do *damper*. Com a máxima abertura do *damper*, tem-se a máxima vazão e a mínima pressão e com o *damper* totalmente fechado, tem-se a máxima pressão e a mínima vazão. Foram coletados pontos intermediários entre a máxima e mínima pressão, para traçar a curva de carga versus vazão.

Para a obtenção da curva característica, utilizou-se o polinômio obtido no *Matlab*, através da função “*polyfit*” que faz a interpolação polinomial de ordem n através do método dos mínimos quadrados. A figura 4.6 apresenta os pontos medidos de vazão e pressão e a curva

característica aproximada do ventilador, obtida através do polinômio de tendência mostrado na equação (4.4).

$$\Delta_p(Q) = -1,4059 \cdot 10^{-6} \cdot Q^3 - 0,014 \cdot Q^2 + 0,4887 \cdot Q + 1428,7 \quad (4.4)$$

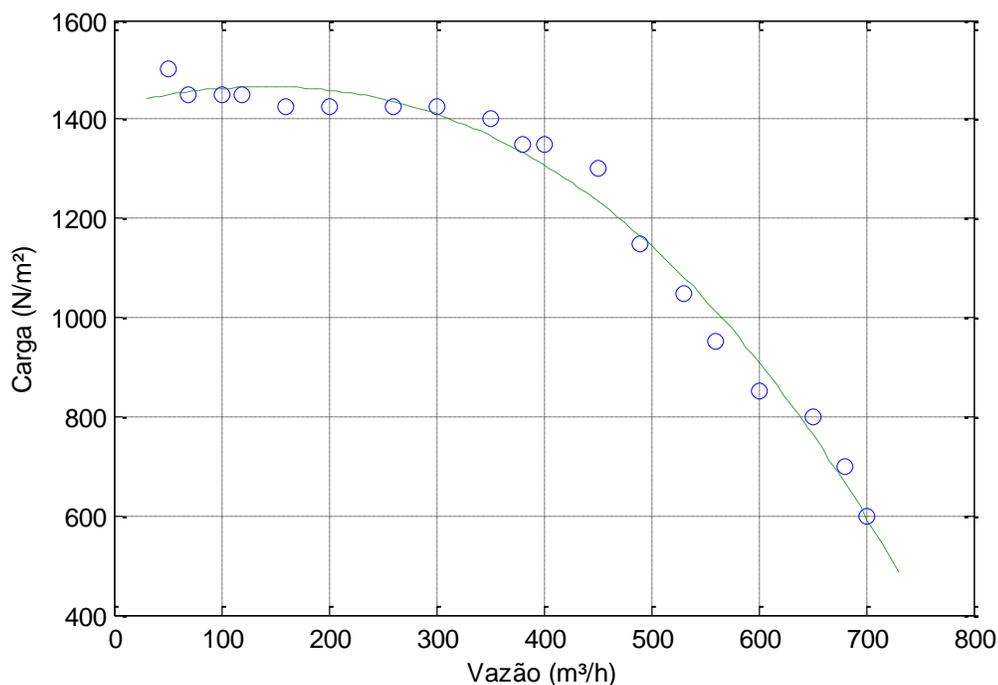


Figura 4.6 - Curva do ventilador centrífugo

O ponto nominal de operação do sistema é o ponto de intersecção entre a curva característica calculada da instalação e a curva do ventilador. A figura 4.7 ilustra os pontos representados pelas letras A, B e C que são os pontos de encontro entre a curva do ventilador e as curvas características da instalação para cada ângulo de abertura do *damper*.

Observa-se na figura 4.7 que quanto maior a obstrução causada pelo *damper*, mais elevada é a perda de carga, de forma que o ponto de funcionamento do sistema se desloca para uma posição correspondente a uma menor vazão. E para a faixa de vazão de 50 a 700 m³/h e com o *damper* 100% aberto, o sistema permanece fora das condições nominais de funcionamento.

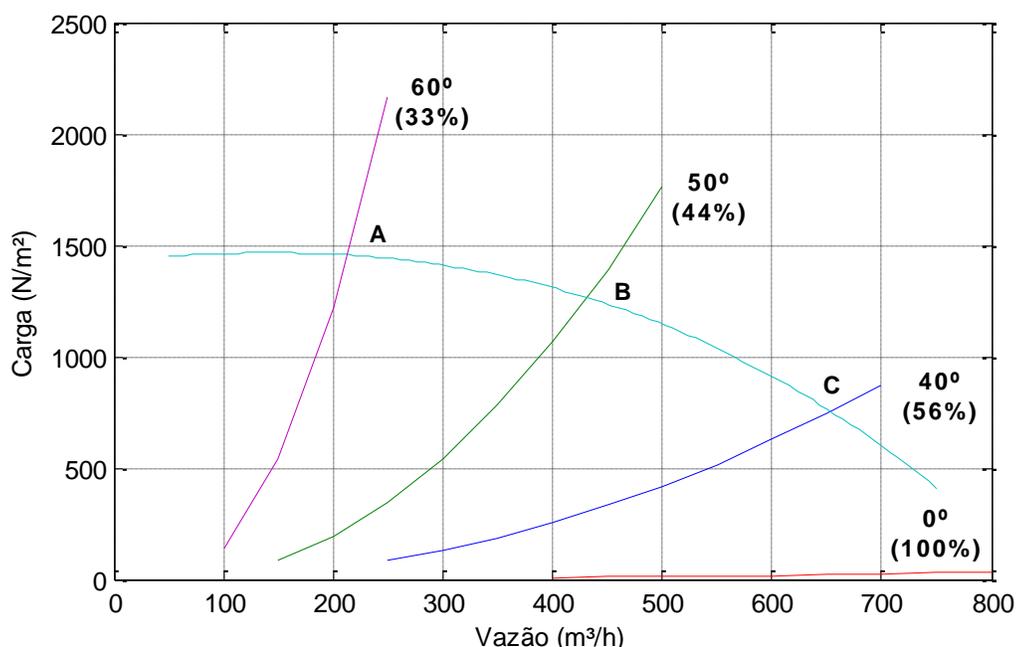


Figura 4.7 - Pontos de funcionamento do sistema de ventilação calculados

A potência no eixo do ventilador centrífugo tipo siroco sobe com o aumento da vazão. O ponto de operação do sistema sem a influência do *damper* está mais alto que a vazão de projeto, o que indica que o motor está sobrecarregado. Neste caso, não é recomendado que o ventilador opere por longos períodos com valores baixos de contrapressão, pois esta condição de funcionamento reduzirá a vida útil do motor.

4.1.3 Obtenção do Campo Básico de Funcionamento do Ventilador

Para a obtenção do campo básico de funcionamento, o ventilador foi submetido a diversas vazões. Para isso, foram utilizadas diferentes aberturas do *damper* e para cada abertura, estabelecidas várias rotações variando-se a frequência da rede através do conversor de frequência. E assim, foram medidos os valores de vazão, carga, e potência ativa do motor e foram calculadas as variáveis de potência no eixo do ventilador, potência hidráulica e rendimentos, para cada rotação.

Com os valores obtidos foi traçado o gráfico de carga versus vazão, ligando-se os pontos correspondentes a mesma abertura do *damper*. A figura 4.8 ilustra as curvas obtidas para cada abertura do *damper*.

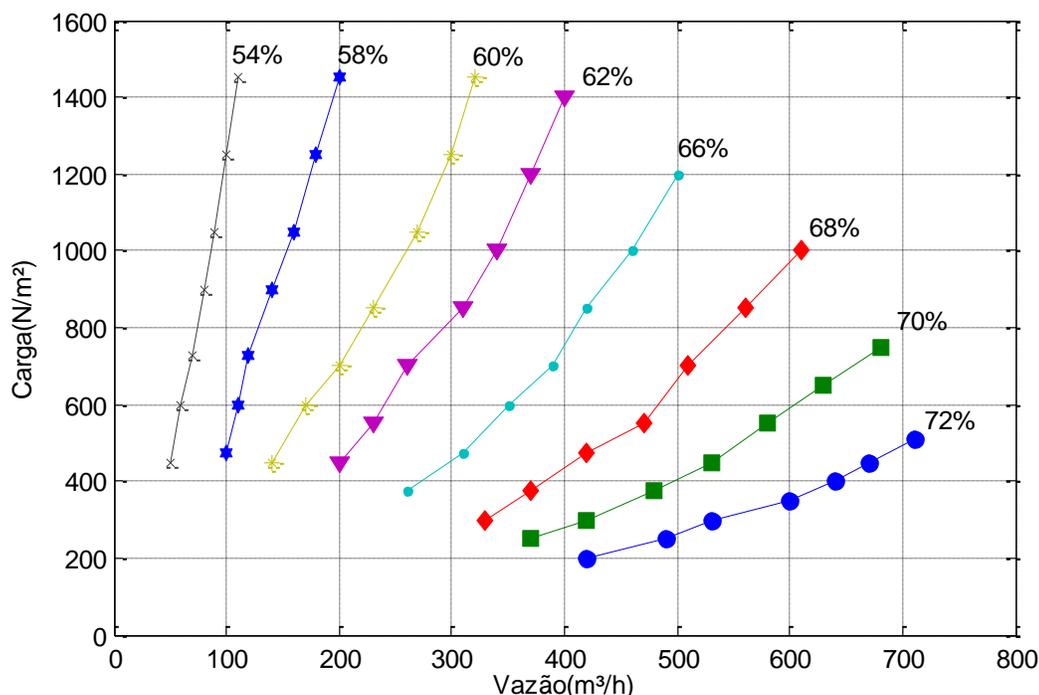


Figura 4.8 - Curvas da instalação medidas para diferentes aberturas do *damper*

As curvas na figura 4.8 são as curvas medidas da instalação para cada posição do *damper*, elemento que oferece a maior parcela de perdas de carga que o ventilador deve vencer. Fazendo-se uma análise comparativa entre as curvas calculadas da figura 4.5 e as curvas medidas da figura 4.8 observa-se que a perda de carga medida está maior que a perda de carga calculada. Esta diferença deve-se à utilização da tabela 2.4 para os valores de coeficiente de perda do *damper* nas curvas calculadas.

