

**PRISCILA SILVA DE AMORIM**

**APLICAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO  
CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE AR  
COMPRIMIDO COM FOCO NA EFICIÊNCIA  
ENERGÉTICA**

**Recife – Pernambuco – Brasil**

**Julho de 2010**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**APLICAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO  
CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE AR  
COMPRIMIDO COM FOCO NA EFICIÊNCIA  
ENERGÉTICA.**

por

**Priscila Silva de Amorim**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Elétrica.

**ORIENTADOR: RONALDO RIBEIRO BARBOSA DE AQUINO, D. Sc.**

Recife, Julho de 2010

© Priscila Silva de Amorim, 2010

A452a Amorim, Priscila Silva de.  
Aplicação de inteligência artificial no controle e automação de sistemas de ar comprimido com foco na eficiência energética / Priscila Silva de Amorim. - Recife: O Autor, 2010.  
xv, 84 folhas, il : figs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2010.

Orientador: Prof. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino.  
Inclui Bibliografia.

1. Engenharia Elétrica. 2. Automação Industrial. 3. Controlador PI. 4. Lógica *Fuzzy*. 5. Eficiência Energética. I. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.) BCTG/2010-144



**Universidade Federal de Pernambuco**

***Pós-Graduação em Engenharia Elétrica***

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE  
DISSERTAÇÃO DO MESTRADO ACADÊMICO DE

**PRISCILA SILVA DE AMORIM**

TÍTULO

**“APLICAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO CONTROLE E  
AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO  
COM FOCO NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA”**

A comissão examinadora composta pelos professores: RONALDO RIBEIRO BARBOSA DE AQUINO, DEESP/UFPE, FRANCISCO DE ASSIS DOS SANTOS NEVES, DEESP/UFPE e MILDE MARIA DA SILVA LIRA, DEESP/UFPE sob a presidência do primeiro, consideram a candidata **PRISCILA SILVA DE AMORIM APROVADA.**

Recife, 15 de julho de 2010.

**RAFAEL DUEIRE LINS**  
Coordenador do PPGE

**RONALDO RIBEIRO BARBOSA DE AQUINO**  
Orientador e Membro Titular Interno

**MILDE MARIA DA SILVA LIRA**  
Membro Titular Externo

**FRANCISCO DE ASSIS DOS SANTOS NEVES**  
Membro Titular Interno

# **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho, em primeiro lugar, a DEUS e em especial a minha mãe Veleda, a minha avó Adelaide e a meus irmãos Paulo e Pedro.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus pela força necessária para superar as pedras no caminho.

A minha mãe Veleda por todo amor, dedicação e incentivo para seguir sempre em frente.

A minha avó Adeilde pelo amor e dedicação.

Aos meus irmãos Paulo e Pedro pelo apoio e companheirismo em todos os momentos da vida.

Especialmente ao Prof. Dr. Ronaldo Aquino pela valiosa orientação, por toda a dedicação, sempre presente, acompanhando todo o trabalho. Pessoa de fundamental importância na minha vida acadêmica. Muito mais que um professor, um grande amigo que sempre me apoiou e me orientou ao longo desta caminhada. Sou imensamente grata pela disponibilidade, confiança, paciência e amizade.

A Andréa Tenório, que, mesmo assoberbada pelas atribuições da secretaria do PPGEE, sempre encontrava tempo e disposição para atender aos alunos.

Aos meus amigos do LEEQE: Filipe e Isabela Cordeiro, Rafael Ferreira, Jorge Ribeiro, e Arineu Félix pelo apoio, incentivo e amizade.

Aos amigos Alexandro Aleixo e Davidson Marques pelas diversas contribuições.

Aos amigos Vítor Emerenciano, Maherbson Carvalho e Anderson Lopes pelos momentos de descontração e apoio.

A todos os professores do mestrado.

Aos amigos do LDSP.

Enfim, a todos que ajudaram a tornar esse projeto possível.

Resumo da Dissertação apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

# **APLICAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE AR COMPRIMIDO COM FOCO NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.**

**Priscila Silva de Amorim**

Julho/2010

Orientador: Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino, D. Sc.

Área de Concentração: Processamento de Energia.

Palavras-chave: Automação Industrial, Controlador PI, Lógica Fuzzy, Eficiência Energética, Sistema de Compressão de Ar.

Número de Páginas: 84

Do total de energia consumida no país, aproximadamente 43% é consumida pelo setor industrial e do total da energia elétrica consumida na indústria, cerca de 60% destina-se aos motores elétricos. Depois da energia elétrica, o ar comprimido é a forma de energia mais consumida na indústria. É também a forma de energia mais onerosa e, também a mais negligenciada. A falta de um projeto adequado e de uma manutenção regular faz com que os sistemas de ar comprimido, muitas vezes, representem uma fonte de desperdício de energia elétrica. Este trabalho descreve a aplicação da modelagem, controle e inteligência artificial para melhorar a eficiência energética em sistemas industriais. Apresenta ainda oportunidades de melhoria da eficiência do sistema, mostrando a influência da pressão de trabalho no consumo de energia, bem como o desperdício devido a vazamentos. A implementação do sistema de controle aplicada em sistemas de ar comprimido é apresentada com os dados experimentais obtidos no Laboratório de Otimização de Sistemas Motrizes da Universidade Federal de Pernambuco. Comparações quanto ao consumo de energia são realizados usando as estratégias de controle convencionais e a proposta neste trabalho.

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

# **APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN CONTROL AND AUTOMATION OF COMPRESSED AIR SYSTEMS WITH FOCUS ON ENERGY EFFICIENCY.**

**PRISCILA SILVA DE AMORIM**

July /2010

Supervisor: Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino, D. Sc.

Concentration Area: Energy Processing.

Keywords: Industrial Automation, PI Controller, Fuzzy Logic, Energy Efficiency, Compressed Air System.

Number of Pages: 84

Of the total energy consumed in the country, approximately 43% is consumed by the industrial sector and of the total of electricity consumed in industry, 60% are intended to electric motors. After the electric energy, compressed air is a form of energy most consumed in the industry. It is also the most costly form of energy and the most neglected too. The lack of an appropriate project and a regular maintenance makes the compressed air systems often a source of wastage of the electric energy. This work describes the application of modeling, control and artificial intelligence to improve energy efficiency in industrial systems. It also presents opportunities for improving efficiency of the system, showing the influence of working pressure on energy consumption and wastage due to leaks. The implementation of the control system applied in compressed air systems is presented with the experimental data obtained in the Laboratory of Optimization Motor Systems of the Federal University of Pernambuco. Comparisons regarding the consumption of energy are performed using conventional control strategies and proposed in this work.

## Sumário

Lista de Figuras .....	X
Lista de Tabelas .....	XIII
Lista de Abreviaturas e Siglas .....	XIV
Lista de Simbologia .....	XV
1 Introdução .....	16
1.1 Eficiência Energética na Indústria .....	16
1.2 Contribuição da Pesquisa .....	18
1.3 Organização do Trabalho .....	18
2 Projeto de Otimização de Sistemas Motrizes Industriais .....	20
2.1 Introdução .....	20
2.2 Apresentação do Projeto de Otimização dos Sistemas Motrizes Industriais .....	20
2.2.1 Objetivos do Projeto .....	21
2.2.2 Metas do Projeto .....	21
2.2.3 Suporte ao Projeto .....	21
2.3 Apresentação da Bancada de Sistema de Compressão de Ar .....	22
2.3.1 Dispositivos de Medição .....	22
2.3.2 Dispositivos de Acionamento Eletrônico .....	23
2.3.3 Modo de Operação das Bancadas .....	23
2.3.4 Descrição da Bancada de Sistema de Compressão de Ar .....	24
2.3.5 Descrição da Bancada de Sistema de Compressão de Ar no Supervisório .....	26
2.4 Sistema de Comunicação Presente na Bancada .....	27
2.5 Compressores de Ar de Deslocamento Positivo .....	27
2.5.1 Compressores Recíprocos .....	27
2.5.2 Compressores Rotativos de Parafuso .....	32
3 Análise de Eficiência Energética .....	36
3.1 Introdução .....	36
3.2 Análise dos Diferentes Tipos de Partida Utilizados na Bancada de Sistema de Compressão de Ar .....	36
3.2.1 Partida Direta .....	37
3.2.2 Partida Suave com <i>Soft Starter</i> .....	39
3.2.3 Partida Controlada com Inversor de Frequência .....	42
3.3 Comparação entre o uso do Controle Partida e Parada e o Uso do Inversor de Frequência no Controle da Pressão .....	45
3.3.1 Controle Partida e Parada .....	45
3.3.2 Controle Utilizando o Inversor de Frequência .....	47
3.4 Aumento do Consumo de Energia com o Aumento da Pressão de Operação do Sistema .....	49
3.5 Perdas por vazamento .....	53
4 Sistemas Inteligentes em Controle e Automação de Processos Industriais .....	57
4.1 Introdução .....	57
4.2 Lógica Fuzzy .....	57
4.2.1 Subconjuntos Fuzzy .....	58
4.2.2 Fuzzificação .....	58
4.2.3 Regras de Inferência Fuzzy .....	58
4.2.4 Defuzzificação .....	59

4.3	Configuração Básica de um Controlador Fuzzy .....	59
4.3.1	Funções da Interface de Fuzzificação.....	60
4.3.2	Base de Conhecimento .....	60
4.3.3	Lógica de Tomada de Decisões .....	60
4.3.4	Funções da Interface de Defuzzificação .....	60
4.4	Controladores Fuzzy Paramétricos .....	61
4.4.1	Comparação entre as Abordagens Fuzzy Baseadas em Regras e Paramétricas 62	
5	Metodologia Aplicada e Resultados .....	63
5.1	Introdução .....	63
5.2	processo industrial proposto .....	63
5.3	Modelagem do Sistema.....	64
5.3.1	Eyeball.....	64
5.4	Projeto do PI .....	69
5.4.1	Desenvolvimento do Controlador Fuzzy .....	70
5.4.2	Resultados Experimentais .....	73
6	Conclusão.....	79
6.1	Considerações Gerais.....	79
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros .....	79
	Referências Bibliográficas.....	81
	Links úteis .....	84

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.1</b>	<i>Consumo Nacional de Energia Elétrica por Setor referente ao ano de 2009.</i>	17
<b>Figura 2.1</b>	<i>Foto do protótipo de carga da bancada de compressão de ar localizada no LAMOTRIZ utilizada para os experimentos deste trabalho.</i>	25
<b>Figura 2.2</b>	<i>Tela de visualização da bancada de sistema de compressão de ar do LAMOTRIZ em WinCC®.</i>	26
<b>Figura 2.3</b>	<i>Hierarquia de sistemas de controle e de comunicação.</i>	27
<b>Figura 2.4</b>	<i>Corte de um compressor a pistão.</i>	28
<b>Figura 2.5</b>	<i>Compressor recíproco: admissão.</i>	28
<b>Figura 2.6</b>	<i>Compressor recíproco: compressão.</i>	29
<b>Figura 2.7</b>	<i>Compressor recíproco: descarga.</i>	29
<b>Figura 2.8</b>	<i>Compressor recíproco: expansão.</i>	29
<b>Figura 2.9</b>	<i>Compressores recíprocos: ciclo de compressão ideal.</i>	30
<b>Figura 2.10</b>	<i>Compressores recíprocos: ciclo de compressão real.</i>	30
<b>Figura 2.11</b>	<i>Compressores recíprocos: câmara de compressão de dupla ação.</i>	31
<b>Figura 2.12</b>	<i>Compressor tipo L.</i>	31
<b>Figura 2.13</b>	<i>Compressor tipo V.</i>	32
<b>Figura 2.14</b>	<i>Compressor parafuso.</i>	33
<b>Figura 2.15</b>	<i>Compressores a parafuso: ciclo de compressão ideal.</i>	33
<b>Figura 2.16</b>	<i>Ciclos de compressão do compressor parafuso no caso em que a relação de compressão interna é maior do que a externa.</i>	34
<b>Figura 2.17</b>	<i>Ciclos de compressão do compressor parafuso no caso em que a relação de compressão interna é menor do que a externa.</i>	34
<b>Figura 3.1</b>	<i>Registro da corrente na partida direta na bancada de sistema de compressão de ar utilizando o Analisador de Energia MARH-21.</i>	37
<b>Figura 3.2</b>	<i>Registro das tensões na partida direta na bancada de sistema de compressão de ar utilizando o Analisador de Energia MARH-21.</i>	37
<b>Figura 3.3</b>	<i>Gráfico das potências ativas e reativas na partida direta do conjunto motor-compressor com a válvula de saída de ar 20% aberta.</i>	38
<b>Figura 3.4</b>	<i>Gráfico do fator de potência na partida direta do conjunto motor-compressor com a válvula de saída de ar 20%.</i>	38
<b>Figura 3.5</b>	<i>Registro da corrente na partida suave utilizando a soft starter na bancada de sistema de compressão de ar utilizando Analisador de Energia MARH-21.</i>	39
<b>Figura 3.6</b>	<i>Registro da corrente na partida suave utilizando a soft starter mal ajustada na bancada de sistema de compressão de ar utilizando Analisador de Energia MARH-21.</i>	40
<b>Figura 3.7</b>	<i>Registro das tensões na partida suave com soft starter na bancada de sistema de compressão e ar utilizando Analisador de Energia MARH-21.</i>	40
<b>Figura 3.8</b>	<i>Formas de onda registradas durante a partida suave com a soft starter da bancada de sistema de ar comprimido do LAMOTRIZ, momento inicial de ligação dos tiristores na fase A e B.</i>	41
<b>Figura 3.9</b>	<i>Gráfico das potências ativa e reativa na partida suave com a soft starter do conjunto motor-compressor com a válvula de saída de ar 20% aberta.</i>	41
<b>Figura 3.10</b>	<i>Gráfico do fator de potência na partida suave com a softstarter do conjunto motor-compressor com a válvula de saída de ar 20% aberta.</i>	42
<b>Figura 3.11</b>	<i>Registro da corrente na partida suave utilizando o inversor de frequência na bancada de sistema de compressão de ar utilizando Analisador de Energia MARH-21.</i>	42

<b>Figura 3.12</b> <i>Gráfico da tensão na partida controlada com o inversor de frequência na bancada de sistema de compressão de ar utilizando o Analisador de Energia MARH-21.</i> .....	43
<b>Figura 3.13</b> <i>Formas de onda registradas durante a partida suave com o inversor de frequência da bancada de sistema de compressão de ar do LAMOTRIZ.</i> .....	43
<b>Figura 3.14</b> <i>Gráfico das potências ativa e reativa na partida controlada com o inversor de frequência do conjunto motor-compressor com a válvula de saída de ar 20% aberta.</i> .....	44
<b>Figura 3.15</b> <i>Gráfico do fator de potência na partida controlada com o inversor de frequência do conjunto motor-compressor com a válvula de saída de ar 20% aberta.</i> .....	44
<b>Figura 3.16</b> <i>Pressão utilizando o controle partida e parada</i> .....	46
<b>Figura 3.17</b> <i>Potência consumida utilizando-se o controle partida e parada para uma faixa de pressão de 4 a 5 bar. Acionamento feito por partida direta.</i> .....	46
<b>Figura 3.18</b> <i>Resposta do sistema utilizando o controlador PI para um set point de 4 bar.</i>	47
<b>Figura 3.19</b> <i>Potência consumida utilizando-se o controlador PI para uma pressão de 4 bar.</i> .....	48
<b>Figura 3.20</b> <i>Comportamento da pressão para uma pressão de desarme de 6 bar</i> .....	50
<b>Figura 3.21</b> <i>Potência consumida para uma pressão de desarme de 6 bar.</i> .....	50
<b>Figura 3.22</b> <i>Comportamento da pressão para uma pressão de desarme de 7 bar.</i> .....	51
<b>Figura 3.23</b> <i>Potência consumida para uma pressão de desarme de 7 bar.</i> .....	51
<b>Figura 3.24</b> <i>Representação gráfica da pressão medida durante o teste para a medição de vazamentos realizado na bancada de sistema de compressão de ar presente no LAMOTRIZ.</i> .....	54
<b>Figura 4.1</b> <i>Descrição local linear através de um modelo fuzzy paramétrico.</i> .....	61
<b>Figura 5.1</b> <i>Resposta a um degrau de velocidade aplicado ao sistema de compressão de ar para uma abertura de 15% da válvula de saída de ar.</i> .....	65
<b>Figura 5.2</b> <i>Diagrama de Blocos utilizado em Simulink.</i> .....	66
<b>Figura 5.3</b> <i>Resposta a um degrau de velocidade aplicado ao sistema de compressão de ar comparado ao resultado de simulação obtido em Simulink® para uma abertura de 15% da válvula de saída de ar.</i> .....	66
<b>Figura 5.4</b> <i>Resposta a um degrau de velocidade aplicado ao sistema de compressão de ar comparado ao resultado de simulação obtido em Simulink® para uma abertura de 20% da válvula de saída de ar.</i> .....	67
<b>Figura 5.5</b> <i>Resposta a um degrau de velocidade aplicado ao sistema de compressão de ar comparado ao resultado de simulação obtido em Simulink® para uma abertura de 25% da válvula de saída de ar.</i> .....	67
<b>Figura 5.6</b> <i>Resposta a um degrau de velocidade aplicado ao sistema de compressão de ar comparado ao resultado de simulação obtido em Simulink® para uma abertura de 30% da válvula de saída de ar.</i> .....	68
<b>Figura 5.7</b> <i>Resposta a um degrau de velocidade aplicado ao sistema de compressão de ar comparado ao resultado de simulação obtido em Simulink® para uma abertura de 35% da válvula de saída de ar.</i> .....	68
<b>Figura 5.8</b> <i>Resposta a um degrau de velocidade aplicado ao sistema de compressão de ar comparado ao resultado de simulação obtido em Simulink® para uma abertura de 40% da válvula de saída de ar.</i> .....	69
<b>Figura 5.9</b> <i>Estrutura do controlador fuzzy em Simulink.</i> .....	70
<b>Figura 5.10</b> <i>Funções de Pertinencia de Entrada do Sistema Fuzzy.</i> .....	72
<b>Figura 5.11</b> <i>Função de saída</i> .....	72

<b>Figura 5.12</b> <i>Desempenho do Controlador Fuzzy utilizando o algoritmo de Runge-Kutta de 4ª ordem.</i> .....	74
<b>Figura 5.13</b> <i>Desempenho do Controlador Fuzzy utilizando os algoritmos de Euler e Runge-Kutta.</i> .....	74
<b>Figura 5.14</b> <i>Desempenho do Controlador PI para um valor fixo de <math>k_p</math> de 52,2.</i> .....	75
<b>Figura 5.15</b> <i>Desempenho do Controlador PI para um valor fixo de <math>k_p</math> de 84,45.</i> .....	75
<b>Figura 5.16</b> <i>Curva da Pressão Utilizando o Controle Partida e Parada para uma abertura de 15% da válvula de saída de ar.</i> .....	76
<b>Figura 5.17</b> <i>Curva da Pressão Utilizando o controlador PI Fuzzy para uma abertura de 15% da válvula de saída de ar.</i> .....	77
<b>Figura 5.18</b> <i>Potência Consumida Utilizando-se o Controle Partida e Parada .</i> .....	77
<b>Figura 5.19</b> - <i>Potência consumida utilizando-se o controlador PI Fuzzy.</i> .....	78

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 3.1</b> Comparação de Consumo de Energia.....	48
<b>Tabela 5.1</b> Valores de $k_p$ e $k_i$ em função da abertura da válvula de saída de ar.....	71

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

AS	Estação de Controle.
BEN	Balanço Energético Nacional.
CLP	Controlador Lógico Programável.
CSV	Valores Separados por Vírgula.
FC	Partida controlada utilizando o Inversor de Frequência .
HMI	Interface Homem Máquina.
IP	Índice de Proteção.
LAMOTRIZ	Laboratório de Sistemas Motrizes da UFPE.
LEEQE	Laboratório de Eficiência Energética e Qualidade de Energia.
MARH	Analizador de Energia.
MID	Multi Indicador Digital.
OS	Estação de Operação.
PA	Painel de Automação.
PD	Partida Direta.
PI	Controlador que utiliza ação Proporcional e Integral.
PROCEL	Programa de Conservação de Energia Elétrica.
SS	Partida Suave utilizando a Soft starter.
EPE	Empresa de Pesquisa Energética.

## Lista de Simbologia

$K_p$	Ganho proporcional.
$K_i$	Ganho Integral.
$n$	Número de estágios de compressão.
$P\%$	Percentual de perdas.
$r_p$	Relação de compressão.
$p_1$	Pressão máxima (bar).
$p_{atm}$	Pressão atmosférica (bar).
$T_p$	Tempo Proporcional.
$T_i$	Tempo integral.
$V_v$	Caudal do vazamento ( $m^3/h$ ).
$V_c$	Vazão de ar do compressor ( $m^3/h$ ).
$\sum t_c$	Tempo de funcionamento do compressor em carga (s).
$t_t$	Tempo de medição total de funcionamento do compressor (s).
$m$	Números de ciclos de carga/alívio do compressor
$V\%$	Percentual de perdas por vazamento.
$c$	Número de compressores do sistema.
$C_v$	Custo da perda por vazamento (R\$/ano).
$C_{ac}$	Custo annual da geração de ar comprimido (R\$/ano).
$K$	Ganho do processo.
$G(s)$	Função de transferência estimada.
$D$	Tempo morto.
$\tau_p$	Constante de tempo (s).

# 1 INTRODUÇÃO

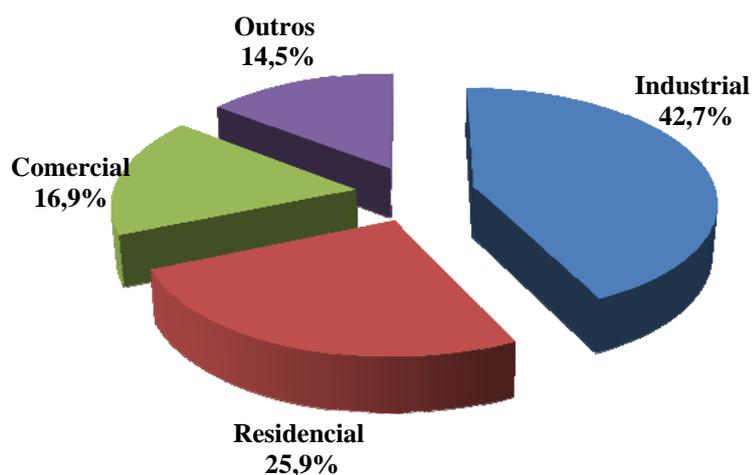
Diante da recente crise enfrentada pelo setor energético brasileiro a busca por soluções para atender à crescente demanda observada nos últimos anos se torna cada vez mais evidente.

A busca por novas fontes de geração de energia, a ampliação dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica são vistas como algumas alternativas para minimizar os impactos causados pelas eventuais faltas de energia. Entretanto, a eliminação do desperdício de energia elétrica, ou seja, a eficiência energética constitui uma solução mais econômica e de alcance mais imediato [1].

## 1.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA

Segundo EPE [2], do total de energia consumida no país, aproximadamente 43% é consumida pelo setor industrial, conforme pode ser observado na Figura 1.1. Do total da energia elétrica consumida na indústria, cerca de 60% destina-se aos motores elétricos [3]. Desse modo, o setor industrial apresenta um grande potencial para a economia de energia.

A necessidade de se controlar sistemas e processos industriais existe e tem sido crescente ao longo do tempo. Com o advento do circuito integrado (1960) e do microprocessador (1970), a quantidade de inteligência que pode ser embutida em uma máquina a um custo razoável se tornou enorme [4]. O número de tarefas complexas que podem ser feitas automaticamente cresceu bastante, criando a possibilidade de adicionar-se aspectos de economia de energia ao sistema de controle. Isso tem desencadeado uma busca por novos métodos e estratégias de controle tais como: controle multivariável, controle adaptativo, controle preditivo, e sistemas de controle inteligente baseado em inteligência artificial para incluir no sistema de controle ações visando à eficiência energética.



**Figura 1.1** *Consumo Nacional de Energia Elétrica por Setor referente ao ano de 2009.*

Fonte: Elaboração própria a partir de dados disponibilizados pela EPE.

O avanço tecnológico e o surgimento dos Controladores Lógicos Programáveis – CLPs possibilitaram a inclusão de tais opções ao controle de processos.

O uso de inteligência artificial em automação e controle de processos vem se tornando cada vez mais atrativo. Dentre as técnicas aplicadas, destacam-se as Redes Neurais e a Lógica *Fuzzy* [5-8].

As técnicas de inteligência artificial são bastante atrativas em virtude da capacidade de utilizar a experiência acumulada pelos operadores e engenheiros de processo juntamente com conceitos teóricos suportados pela teoria clássica de controle [9],10]. Além disso, diferentes pesquisas têm demonstrado que técnicas de inteligência artificial podem ser usadas com sucesso na interpretação de fenômenos do nosso dia-a-dia, representando-os com menos complexidade do que os princípios matemáticos usuais, [11-13]. Podemos citar como exemplo de inteligência aplicada a sistemas de controle, os controladores auto-ajustáveis que utilizam Lógica *Fuzzy* para ajustar seus parâmetros [14,15].

Este trabalho apresenta a proposta de um controlador PI que utiliza Lógica *Fuzzy* para selecionar o parâmetro adequado com base na mudança do ponto de operação do sistema, visando melhorar a resposta do controlador e assim aumentar a eficiência do sistema.

## 1.2 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA

Com o objetivo de minimizar as perdas nos sistemas motrizes já instalados na indústria brasileira e acelerar a penetração no mercado de motores de indução trifásicos de alto rendimento [16], a ELETROBRÁS através de seu programa de conservação de energia elétrica na indústria (PROCEL – Indústria) tem firmado convênios com várias universidades para implantação do Laboratório de Otimização em Sistemas Motrizes – LAMOTRIZ. Desta parceria entre a ELETROBRÁS e a Universidade Federal de Pernambuco resultou o LAMOTRIZ-UFPE com os seguintes objetivos:

- Colaborar com a formação de engenheiros no âmbito da conservação de energia;
- Expandir conhecimentos de eficiência energética no meio acadêmico e industrial;
- Criar critérios de eficiência energética em força motriz;
- Avaliar as oportunidades de economia de energia nos sistemas motrizes já instalados;
- Desenvolver pesquisa de alto nível em acionamentos industriais eficientes.

O trabalho é parte da pesquisa desenvolvida no LAMOTRIZ-UFPE, cujo objetivo é abordar a eficiência energética em sistemas de geração e distribuição de ar comprimido. Desta forma, torna-se um incentivo a outras pesquisas tanto de mestrado como de iniciação científica, ampliando assim as áreas de atuação do LAMOTRIZ-UFPE.

A presente pesquisa em um primeiro momento aborda os diferentes tipos de acionamento de motores presentes na indústria (partida direta, chaves de partida suave e inversores de frequência), analisa a operação de um sistema de ar comprimido industrial para o controle da pressão à velocidade constante utilizando o controle partida e parada e à velocidade variável utilizando o inversor de frequência e por fim, é realizada uma aplicação de Lógica Fuzzy no controle do sistema de ar comprimido. Foram realizadas comparações através de medições experimentais, de forma a avaliar os resultados, visando sempre a eficiência energética de sistemas industriais.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 2 é apresentado o projeto que deu origem ao Laboratório de Sistemas Motrizes da UFPE (LAMOTRIZ). É dada uma visão geral dos equipamentos e sistemas utilizados na bancada de sistema de compressão de ar para o desenvolvimento deste trabalho. Por fim, é feita a descrição do sistema de compressão de ar como um todo: o

sistema de comunicação do LAMOTRIZ, as formas de comunicação do operador com a bancada, as principais características do supervisor. Além disso, é feita uma breve abordagem dos tipos de compressores de deslocamento positivo, suas características construtivas e princípio de funcionamento.

O capítulo 3 tem como objetivo apresentar os tipos de partida disponíveis no LAMOTRIZ e realizar uma análise quanto à qualidade de energia elétrica, bem como as possíveis causas de desperdício de energia elétrica em instalações de ar comprimido. Assim, é mostrada uma metodologia de diagnóstico energético para o cálculo de perda de energia devido a vazamentos. É também evidenciada a importância, do ponto de vista da eficiência energética, da escolha adequada da pressão de trabalho máxima regulada para o reservatório de ar comprimido.

No capítulo 4 é feita uma breve abordagem sobre controle e automação de processos usando inteligência artificial. É apresentada uma introdução à Lógica Fuzzy, descrevendo o Controlador Fuzzy Paramétrico.

No capítulo 5 é apresentada a comprovação teórico-experimental, descrevendo assim a metodologia aplicada para a implementação do controle do tipo PI com o auxílio da Lógica Fuzzy no sistema de compressão de ar do LAMOTRIZ da UFPE. Foram realizados ensaios para obtenção de dados para traçarem-se as curvas de desempenho do sistema. Foram realizadas comparações entre o controle proposto e a forma de controle tradicionalmente usada na indústria em compressores a pistão, resultando em ganhos significativos no consumo de energia elétrica.

No capítulo 6 são apresentadas as considerações finais do trabalho, analisando a importância da eficiência energética em sistemas industriais, bem como os méritos obtidos com o auxílio da inteligência artificial no controle da pressão em processos industriais e as sugestões de trabalhos futuros.

# 2 PROJETO DE OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS MOTRIZES INDUSTRIAIS

## 2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, é apresentado o Projeto de Otimização Energética de Sistemas Motrizes Industriais que originou o Laboratório de Otimização de Sistemas Motrizes da UFPE (LAMOTRIZ).

É feita uma descrição da Bancada de Compressor presente neste laboratório com todos os dispositivos de instrumentação e controle disponíveis para o desenvolvimento da dissertação. É descrito também o sistema de comunicação usado para supervisão e controle da bancada.

## 2.2 APRESENTAÇÃO DO PROJETO DE OTIMIZAÇÃO DOS SISTEMAS MOTRIZES INDUSTRIAIS

A classe industrial é responsável por cerca de 40% do consumo de energia elétrica do país, sendo o consumo de energia nos sistemas motrizes correspondente a 62% do total da energia elétrica consumida na indústria, o que corresponde a 28,5% da energia elétrica consumida no país [17].

Os motores elétricos presentes nas indústrias podem acionar cargas, como por exemplo, ventiladores, bombas, compressores, esteiras, entre outras. Na indústria nacional a potência instalada em sistemas de ventilação, compressão e bombeamento alcançam aproximadamente 75% da potência total [16].

Esse elevado consumo de energia elétrica em sistemas motrizes na indústria brasileira motivou a Eletrobrás, através do Procel Indústria a desenvolver o projeto de otimização dos sistemas motrizes. Atualmente, há laboratórios montados em 14 universidades, contemplando todas as regiões do país [18].

O LAMOTRIZ implantado na UFPE é composto de três bancadas didáticas que visam simular sistemas industriais comumente utilizados: bombeamento de água, exaustão e compressão de ar. Cada um desses sistemas possui diversas opções de operação.

### **2.2.1 Objetivos do Projeto**

Os principais objetivos do projeto são a minimização das perdas dos sistemas motrizes industriais já instalados na indústria brasileira e a aceleração da penetração no mercado de motores de indução trifásicos de alto rendimento.

Assim, além de apresentar um grande potencial de redução de consumo, este projeto tem como objetivo uma redução dos custos com os insumos energéticos o que refletiria diretamente na lucratividade das empresas.

### **2.2.2 Metas do Projeto**

O projeto tem como metas principais a identificação de diversas oportunidades de economia de energia em acoplamento motor-carga, super dimensionamento de motores, utilização de acionamentos eletrônicos, entre outros, apresentando também como meta a diminuição dos níveis de perdas dos sistemas sem necessidade de grandes investimentos; e ainda a implementação deste projeto em 2000 estabelecimentos, resultando em uma economia de energia para o país de 2 TWh.

### **2.2.3 Suporte ao Projeto**

Capacitação Laboratorial: o programa através de convênios com universidades implanta laboratórios de sistemas motrizes para fins didáticos no tema eficiência energética em sistemas motrizes industriais.

## **2.3 APRESENTAÇÃO DA BANCADA DE SISTEMA DE COMPRESSÃO DE AR**

A bancada de sistema de compressão de ar presente no LAMOTRIZ constitui um protótipo de um sistema de geração de ar comprimido industrial. É composta por um reservatório de ar com capacidade para 175L e unidade compressora duplo pistão de um estágio acionada por um motor de indução trifásico de alto rendimento.

O sistema é operado e supervisionado através da estação de operação (OS), que serve de Interface Homem-Máquina (IHM) entre o operador e o sistema de controle da bancada. Pode também ser operado localmente, através de dispositivos de acionamento dispostos na porta do painel.

A bancada é composta por um conjunto: painel de automação mais protótipo de carga. No painel de automação (PA), está instalado o controlador Lógico Programável (CLP), juntamente com dispositivos de medição e controle do sistema. A comunicação entre o CLP e os dispositivos de medição e controle é realizada por meio de rede PROFIBUS-DP e a conexão entre a estação de operação (OS) da bancada e o sistema de controle (AS) via rede INDUSTRIAL-ETHERNET.

### **2.3.1 Dispositivos de Medição**

A bancada possui um multimedidor digital de grandezas elétricas (MID) conectado a rede PROFIBUS que mede e armazena as seguintes informações:

- Tensões de linha;
- Correntes de linha;
- Potências: ativa, reativa e aparente;
- Energia consumida e fornecida;
- Ângulo de defasagem entre tensão e corrente;
- Fator de potência;
- Fator de potência por linha;

Estão presentes também na bancada de Sistema de Compressão de Ar, transmissores de vazão e de pressão. Os dados de vazão e pressão são enviados ao CLP via rede PROFIBUS e em seguida enviados a estação de operação via rede INDUSTRIAL-

ETHERNET onde são armazenados em arquivos no formato CSV (Comma Separated Value).

### **2.3.2 Dispositivos de Acionamento Eletrônico**

Além da chave de partida direta, estão presentes na bancada mais duas opções de acionamento, que são acionamentos eletrônicos. O acionamento eletrônico é formado por um conjunto de dispositivos que permite o controle de velocidade e/ou torque de um motor elétrico através da variação da tensão e/ou da frequência de alimentação do motor [19]. Os dispositivos de acionamento eletrônico presentes no protótipo são chave de partida suave, soft starter e inversor de frequência. As soft starters são constituídas de um circuito eletrônico acoplado a um microprocessador que controla um conjunto de tiristores responsáveis pelo ajuste da tensão aplicada aos terminais do motor [20]. Desse modo, pode-se reduzir bastante a corrente de partida do motor ao utilizar o acionamento por chave de partida estática (*soft starter*).

Outra opção de acionamento presente na bancada é o inversor de frequência, que é um equipamento constituído basicamente por um retificador e um inversor. Existem basicamente dois tipos de controle utilizados em inversores de frequência: o controle escalar e o controle vetorial. Para os ensaios apresentados neste trabalho, utiliza-se o controle escalar linear (o inversor apresenta a opção de controle escalar quadrático), o qual faz o motor operar controlando a tensão e a frequência, mantendo sua relação constante para qualquer valor de operação. O inversor de frequência é bastante útil em sistemas que apresentam velocidade variável.

### **2.3.3 Modo de Operação das Bancadas**

O sistema pode ser operado no modo local ou remoto. Existe uma chave “local/remoto”, na porta do painel de automação que permite selecionar a opção desejada.

#### **OPERAÇÃO LOCAL**

Este modo de operação permite que a bancada seja parcialmente operada sem a estação de operação. Quando em modo local, a bancada é comandada por chaves e botões instalados na porta do painel de automação.

Os comandos disponíveis localmente são:

- 1 – Ligar motor.
- 2 – Desligar motor.
- 3 – Reconhecer falha.
- 4 – Ajustar a velocidade parâmetros do inversor de frequência.
- 5 – Selecionar o tipo de acionamento (Partida direta, Partida com soft starter ou com inversor de frequência)

Para executar qualquer dos comandos listados anteriormente, basta pressionar o botão correspondente à função desejada. No caso da seleção do tipo de acionamento, há uma chave que permite a seleção do tipo de partida, bastando girá-la para a opção desejada.

#### **Sinalizações em modo local:**

Todos os botões de comando são sinalizados. Os *leds* de sinalização dos botões são utilizados para mostrar informações localmente. As informações disponíveis estão listadas abaixo.

- 1 – Motor ligado.
- 2 – Motor desligado.
- 3 – Falha presente.

#### **OPERAÇÃO REMOTA**

Este modo permite a operação, supervisão e aquisição de dados via estação de operação. Uma vez em modo remoto, a bancada é exclusivamente operada via computador. Desse modo, é possível controlar a abertura de válvulas, pressão de religamento e parâmetros do controlador, por exemplo.

#### **2.3.4 Descrição da Bancada de Sistema de Compressão de Ar**

A bancada de sistema de compressão de ar utilizada para o desenvolvimento deste trabalho pode ser visualizada na Figura 2.1.



**Figura 2.1** Foto do protótipo de carga da bancada de compressão de ar localizada no LAMOTRIZ utilizada para os experimentos deste trabalho.

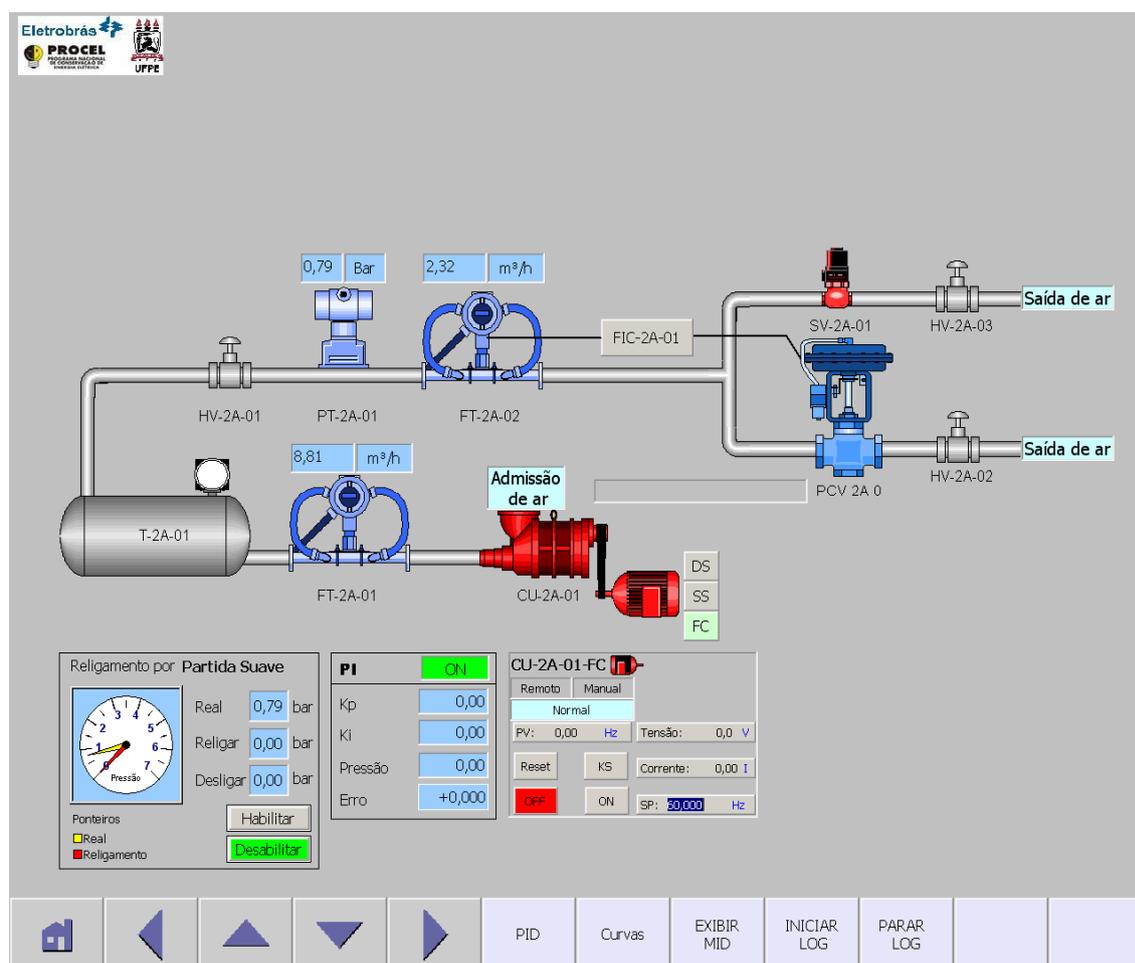
Na Figura 2.1 são apresentados os principais equipamentos com a legenda a seguir:

1. Reservatório de ar comprimido com capacidade para 175L
2. Válvula solenóide proporcional (0-100%) na saída de ar;
3. Válvula solenóide on/off;
4. Compressor recíproco de pistão;
5. Acoplamento motor-compressor;
6. Motor de alto rendimento com potência de 1,5 cv;
7. Válvula manual na saída de ar;
8. Válvula manual na saída de ar;
9. Transmissor de pressão;
10. Transmissor de vazão na entrada do reservatório;
11. Transmissor de vazão na saída de ar;
12. Filtro;

## 13. Manômetro.

### 2.3.5 Descrição da Bancada de Sistema de Compressão de Ar no Supervisório

A bancada é representada no computador através do software supervisor WinCC® [21] onde são modelados todos os componentes do sistema. Para a configuração estudada, a representação no programa WinCC® tem a tela principal conforme se verifica na Figura 2.2., através da qual pode ser visualizado o diagrama da planta do sistema de geração e distribuição de ar comprimido .



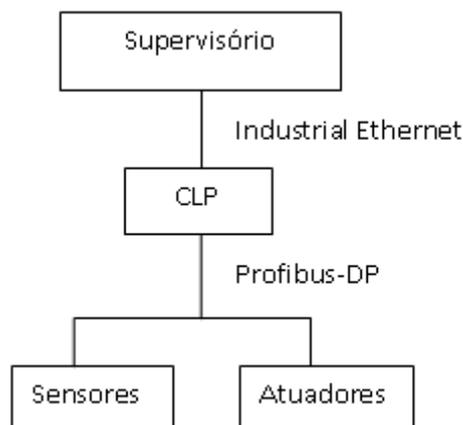
**Figura 2.2** Tela de visualização da bancada de sistema de compressão de ar do LAMOTRIZ em WinCC®.

Na Figura 2.2, pode-se observar o conjunto motor-compressor (CU-2A-01), o reservatório de ar comprimido (T-2A-01), transmissor de vazão na entrada do reservatório (FT-2A-01), válvula manual (HV-2A-01), transmissor de pressão (PT-2A-01), transmissor de vazão na saída do reservatório (FT-2A-02). Já na saída de carga, pode-se ver válvula

solenóide proporcional com abertura variando de 0 a 100% (PCV-2A-01) utilizada para simular consumidores de ar, válvula solenóide on/off (SV-2A-03) utilizada para a simulação de vazamentos e válvulas manuais (HV-2A-02 e HV-2A-03).

## 2.4 SISTEMA DE COMUNICAÇÃO PRESENTE NA BANCADA

Na Figura 2.3 é apresentado um diagrama das hierarquias e dos sistemas de controle e comunicação presentes no LAMOTRIZ.



**Figura 2.3** Hierarquia de sistemas de controle e de comunicação.

Na Figura 2.3 é visualizada a hierarquia de comunicação entre os diferentes componentes do sistema de compressão de ar utilizado para o desenvolvimento deste trabalho. O supervisório permite o ajuste dos parâmetros ao longo do ensaio, e comanda o CLP que está em um nível hierárquico inferior. O CLP é responsável pelo controle direto do sistema, interagindo com sensores e atuadores presentes.

## 2.5 COMPRESSORES DE AR DE DESLOCAMENTO POSITIVO

São aqueles nos quais sucessivos volumes de ar são confinados em um espaço fechado e através da redução ou deslocamento desse espaço o ar tem sua pressão elevada. Estão disponíveis em dois tipos: rotativos e recíprocos. Dentre esses, os mais utilizados na maioria das aplicações usuais de ar comprimido são os recíprocos de pistão e os rotativos de parafuso [22].

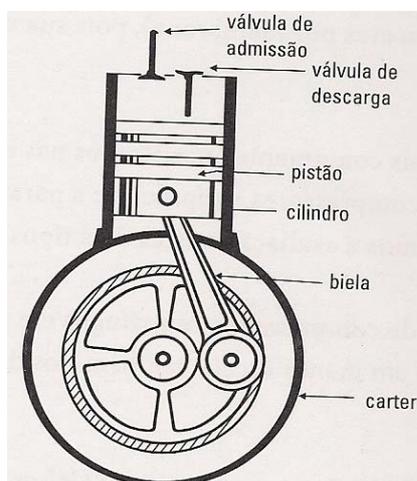
### 2.5.1 Compressores Recíprocos

São aqueles em que o deslocamento e a compressão do volume de ar ocorrem por meio de um êmbolo. O tipo mais conhecido e utilizado de compressor recíproco é o

compressor a pistão. Esses compressores fornecem tipicamente uma vazão entre 3 a 5000 m<sup>3</sup>/h [23], produzem altas pressões e funcionam com excelente desempenho mecânico [22].

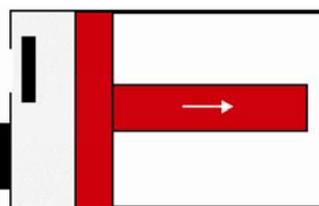
### 2.5.1.1 Princípio de Funcionamento

Os compressores a pistão aspiram e comprimem o ar durante seu movimento entre o ponto morto inferior e o ponto morto superior, à medida que são acionadas as válvulas de admissão e descarga do ar. Seu princípio de funcionamento é baseado em um sistema biela-manivela que converte o movimento rotativo de um motor de indução trifásico (MIT) em movimento linear de um pistão [23], [24]. A Figura 2.4 mostra um corte de um compressor a pistão de um estágio [23].