Ligando-se os pontos de mesma frequência nas curvas da instalação medidas, obteve-se o campo básico de funcionamento do ventilador, ilustrado pela figura 4.9. Nesse campo, foram colocados os valores dos rendimentos do ventilador.

Fazendo a ligação das curvas de mesmo rendimento se obtém novas curvas, que possuem o formato semelhante a uma elipse e o rendimento máximo ocorrerá do centro dessa elipse. Esse ponto representa o melhor ponto de operação do ventilador (Procel, 2004).

Pode-se observar na figura 4.9 que a melhor condição de operação do sistema, onde se obteve o valor de rendimento máximo 19%, ocorre no valor de vazão de 350 m³/h, com carga de 800 N/m², *damper* com 64% de abertura e frequência de 45 Hz (velocidade de 2700 rpm).

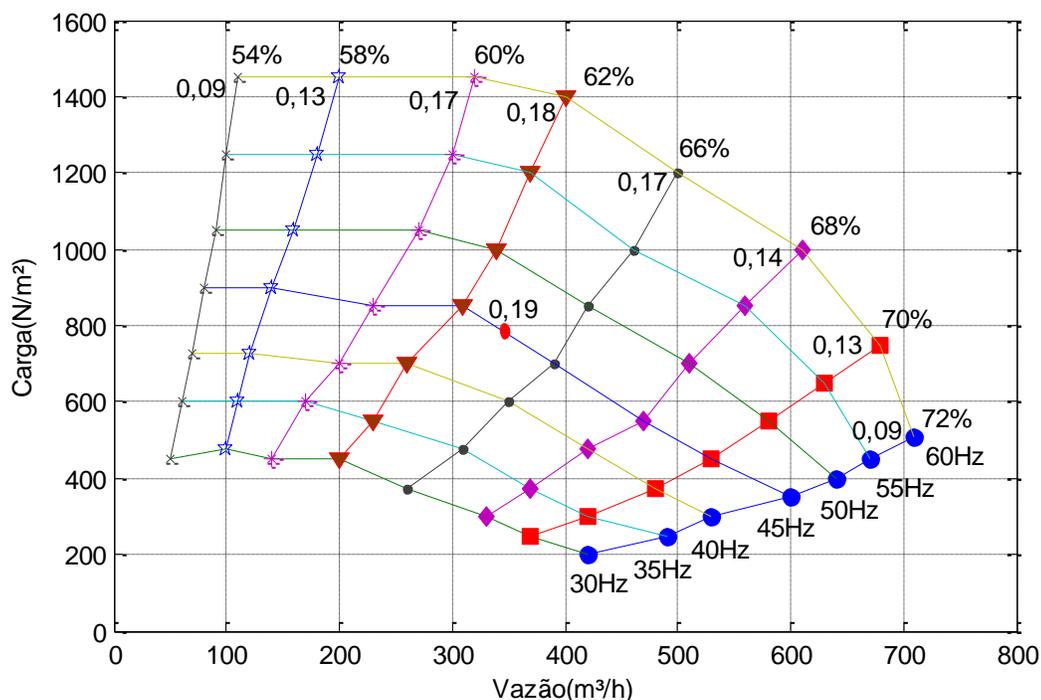


Figura 4.9 - Campo básico de funcionamento do ventilador

Observa-se que o valor de rendimento do melhor ponto de operação do sistema (19%) está próximo do rendimento máximo do ventilador obtido na figura 4.2, e na mesma faixa de vazão, valor de 350 m³/h.

4.1.4 Obtenção da Potência Ativa Requerida pelo Sistema

As curvas da potência ativa foram obtidas de forma análoga as curvas do sistema de ventilação. Foi medida experimentalmente a potência ativa requerida *versus* vazão para as instalações representados pelas letras A, B, C, D, E, F, G e H, que equivalem a 72%, 70%, 68%, 66%, 62%, 60%, 58% e 54% de abertura, respectivamente, como mostra a figura 4.10. Neste ensaio foi utilizado o motor W21 *plus* e o conversor de frequência para acionar o motor em velocidade variável entre 30 e 60 Hz.

A potência no eixo do ventilador siroco cresce com o aumento do valor de vazão. Essa característica pode ser observada na figura 4.10, onde a potência ativa requerida pelo sistema aumenta conforme o aumento da vazão.

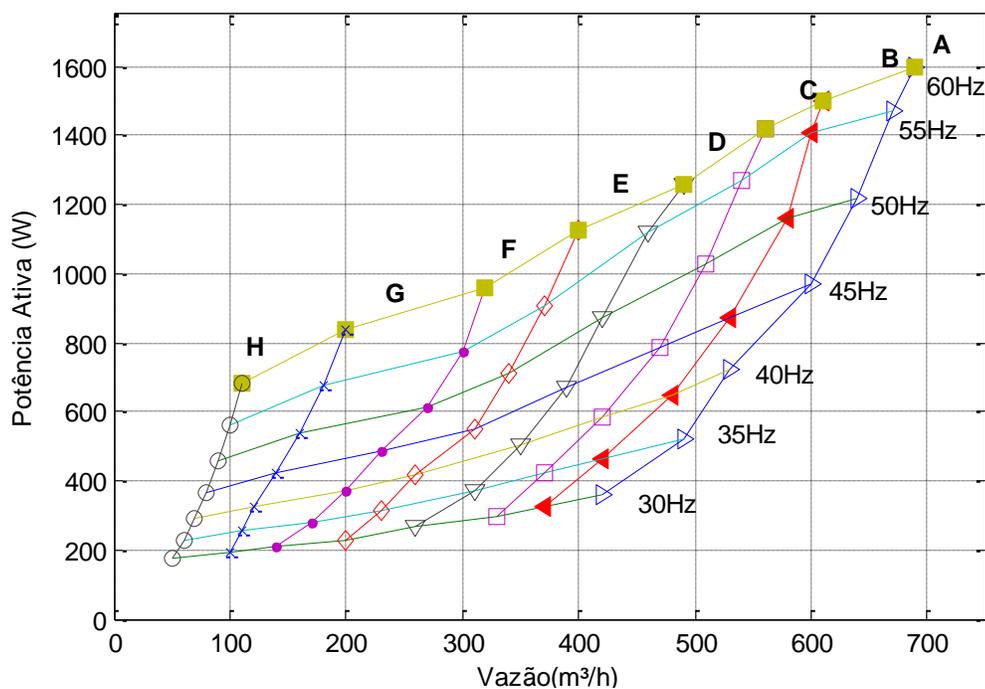


Figura 4.10 - Potência ativa requerida pelo sistema *versus* vazão

Analisando a figura 4.10, nota-se que na instalação A para o valor de vazão $700 \text{ m}^3/\text{h}$, a potência ativa requerida pelo sistema possui o valor de 1600 W . Utilizando a equação (4.1) da potência no eixo do motor em função da potencia ativa, obtêm-se o valor de $1239,8 \text{ W}$ de potência no eixo do motor. Sabendo que a potência máxima no eixo do motor considerando o fator de serviço $F_s = 1,15$ é de $1268,7 \text{ W}$, observa-se que a potência mecânica no eixo do motor para a vazão de $700 \text{ m}^3/\text{h}$ está bem próxima do valor de potência que o motor pode trabalhar em regime permanente sem afetar sua vida útil.

4.2 Comparação entre o Uso do *Damper* e Conversor de Frequência

Foram realizadas medições de potência ativa *versus* vazão com os quatros conjuntos (tipo de motor e método de controle de vazão) com a finalidade de se comparar o método mais eficiente. Utilizaram-se os motores W21 e W21 *plus* com *damper* e conversor de frequência para o controle de vazão. A figura 4.11 ilustra essa comparação.

Os testes foram feitos variando-se o a vazão de 50 a 700 m³/h, de acordo com o *set point* de vazão desejado. O *damper* regula automaticamente para sua abertura e o conversor varia automaticamente o valor da frequência para alimentar o motor.

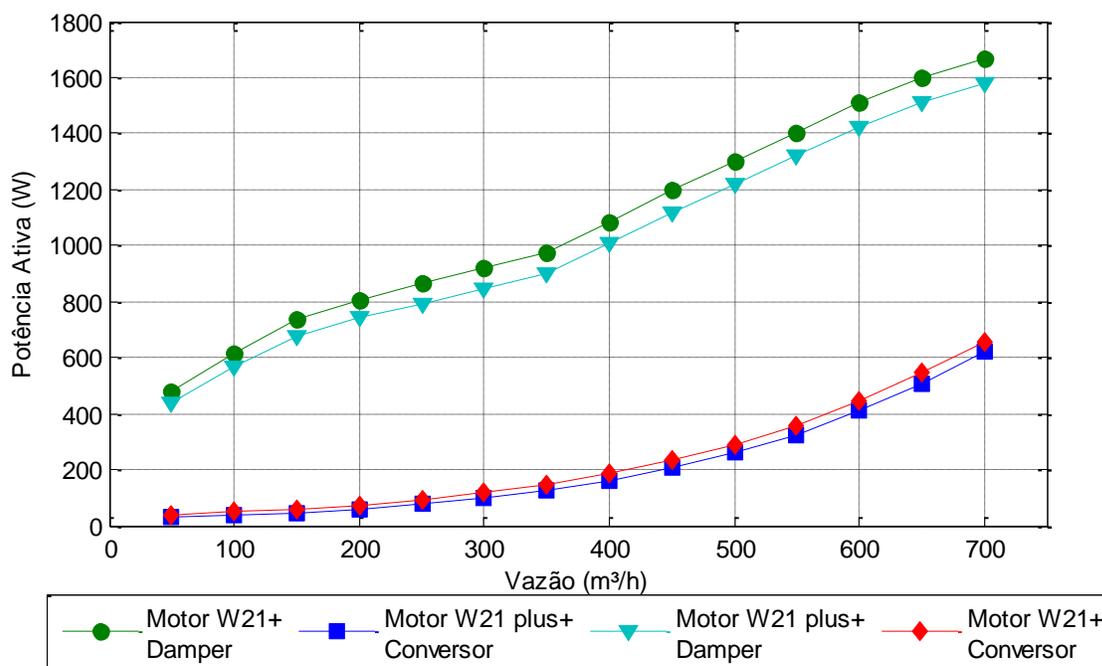


Figura 4.11 - Potência ativa versus vazão para os 4 conjuntos de operação

A diferença de potência entre as curvas que utilizam o conversor de frequência e o *damper* é bastante significativa. Observa-se que a utilização do conversor de frequência é uma alternativa eficiente na substituição do *damper* para controlar a vazão do ventilador, como mostra a figura 4.11.