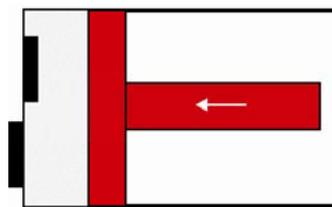
**Figura 2.4** Corte de um compressor a pistão.

Para poder realizar a compressão durante o movimento linear do pistão, o cabeçote é provido de válvulas na admissão e descarga do ar. Durante a admissão do ar o êmbolo retorna à sua posição inferior no cilindro reduzindo a pressão no interior do mesmo. A válvula de sucção abre-se permitindo a entrada de ar a ser comprimido, conforme mostrado na Figura 2.5.



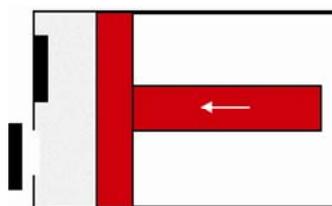
**Figura 2.5** Compressor recíproco: admissão.

Durante a compressão, a válvula de sucção permanece fechada, conforme mostrado na Figura 2.6.



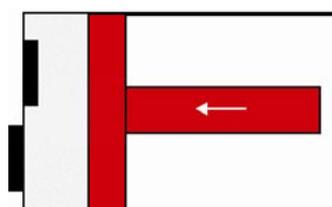
**Figura 2.6** *Compressor recíproco: compressão.*

No momento em que a pressão no interior do cilindro torna-se maior que a pressão na descarga, a válvula de descarga abre-se, permitindo a saída do ar comprimido, conforme representa a Figura 2.7.



**Figura 2.7** *Compressor recíproco: descarga.*

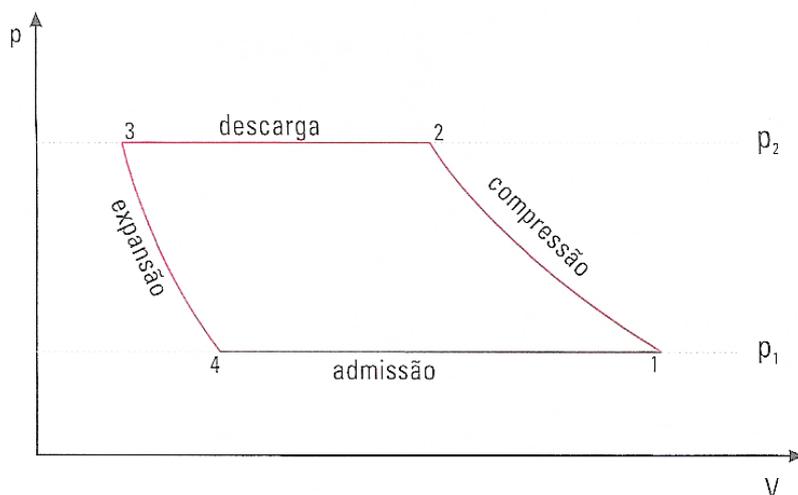
Terminado o percurso ascendente do êmbolo, a válvula de descarga fecha-se e o êmbolo inicia nova descida, como ilustra a Figura 2.8. Como o êmbolo não pode tocar no topo do cilindro, uma quantidade residual de ar comprimido permanece no volume morto do cilindro, fazendo com que a válvula de sucção somente seja aberta quando a pressão no interior do cilindro diminuir até o nível permitido.



**Figura 2.8** *Compressor recíproco: expansão.*

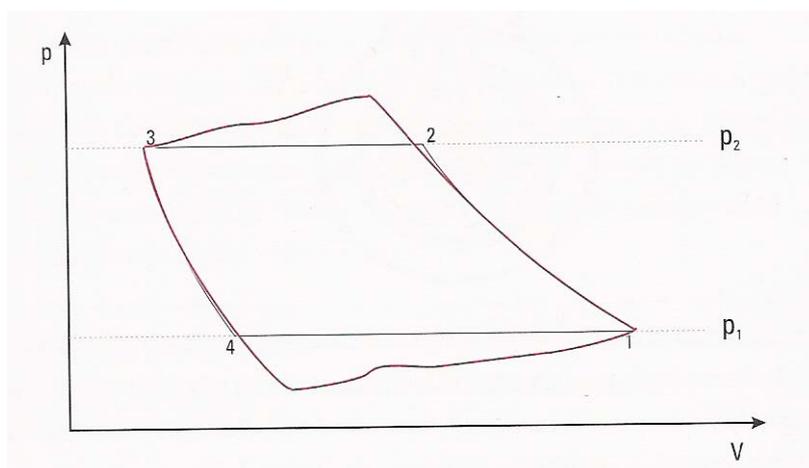
### 2.5.1.2 Ciclos de Compressão

A Figura 2.9 mostra o ciclo de compressão ideal dos compressores recíprocos [23].



**Figura 2.9** Compressores recíprocos: ciclo de compressão ideal.

Conforme podemos observar na Figura 2.9, as retas 2-3 e 1-4, respectivamente, representam a descarga e admissão no ciclo de compressão e são isobáricas. A curva 3-4 representa a expansão do pistão do cilindro e a curva 1-2, a compressão do ar, devendo se aproximar o máximo de uma isotérmica para garantir a compressão mais eficiente. O retardo imposto pelo funcionamento das válvulas de sucção e descarga faz com que ocorra uma flutuação da pressão durante a admissão e descarga e o ciclo real segue a tendência da Figura 2.10 [23].



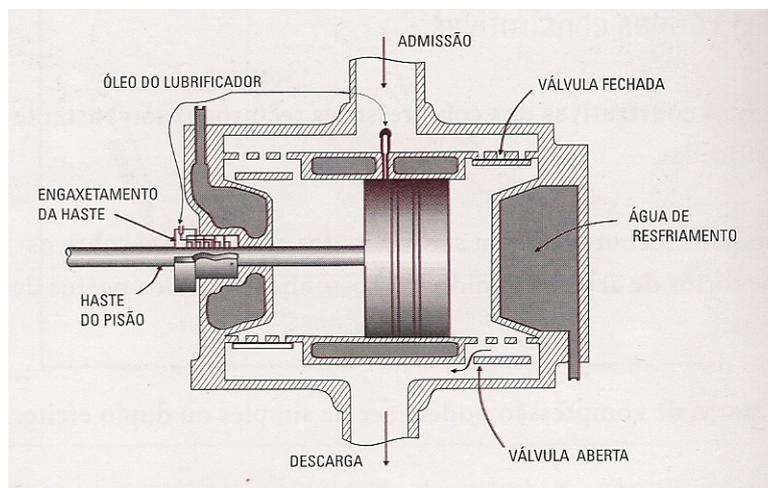
**Figura 2.10** Compressores recíprocos: ciclo de compressão real.

### 2.5.1.3 Formas Construtivas

As formas construtivas dos compressores recíprocos a pistão são muito diversificadas. As câmaras de compressão podem ser de simples ou dupla ação.

- Simples ação: uma rotação do motor executa apenas uma compressão, como ilustrado na Figura 2.4.

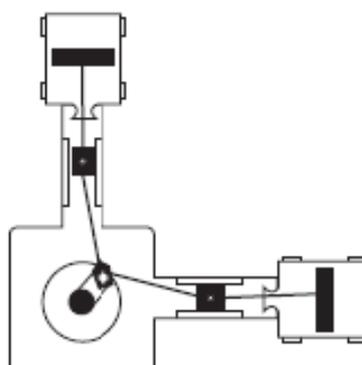
- Dupla ação: um lado do êmbolo comprime o ar, enquanto do outro lado, o ar é admitido na câmara de compressão, ou seja, uma rotação do motor executa duas compressões como mostra a Figura 2.11 [23].



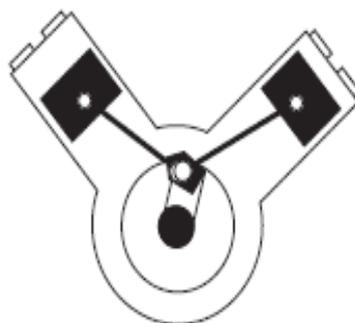
**Figura 2.11** Compressores recíprocos: câmara de compressão de dupla ação.

Os compressores recíprocos podem apresentar um ou mais cilindros trabalhando em conjunto, e conseqüentemente, um ou mais pistões. Ele permite obter grande flexibilidade na produção de pressões e vazões.

Quando possuírem mais de um cilindro, a disposição dos mesmos pode ser de diversas formas, como por exemplo, em “V” ou em “L”. Os compressores de simples ação mais comuns são os do tipo V, já os de dupla ação são os do tipo “L”, com um pistão na horizontal e outro na vertical. [22], [25]. A Figura 2.12 e a Figura 2.13 ilustram compressores tipo L e tipo V respectivamente [22].



**Figura 2.12** Compressor tipo L.



**Figura 2.13** *Compressor tipo V.*

## 2.5.2 Compressores Rotativos de Parafuso

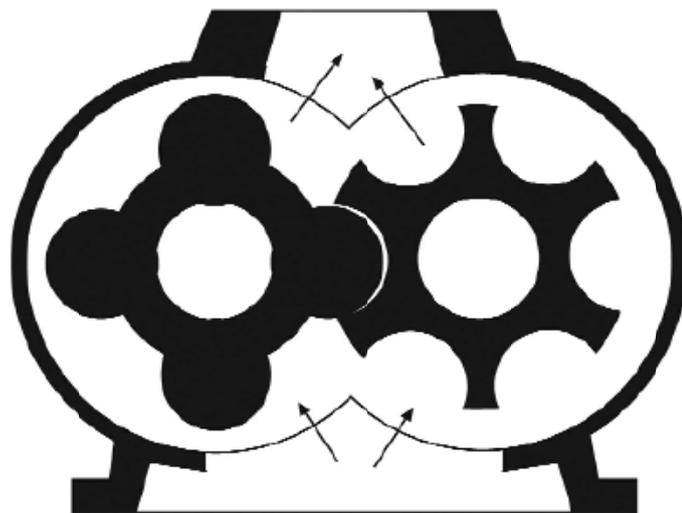
Esse tipo de compressor surgiu da necessidade de compressores que produzissem altas vazões, cerca de 10000 m<sup>3</sup>/h [26] e que mantivessem o comportamento estável com a variação da carga. Os compressores a parafuso podem ser isentos de óleo ou com injeção de óleo [22]. Suas características mais importantes são:

- Volume reduzido;
- Produção contínua de ar;
- Temperatura mais baixa no fim da compressão.

### 2.5.2.1 Princípio de Funcionamento

Dois rotores são montados em paralelo dentro de uma carcaça. Esses rotores, um “macho” e outro “fêmea” giram em sentidos opostos. Um dos parafusos recebe energia motriz e o outro é acionado pelo movimento transmitido por meio de engrenagens acionadas pelo primeiro rotor, conforme ilustra a Figura 2.14 [22].

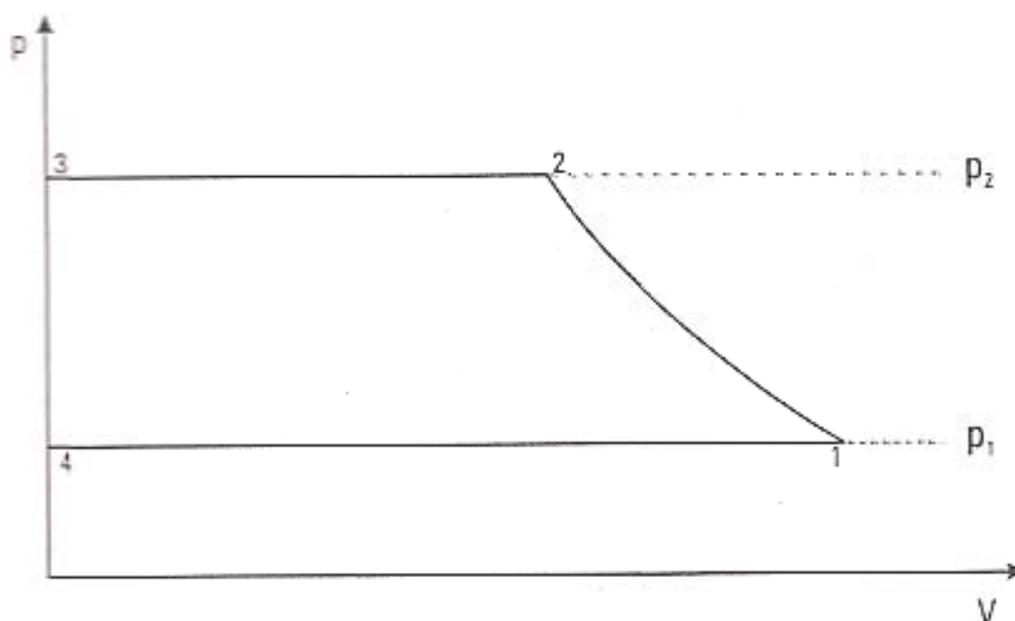
Devido à diferença entre o número de filetes em cada rotor com velocidades angulares diferentes, os espaços entre os rotores formam câmaras de compressão incluindo determinado volume de ar. Conforme os rotores giram, o volume de ar compreendido entre os mesmos é isolado da admissão e, em seguida, começa a decrescer iniciando a compressão que continua até o começo da abertura de descarga onde o ar é continuamente descarregado, livre de pulsações [27].



**Figura 2.14** *Compressor parafuso.*

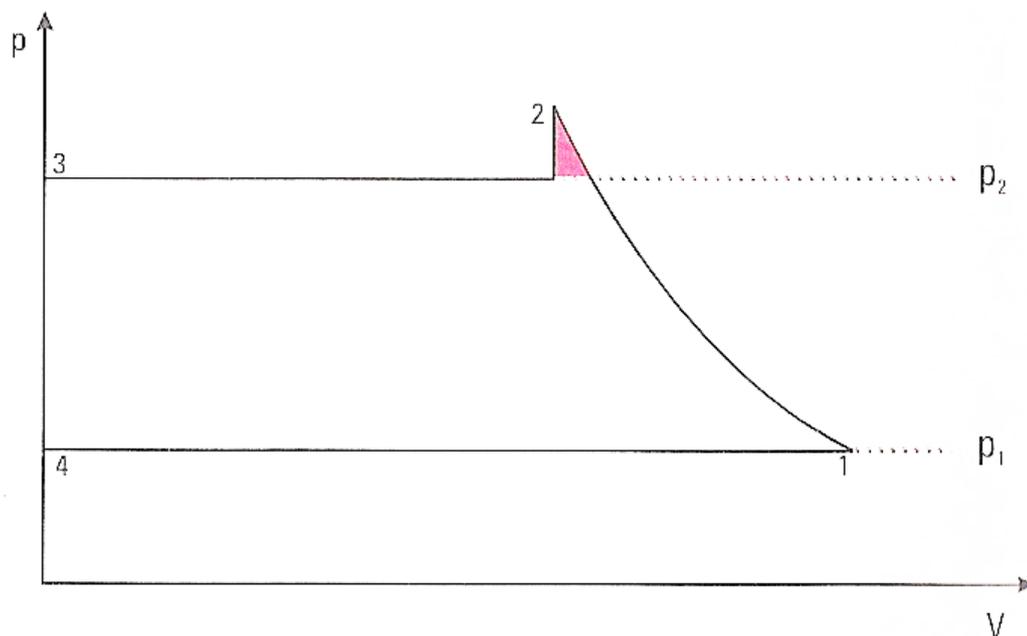
### 2.5.2.2 Ciclos de Compressão

Na Figura 2.15, é mostrado o ciclo de compressão ideal dos compressores a parafuso [23] em que a relação de compressão interna é igual à relação de compressão externa.

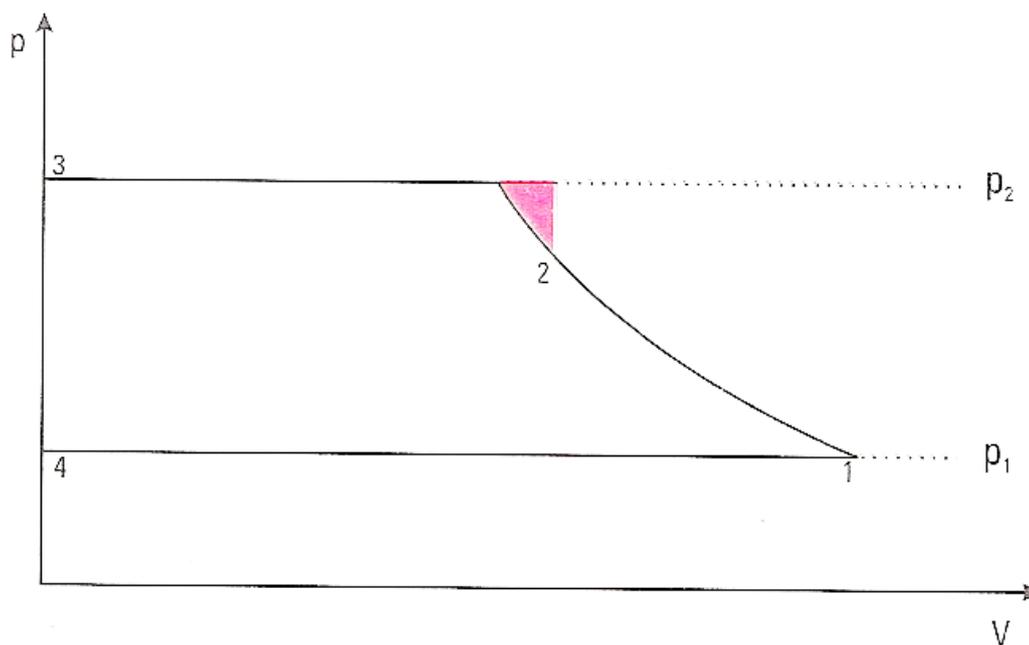


**Figura 2.15** *Compressores a parafuso: ciclo de compressão ideal.*

O ciclo de trabalho real deste compressor possui uma diferença em relação ao compressor a pistão: pode haver uma redução de pressão durante a descarga, com expansão do gás ou uma elevação da pressão com o retorno do gás comprimido para dentro do compressor como ilustra a Figura 2.16 e a Figura 2.17, respectivamente [23].



**Figura 2.16** Ciclos de compressão do compressor parafuso no caso em que a relação de compressão interna é maior do que a externa.



**Figura 2.17** Ciclos de compressão do compressor parafuso no caso em que a relação de compressão interna é menor do que a externa.

### 2.5.2.3 Formas Construtivas

Os compressores parafuso podem ser isentos de óleo ou com injeção de óleo. Os do primeiro tipo apresentam necessidade de sincronização dos rotores por meio de engrenagens. Já os com lubrificação, permite o contato direto entre os rotores. [26].

No modelo com injeção de óleo, ocorre injeção do óleo entre os dois rotores, tendo três funções básicas:

- Lubrificação dos rotores, eliminando a necessidade de sincronização entre os rotores, pois permite contato direto entre as paredes do filete;
- Vedação entre os rotores, reduzindo o refluxo de gás comprimido e, por consequência, o consumo específico de energia elétrica;
- Resfriamento da câmara de compressão. O calor gerado durante a compressão é absorvido pelo óleo e retirado do bloco do compressor, permitindo pressões de descarga elevadas com temperaturas finais do gás comprimido por volta de 100 °C.

Nos compressores insetos de óleo, uma folga menor entre os rotores minimiza o efeito de refluxo do gás comprimido. Como nenhum fluido retira o calor do bloco de compressão, como ocorre na injeção de óleo, a relação de compressão é menor.

Uma outra forma construtiva, menos usual, é da injeção de água [23]. Como a água não oferece lubrificação, esta forma construtiva também necessita de sincronização entre os rotores por meio de engrenagens externas. Um problema comum desta forma construtiva é o desenvolvimento de bactérias na água e o depósito de cal nas paredes dos filetes e da câmara de compressão.

Os compressores a parafuso podem apresentar um único estágio de compressão ou múltiplos estágios. No caso de múltiplos estágios, os elementos compressores geralmente são montados em série.

# 3 ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

## 3.1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o ar comprimido é utilizado para diversos fins: ferramentas pneumáticas, acionamentos, controles de equipamentos, transporte de materiais, etc. Depois da energia elétrica, o ar comprimido é a forma de energia mais consumida na indústria de transformação. É a forma de energia mais onerosa e também a mais negligenciada. Embora a matéria-prima seja gratuita, captada da atmosfera, o processo de compressão envolve motores elétricos, secadores, perdas na linha, etc.

Este capítulo tem como objetivo apresentar os tipos de partida disponíveis no LAMOTRIZ e realizar uma análise quanto à qualidade de energia elétrica. Além disso, é dado enfoque à distribuição do ar comprimido apresentando uma metodologia de diagnóstico energético para o cálculo de perda de energia devido a vazamentos e evidenciando a importância da escolha adequada da pressão de trabalho máxima regulada para o reservatório de ar comprimido, do ponto de vista da eficiência energética.

## 3.2 ANÁLISE DOS DIFERENTES TIPOS DE PARTIDA UTILIZADOS NA BANCADA DE SISTEMA DE COMPRESSÃO DE AR

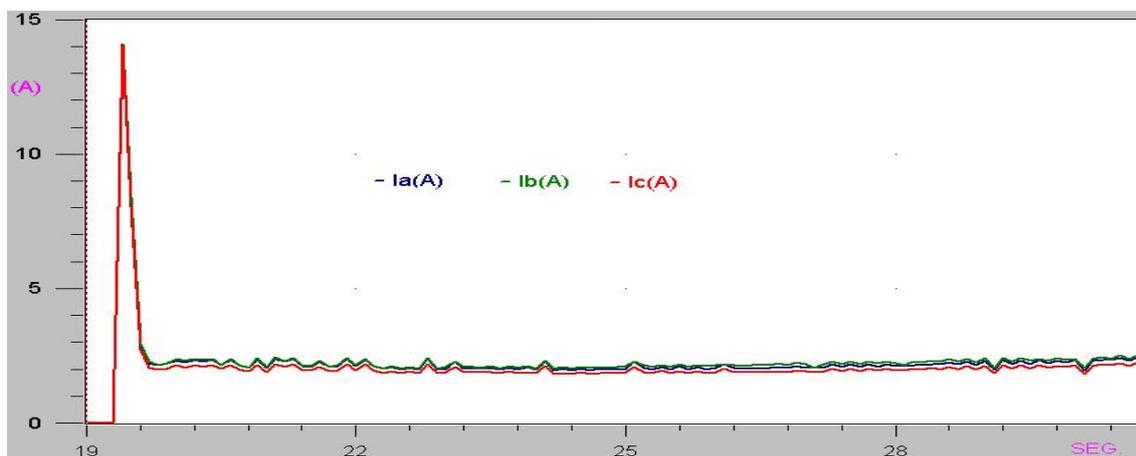
Iniciou-se o ensaio das bancadas com os três tipos de partidas possíveis, ou seja, a partida direta (PD), a partida suave com a *soft starter* (SS) e a partida controlada com o inversor de frequência (FC).

Abaixo seguem os gráficos construídos a partir dos dados registrados nos três tipos de partidas através do Analisador de Energia MARH-21.

### 3.2.1 Partida Direta

A seguir é analisado o comportamento da corrente, tensão, potências ativas e reativas e fator de potência na partida direta na bancada de sistemas de compressão de ar.

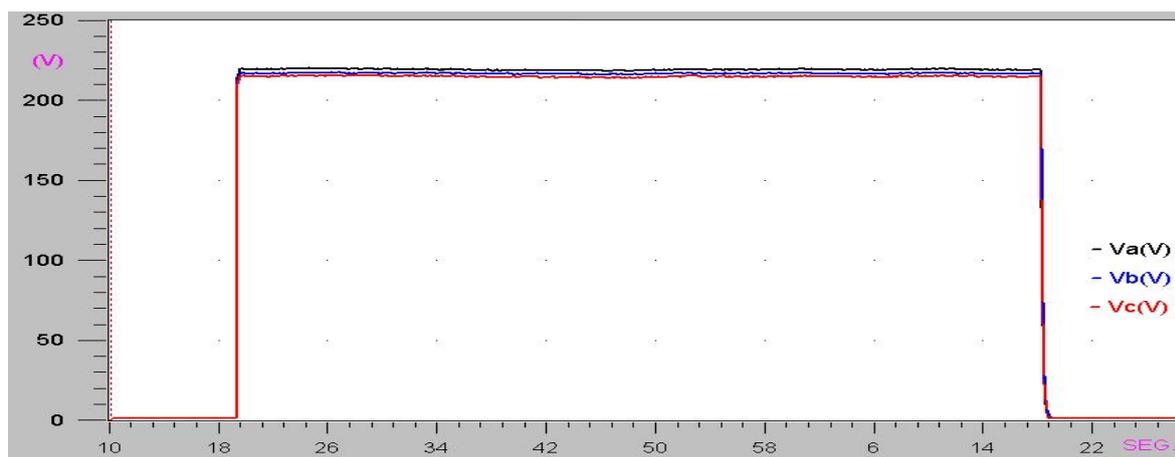
A Figura 3.1 apresenta o valor RMS da corrente registrada durante a partida direta na bancada de sistema de compressão de ar.



**Figura 3.1** Registro da corrente na partida direta na bancada de sistema de compressão de ar utilizando o Analisador de Energia MARH-21.

Como podemos observar na Figura 3.1, as correntes nas três fases na partida direta apresentam um pico de corrente de, aproximadamente 14 A.

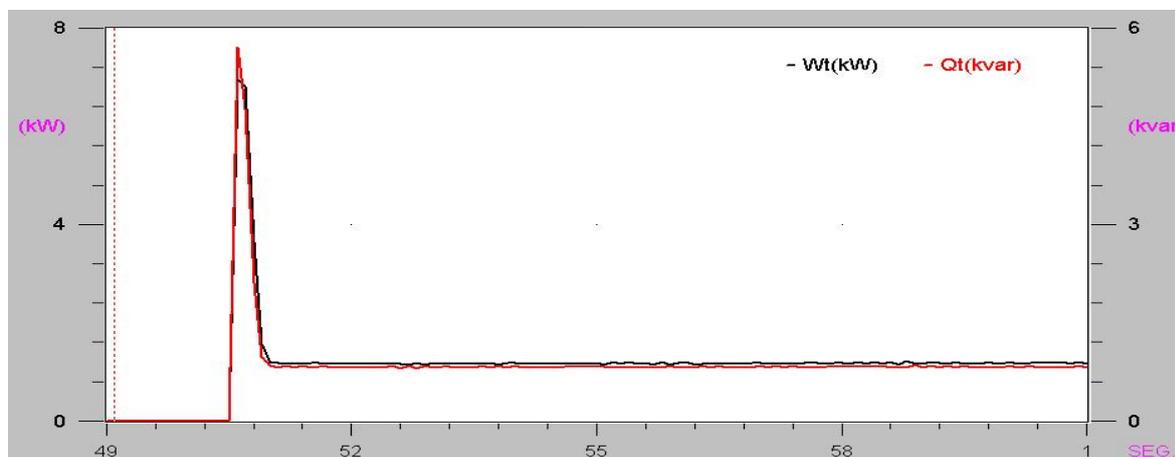
A Figura 3.2 apresenta a tensão registrada durante a partida direta na bancada de sistema de compressão de ar.



**Figura 3.2** Registro das tensões na partida direta na bancada de sistema de compressão de ar utilizando o Analisador de Energia MARH-21.

Essas tensões alimentam as três fases do motor. O valor nominal do sistema é 220V, sendo observada durante o experimento uma queda de tensão de aproximadamente 2,5%.

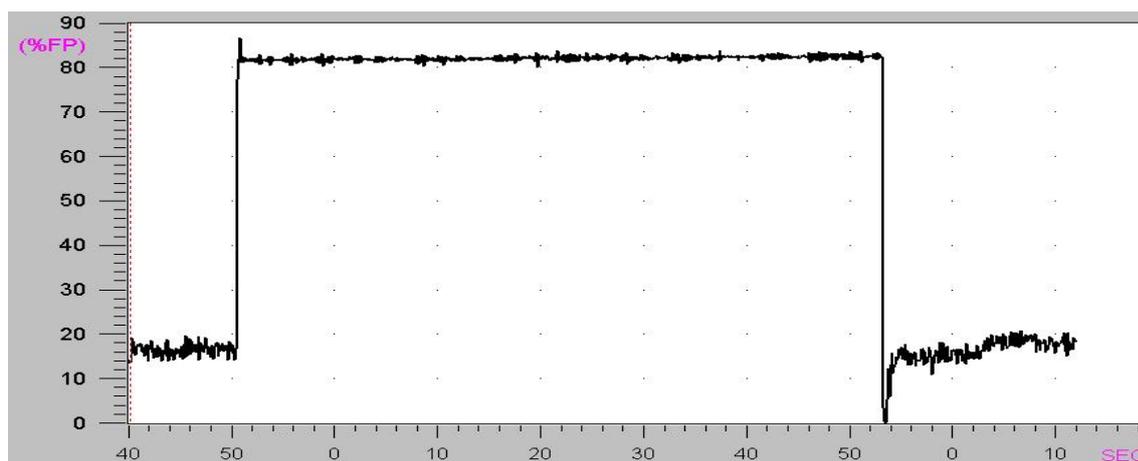
A Figura 3.3 apresenta as potências ativas e reativas registradas durante a partida direta na bancada de sistema de compressão de ar.



**Figura 3.3** Gráfico das potências ativas e reativas na partida direta do conjunto motor-compressor com a válvula de saída de ar 20% aberta.

Como é observado na Figura 3.3, tem-se um pico de potência reativa de 5790 Var e de potência ativa de 6956 W na partida. Em regime, a potência ativa continua maior que a reativa conforme o esperado.

A Figura 3.4 apresenta o fator de potência registrado durante a partida direta na bancada de sistema de compressão de ar.



**Figura 3.4** Gráfico do fator de potência na partida direta do conjunto motor-compressor com a válvula de saída de ar 20%.

Conforme se pode observar, o fator de potência mostrado na Figura 3.4 assume um valor razoavelmente aceitável de 0,83, visto que, o que é exigido pela concessionária local é 0,92.

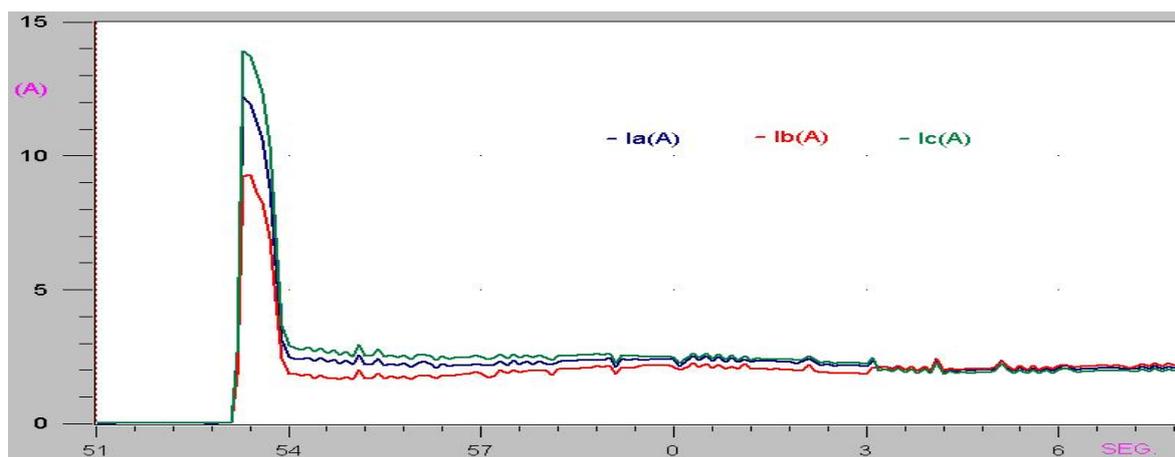
Em sistemas industriais utiliza-se correção de fator de potência para solucionar o problema.

É importante frisar que o motor utilizado na bancada é um motor de alto rendimento.

### 3.2.2 Partida Suave com *Soft Starter*

A seguir é analisado o comportamento da corrente, tensão, potências ativas e reativas e fator de potência na partida suave com a *soft starter* na bancada de sistema de compressão de ar.

A Figura 3.5 apresenta a corrente registrada durante a partida suave com *soft starter* na bancada de compressão de ar.



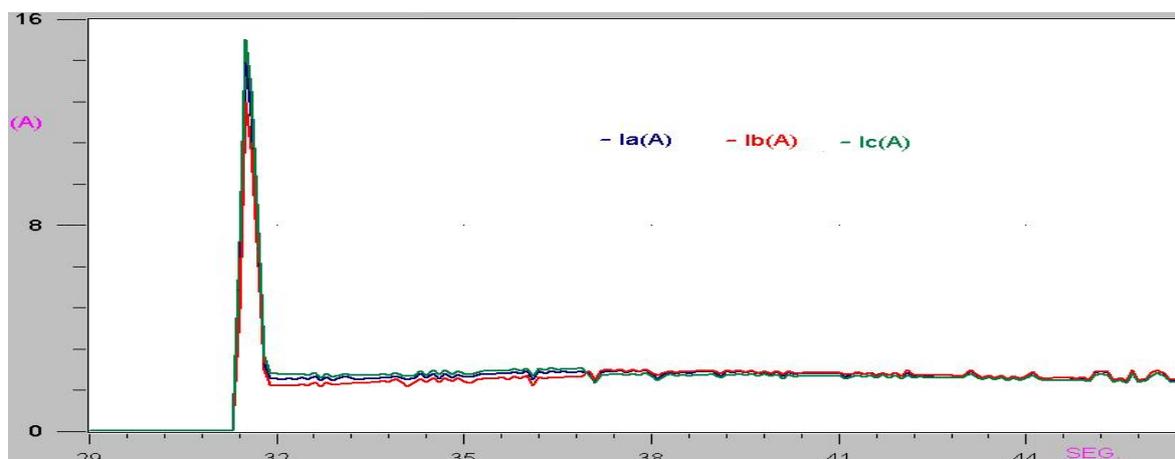
**Figura 3.5** Registro da corrente na partida suave utilizando a *soft starter* na bancada de sistema de compressão de ar utilizando Analisador de Energia MARH-21.

Conforme ilustra a Figura 3.5, a corrente da partida com a *soft starter* atinge um pico de 12.20 A na fase C, 9.02 A na fase B e 13.92 A na fase A. A corrente se apresenta desequilibrada, com um valor maior na fase C do que nas fases A e B. Isso ocorre devido ao fato da *soft starter* presente na bancada controlar apenas 2 fases (A e B).

Para obtermos uma redução na corrente de partida, é necessário ajustar os parâmetros da *soft starter*. A Figura 3.6 mostra que o ajuste não adequado dos parâmetros da *soft starter* pode provocar picos de correntes até maiores que na partida direta.

Tais parâmetros, que são o tempo de rampa de subida (0 a 20 segundos), a tensão aplicada ao motor a partir de uma tensão ajustável de partida (30 a 100%) por meio do

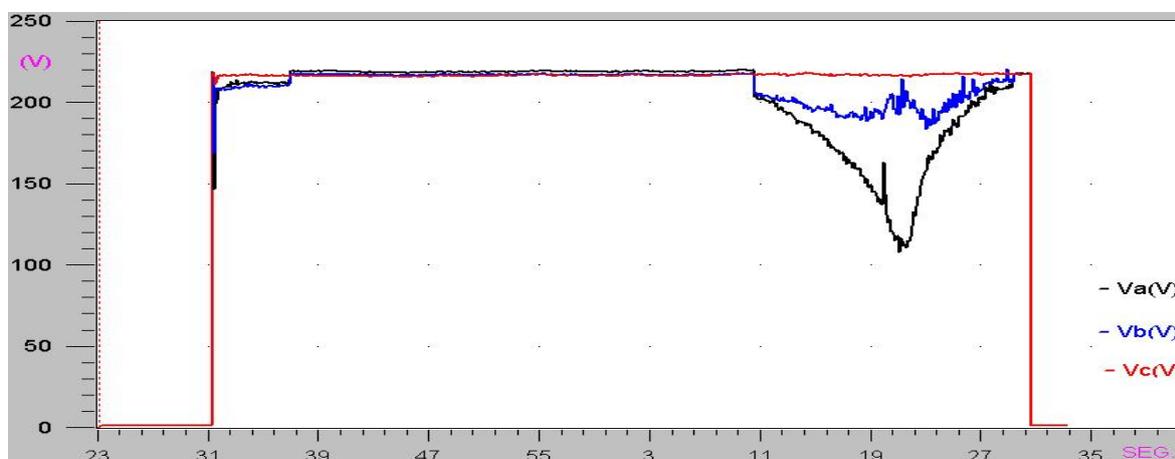
controle do ângulo de fase e o tempo de rampa de descida (0 a 20 segundos) podem ser ajustados por meio de um potenciômetro presente na parte externa da *soft starter*.



**Figura 3.6** Registro da corrente na partida suave utilizando a *soft starter* mal ajustada na bancada de sistema de compressão de ar utilizando Analisador de Energia MARH-21.

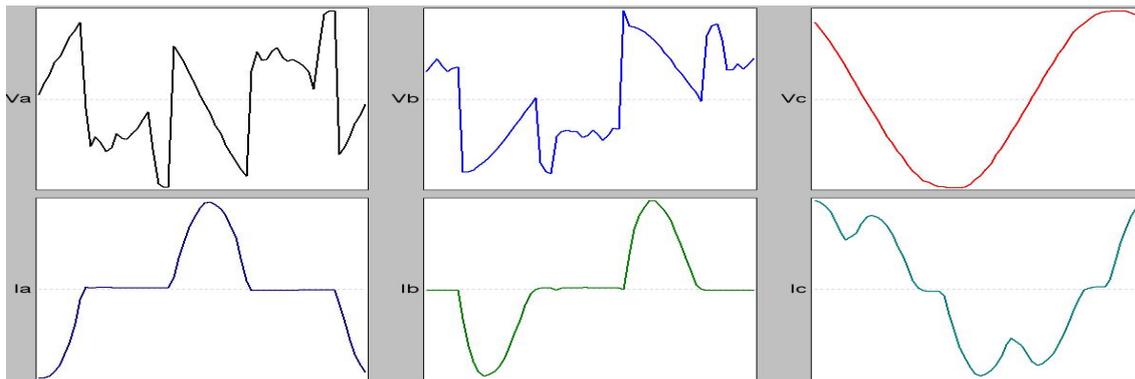
A corrente atingiu um pico de aproximadamente 14.30 A na fase A, 12.78 A na fase B e 15.22 A na fase C.

A Figura 3.7 apresenta a tensão registrada durante a partida suave com *soft starter* na bancada sistema de compressão de ar.



**Figura 3.7** Registro das tensões na partida suave com *soft starter* na bancada de sistema de compressão e ar utilizando Analisador de Energia MARH-21.

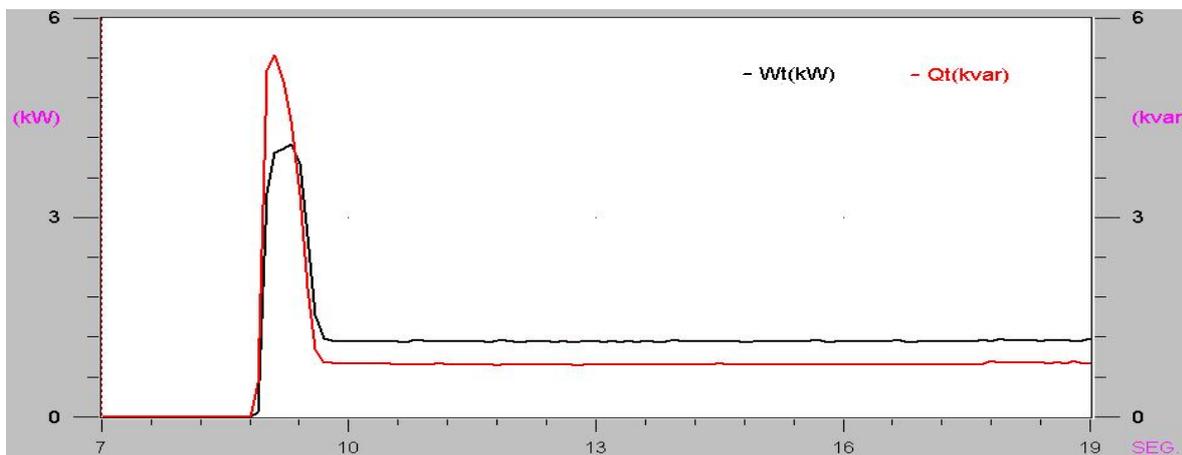
A Figura 3.8 mostra um ciclo da tensão registrada durante a partida com a *soft starter* da bancada de sistema de ar comprimido.



**Figura 3.8** Formas de onda registradas durante a partida suave com a *soft starter* da bancada de sistema de ar comprimido do LAMOTRIZ, momento inicial de ligação dos tiristores na fase A e B.

Como mostra a Figura 3.8, a tensão na fase C se comporta como na partida direta, uma vez que a *soft starter* presente nesta bancada não controla a fase C. Já nas fases A e B, ocorre uma diminuição da tensão, assim como uma distorção na forma de onda provocada pelo chaveamento dos tiristores no momento da partida e do desligamento.

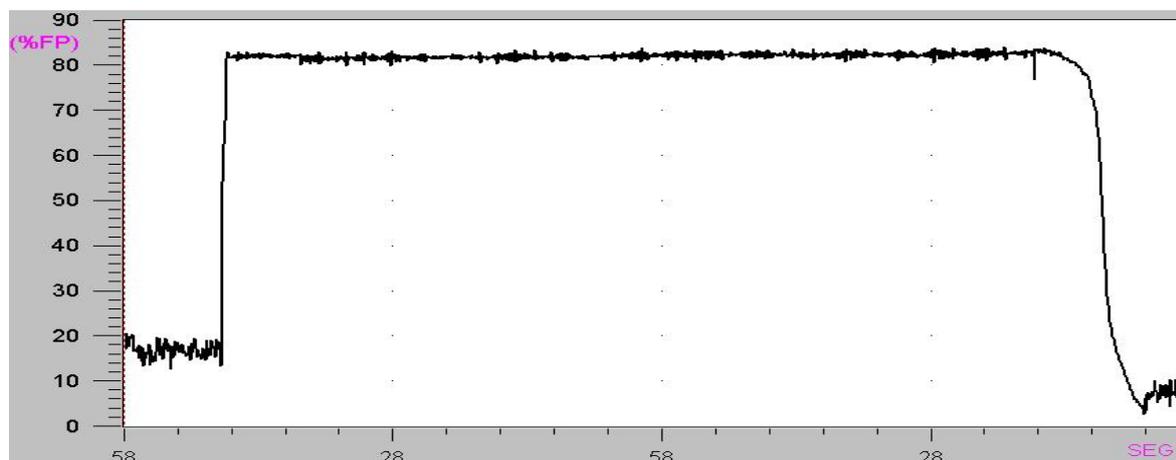
A Figura 3.9 apresenta as potências ativas e reativas registradas durante a partida suave com *soft starter* na bancada de sistema de compressão de ar.



**Figura 3.9** Gráfico das potências ativa e reativa na partida suave com a *soft starter* do conjunto motor-compressor com a válvula de saída de ar 20% aberta.

Como é observado na Figura 3.9, tem-se um pico de potência reativa de 5440 Var e de potência ativa de 4101 W, conforme era esperado devido à presença de harmônicos gerados pelo chaveamento dos tiristores presentes na *soft starter*, a potência reativa apresenta valor mais elevado do que a potência ativa. No entanto, após a partida, em regime permanente, observa-se que a potência ativa apresenta valor superior ao da potência reativa.

A Figura 3.10 apresenta o fator de potência registrado durante a partida suave com a *soft starter* na bancada de sistema de compressão de ar.



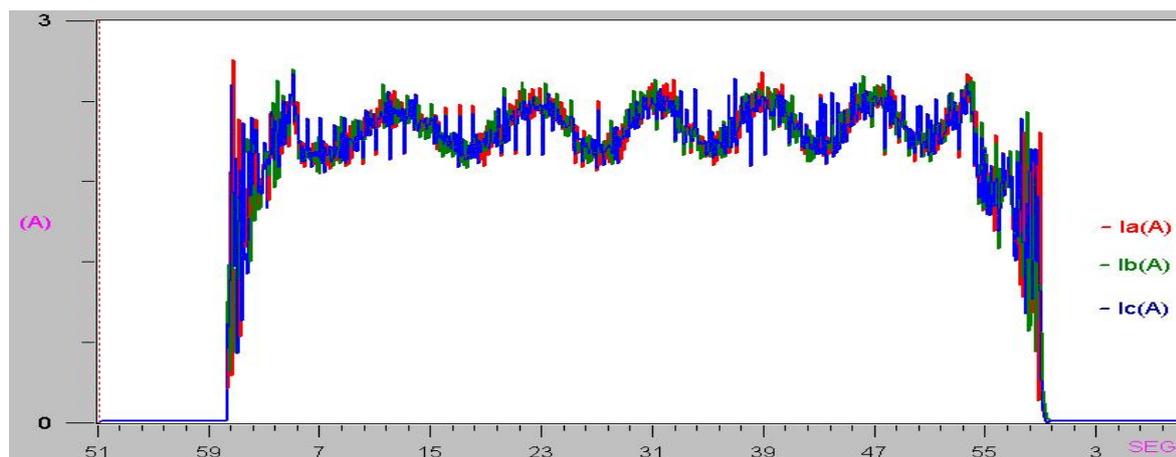
**Figura 3.10** Gráfico do fator de potência na partida suave com a *softstarter* do conjunto motor-compressor com a válvula de saída de ar 20% aberta.

O fator de potência mostrado na Figura 3.10 está em um valor razoavelmente aceitável de 0,82 semelhante ao da partida direta.