As diferenças de potências observadas variam entre os valores de 415 W para a vazão de 50 m³/h, chegando a 1026 W para a vazão de 600 m³/h, esses valores de economia estão relacionados à utilização do motor W21 *plus*. A figura 4.12 ilustra essa economia percentual em função da vazão, onde o maior percentual de economia é de 93,3%, na vazão de 100 m³/h.

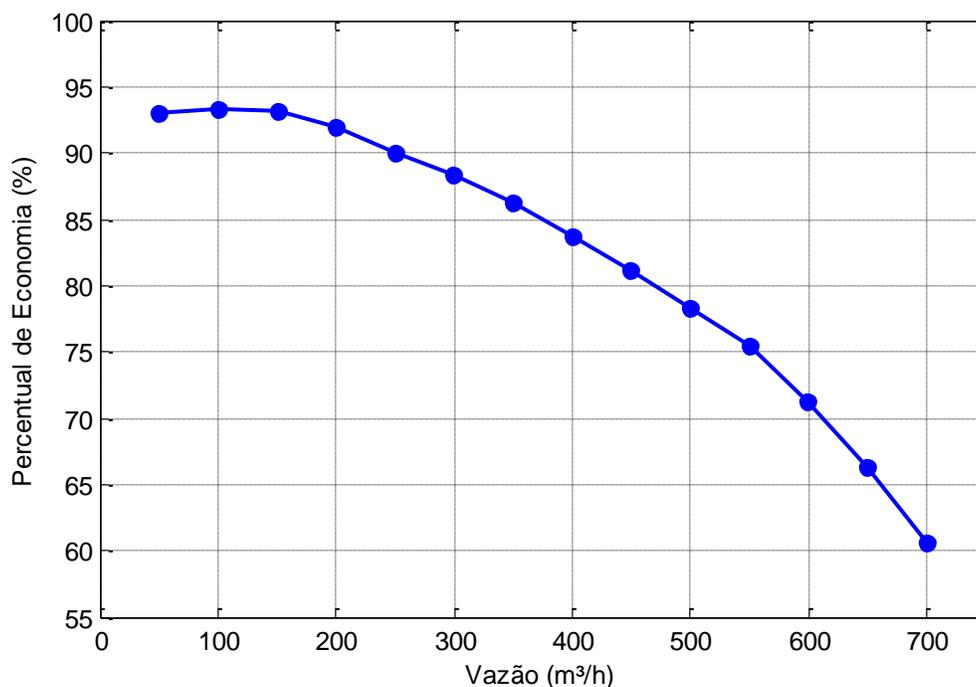


Figura 4.12 - Economia de energia proporcionada pelo conversor de frequência

A curva de economia proporcionada pelo conversor de frequência decresce com o aumento da vazão, como se pode observar na figura 4.12. Essa característica deve-se ao fato de que a perda de carga é maior para valores menores de vazão, quando se utiliza o *damper* para o controle de vazão. Quando o controle de vazão é realizado pelo conversor de frequência não ocorre esse problema, pois o motor é ajustado para trabalhar na velocidade suficiente para atender o valor de vazão desejado.

A tabela 4.2 apresenta os valores medidos de rotação, frequência, potência ativa medida e potência ativa calculada. A potência calculada da tabela 4.2 foi obtida através da equação (2.17), utilizando o valor inicial de rotação de 2116 rpm e potência ativa medida de 620 W.

Observou-se, entretanto, que na simulação realizada com o conversor de frequência, a rotação do motor não chegou ao seu valor nominal de 3400 rpm, ou seja, para o valor de vazão de 700 m³/h e sem perdas de carga no *damper*, a rotação do motor foi de 2116 rpm. Isso ocorre porque o motor está sobrecarregado. Para o motor operar em sua rotação nominal seria necessário uma faixa de vazão maior do que a faixa adotada nesse trabalho.

Tabela 4.2 - Valores medidos e calculados de vazão, rotação e potência

Vazão (m ³ /h)	Rotação (rpm)	Frequência (Hz)	Potência Ativa Medida (W)	Potência Ativa Calculada (W)
50	200	3,3	31	1
100	330	5,5	38	2
150	470	7,8	46	7
200	640	10,7	60	17
250	805	13,4	78	34
300	950	15,8	98	56
350	1095	18,3	123	86
400	1235	20,6	163	123
450	1381	23,0	210	172
500	1530	25,5	264	234
550	1672	27,9	325	306
600	1820	30,3	410	395
650	1974	32,9	508	503
700	2116	35,3	620	620

A potência ativa medida e calculada foram comparadas para verificar se os valores medidos na prática seguem as características da teoria. A figura 4.13 ilustra essa comparação.

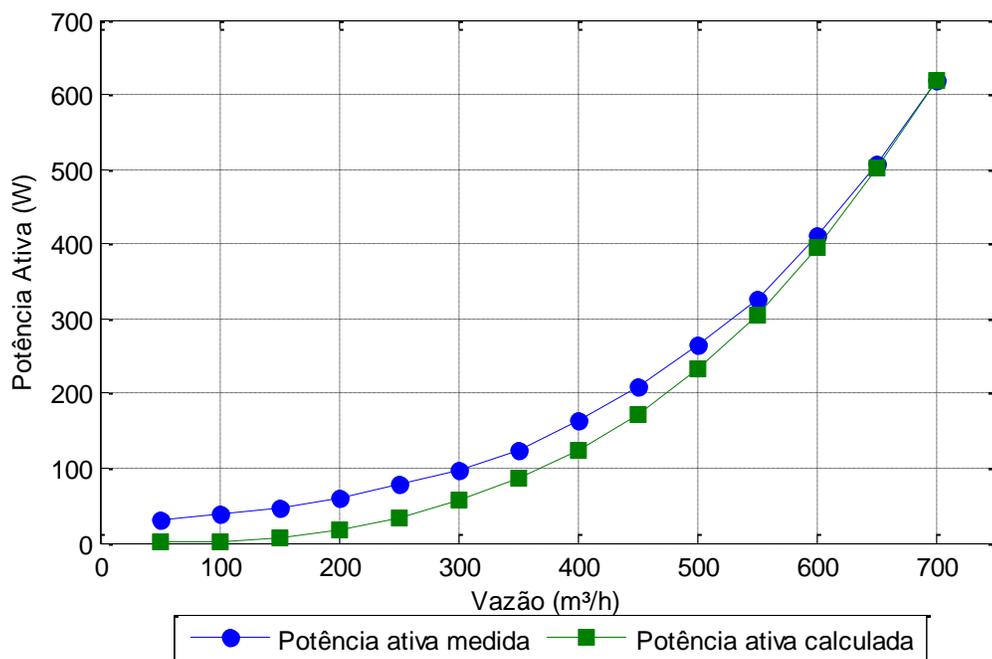


Figura 4.13 - Comparação entre a potência ativa medida e calculada

Através da análise da tabela 4.2 e da figura 4.13, observa-se que as diferenças de potência ativa são maiores para os valores mais baixos de vazão. Essa maior diferença ocorre na faixa de rotações mais baixas, onde os valores de potência ativa são pequenos e qualquer alteração externa que influencia a medição terá uma representação muito maior. É importante destacar que os equipamentos de medição possuem uma faixa de imprecisão, o que justifica essa diferença entre os valores medidos e calculados.

4.3 Comparação entre o Uso do Motor W21 e W21 plus

Além da comparação entre os métodos de controle de vazão (*damper* e conversor de frequência), foi realizada a comparação entre os tipos de motores W21 e W21 *plus*. Nesta simulação as potências ativas requeridas pelo sistema foram comparadas utilizando o método de acionamento partida direta (com o *damper* para o controle de vazão). Esses valores podem ser observados na tabela 4.3.

Como mencionado anteriormente, os motores W21 e W21 *plus* possuem rendimentos de 78,6% e 83%, respectivamente, para cem por cento de carga nominal.

Tabela 4.3 - Valores medidos de potência ativa dos motores W21e W21 plus

Vazão (m ³ /h)	Potência Ativa Motor W21 (W)	Potência Ativa Motor W21plus (W)	Economia (%)
50	488	446	8,6
100	627	572	8,7
150	740	680	7,9
202	808	741	8,3
250	867	792	8,7
299	923	846	8,3
351	976	898	8,0
399	1085	1008	7,1
448	1201	1117	7,0
500	1303	1219	6,4
550	1401	1329	5,1
601	1508	1432	5,0
651	1597	1523	4,6
700	1666	1600	4,0

Observando os resultados da tabela 4.3 verifica-se que o percentual de economia entre os motores W21 e W21 *plus* ficou na faixa entre 8,7% para a vazão de 100 m³/h e 4,0% para a vazão de 700 m³/h. Essa diferença de economia deve-se à diferença de variação entre as curvas de rendimento dos motores W21 e W21 *plus* para cada valor de carregamento.

A tabela 4.4 ilustra os valores de rendimento e carregamento, retirados das curvas de rendimento das figuras 3.6 e 3.7.

Tabela 4.4 - Valores de rendimento dos Motors W21 e W21 *plus*

Carregamento (%)	Rendimento		Diferença (%)
	Motor W21	Motor W21 <i>plus</i>	
10	43	54	11
30	68	76	8
50	76	82	6
75	78,2	82,7	4,5
100	78,6	83	4,4
110	78	82	4

A figura 4.14 mostra a variação de potência ativa entre os motores nos ensaios realizados para diferentes vazões.

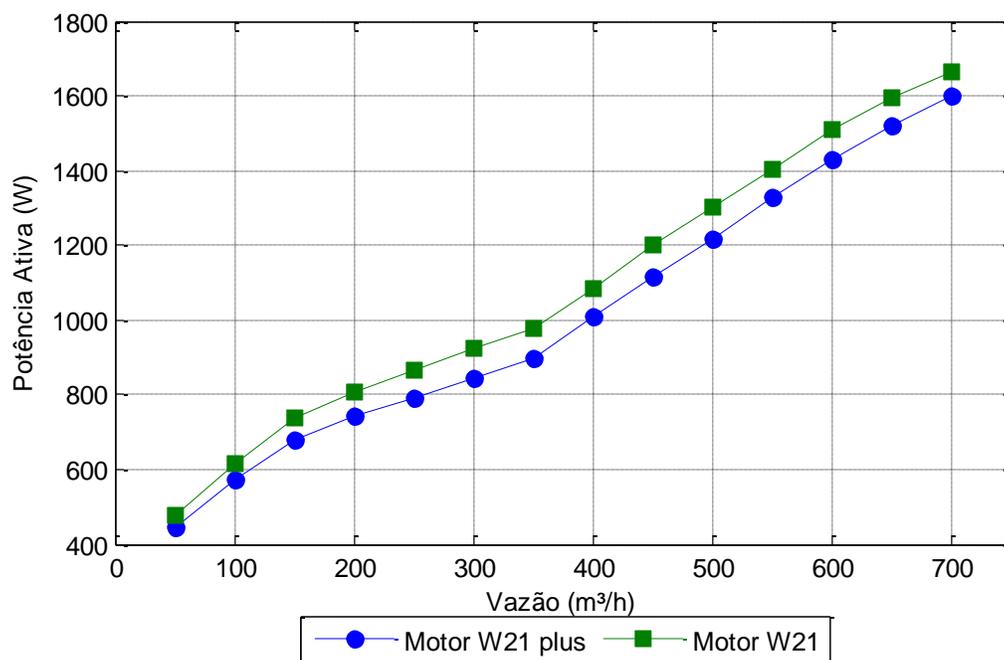


Figura 4.14 - Comparação entre a utilização do motor W21 e W21 *plus*

A economia de potência ativa proporcionada pela utilização do motor W21 *plus* está condizente com as curvas de rendimento dos motores. Observa-se que a economia vai diminuindo de acordo com o carregamento, ou seja, com o aumento da vazão.

É importante destacar que o rendimento do motor varia de acordo com a potência do motor e com o fabricante, portanto, não varia de forma constante.

Os percentuais de economia observados na comparação entre os motores poderão ser utilizados em estudos de viabilidade econômica para se verificar o tempo de retorno do investimento na substituição de um motor por outro com melhor rendimento.

4.4 Comportamento do Fator de Potência

O comportamento do fator de potência foi avaliado para os quatro conjuntos do sistema de ventilação, mostrado na figura 4.15. Os motores W21 e W21 *plus* possuem fator de potência nominal de 0,83 e 0,86, respectivamente.

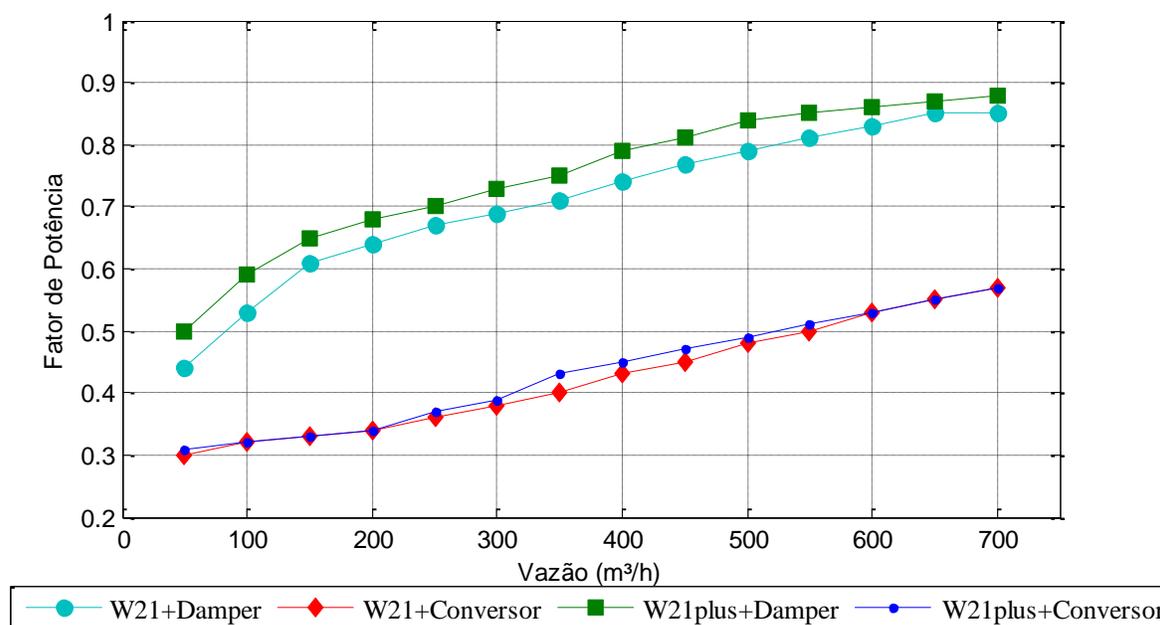


Figura 4.15 - Comportamento do fator de potência para cada conjunto

Analisando aos conjuntos que utilizam o *damper* para o controle de vazão e acionamento feito por partida direta, observa-se que os valores do fator de potência aumentam conforme o

aumento da vazão. Para valores menores de vazão o fator de potência é baixo e para a faixa de vazão entre 600 m³/h e 700 m³/h o fator de potência aproxima-se dos valores de placa.

Esse comportamento do fator de potência mostra a importância do correto dimensionamento do motor. Quanto mais o sistema trabalhar a vazio, maior será o consumo de energia reativa.

Os conjuntos que utilizaram o conversor de frequência possuíram valores de fator de potência mais baixos, entre 0,30 e 0,57, ao longo da faixa de vazão de trabalho. A alta frequência de chaveamento do conversor contribui para a diminuição do fator de potência do sistema. Entretanto, a qualidade de energia não é enfoque deste trabalho e para verificar a relação entre as taxas de distorção harmônicas e o fator de potência sugere-se que para trabalhos futuros sejam feitas análises minuciosas dessas duas grandezas utilizando o sistema de ventilação.

Em estudos de viabilidade econômica, o baixo fator de potência ocasionado pelo conversor de frequência deve ser considerado, pois para instalações que utilizam esse tipo de equipamento serão necessários custos adicionais para fazer essa correção e minimizar os prejuízos causados pelo baixo fator de potência.

Em vista dos quatro conjuntos analisados, o motor W21 *plus* com acionamento por partida direta é o conjunto que consome menor quantidade de energia reativa.

4.5 Simulação de um Sistema de Ventilação com Curva de Carga Variável

A bancada do ventilador do LAMOTRIZ permite a realização de ensaios que simulam cargas típicas no ambiente industrial. Através da função de variação automática de vazão, desenvolvida por Moreira (2008), foi possível simular uma curva com valores variáveis de vazão, com a finalidade de se avaliar o desempenho energético entre os tipos de controle de vazão e os tipos de motores utilizados neste trabalho.

Na figura 4.16 mostra-se a janela de *pop up* da função de variação de vazão, onde foram inseridos os valores de vazão e o tempo desejado para cada valor de forma descontínua, simulando assim uma carga típica industrial.



Figura 4.16 - Janela pop up da função de variação da vazão

A curva de carga variável, mostrada na figura 4.17, tem a duração de 8 horas com 20 variações de vazão, operando na faixa de 100 e 700 m³/h. O sistema de aquisição de dados armazena as medições a cada segundo. Assim, os valores medidos foram integrados no intervalo de um minuto.