### 3.2.3 Partida Controlada com Inversor de Frequência

A seguir é analisado o comportamento da corrente, tensão, potências ativas e reativas e fator de potência na partida controlada com o inversor de frequência na bancada de sistema de compressão de ar.

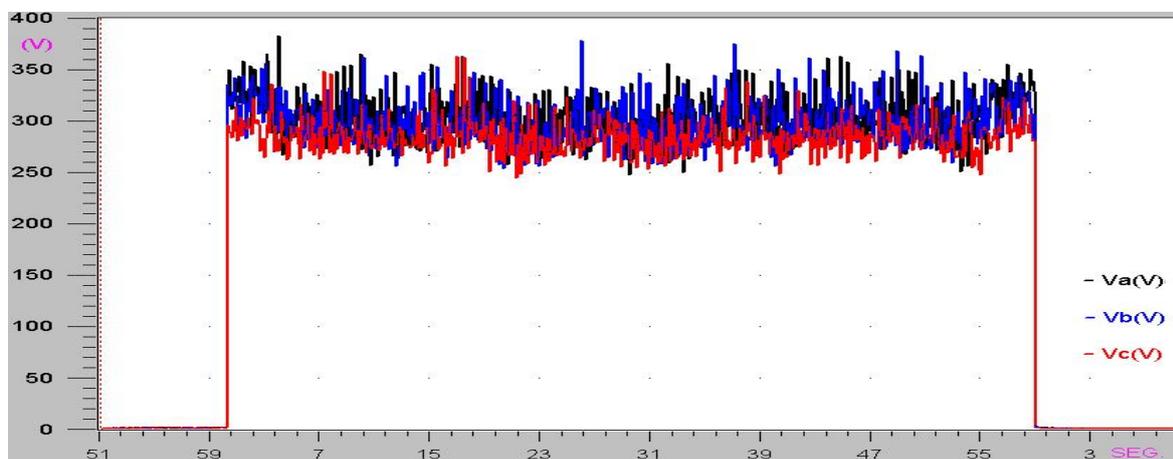
A Figura 3.11 apresenta a corrente registrada durante a partida controlada com o inversor de frequência na bancada de sistema de compressão de ar.



**Figura 3.11** Registro da corrente na partida suave utilizando o inversor de frequência na bancada de sistema de compressão de ar utilizando Analisador de Energia MARH-21.

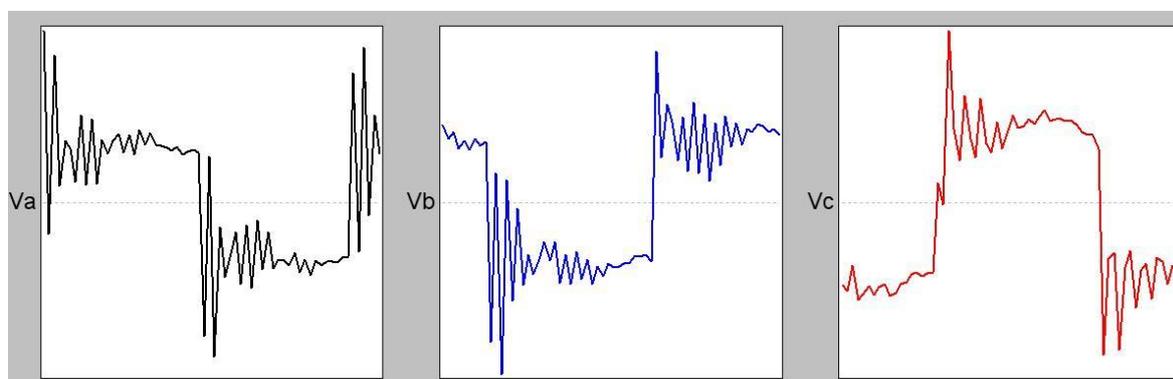
Como pode ser observado na Figura 3.11, as correntes da partida controlada com o inversor de frequência apresentam um valor de 2,34A, ou seja, aproximadamente a corrente nominal e bastante inferior à apresentada na partida direta, conforme Figura 3.11.

A Figura 3.12 apresenta a tensão registrada durante a partida controlada com o inversor de frequência na bancada de sistemas de compressão de ar.



**Figura 3.12** Gráfico da tensão na partida controlada com o inversor de frequência na bancada de sistema de compressão de ar utilizando o Analisador de Energia MARH-21.

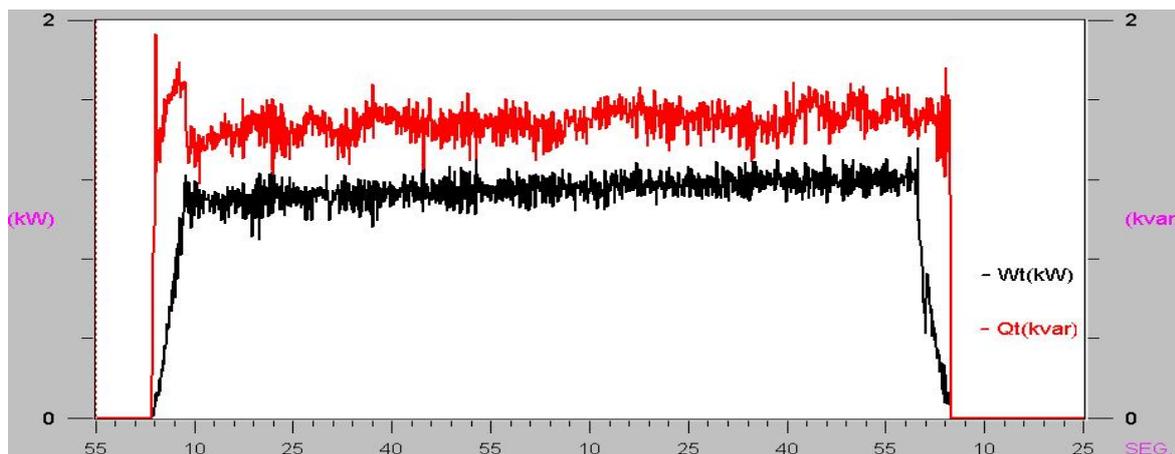
Na Figura 3.13, tem-se o registro de um ciclo da tensão aplicada ao motor durante a partida utilizando o inversor de frequência.



**Figura 3.13** Formas de onda registradas durante a partida suave com o inversor de frequência da bancada de sistema de compressão de ar do LAMOTRIZ.

Como podemos ver na Figura 3.12, as tensões apresentam valores em torno de 300V.

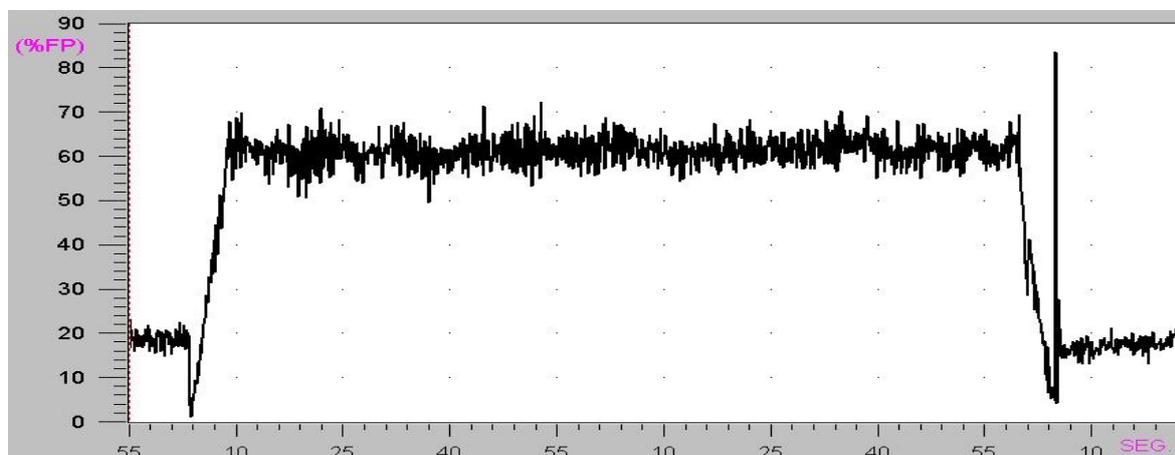
A Figura 3.14 apresenta as potências ativas e reativas na partida registradas durante a partida controlada com o inversor de frequência na bancada de sistema de compressão de ar.



**Figura 3.14** Gráfico das potências ativa e reativa na partida controlada com o inversor de frequência do conjunto motor-compressor com a válvula de saída de ar 20% aberta.

Como se pode ver na Figura 3.14, tem-se um pico de potência reativa (1931 Var) bem superior ao pico de potência ativa (1222 W) na partida. E, mesmo após a partida permanece uma diferença considerável entre as duas potências. Mas, mesmo assim, inferior às potências registradas na partida direta e na partida suave com a *soft starter*.

A Figura 3.15 apresenta o fator de potência registrado durante a partida controlada com o inversor de frequência na bancada de sistema de compressão de ar.



**Figura 3.15** Gráfico do fator de potência na partida controlada com o inversor de frequência do conjunto motor-compressor com a válvula de saída de ar 20% aberta.

O fator de potência mostrado na Figura 3.15 está em um valor baixo em torno de 0,67, bem inferior ao da partida direta e da *soft starter*.

### **3.3 COMPARAÇÃO ENTRE O USO DO CONTROLE PARTIDA E PARADA E O USO DO INVERSOR DE FREQUENCIA NO CONTROLE DA PRESSÃO**

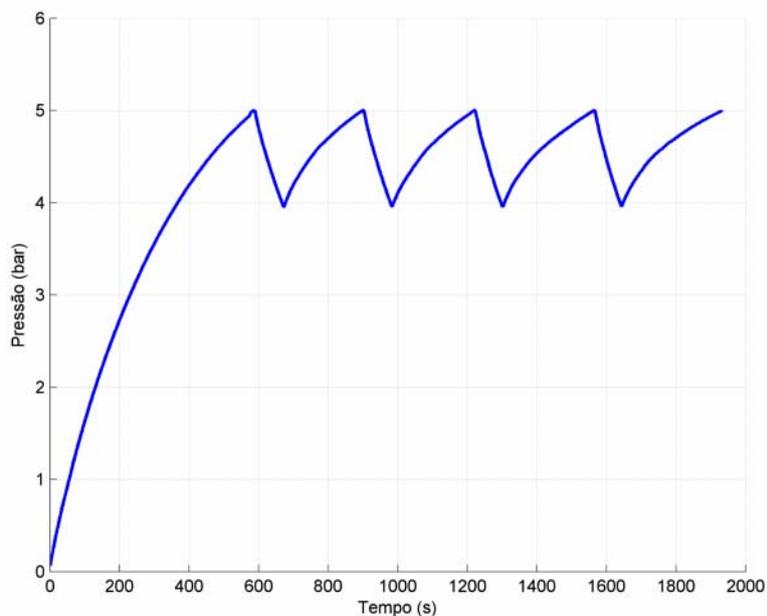
Este item traz uma comparação entre o controle Partida e Parada tradicionalmente utilizado na indústria em compressores recíprocos com potência de até 30 hp [28] e o controle usando o inversor de frequência. Foram realizadas comparações do ponto de vista da eficiência energética do sistema. Foi medida a potência ativa consumida utilizando-se os dois tipos de controle e em seguida foi analisado o consumo de energia em ambos os casos. É importante frisar que o controle partida e parada foi realizado utilizando a partida direta e a partida controlada com inversor de frequência. Foi calculada a economia de energia nos dois casos.

#### **3.3.1 Controle Partida e Parada**

O tipo de controle especificado para um determinado sistema de ar comprimido é basicamente determinado pelo tipo de compressor. A estratégia de controle utilizada deve ser criteriosamente escolhida, pois ela é um dos fatores que mais afeta o desempenho e a eficiência do sistema [22].

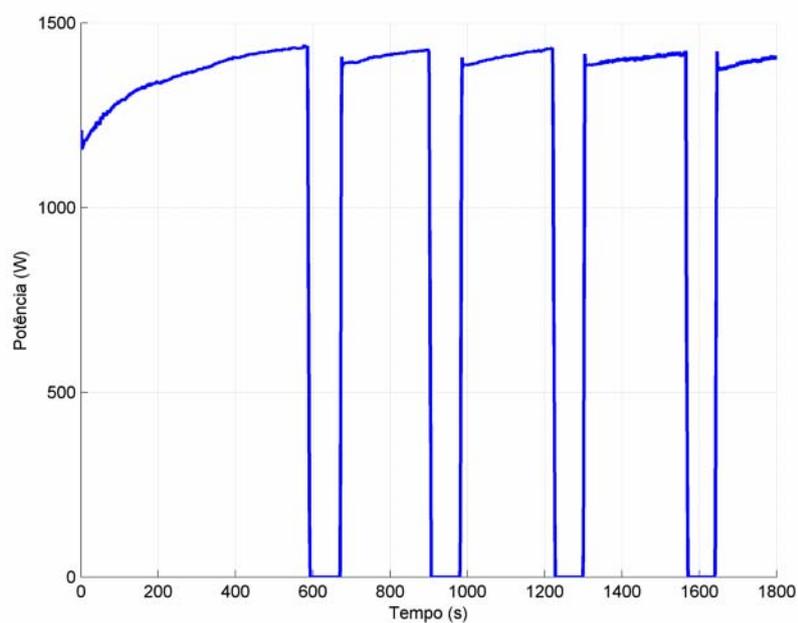
Compressores a pistão são controlados de forma que parem de funcionar completamente quando a pressão limite superior for alcançada e retornem ao funcionamento quando a pressão limite inferior for alcançada..

O sistema descrito aqui tem como limite superior 5 bar e como limite inferior 4 bar. A Figura 3.16 ilustra o comportamento da pressão utilizando o controle partida e parada.



**Figura 3.16** *Pressão utilizando o controle partida e parada*

A Figura 3.17 mostra a potência consumida utilizando-se o controle partida e parada para uma faixa de pressão de 4 a 5 bar.



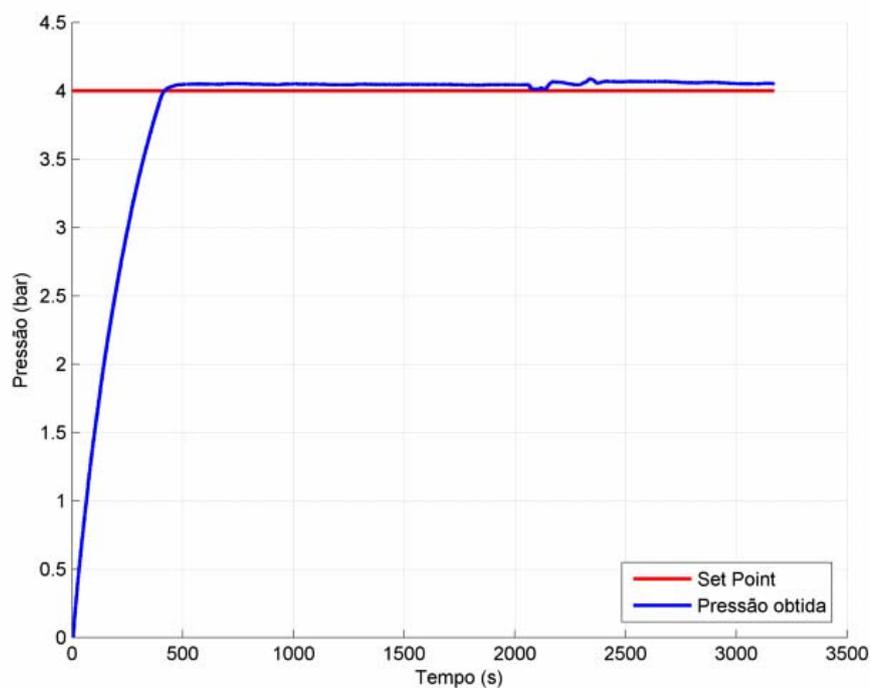
**Figura 3.17** *Potência consumida utilizando-se o controle partida e parada para uma faixa de pressão de 4 a 5 bar. Acionamento feito por partida direta.*

### 3.3.2 Controle Utilizando o Inversor de Frequência

Os inversores de frequência têm grande aplicação na indústria. Eles controlam a rotação e a velocidade do motor elétrico de forma a prover as demandas reais do processo diminuindo as perdas, propiciando assim uma considerável economia de energia [29]-31]. Além disso, reduz o desgaste mecânico nas máquinas durante a partida do motor.

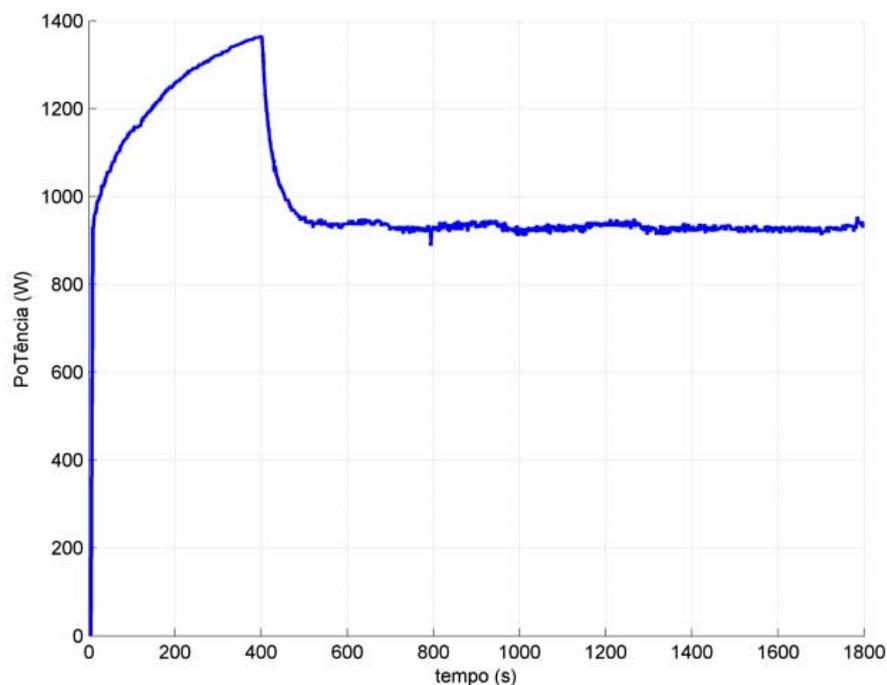
Compressores parafuso e a pistão são cargas de torque constante que podem utilizar o controle a velocidade variável para economizar energia [32], [33].

Foi implementado um controlador PI, de modo a controlar a velocidade do motor através do inversor de frequência para um dado *set point* de pressão. A Figura 3.18 mostra a resposta do controlador para um *set point* de 4 bar.



**Figura 3.18** Resposta do sistema utilizando o controlador PI para um set point de 4 bar.

A Figura 3.19 mostra a potência consumida utilizando-se o controlador PI para uma pressão de 4 bar.



**Figura 3.19** Potência consumida utilizando-se o controlador PI para uma pressão de 4 bar.

A Tabela 3.1 mostra o consumo de energia do sistema de compressão de ar 30 minutos em operação com o uso do controle partida e parada e 30 minutos em operação com o controlador PI. No caso do controle partida e parada, foi utilizada uma faixa de pressão de 4 (limite inferior) a 5(limite superior) bar. Para o caso do PI, foi utilizada uma pressão de trabalho de 4 bar.

Conforme se pode observar na Tabela 3.1, a operação do compressor utilizando um controlador PI consegue uma economia significativa em relação ao uso do controle partida e parada.

**Tabela 3.1** Comparação de Consumo de Energia

Tipo de Acionamento	Pressão (bar)	Consumo (kWh)		Economia (%)
		Partida e Parada	PI	
Inversor de frequência	4	0.5695	0.4996	12.34
Partida direta	4	0.5819	-	14.25

Vale salientar que a Tabela 3.1 mostra uma economia considerável para fins industriais e que pode ser ainda maior para outros pontos de operação não discutidos aqui.

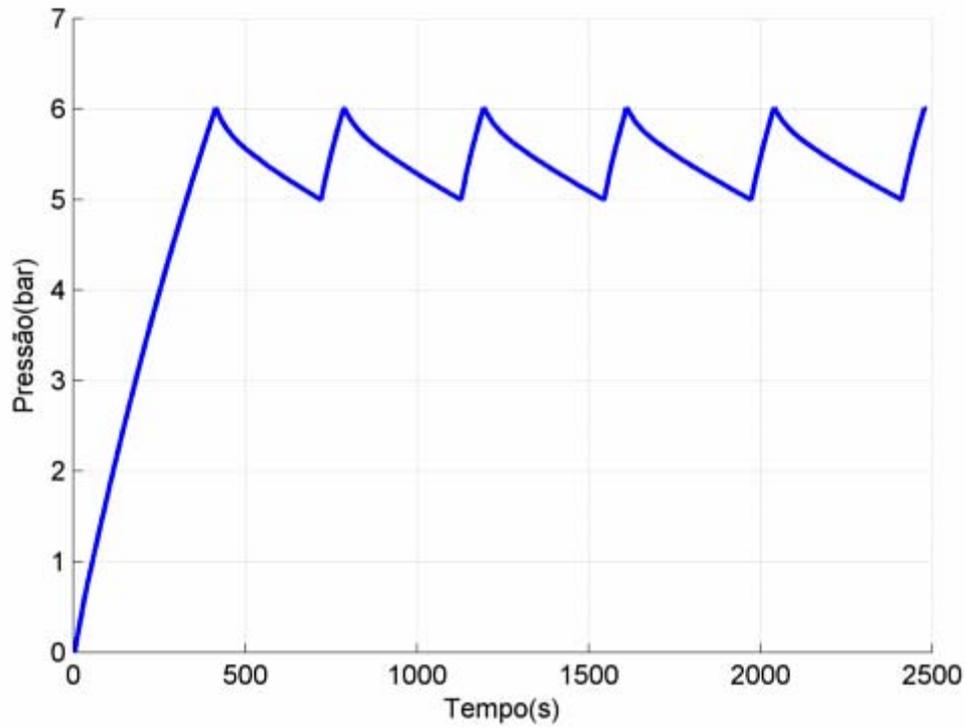
### **3.4 AUMENTO DO CONSUMO DE ENERGIA COM O AUMENTO DA PRESSÃO DE OPERAÇÃO DO SISTEMA**

Outro aspecto importante a ser observado nos sistemas de ar comprimido é a pressão máxima de geração de ar. Essa pressão de operação afeta significativamente o consumo de energia que aumenta com o aumento da pressão de trabalho. Uma pressão inadequada resulta em maior perda de rendimento. Quanto maior a pressão do sistema, maior também será a perda por vazamento [34].

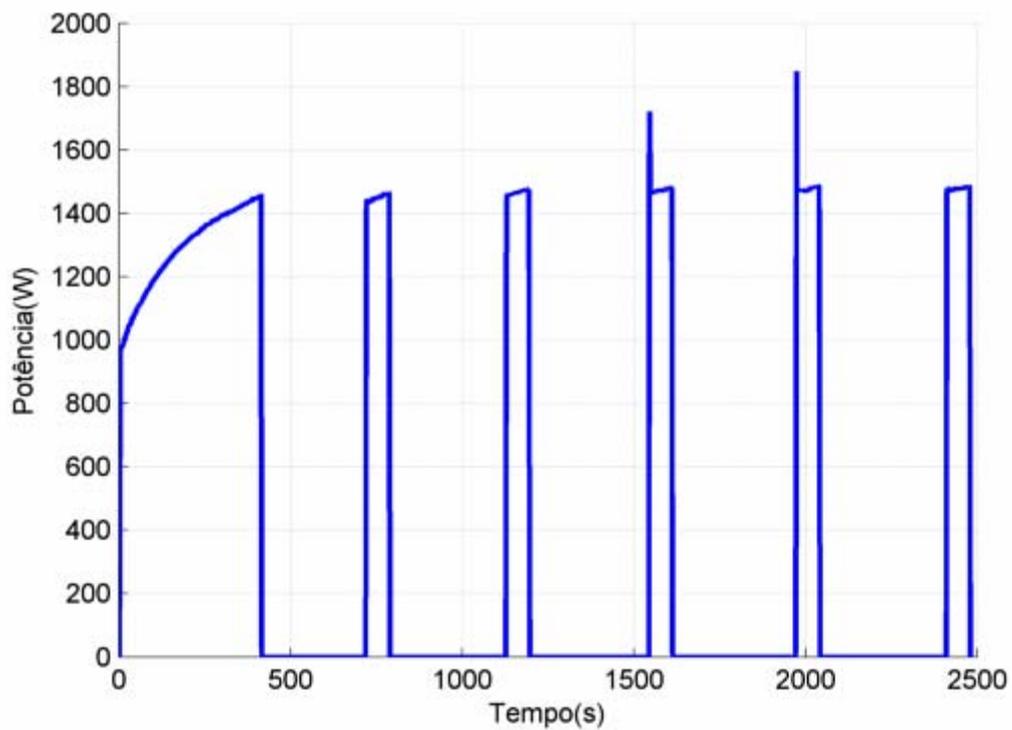
A pressão de operação de uma instalação é definida pela pressão que atenda às especificações dos equipamentos consumidores considerando as perdas existentes na distribuição do ar [35]. Esta pressão deve ser escolhida de forma a ser a menor pressão que consiga atender à carga, pois uma pressão mais elevada leva o compressor a funcionar mais tempo que o necessário, aumentando assim o consumo de energia elétrica. Alguns dos motivos que levam a pressões elevadas desnecessariamente são os seguintes [35]:

- Existência de equipamentos que necessitam de pressão mais elevada, enquanto a grande maioria dos equipamentos necessita de pressões bem inferiores;
- Tentativa de suprir perdas por vazamento;
- Reservatório sub-dimensionado. Tenta-se compensar demandas maiores elevando a pressão.
- Falta de conhecimento do pessoal de operação.

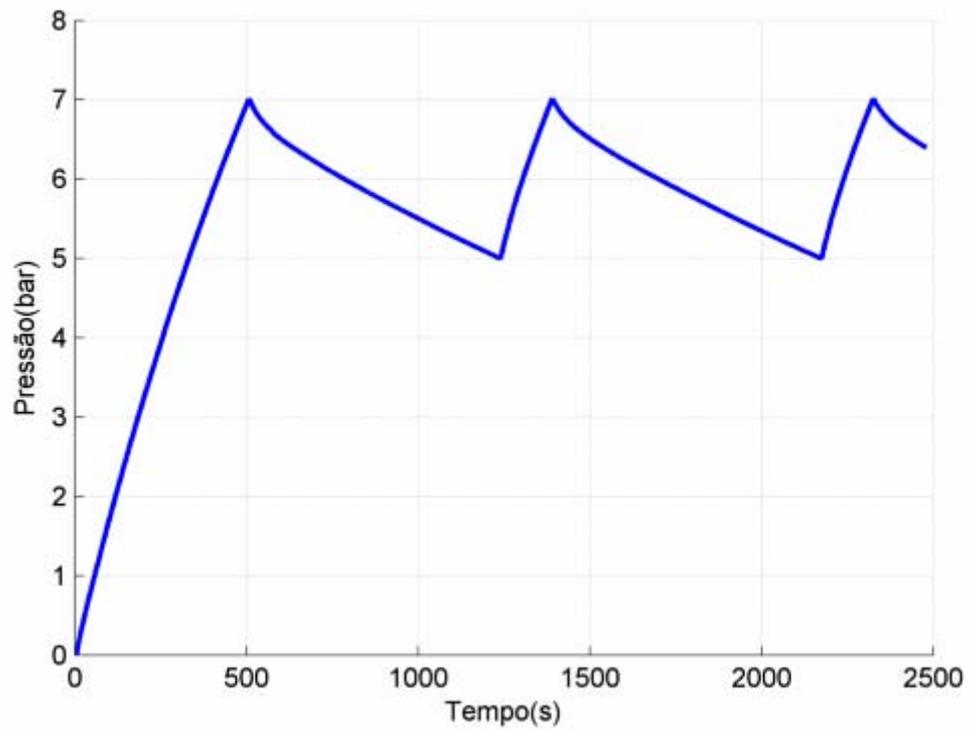
Foi realizado na bancada de sistemas compressão de ar do LAMOTRIZ um teste utilizando o controle partida e parada variando a pressão de desarme do compressor de 1bar com o objetivo de medir o aumento no consumo de energia elétrica do sistema. A pressão de religamento foi definida como sendo 5 bar. No primeiro ensaio, foi definida a pressão de desarme como sendo 6 bar. Já no segundo ensaio, definiu-se 7 bar como pressão de desarme. Foi analisado o consumo de energia nos dois casos. É importante frisar que os dois ensaios tiveram o mesmo tempo de duração. A Figura 3.20 ilustra o comportamento da pressão e a Figura 3.21 mostra a potência consumida pelo motor para um ajuste de 6 bar. A Figura 3.22 e a Figura 3.23 apresentam o comportamento da pressão e da potência respectivamente, para um ajuste de 7 bar



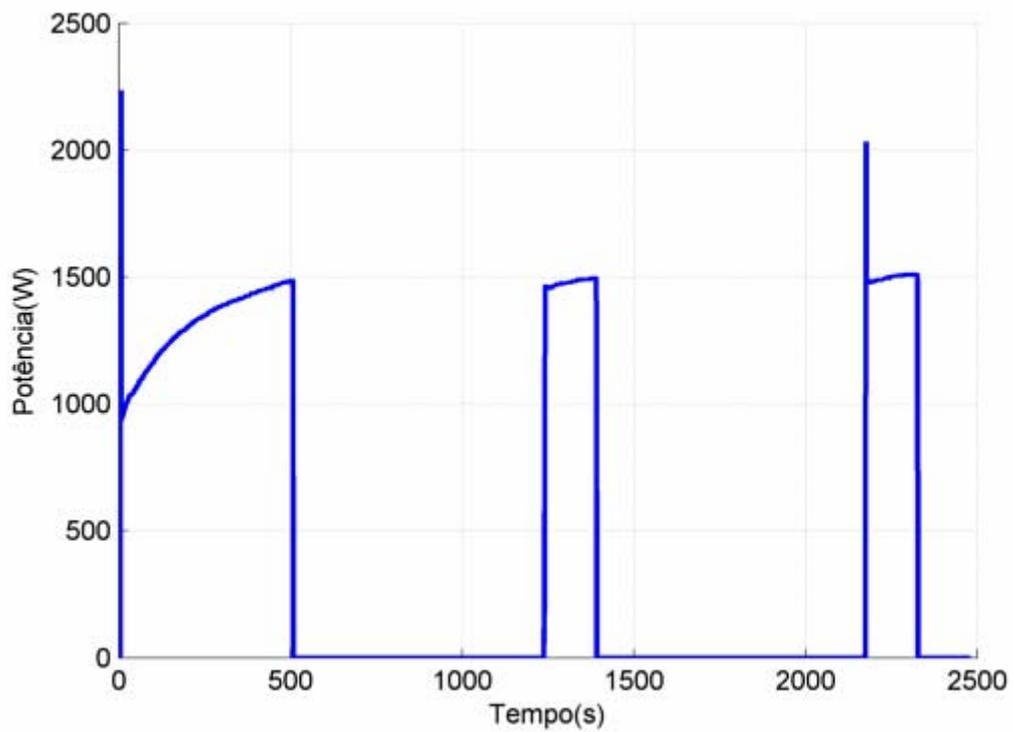
**Figura 3.20** Comportamento da pressão para uma pressão de desarme de 6 bar .



**Figura 3.21** Potência consumida para uma pressão de desarme de 6 bar.



**Figura 3.22** Comportamento da pressão para uma pressão de desarme de 7 bar.



**Figura 3.23** Potência consumida para uma pressão de desarme de 7 bar.

Calculando-se o consumo de energia para uma pressão de 6 bar, obteve-se 0,2846 kWh. Já para uma pressão de 7 bar, o consumo medido foi de 0,382 kWh, o que corresponde a um aumento de aproximadamente 34% no consumo de energia para um aumento de 1 bar na pressão de desarme do sistema.

O percentual de perdas devido à pressão elevada foi determinado calculando-se a área do gráfico da potência no tempo, mas também pode ser encontrado utilizando a equação (3.1):

$$P_{\%} = \left[ 1 - \frac{\left( \sqrt[n]{r_{p'}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\left( \sqrt[n]{r_p} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1} \right] \cdot 100 \quad (3.1)$$

Onde:

$P_{\%}$  = percentual de perdas devido à pressão elevada;

$r_p$  = relação de compressão original;

$r_{p'}$  = relação de compressão pós otimização;

$n$  = número de estágios de compressão;

$k$  = coeficiente adiabático (isentrópico).

Para o ar, o coeficiente isentrópico  $k$  varia pouco em condições normais de trabalho e pode ser assumido como sendo igual a 1,41 [23].

A relação de compressão é dada pelas equações (3.2) e (3.3):

$$r_p = \frac{p_1 + p_{atm}}{p_{atm}} \quad (3.2)$$

$$r_{p'} = \frac{p_1' + p_{atm}}{p_{atm}} \quad (3.3)$$

Onde:

$r_p$  = relação de compressão;

$p_1$  = pressão máxima em bar;

$p_1'$  = pressão otimizada;

$p_{atm}$  = pressão atmosférica em bar;

$r_{p'}$  = relação de compressão pós otimização.

### 3.5 PERDAS POR VAZAMENTO

Geralmente, nas instalações industriais de ar comprimido, não há verificação nem manutenção periódica das linhas de distribuição. Considera-se perda de tempo parar a produção para fazer manutenção. Os vazamentos existentes normalmente são negligenciados e representam de 10% a 40% da demanda máxima de ar comprimido de um sistema [36], [37]. Tais vazamentos contribuem para um aumento significativo do consumo de energia elétrica e, conseqüentemente, do custo final do ar comprimido [38].

O valor máximo admissível para vazamentos é de 5% da capacidade instalada para indústrias de médio porte que não possuem ferramentas como: martelletes, esmilhadeiras, etc. Para indústrias de caldeirarias pesadas, construção civil, por exemplo, é admissível um valor máximo de 10% [39].

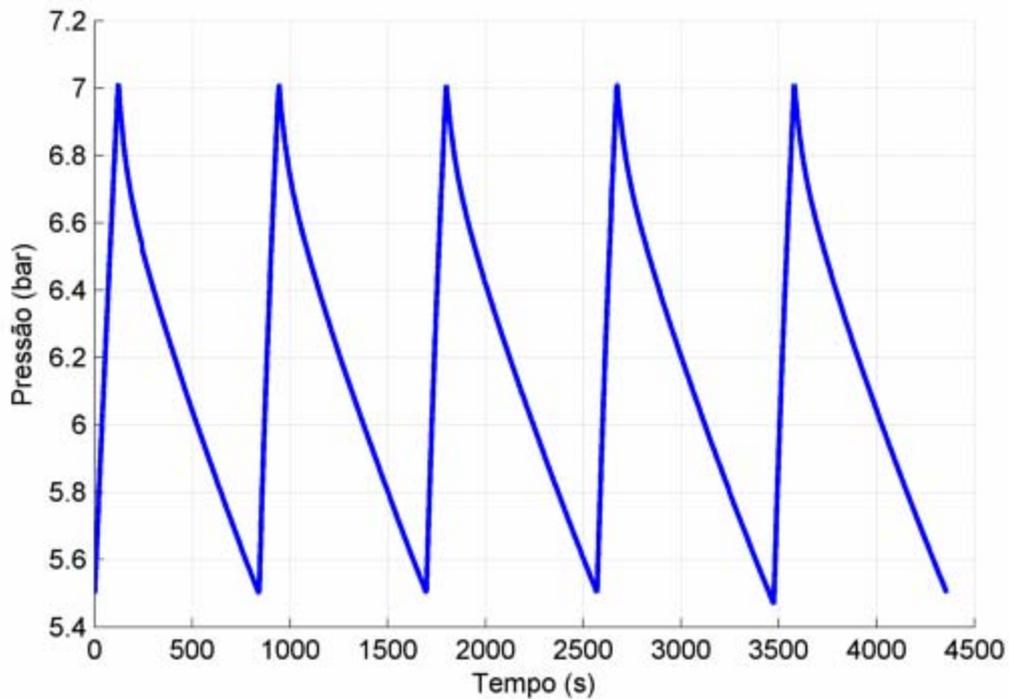
A metodologia que será utilizada permite o cálculo do desperdício de energia devido a vazamentos. O método empregado para quantificar vazamentos é o da medição do tempo em carga [23]. Para realização do teste utilizando-se este método, é necessário que a estação consumidora de ar comprimido esteja fora de operação, porém, existem atualmente muitos recursos para detectar vazamentos com aparelhagens específicas que utilizam os princípios do ultrassom, não sendo necessário assim desligar a estação consumidora e conseqüentemente interromper a produção na fábrica. Os procedimentos adotados para a realização da medição do tempo em carga são os seguintes:

- Desligar todos os consumidores de ar comprimido;
- Ligar o compressor a ser utilizado para o teste e esperar que o mesmo encha o reservatório de ar comprimido até a sua pressão de trabalho normal;
- Medir os tempos em carga do compressor durante pelo menos cinco ciclos de compressão (carga/alívio);
- Medir o tempo total necessário para completar os ciclos de compressão do teste.

Durante o teste, o volume de ar deslocado ao longo do tempo de compressão efetiva é aproximadamente equivalente ao ar que atravessa os orifícios de vazamento durante a somatória dos tempos de compressão e alívio do compressor (é como se os vazamentos fossem um consumidor virtual).

O tempo de funcionamento em carga durante a medição é o somatório de todos os tempos parciais de funcionamento em carga durante o tempo total de medição. A Figura 3.24 ilustra o comportamento da pressão durante o teste, podendo ser visualizado o tempo

em carga e o tempo em alívio do compressor. Foi utilizada a abertura da válvula solenóide presente na bancada para simular o vazamento a ser mensurado.



**Figura 3.24** Representação gráfica da pressão medida durante o teste para a medição de vazamentos realizado na bancada de sistema de compressão de ar presente no LAMOTRIZ.

A fórmula para o cálculo do caudal do vazamento por este método é apresentada na equação (3.4).

$$V_V = V_C \cdot \frac{\sum_i^m t_{c_i}}{t_t} \quad (3.4)$$

Onde:

$V_V$ = caudal do vazamento

$V_C$ = vazão de ar do compressor (dado de placa do compressor)

$\sum t_c$ = tempo de funcionamento em carga, durante a medição

$t_t$ = tempo de medição total

$m$ = número de ciclos de carga/alívio na medição

O percentual de perdas por vazamento é determinado pela equação (3.5).

$$V_{\%} = \frac{V_V}{\sum_{i=1}^c V_{c_i}} \cdot 100 \quad (3.5)$$

Onde:

$V_{\%}$  = percentual de perdas por vazamento

$V_v$  = caudal do vazamento

$\sum_{i=1}^c V_{c_i}$  = vazão total de todos os compressores

$c$  = número de compressores do sistema

O custo devido a vazamentos é determinado pela equação (3.6):

$$C_V = C_{ac} \frac{V_{\%}}{100} \quad (3.6)$$

Onde:

$C_V$  = custo da perda por vazamentos

$C_{ac}$  = custo anual da geração de ar comprimido, em carga

$V_{\%}$  = percentual de perdas por vazamento

É importante estar atento à vazão de ar especificada na placa do compressor. Esse dado corresponde à vazão quando o compressor está trabalhando na sua pressão nominal. Entretanto nem sempre o compressor está ajustado para operar à pressão nominal.

Geralmente, a pressão de operação do compressor é menor que sua pressão nominal. Sendo assim, a vazão do compressor será maior para um ponto de menor pressão.

Os dados do sistema de compressão simulado através da bancada didática do LAMOTRIZ no qual foi realizado o teste foram os seguintes:

- Vazão de ar do compressor: 21,33 m<sup>3</sup>/h para uma pressão de 7 bar;
- Pressão limite superior: 7 bar;
- Pressão limite inferior: 5,5 bar;
- Tempos de funcionamento em carga: 122 s, 99 s, 104 s, 118 s, 111 s;
- Tempo total de medição: 4358 s

Substituindo os dados citados acima e a equação (3.4) obtemos:

$$V_V = 21,33 \cdot \frac{(122 + 99 + 104 + 118 + 111)}{4358} = 2,71 \text{ m}^3/\text{h}$$

Substituindo o caudal do vazamento encontrado na equação (3.5), encontramos o percentual de perdas por vazamento:

$$V_{\%} = \frac{2,71}{21,33} \cdot 100 = 12,71\%$$

Tendo o valor do custo anual de geração de ar comprimido e utilizando a equação (3.6), pode-se obter o custo com vazamentos.

# 4 SISTEMAS INTELIGENTES EM CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS

## 4.1 INTRODUÇÃO

Sistemas de controle fornecem resposta a uma determinada entrada de acordo com a função de transferência. Os “sistemas inteligentes” são aqueles que solucionam problemas fornecendo respostas apropriadas às situações específicas destes problemas, mesmo que sejam novas ou inesperadas, fazendo com que tal comportamento seja “único”. A operação de sistemas inteligentes é geralmente associada às analogias com sistemas biológicos, por exemplo, ao se observar uma pessoa cumprindo determinadas tarefas de controle, reconhecendo padrões, ou tomando decisões.

Inteligência Artificial é a parte da ciência da computação envolvida no projeto de sistemas que exibem características que associamos com inteligência no comportamento humano [40]. Entre as técnicas utilizadas na área de Inteligência Artificial, estão os sistemas baseados na Lógica Fuzzy.

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma introdução à Lógica Fuzzy e sua importância para o desenvolvimento deste trabalho.

## 4.2 LÓGICA FUZZY

A Lógica Fuzzy é uma técnica que incorpora a forma humana de pensar em um sistema de controle. Um controlador fuzzy típico pode ser projetado para comportar-se conforme o raciocínio dedutivo, isto é, o processo que as pessoas utilizam para inferir

conclusões baseadas em informações que elas já conhecem. Por exemplo, operadores humanos podem controlar processos industriais e plantas com características não-lineares e até com comportamento dinâmico pouco conhecido, através de experiência e inferência de relações entre as variáveis do processo. A Lógica Fuzzy pode capturar esse conhecimento em um controlador fuzzy, possibilitando a implementação de um controlador computacional com desempenho equivalente ao do operador humano.

### 4.2.1 Subconjuntos Fuzzy

A teoria de subconjuntos *fuzzy* nasceu da constatação de que quando a complexidade de um sistema aumenta, nossa habilidade para concluir fatos e tomar decisões que sejam ao mesmo tempo precisos e significativos, tende a diminuir até um limite a partir do qual precisão e relevância passam a ser características quase excludentes [40]. Desta forma, esta teoria de subconjuntos *fuzzy* teve como objetivo criar um sistema que permitisse representar conhecimentos complexos, incertos, contraditórios e incompletos de uma maneira matemática e lógica [40].

Um subconjunto  $A$  de  $X$  é definido por uma função característica  $\mu$ , chamada de função de pertinência, que associa a cada elemento de  $X$  um grau  $\mu_A(x)$  compreendido entre 0 e 1, com o qual  $x$  pertence a  $A$  [41], [42]. O intervalo numérico de todos os possíveis valores reais que uma variável específica pode assumir é denominado universo de discurso.

### 4.2.2 Fuzzificação

Fuzzificação é um mapeamento do domínio de números reais para o domínio fuzzy. Fuzzificação também representa que há atribuição de valores lingüísticos, descrições vagas ou qualitativas, definidas por funções de pertinência às variáveis de entrada. A fuzzificação é uma espécie de pré-processamento de categorias ou classes dos sinais de entrada, reduzindo grandemente o número de valores a serem processados [41].

### 4.2.3 Regras de Inferência Fuzzy

Uma regra *fuzzy* ou inferência *fuzzy* relaciona conjuntos *fuzzy* do seguinte modo: **SE**  $X = A$  **ENTÃO**  $Y = B$ , onde  $A \subset B$  e  $B \subset Y$ . Um controlador *fuzzy* contém muitas destas inferências e todas são ativadas ao mesmo tempo. Quando uma entrada é fornecida,

um controlador *fuzzy* dispara cada regra em paralelo com graus diferentes, dependendo de um peso chamado grau de pertinência, que é um número no intervalo de  $[0,1]$  associado a cada regra, para inferir um resultado ou saída. A forma geral de uma regra *fuzzy* é:

**SE** <condições> **ENTÃO** <conclusão>

As condições relacionam-se a valores *fuzzy* lingüísticos de uma ou mais variáveis, como por exemplo:

**SE** pressão = <muito baixa> **E** temperatura = <média> **ENTÃO** válvula = <abrir um pouco>

#### 4.2.4 Defuzzificação

Na defuzzificação, o valor da variável lingüística de saída inferida pelas regras *fuzzy* será traduzido num valor discreto. O objetivo é obter um único valor numérico discreto que melhor represente os valores *fuzzy* inferidos da variável lingüística de saída. Assim, a defuzzificação é uma transformação inversa que traduz a saída do domínio *fuzzy* para o domínio discreto. Para selecionar o método apropriado de defuzzificação, pode-se utilizar um enfoque baseado no centróide ou nos valores máximos que ocorrem na função de pertinência resultante.

### 4.3 CONFIGURAÇÃO BÁSICA DE UM CONTROLADOR FUZZY

Um controlador *fuzzy* é composto dos seguintes blocos funcionais [41], [43]:

- Interface de fuzzificação;
- Base de conhecimento;
- Lógica de tomada de decisões;
- Interface de defuzzificação.

Essa estrutura de controlador representa a transformação que ocorre do domínio do real, que usa números reais, para o domínio *fuzzy*, que usa números *fuzzy*. Nessa transformação um conjunto de inferências *fuzzy* é usado para tomadas de decisões, e por fim há uma transformação inversa do domínio *fuzzy* para o domínio do mundo real, para que ocorra o acoplamento entre a saída *fuzzy* e as variáveis de atuação.