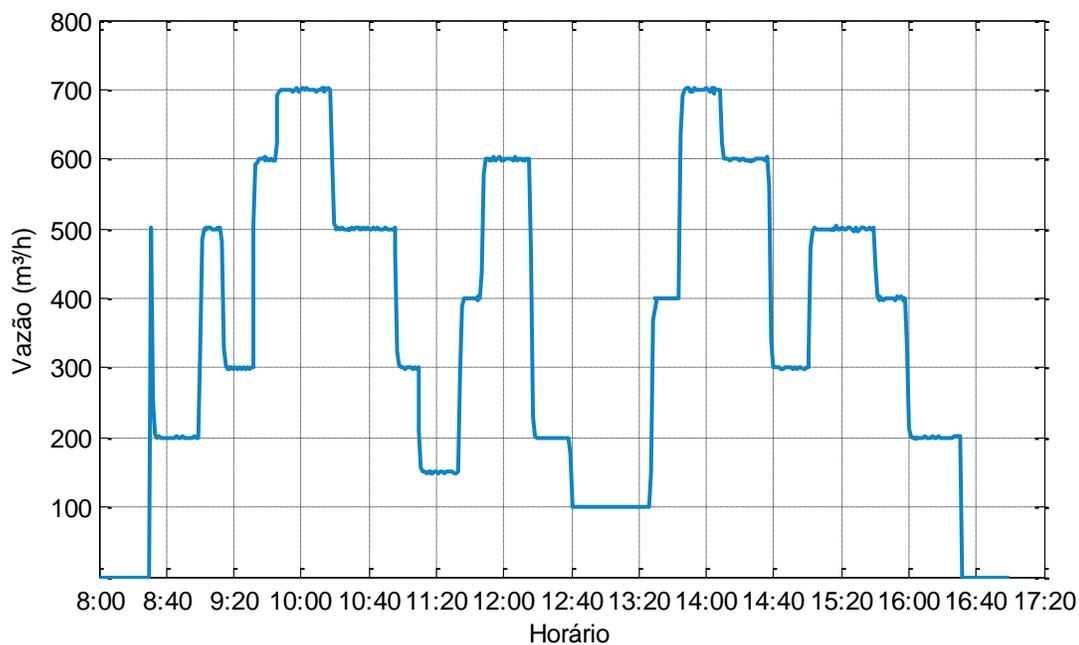


Figura 4.17 - Curva simulada da variação de carga de um sistema de ventilação

A curva de carga mostrada na figura 4.17 foi utilizada nas simulações para os conjuntos: “Motor W21 *plus* + Conversor de frequência”, “Motor W21 *plus* + *Damper*” e “Motor W21 + *Damper*”, com o propósito de se analisar a eficiência energética de cada um desses conjuntos.

4.5.1 Comparação entre o Motor W21 e W21 *plus*

Para avaliar a economia proporcionada pela substituição de um motor por outro com maior rendimento, de forma análoga à análise anterior, as curvas de potência ativa versus o tempo dos conjuntos: “Motor W21 *plus*+*Damper*” e “Motor W21+*Damper*”, foram confrontadas no mesmo gráfico, mostrado na figura 4.18.

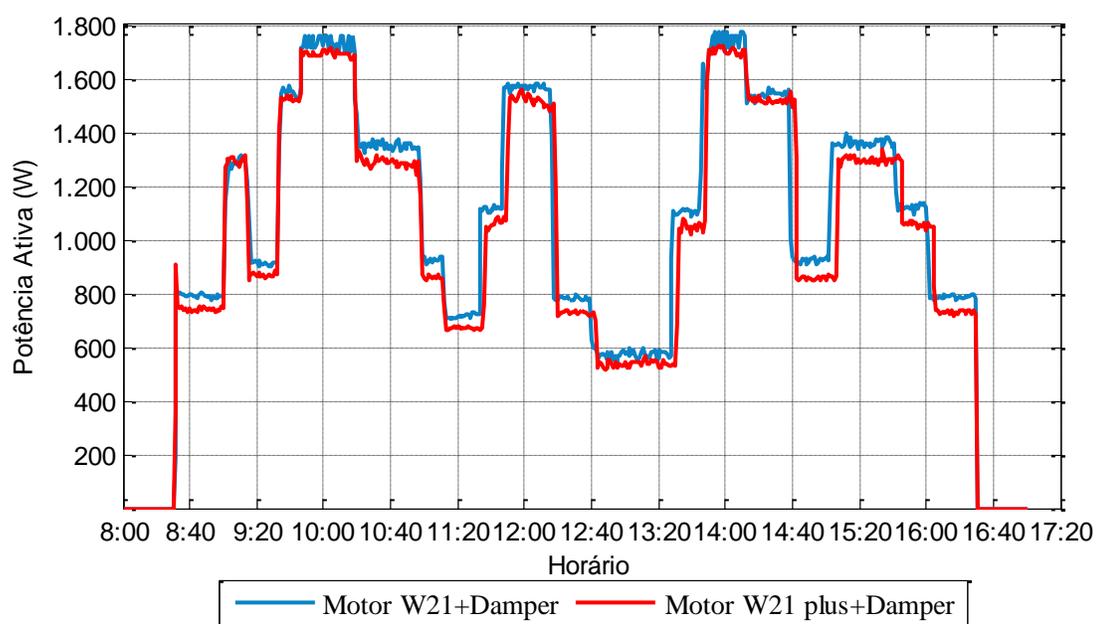


Figura 4.18 - Curvas de potência para os conjuntos: “Motor W21+*Damper*” e “MotorW21 *plus*+*Damper*”

Observa-se que a curva de potência ativa do motor W21 *plus* apresenta valores menores que a curva do motor W21. E para visualizar a economia de energia proporcionada pelo motor W21 *plus*, calculou-se o consumo em Wh durante o período de operação dos conjuntos. A figura 4.19 ilustra as curvas de consumo dos motores W21 e W21 *plus*.

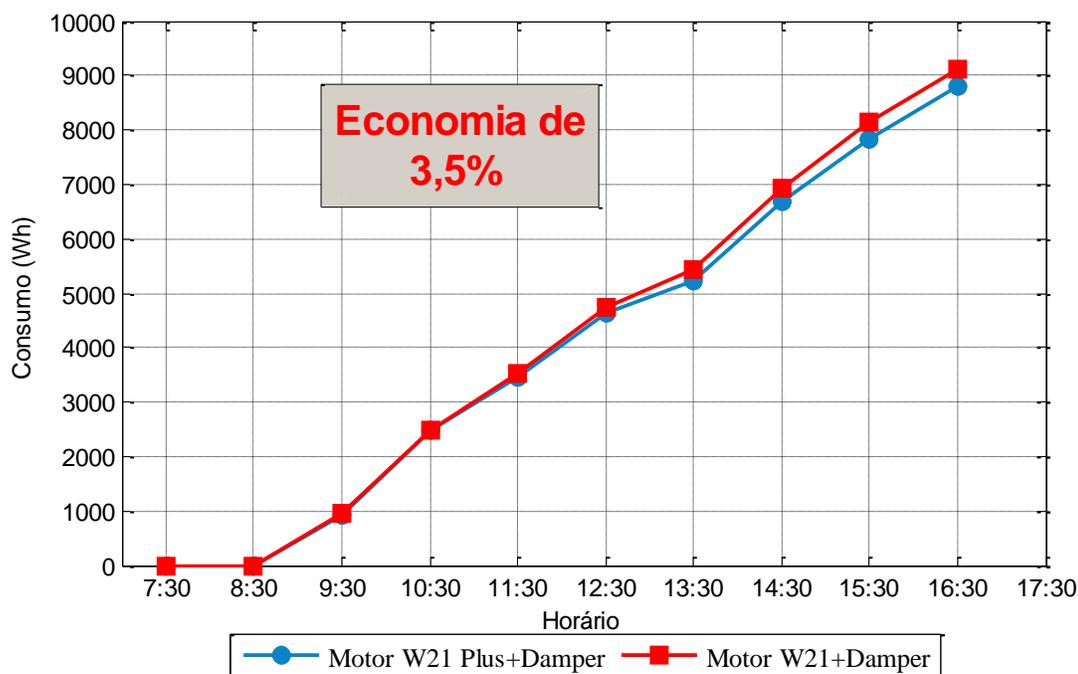


Figura 4.19- Comparação entre o consumo dos motores W21 e W21 *plus*

O consumo do conjunto que utilizou o motor W21 foi de 9118 Wh, enquanto que o consumo do conjunto que utilizou o motor W21 *plus* foi de 8803 Wh. Essa diferença de consumo equivale a uma economia de 3,5% na utilização do motor W21 *plus*.

4.5.2 Comparação entre o Conjunto Mais Eficiente e Menos Eficiente

As curvas obtidas de potência ativa *versus* o tempo para os conjuntos “Motor W21 *plus* + Conversor” e “Motor W21 + *Damper*” foram confrontadas no mesmo gráfico, como mostra a figura 4.20.

O conjunto que utiliza o conversor de frequência para realizar o controle de vazão de ar apresenta valores muito menores se comparado com o conjunto que utiliza o *damper*. O método de controle de vazão via conversor de frequência aliado à utilização de um motor com melhor rendimento é uma alternativa eficiente na substituição do método de controle via *damper* com a utilização de um motor com menor rendimento.

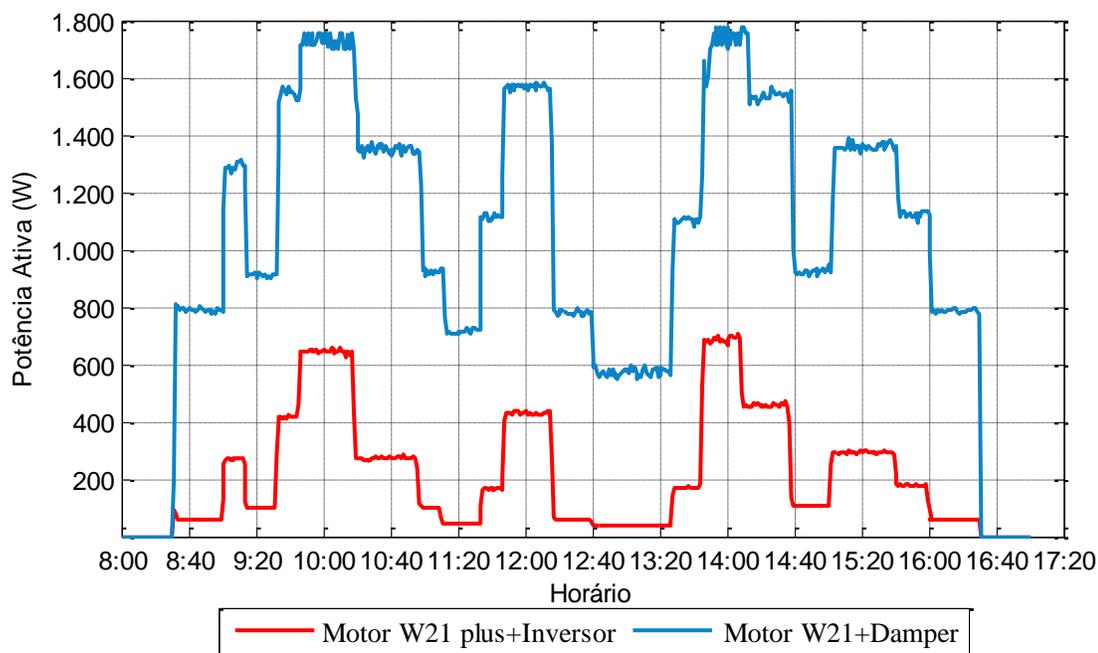


Figura 4.20 - Curvas de potência para os dois conjuntos

Para se obter a economia proporcionada pelo conjunto mais eficiente na comparação entre os dois conjuntos citados anteriormente, calculou-se o consumo de energia em Wh, durante as oito horas de operação. Essa diferença de potência consumida entre os conjuntos analisados pode ser observada em função do consumo, como mostra a figura 4.21.

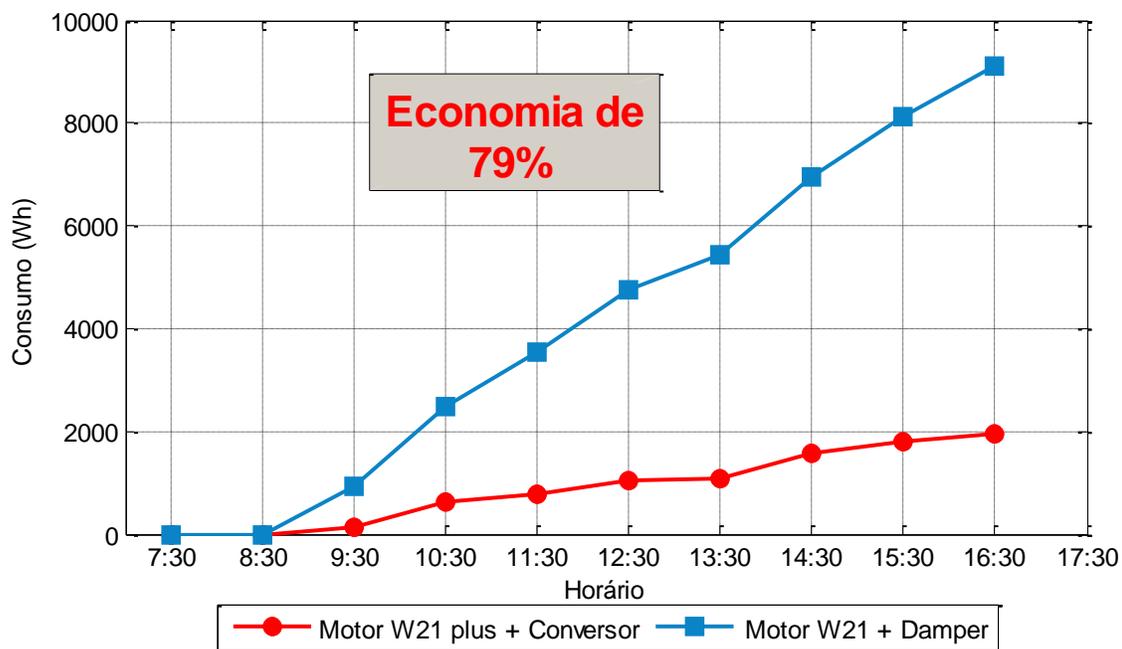


Figura 4.21 - Comparação entre o consumo dos conjuntos mais e menos eficiente

O consumo total de energia do conjunto “Motor W21+*Damper*” foi de 9118 Wh, enquanto que o consumo total do conjunto “Motor W21 *plus*+Conversor” foi de 1954 Wh. A diferença de 7164 Wh entre os consumos dos dois conjuntos representa uma economia de 79%. Ressalta-se que para obter tal percentual de economia deve-se substituir conjuntamente o motor menos eficiente por outro de melhor rendimento e o *damper* pelo conversor de frequência no controle de vazão.

É importante destacar que a economia proporcionada pelo conversor de frequência depende da característica da curva de vazão de ar. Para valores de vazão mais próximos do valor nominal do ventilador, a economia proporcionada pela substituição do *damper* pelo conversor de frequência será menor.

A média de vazão para a curva simulada de variação de carga foi de aproximadamente 400 m³/h. Comparando a economia proporcionada para esta simulação de carga com a economia proporcionada pelo conversor de frequência, mostrada na figura 4.12, observa-se que para a faixa de vazão de 400 m³/h a economia é de 84%, valor próximo da economia de energia da simulação (79%).

4.5.3 Análise Econômica de Investimento

Com os valores de economia obtidos na seção 4.5.2, foi realizada uma análise econômica de investimento simples, baseada no método de cálculo do Valor Presente Líquido (VPL).

Para a análise econômica foi considerado um caso hipotético de um sistema industrial com três turnos de funcionamento diário, sendo que a característica de carga de um turno (8 horas) é representada pelo gráfico da figura 4.23. Considerou-se ainda o funcionamento desse sistema durante 30 dias por mês e durante 12 meses por ano.

Para a determinação do custo médio da energia, definiu-se como estrutura tarifária a modalidade Horosazonal Verde, por ser um enquadramento típico de consumidores industriais. Realizou-se um cálculo da média ponderada entre os valores de custo do kWh nos diferentes horários e nos diferentes períodos do ano e obteve-se um valor médio de R\$ 0,3644 / kWh. As tarifas utilizadas como referência constam da Resolução n. 1128 da ANEEL, que define os custos de energia para o Estado de Mato Grosso do Sul em 2011. Foram inclusos os

impostos incidentes sobre a energia elétrica, ICMS, PIS e COFINS, totalizando o percentual de 22%.

Baseado nessas considerações a economia mensal obtida com a substituição do conjunto menos eficiente pelo conjunto mais eficiente foi de R\$ 234,95 (Duzentos e Trinta e Quatro Reais e Noventa e Cinco Centavos).

A economia supracitada só é obtida através da troca dos conjuntos (motor + método de controle de vazão), o que representa um custo inicial de investimento para o consumidor. Estimou-se um valor de R\$ 3.000,00 (Três Mil Reais) envolvendo o investimento na aquisição de novo motor de 1,5 cv, do conversor de frequência, acessórios e serviços de instalação e *start-up*.

De acordo com os valores de economia mensal, custo de investimento e considerando uma taxa de juros anual de 12%, a tabela 4.5 apresenta os valores do fluxo de caixa atualizado e acumulado de acordo com o método do VPL.

Tabela 4.5 - Método do Valor Presente Líquido

Ano	Fluxo de caixa atualizado (R\$)	Fluxo de caixa acumulado (R\$)
1	2517,32	2517,32
2	2247,61	4764,93
3	2006,79	6771,72
4	1791,78	8563,50
5	1599,80	10163,31

Observando os valores de fluxo de caixa acumulado apresentados, verifica-se que o investimento de R\$ 3.000,00 terá seu tempo de retorno após o primeiro ano do investimento.

A figura 4.22 apresenta graficamente o tempo de retorno do investimento e a economia obtida ao final de 5 anos.

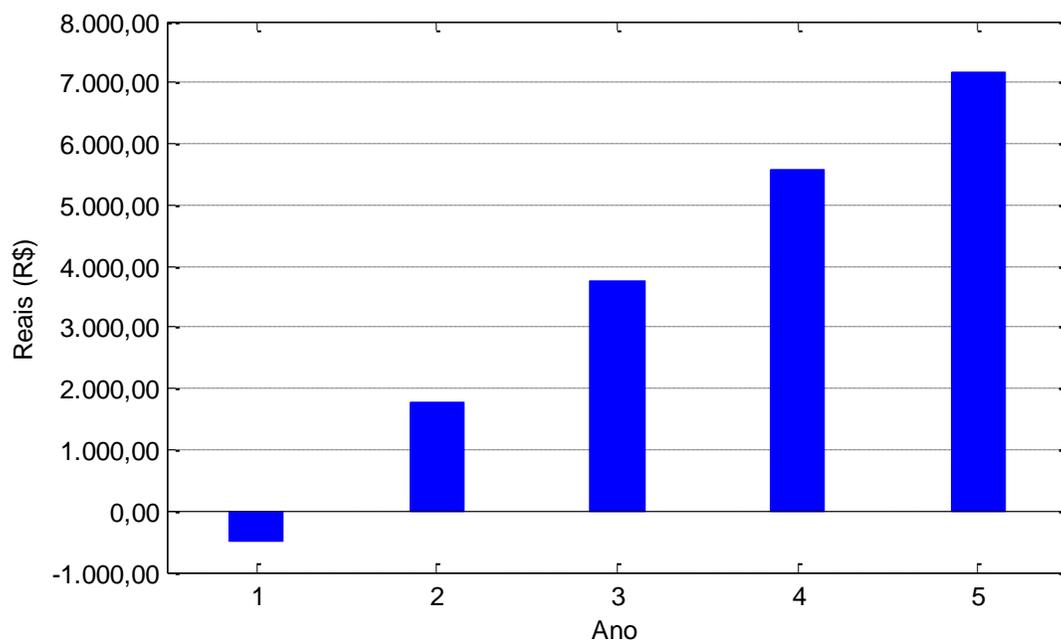


Figura 4.22 - Representação do Tempo de Retorno do Investimento

Na figura 4.22 pode-se verificar que ao final do segundo ano, o investimento já foi compensado resultando ainda num lucro de aproximadamente R\$ 1.800,00 (Um Mil e Oitocentos Reais). Ao final de 5 anos, o lucro acumulado ultrapassa o valor de R\$ 7.000,00 (Sete Mil Reais).