### 4.3.1 Funções da Interface de Fuzzificação

A interface de fuzzificação é responsável pela medida dos valores das variáveis de entrada, que caracterizam o estado do sistema e pela normalização destas variáveis em um universo de discurso padronizado. A interface de fuzzificação usa funções de pertinência contidas na base de conhecimento, convertendo os sinais de entrada em um intervalo  $[0,1]$ .

### 4.3.2 Base de Conhecimento

A base de conhecimento representa o modelo do sistema a ser controlado, consistindo de uma base de dados (funções de pertinência lingüísticas) e uma base de regras *fuzzy* lingüísticas. A base de dados fornece as definições numéricas necessárias às funções de pertinência usadas no conjunto de regras *fuzzy*. A base de regras caracteriza os objetivos do controle e a estratégia de controle usada por especialistas na área, por meio de um conjunto de regras de controle em geral lingüísticas.

### 4.3.3 Lógica de Tomada de Decisões

A lógica de tomada de decisões, incorporada na estrutura de inferência da base de regras, usa implicações *fuzzy* para simular tomadas de decisão humanas. Ela gera ações de controle (conseqüentes) inferidas a partir de um conjunto de condições de entrada (antecedentes).

### 4.3.4 Funções da Interface de Defuzzificação

A defuzzificação consiste em obter-se um único valor discreto, utilizável numa ação de controle concreta no mundo real, a partir de valores *fuzzy* de saída obtidos. Este único valor discreto representa um compromisso entre os diferentes valores *fuzzy* contidos na saída do controlador.

Esta função é necessária apenas quando a saída do controlador tiver de ser interpretada como uma ação de controle discreta, como por exemplo, configurar um seletor numa determinada posição. Existem sistemas que não exigem defuzzificação porque a saída *fuzzy* é interpretada de modo qualitativo.

#### 4.4 CONTROLADORES FUZZY PARAMÉTRICOS

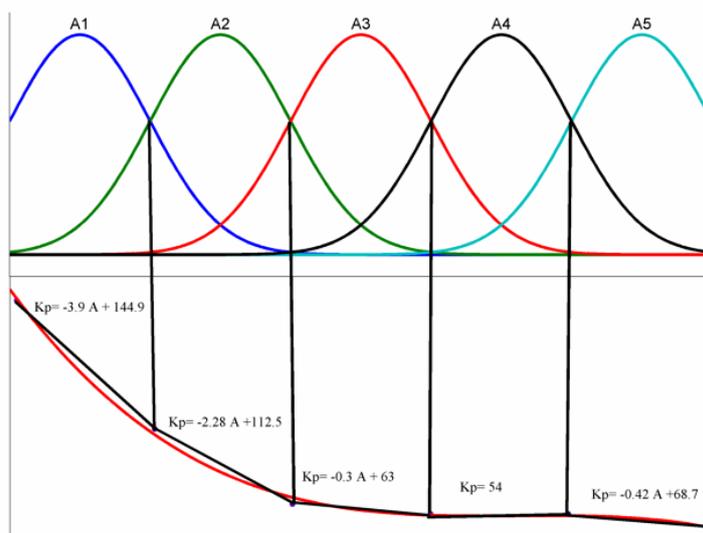
A forma paramétrica das regras *fuzzy* é uma abordagem híbrida que combina um método *fuzzy* baseado em regras e um método matemático: os antecedentes definem os trechos superpostos relacionados à transferência de entrada e saída e os conseqüentes definem aproximações lineares para esses trechos. O formato genérico de uma regra na forma paramétrica é mostrado na equação (4.1).

$$\text{SE } s_1 = S_1^i \text{ e } s_2 = S_2^i \text{ ENTÃO } v_{\text{out}}^i = a_0^i + a_1^i s_2 + \dots + a_p^i s_p^i \quad (4.1)$$

Onde  $s_1$  é uma variável de entrada,  $S_1^i$  é uma função de pertinência lingüística *fuzzy*, e o conjunto de coeficientes  $a_j^i$  é o conjunto dos coeficientes a ser determinado [41], [44].

A idéia do fuzzy paramétrico é combinar uma descrição global baseada em regras com aproximações lineares locais correspondente a um modelo linear de entrada e saída que se usaria para descrever o sistema localmente, conforme ilustra a Figura 4.1. Em outras palavras, é uma abordagem híbrida que combina um método fuzzy baseado em regras e um método matemático: os antecedentes definem os trechos superpostos relacionados à transferência de entrada e saída, e os conseqüentes definem aproximações lineares para estes trechos.

Os coeficientes  $a_j^i$  que aparecem na equação(4.1) podem ser determinados por análise de regressão linear, baseado em procedimentos estatísticos, e depois ajustados por simulação.



**Figura 4.1** Descrição local linear através de um modelo fuzzy paramétrico.

#### 4.4.1 Comparação entre as Abordagens Fuzzy Baseadas em Regras e Paramétricas

- A abordagem *fuzzy* baseada em regras é mais recomendável para colher e implementar o conhecimento de um operador humano especializado, enquanto que a abordagem paramétrica *fuzzy* é melhor usada com dados de entrada e saída numéricos, quando disponíveis.
- O algoritmo *fuzzy* paramétrico é inerentemente adaptativo, porque os coeficientes  $a_{ij}$  podem ser alterados para o ajuste do sistema. Assim, uma implementação adaptativa em tempo real da abordagem paramétrica é possível, mudando-se dinamicamente os coeficientes lineares.
- Em versões adaptativas da abordagem baseada em regras, é também possível mudar recorrentemente os pesos das regras ou as funções de pertinência. O *software* Matlab contém um *fuzzy logic toolbox* para ajuste recorrente de tais parâmetros.
- A desvantagem da abordagem *fuzzy* paramétrica é a perda da formulação lingüística dos consequentes de saída.

# 5 METODOLOGIA APLICADA E RESULTADOS

## 5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, é apresentada a proposta de um controlador PI “inteligente” aplicado a um compressor tipo pistão que utiliza Lógica *Fuzzy* para ajustar a sintonia do controlador PI em função das regiões de operação.

Este sistema de controle foi implementado na bancada sistema de compressão de ar do LAMOTRIZ , visando avaliar possível aumento da eficiência energética do sistema.

Aqui, é descrita a modelagem do sistema, o projeto e implementação do controlador via software supervisor e os resultados obtidos são analisados não só do ponto de vista de controle como também do ponto de vista da eficiência energética.

## 5.2 PROCESSO INDUSTRIAL PROPOSTO

O ar comprimido, ao longo do tempo, tem sido usado para várias finalidades industriais, como por exemplo, no acionamento de ferramentas pneumáticas, no acionamento mecânico e no comando de válvulas em sistemas de controle. Cada equipamento consumidor de ar comprimido necessita de uma determinada pressão e vazão de ar para ter um bom desempenho.

Normalmente, é requisito de uma instalação de ar comprimido o fornecimento do ar a pressão constante e que haja pleno atendimento do fornecimento da vazão necessária aos consumidores. Foi simulado, então, um processo industrial hipotético, no qual se tem várias cargas que operam na mesma pressão, mas com vazões diferentes. Desse modo, é necessário variar a vazão mantendo a pressão constante para atender às necessidades da carga.

As cargas foram definidas baseadas nas aberturas da válvula de saída de ar na faixa de 15 a 40%. A pressão de operação do sistema foi definida como 3 bar.

### 5.3 MODELAGEM DO SISTEMA

A modelagem do sistema a ser controlado é de fundamental importância na sintonia automática de controladores. A partir da modelagem do sistema, são calculados os parâmetros que melhor ajustam a ação do controlador.

Com base nas informações obtidas, os métodos de identificação de sistemas podem ser classificados em abordagens no domínio do tempo ou no domínio da frequência. A abordagem no domínio do tempo gera uma resposta a um degrau. As características da resposta do processo são então utilizadas para calcular os parâmetros de um “modelo” assumido para o processo. O teste do degrau pode ser realizado em malha aberta (modo manual) ou em malha fechada (com o controlador atuando) [45].

O sistema de compressão de ar foi modelado matematicamente para que fosse possível sua implementação em Simulink® [46]. Para isso, foi utilizado o método “Eyeball” [47], que será descrito a seguir.

#### 5.3.1 Eyeball

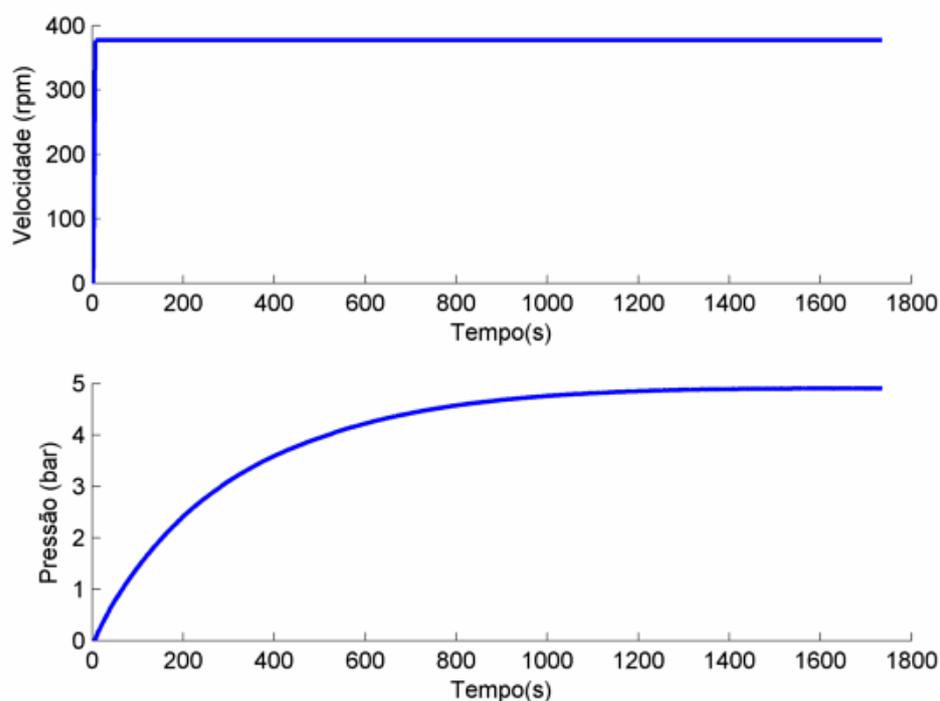
O caminho mais direto de se obter um modelo empírico de um processo é encontrar os parâmetros tempo morto, constante de tempo e coeficiente de amortecimento que ajustam os dados obtidos experimentalmente como resposta a um degrau aplicado à planta. Este método propõe a aplicação de um degrau ao sistema, sendo sua saída observada e comparada a uma função-modelo. Para o caso de sistemas de primeira ordem, a função é a ilustrada na equação (5.1).

$$G(s) = \frac{K e^{-Ds}}{\tau_p s + 1} \quad (5.1)$$

O ganho K pode ser obtido da relação em regime entre a saída e a entrada. O tempo morto D pode ser facilmente identificado observando-se o gráfico da resposta ao degrau e a constante de tempo  $\tau_p$  corresponde ao período em que a saída atinge 62,3% do seu valor em regime sem levar em conta o tempo morto.

### 5.3.1.1 Aplicação de um Degrau de Velocidade ao Sistema

O primeiro passo para a modelagem do sistema, é aplicar um degrau de velocidade à entrada da planta e capturar os pontos da curva da pressão no tempo para os seguintes valores de abertura da válvula de saída de ar: 15%, 20%, 25%, 30% e 40%. Esses valores foram definidos tomando como base a pressão máxima obtida para cada abertura. Para valores acima de 40%, a pressão obtida fica abaixo de 2,5 bar e acaba não tendo aplicações práticas. A Figura 5.1 ilustra o degrau de velocidade aplicado à planta e a sua resposta para uma abertura de 15% da válvula.



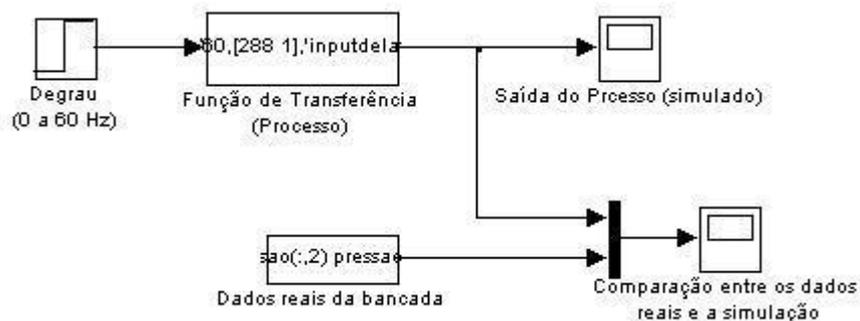
**Figura 5.1** Resposta a um degrau de velocidade aplicado ao sistema de compressão de ar para uma abertura de 15% da válvula de saída de ar..

### 5.3.1.2 Obtenção da Função de Transferência por Abertura

Após a obtenção dos parâmetros citados na seção 5.3.1, verificou-se que a equação (5.1) ajusta-se bem à curva obtida como resposta ao degrau aplicado à planta, e, portanto representa a função de transferência do sistema.

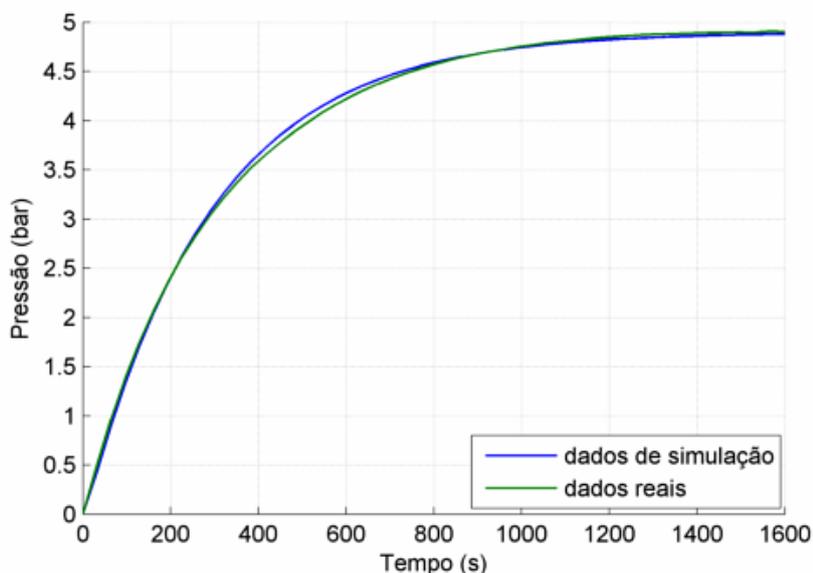
Foi obtida uma função de transferência para cada abertura citada anteriormente. Em seguida, o sistema foi simulado utilizando Simulink®, parte integrante do software Matlab® e o resultado de simulação foi comparado aos dados reais obtidos na bancada. Foi

aplicado um degrau ao sistema modelado e a saída foi comparada à saída real da planta quando aplicado um degrau de velocidade de mesmo valor. A Figura 5.2 ilustra o diagrama de blocos utilizado em Simulink®.



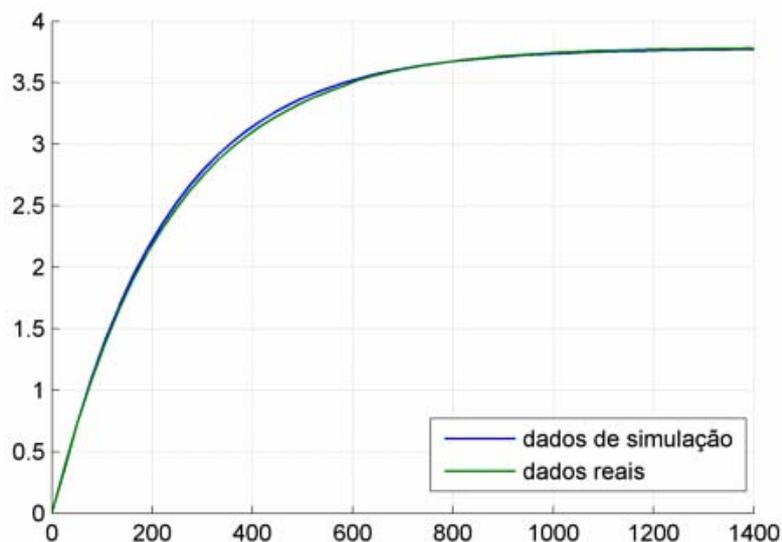
**Figura 5.2** Diagrama de Blocos utilizado em Simulink.

A comparação entre o processo real e o simulado para a abertura de 15% é apresentada na Figura 5.3.



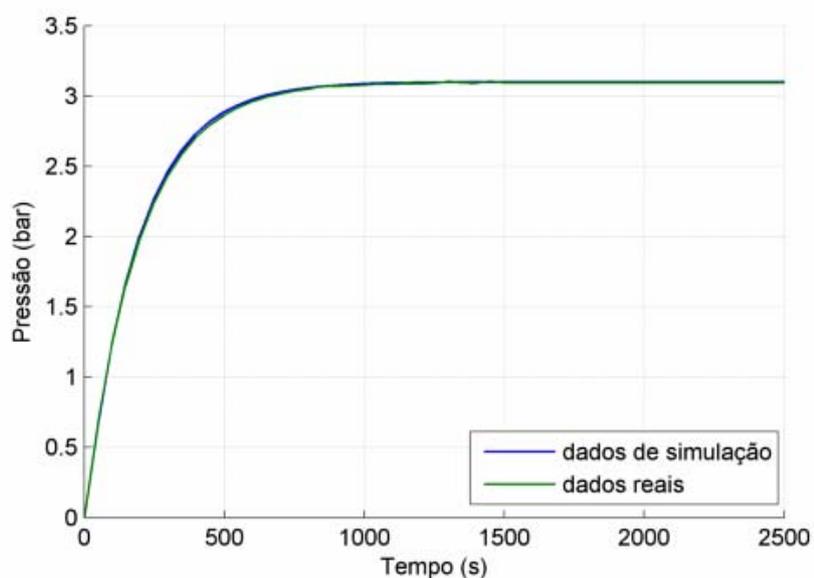
**Figura 5.3** Resposta a um degrau de velocidade aplicado ao sistema de compressão de ar comparado ao resultado de simulação obtido em Simulink® para uma abertura de 15% da válvula de saída de ar.

A comparação entre o processo real e o simulado para a abertura de 20% é apresentada na Figura 5.4.



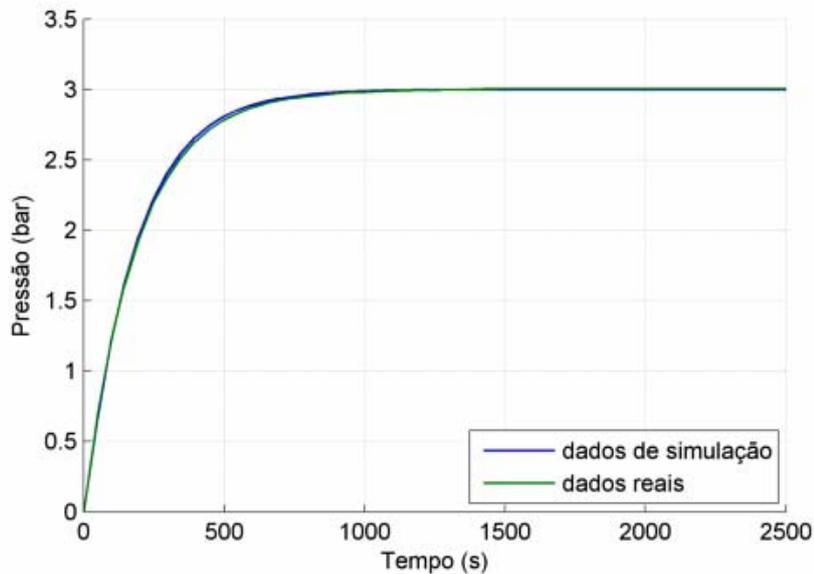
**Figura 5.4** Resposta a um degrau de velocidade aplicado ao sistema de compressão de ar comparado ao resultado de simulação obtido em Simulink® para uma abertura de 20% da válvula de saída de ar.

A comparação entre o processo real e o simulado para a abertura de 25% é apresentada na Figura 5.5.



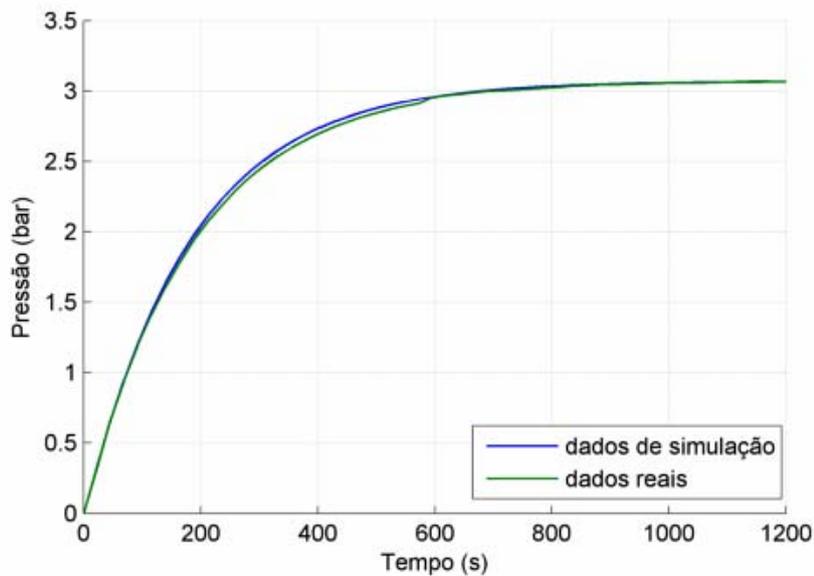
**Figura 5.5** Resposta a um degrau de velocidade aplicado ao sistema de compressão de ar comparado ao resultado de simulação obtido em Simulink® para uma abertura de 25% da válvula de saída de ar.

A comparação entre o processo real e o simulado para a abertura de 30% é apresentada na Figura 5.6.



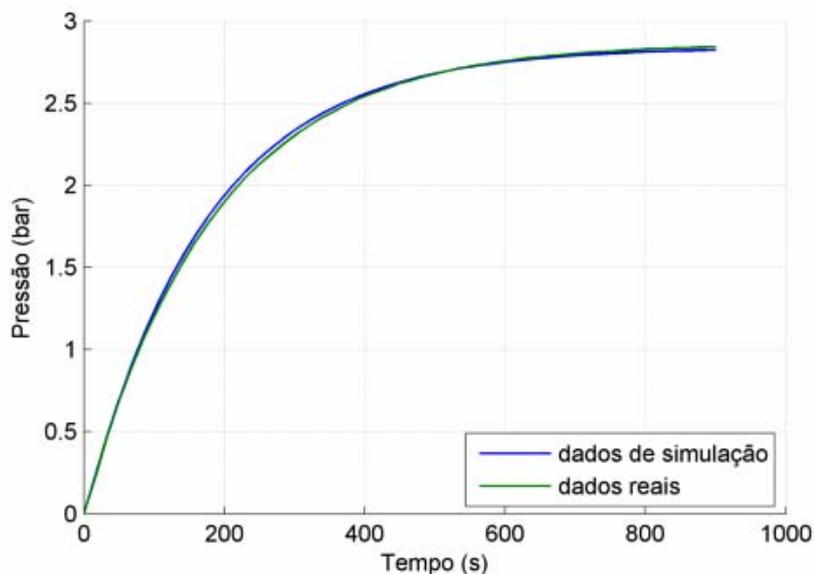
**Figura 5.6** Resposta a um degrau de velocidade aplicado ao sistema de compressão de ar comparado ao resultado de simulação obtido em Simulink® para uma abertura de 30% da válvula de saída de ar.