Tanto o tempo de retorno quanto o lucro acumulado no período de 5 anos analisado tornam o investimento atrativo. Salienta-se que a análise e os resultados obtidos são restritos à apenas um sistema de ventilação de 1,5 cv. Tendo em vista que em plantas industriais de médio e grande porte a presença destes sistemas pode se dar em maior quantidade, destaca-se como uma relevante oportunidade de eficientização o investimento em motores de melhor rendimento e utilização de conversores de frequência em tais aplicações.

4.6 Considerações Finais

Através da análise das curvas características do ventilador constatou-se que a potência no eixo do ventilador centrífugo do tipo siroco sobe constantemente com o aumento da vazão. Ventiladores desse tipo requerem cuidados no dimensionamento do motor para o acionamento,

pois essa característica pode levar a queima do motor se a vazão estiver muito superior que a de projeto.

A partir dos resultados experimentais foi verificado que o motor está sobrecarregado, não sendo possível avaliar o comportamento do ventilador para toda sua curva de desempenho. Para a obtenção de melhores valores de rendimento, recomenda-se o dimensionamento adequado do conjunto motor-ventilador.

O dimensionamento correto pode ser realizado de duas maneiras: aumentando a potência do motor para 2 cv ou mudando o modelo do ventilador. Sabe-se que o ventilador da bancada de simulação é do fabricante Deltra, modelo EC-20 compatível com o motor de 2 cv. Mas existe modelo do mesmo fabricante o EC-18, por exemplo, que possui vazão máxima de 1548 m³/h e é compatível com o motor de 1,5 cv.

Com a obtenção do campo básico de funcionamento do motor, obteve-se a melhor condição de operação do sistema. Mas nem sempre há necessidade do ventilador trabalhar na melhor condição de operação, pois o sistema pode requerer outras condições de pressão e vazão. Como exemplo disso, cita-se os sistemas de ar condicionado que são projetados para atender a demanda dos dias mais quentes, e com a utilização de conversores, consegue-se fazer trabalhar abaixo de sua capacidade máxima, e assim, economizar energia.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

Com relação às curvas características do sistema, calculadas e obtidas experimentalmente, verificou-se que o rendimento máximo alcançado do ventilador foi de 18%, para a faixa de vazão de 400 m³/h. Observa-se que o valor de rendimento obtido está baixo se comparado ao rendimento máximo do ventilador centrífugo tipo siroco que é de 65%.

Na análise do sistema, sem a influência do *damper*, observou-se que o ponto de operação do sistema está mais alto que a vazão de projeto, o que indica que o motor está sobrecarregado. Neste caso, não é recomendado que o ventilador opere por longos períodos com valores acima de 700 m³/h, pois esta condição de funcionamento reduzirá a vida útil do motor.

Com a obtenção do campo básico de funcionamento do motor, obteve-se a melhor condição de operação do sistema, onde se obteve o maior valor de rendimento que foi 19%, valor bem próximo do rendimento máximo do ventilador, ocorre no valor de vazão de 350 m³/h, com carga de 800 N/m², *damper* com 64% de abertura e frequência de 45 Hz.

Avaliou-se a economia proporcionada pelo conversor de frequência e a economia proporcionada pela utilização do motor de melhor rendimento. Os testes foram feitos variando-se o a vazão de 50 a 700 m³/h. As diferenças de potências entre o conjunto que utilizava o conversor de frequência e o *damper* variaram entre os valores de 415 W para a vazão de 50 m³/h, chegando a 1022 W para a vazão de 600 m³/h, valores relacionados com a utilização do motor mais eficiente.

O percentual de economia entre os motores W21 e W21 *plus* ficou na faixa entre 8,7% para a vazão de 100 m³/h e 4,0% para a vazão de 700 m³/h. Essa diferença de economia deve-se à diferença de variação entre as curvas de rendimento dos motores W21 e W21 *plus versus* o carregamento do motor.

A utilização do conversor de frequência reduziu o valor do fator de potência, que ficou entre 0,30 e 0,57 ao longo da faixa de vazão de trabalho, enquanto que com o acionamento por partida direta manteve o valor baixo para vazões menores e para a faixa de vazão entre 600 m³/h e 700 m³/h o fator de potência aproximou-se dos valores de placa dos motores. Concluiu-se então que o motor W21 *plus* com acionamento por partida direta é o conjunto que consome menor quantidade de energia reativa.

Nas simulações da curva de carga variável, típica do ambiente industrial, verificou-se que a utilização do motor W21 *plus* proporcionou uma economia de 3,5% em substituição ao motor W21. E com a substituição conjunta do motor menos eficiente por outro de melhor rendimento e do *dampner* pelo conversor de frequência no controle de vazão obteve-se a diferença de consumo de 7164 Wh, o que representa uma economia de 79%.

Com a análise econômica de investimento verificou-se que a utilização do conversor de frequência para controle de vazão aliado ao uso de um motor mais eficiente é atrativamente econômico, com tempo de retorno em pouco mais de um ano.

Portanto, com as simulações realizadas e com a análise econômica de investimento, ficou claro que a substituição do *dampner* pelo conversor de frequência para o controle de vazão é vantajosa. Entretanto, deve-se tomar cuidado ao adotar essa medida, pois o conversor de frequência diminui o fator de potência e os custos gerados pelo excesso de energia reativa podem ser significativos.

A utilização do motor com melhor rendimento, embora tenha apresentado uma economia pequena se comparada a outros estudos, mostrou-se vantajosa nas análises realizadas, pois se deve considerar que a vida útil do motor é superior a 20 anos.

Evidencia-se que as metodologias adotadas para a elaboração do campo básico de funcionamento do ventilador poderão contribuir para novos estudos de sistemas de ventilação encontrados na prática, a fim de se determinar o desempenho do ventilador ao longo de sua faixa de operação, uma vez que este campo de funcionamento não é fornecido pelo fabricante do ventilador.

5.2 Recomendações para Trabalhos Futuros

Como sugestão para a realização de futuros trabalhos pode-se sugerir:

- Realizar um modelo matemático e implementar no Simulink para verificar a eficiência energética para maiores potências.
- Analisar, sob o enfoque da qualidade de energia, as conseqüências da utilização do inversor de frequência na instalação elétrica devida a taxa de distorção harmônica.
- Verificar o impacto da eficiência energética, utilizando a metodologia deste trabalho em sistemas de ventilação industrial do Estado de Mato Grosso do Sul.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. T.; FERREIRA, F. J. T. E.; BOTH, D., Technical and Economical Considerations in the Application of Variable-Speed Drives with Electric Motor Systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 41, p. 188-199, 2005.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **Fundamentals. ASHRAE Handbook**. Atlanta. ASHRAE, 1997.

ANDRADE, C. T. C. **Análise de Métodos para Determinação da Eficiência de Motores Trifásicos de Indução**. 2009. 128p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Ceará – UFC. Fortaleza, 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução nº 456: Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica**. Brasília: ANEEL, 2000.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Homologatória nº 1.128: Homologa as tarifas de fornecimento de energia elétrica e as tarifas de uso dos sistemas de distribuição**. ANEEL, 2011.

ARAÚJO, J. A. B. **Aplicação de Inversor de Frequência Para Economia de Energia Elétrica em Sistemas de Irrigação por Aspersão**. 2003. 142 p. Tese (Doutorado) Universidade Estadual Paulista - UNESP. Botucatu, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5383 - Máquinas Elétricas Girantes- Máquina de Indução-Determinação de Características- Métodos de Ensaio**. Novembro/1982.

BANDARA, K.S.; KARUNARATHNE, W.G.L.; ARULAMPALAM, A.; ABEYRATNE, S.G.; Energy Saving by Controlling the Inlet Air Flow of a Oil Fired Boiler Using a VSD Driven Blower Fan – Case Study. **IEEE Region 10 Conference**, 2008.

BEN, **Balanco Energético Nacional**. Ministério de Minas e Energia, ano base 2010.

BROWN, G.; Cutting Pumping Costs Through Motor Efficiency. **World Pumps Magazine**. p. 22-26. Disponível em <<http://www.worldpumps.com>>, Junho de 2001.

CORREIA, P. **Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil: Pesquisa na Classe Industrial AT**. Apresentação realizada no Workshop “Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil”. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br>> Acesso em 20 de abril de 2010.

FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY JR. C.; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas**. 6.ed. Porto Alegre: Bookman, 648 p. 2006.

FOGAL, M. L. F. **Estudo Teórico e Experimental das Curvas características de um Ventilador Axial Aplicado em Pulverização Agrícola**. 2009. 103 p. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia – UNESP. Bauru, 2009.

FOX, R. W. ; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos Fluidos**. 6 ed. 798 p. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

FRANÇA, F. de A. **Ventiladores: Conceitos Gerais, Classificação, Curvas Características Típicas e Leis dos Ventiladores**. FEM / UNICAMP, 1999. Disponível em: <www.fem.unicamp.br/~em712/sisflu09>. Apostila do curso EM 712 - Sistemas Fluidomecânicos, da FEMUnicamp. Acesso em: 13 de dezembro de 2009.

GARCIA, A. G. P. **Impacto da Lei de Eficiência Energética para Motores Elétricos no Potencial de Conservação de Energia na Indústria**. 2003. 127 p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro, 2003.

GONELLA, G. **Um Estudo Comparativo dos Harmônicos de Torque Gerados pelos Inversores de Tensão de Frequência Variável**. 2007. 54p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal Fluminense. Niterói - RJ, 2007.

GUALBERTO, L. **Motores Elétricos de Alto Rendimento**. Programa Municipal de Gestão Energética. GEPEA/EPUSP Grupo de Energia do Departamento de Energia e Automação Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Disponível em: <www.prefeitura.sp.gov.br/arquivos/secretarias/gestaopublica/pmge> Acesso em: 02. mai. 2010.

HOPPER, W.S., ID Fan Drive Efficiency Upgrade: MV AFD to Replace Mechanical Drive Steam Turbine. Pulp and Paper Industry Technical Conference (PPIC). **IEEE Conference Record of 2010 Annual**, 2010.

KARMOUCHE, A. R. **Análise da Eficiência Energética em Compressores a Pistão em Sistemas de Ar Comprimido**. 2009. 92p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS, Campo Grande, 2009.

LUCATO, M. **Uma Proposta de Modelagem para Secadores de Macarrão de Corte Longo**. 2009. 114 p. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia – CEUN-EEM, São Caetano do Sul, SP, 2009.

MACINTYRE, A. J. **Ventilação Industrial e Controle de Poluição**. 2 ed. 277 p. Rio de Janeiro: LTC., 1990.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações Elétricas Industriais**. 7 ed. 914 p. Rio de Janeiro: LTC., 2007.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Lei de Eficiência Energética**. Lei 10.295/2001, Decretos 4059/2001 e 4508/2002, Portaria Interministerial MME-MCT-MDIC 553/2005. Disponível em <www.mme.gov.br>. Acesso em 14 de março de 2010.

MOREIRA, S. G. **Estratégias de Simulação para Análise da Eficiência Energética em Sistema de Bombeamento Monitorado Via Supervisório**. 2008. 92p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS. Campo Grande, 2008.

OLIVEIRA, Fabielli Guerra de; ALBERTIN, Marcos Ronaldo. **Estudo de caso – Eficiência Energética no Erédio da ESTUFOR**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 27. (ENEGEP 2007), 2007, Foz do Iguaçu. . *Anais...* Foz do Iguaçu: [s.n.], 2007. Disponível em: <www.abepro.org.br>. Acesso em: 15 maio 2009.

PASSOS, M.; SIMONETTI, D. S. L. **Aspectos de Qualidade de Energia Elétrica e Eficiência Energética em Motores de Indução Trifásicos**. In: VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE 2009), Blumenau – SC. Disponível em <www.sbqee.com.br>. Acesso em: 13 de dezembro de 2009.

PAUWELS, K. M. Energy Savings with Variable Speed Drives. CIRE2001. **IEEE Conference Publication**. n. 482, 2001.

PIRES. A.; FERNÁNDEZ, E. F.; BUENO, J. C. C. **Política Energética para o Brasil: Propostas para o Crescimento Sustentável**. 1 ed. 336 p. Rio de Janeiro, Editora Nova fronteira S.A. 2006.

PROCEL / ELETROBRÁS. (2007). **Eficiência Energética: Teoria e Prática**. Itajubá, 224p.

PROCEL / ELETROBRÁS. (2006). **Conservação de energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações**. Itajubá, 597p.

PROCEL / ELETROBRÁS. (2004). **Manual do Programa de Eficientização Industrial - Módulo: Ventiladores e Exaustores**. Rio de Janeiro.

RAMOS, M. C. E. S. **Metodologia para Avaliação e Otimização de Motores Elétricos de Indução Trifásicos Visando a Conservação de Energia em Aplicações Industriais**. 2009. 246p. Tese (Doutorado) Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2009.

REIS, L. B.; CUNHA, E. C. N. **Energia Elétrica e Sustentabilidade: Aspectos Tecnológicos, Socioambientais e Legais**. 1 ed. 243 p. Barueri. Editora Manole. 2006.

RODRIGUES, W. **Critérios para o Uso Eficiente de Inversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento de Água**. 2007. 208 p. Tese (Doutorado) Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2007.

RODRIGUES, W.; JÚNIOR, E. L. **Inversor de Frequência em Sistemas de Bombeamento**. UNICAMP. Campinas, 2002. 11p.

ROOKS, J. A.; WALLACE, A. K. Energy Efficiency of VSDs. **IEEE Industry Applications Magazine**, p. 57-61, mai/jun, 2004.

SILVA JUNIOR, A. N. **Eficiência Energética em Sistemas de Aeração de Silos de Armazenagem de Grãos, Utilizando o Inversor de Frequencia**. 2004. 132p. Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista. Butucatu, 2004.

TAYLOR, R.P.; GOVINDARAJALU, C.; LEVIN, J.; MEYER, A.S; WARD, W.A. **Financing Energy Efficiency: Lessons from Brazil, China, India, and beyond**. Washington: The Word Bank, 2008.

WEG Equipamentos Elétricos S/A. **Eficiência Energética na Cocelpa**. Disponível em <www.weg.com.br>. 2010a. Acesso em 12 de maio de 2010.

WEG Equipamentos Elétricos S/A – Inversores. **Inversores de Frequência Aplicados em Processos de Mineração Trazem Ganho de Produtividade, economia de Energia e Manutenção Reduzida**. Disponível em <www.weg.com.br>. 2010b. Acesso em 31 de maio de 2010.

WEG Equipamentos Elétricos S/A. **Eficiência Energética na Cargill**. Disponível em <www.weg.com.br>. 2010c. Acesso em 12 de maio de 2010.

WEG Equipamentos Elétricos S/A. **Manual para Correção do Fator de Potência**. Disponível em <www.weg.com.br>. Acesso em 18 de maio de 2011.

WEG Equipamentos Elétricos S/A - Motores. **Motores Elétricos Industriais**. Disponível em <www.weg.com.br>. Acesso em 20 de maio de 2010.

APÊNDICE

LISTA DE MATERIAIS - BANCADA DO VENTILADOR CENTRÍFUGO			
Item	Descrição	Fabricante / Modelo	Quant.
1	Ventilador Centrífugo: compatível com motor de 1,5 cv; vazão máxima 15 m ³ /m, pressão máxima 150 mmCA, 3600rpm.	Deltra Vent MODELO: Ventilador Siroco CV-20 E06	1
2	<i>Damper</i> elétrico: compatível com a vazão e pressão dos ventiladores, variação de 0 a 100%, com indicação da posição atual na tela do software supervisorío.	TROX do Brasil MODELO: Varicontrol	1
3	Transdutor de velocidade do ar: 0 – 20 m/s, Faixa de temperatura: 0° – 50° C, Saída analógica 4 -20mA, Exatidão 0,1 m/s + 2%, Alimentação 24 Vcc, Proteção IP65, Conexão com parafusos 1,5 mm2.	Tecnovip TEC - CVT- 200_HO300	1
4	Fonte de alimentação, entrada 220 Vca, saída 24 Vcc, 5A, compatível com o sistema de controle, sensores e transdutores.	MCE Microtécnica chaveada CH-24	1
5	Transdutor de rotação, classe de precisão 0,2; medição de velocidade compatível com o Controlador Lógico Programável (CLP) utilizado.	MK Controles MKDQ-20	2
6	Manometro tipo petroquímico, diametro 4 1/2", conexão ao processo 1/2", faixa de 0 a 400 mmH2O	Modena TAG PI-01	1
7	Atuador elétrico para damper, alimentação 24 Vac/Vcc, sinal de entrada 2 a 10 Vcc, 35 in.lb (4Nm), tempo de ação 95 s.	Belimo LM24-SR-T-2.0	1
8	Sensor de velocidade 0 a 20 m/s e temperatura 0 a 50°C, alimentação 24 vcc, sinal de saída 4 a 20 mA	Kimo CTV200- HO300/SFC	1
9	Motor elétrico 1,5 cv indução, trifásico; 220/380 V; 4 pólos; 60 Hz; IP 55; convencional (<i>standard</i>) com sensores do tipo PT 100 instalados nas bobinas do estator e na carcaça.	WEG	1
10	Motor elétrico 1,5 cv; indução, trifásico. 220/380 V; 4 pólos; 60 Hz; IP 55; alto rendimento, com sensores do tipo PT 100 instalados nas bobinas do estator e na carcaça.	WEG	1
11	CLP - CPU premium UNITY N1 ETH 96KB	Schneider / TSXP571634M	1
12	CLP - Módulo fonte alimentação TSX57 10	Schneider / TSXPSY2600M	1
13	CLP - <i>Rack standard</i>	Schneider /	1

		TSXRKY12	
14	CLP - Placa 16 entrada digital 24Vcc com borneira	Schneider / TSXDEY16D2	1
15	CLP - Placa 16 saída digital a rele com borneira	Schneider / TSXDSY16R5	1
16	CLP - Placa 8 entrada analógica 0-10V/4-20MA	Schneider / TSXAEY800	1
17	CLP - Placa 8 saída analógica 0-10V/4-20MA	Schneider / TSXASY800	1
18	CLP - Placa entrada analógica multigama 16BI	Schneider / TSXAEY414	1
19	Conversor de Frequência: trifásico; para motor de 1,5 cv; 220 V; 60 Hz; comunicação via rede ModBus, entrada para <i>encoder</i> ; controle PID; entrada 0-10V analógica para controle de velocidade.	Schneider / Altivar 31 / ATV31HU11M3X A	1
20	Dispositivo de partida suave (<i>Soft- Starter</i>) trifásico; 220 V para motor de 1,5 cv comunicação via rede ModBus.	Schneider / Altistart / ATS48D17Q	1
21	Medidores de energia multifunção: Transdutor digital multifunção (V,I, W,VA, Var, Hz, cos fi, THD) trifásico; tensão; corrente; frequência; potências ativas, reativas e aparentes; fator de potência; THD% de tensão e corrente; demanda; energia ativa; energia reativa indutiva e capacitiva; medição True RMS; exatidão básica 0,5 %; comunicação RS232; protocolo MODBUS RTU.	Schneider / Power Meter Series 800 / PM850U	1
22	Dispositivo de partida direta para motores	Tesys / modelo U	1