A comparação entre o processo real e o simulado para a abertura de 35% é apresentada na Figura 5.7.



**Figura 5.7** Resposta a um degrau de velocidade aplicado ao sistema de compressão de ar comparado ao resultado de simulação obtido em Simulink® para uma abertura de 35% da válvula de saída de ar.

A comparação entre o processo real e o simulado para a abertura de 40% é apresentada na Figura 5.8.



**Figura 5.8** Resposta a um degrau de velocidade aplicado ao sistema de compressão de ar comparado ao resultado de simulação obtido em Simulink® para uma abertura de 40% da válvula de saída de ar.

Observando as curvas ilustradas anteriormente, conclui-se que a função de transferência encontrada para cada abertura representa de forma bastante precisa o processo real.

## 5.4 PROJETO DO PI

Após o sistema ser modelado, foi utilizada a regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada na resposta ao degrau [48]-[50], para estimar os parâmetros de  $k_p$  e  $k_i$  do controlador. Esse procedimento foi realizado para cada valor de abertura da válvula de saída de ar para as quais o sistema foi modelado: 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40%. Utilizando equações (5.1), (5.3) e (5.4) propostas por Ziegler e Nichols e os parâmetros obtidos conforme descrito na seção 5.3.1, foram calculados  $k_p$  e  $k_i$  para cada valor de abertura da válvula.

$$k_p = \frac{0.9\tau_p}{D} \quad (5.2)$$

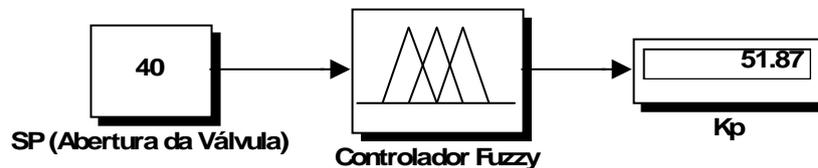
$$k_i = \frac{k_p}{T_i} \quad (5.3)$$

$$T_i = \frac{D}{0.3} \quad (5.4)$$

A próxima etapa agora é ajustar a sintonia do controlador quando houver variação de carga, ou seja, quando mudar a abertura da válvula de saída de ar dentro da faixa para a qual o sistema foi modelado. Foi então implementada a Lógica Fuzzy associada ao PI de forma a selecionar o valor de  $k_p$  e  $k_i$  do controlador adequados à abertura selecionada.

#### 5.4.1 Desenvolvimento do Controlador Fuzzy

Os sistemas *Fuzzy* permitem elaborar estratégias de controle “não-linear” de uma maneira rápida e eficiente. É apresentado aqui um controlador fuzzy paramétrico para ajustar a sintonia do controlador PI em função das regiões de operação (abertura da válvula). O controlador foi implementado em Simulink® antes de ser utilizado na bancada de sistema de compressão de ar, com o objetivo de avaliar o seu desempenho. A Figura 5.9 ilustra a estrutura do controlador fuzzy desenvolvido usando o Simulink®.



**Figura 5.9** Estrutura do controlador fuzzy em Simulink.

A Tabela 5.1 mostra os valores de  $k_p$  e  $k_i$  para cada abertura da válvula. Conforme pode ser observado, o valor de  $k_i$  é igual ao valor de  $k_p$  dividido por dez. Isso acontece porque o tempo morto ( $D$ ) é o mesmo para todas as aberturas simuladas. Esse fato pode ser mais bem entendido, observando-se as equações (5.2) e (5.3). Desse modo foi usado apenas o valor de  $k_p$  como saída do controlador fuzzy e o valor de  $k_i$  foi calculado dividindo-se  $k_p$  por dez.

A tarefa agora é encontrar segmentos lineares da função de saída, ajustando-se uma reta naqueles valores que correspondem às entradas *fuzzy* definidas por funções de pertinência lingüísticas.

**Tabela 5.1** Valores de  $k_p$  e  $k_i$  em função da abertura da válvula de saída de ar.

Abertura	$k_p$	$k_i$
15%	86,4	8,64
20%	66,9	6,69
25%	55,5	5,55
30%	54	5,4
35%	52,2	5,22
40%	51,9	5,19

Assumindo-se cinco faixas de abertura da válvula, consideramos as seguintes regras:

**Regra 1:**

SE  $15\% < A < 20\%$

ENTÃO  $k_p(A) = -3.9A_1 + 144.9$

**Regra 2:**

SE  $20\% < A < 25\%$

ENTÃO  $k_p(A) = -2.28A_2 + 112.5$

**Regra 3:**

SE  $25\% < A < 30\%$

ENTÃO  $k_p(A) = -0.3A_3 + 63$

**Regra 4:**

SE  $30\% < A < 35\%$

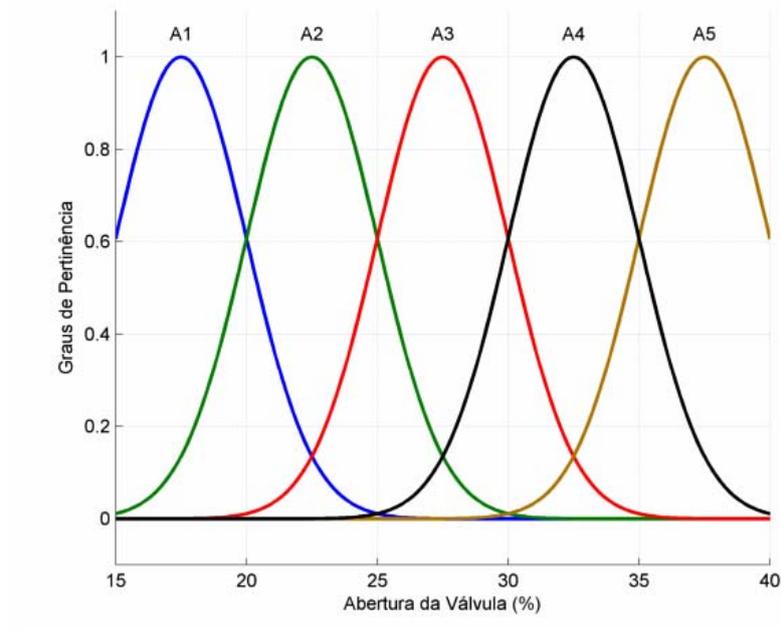
ENTÃO  $k_p(A) = 54$

**Regra 5:**

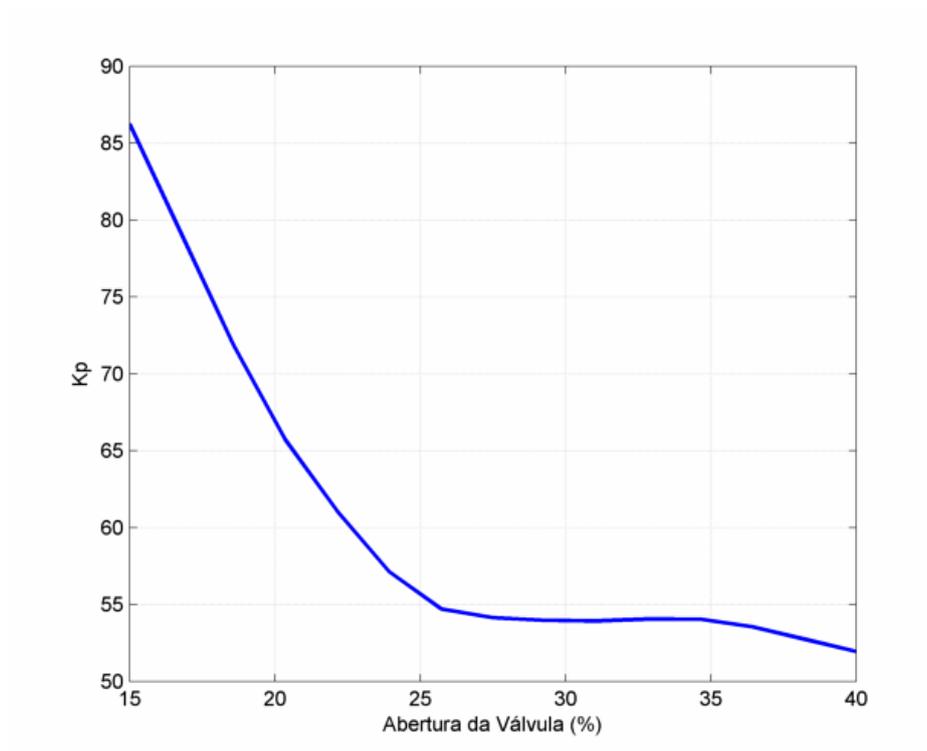
SE  $35\% < A < 40\%$

ENTÃO  $k_p(A) = -0.42A_5 + 64.8$

Os coeficientes das equações foram determinados por análise de regressão linear, utilizando o método dos mínimos quadrados. A Figura 5.10 mostra as funções de pertinência de entrada do sistema fuzzy e a Figura 5.11 ilustra a função de saída do fuzzy.



**Figura 5.10** Funções de Pertinência de Entrada do Sistema Fuzzy.



**Figura 5.11** Função de saída

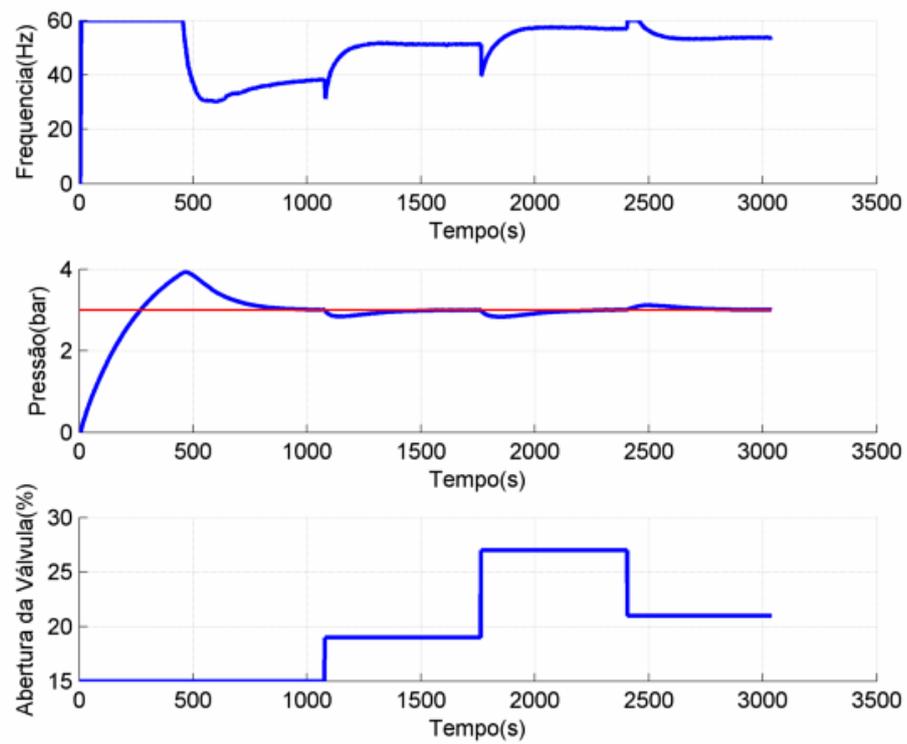
## 5.4.2 Resultados Experimentais

Seguindo a metodologia utilizada neste trabalho, a Lógica Fuzzy e o controle do tipo PI foram implementados na bancada de sistema de compressão de ar presente no LAMOTRIZ, com o objetivo de obter os resultados experimentais e, desta forma, avaliar a viabilidade prática do controlador. O controle do tipo PI e a Lógica Fuzzy foram implementados no *software* supervisor da bancada de sistemas de compressão de ar através de scripts em Visual Basic®. Quando colocado em execução, o algoritmo funciona juntamente ao WinCC®, ou seja, enquanto o operador faz a supervisão da planta, o controle é executado pelo algoritmo. O script implementado tem a seguinte ordem:

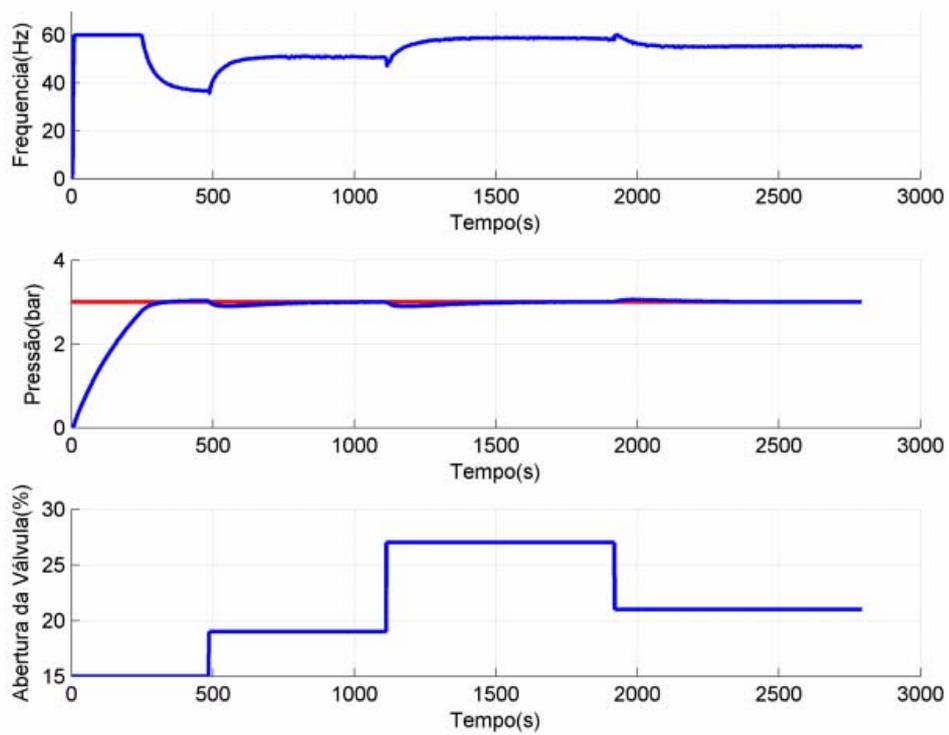
- Declaração das variáveis;
- Implementação dos antecedentes e conseqüentes *fuzzy*;
- Implementação do algoritmo de Euler usado na integração do erro utilizado pelo PI.
- Implementação do algoritmo Runge-Kutta de quarta ordem usado na integração do erro utilizado pelo PI.
- Implementação do PI .

A implementação do controlador produz o desempenho mostrado na Figura 5.12. Pode-se observar que para todos os valores de abertura selecionados, o sistema de controle apresenta bom desempenho. No entanto, durante o período de enchimento do reservatório, foi verificado um overshoot relativamente elevado (30%). Para diminuir esse overshoot, o método usado na integração do erro do PI durante esse período de enchimento do reservatório foi o método de Euler, sendo o Runge-Kutta de 4ª ordem usado após a primeira variação de abertura da válvula, quando o reservatório já havia atingido a pressão de *set point*. A Figura 5.13 mostra o desempenho do controlador PI Fuzzy utilizando o método de Euler na integração do erro utilizado pelo PI durante o enchimento do reservatório e Runge-Kutta após a primeira variação de abertura da válvula, enquanto a Figura 5.12 mostra o desempenho do controlador usando apenas o método de Runge-Kutta de 4ª ordem.

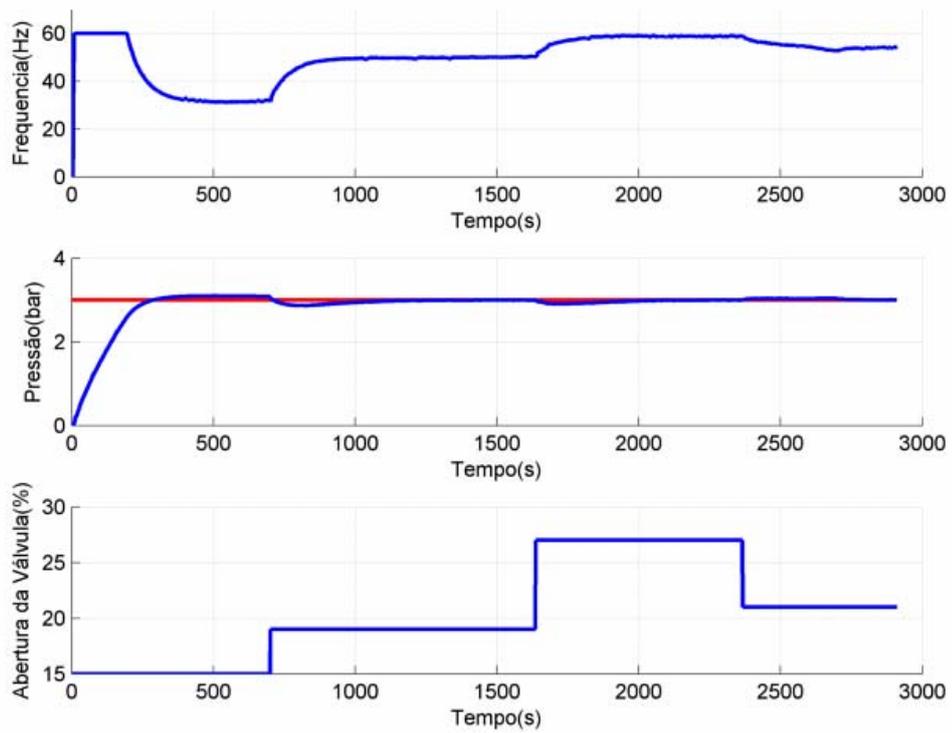
A fim de se verificar o desempenho do controlador para valores de  $k_p$  diferentes daquele selecionado pelo *fuzzy*, foram testados dois valores de  $k_p$ : 52,2 e 84,45. É importante frisar que esses valores permaneceram fixos quando a abertura da válvula foi variada, ou seja, o *fuzzy* não atuou. Foram feitos testes apenas com o PI. Os resultados são apresentados na Figura 5.14 e na Figura 5.15.



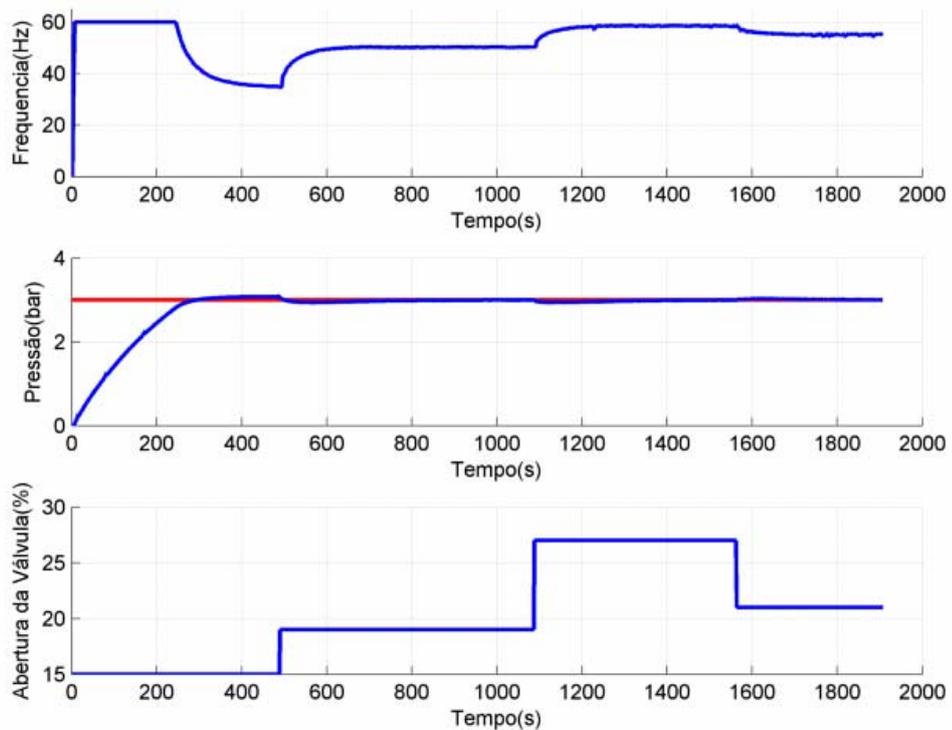
**Figura 5.12** Desempenho do Controlador Fuzzy utilizando o algoritmo de Runge-Kutta de 4<sup>a</sup> ordem.



**Figura 5.13** Desempenho do Controlador Fuzzy utilizando os algoritmos de Euler e Runge-Kutta.



**Figura 5.14** Desempenho do Controlador PI para um valor fixo de  $k_p$  de 52,2.

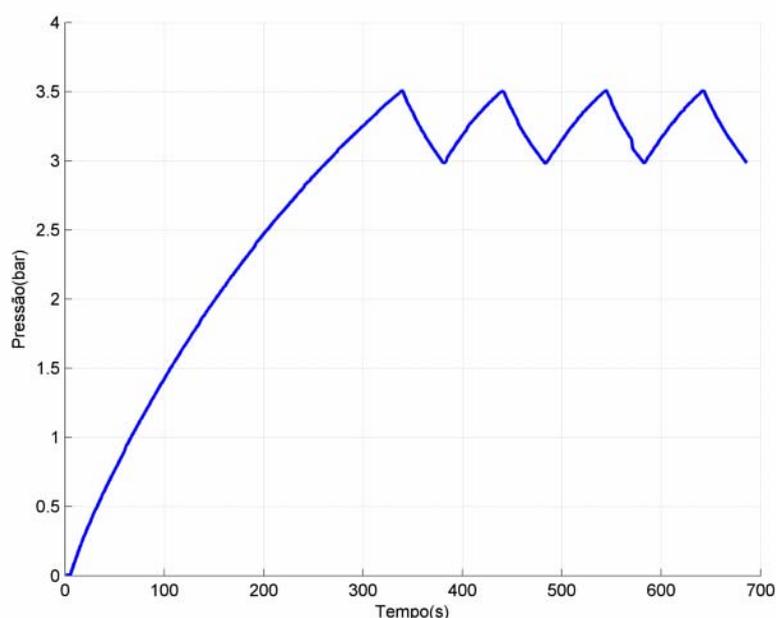


**Figura 5.15** Desempenho do Controlador PI para um valor fixo de  $k_p$  de 84,45.

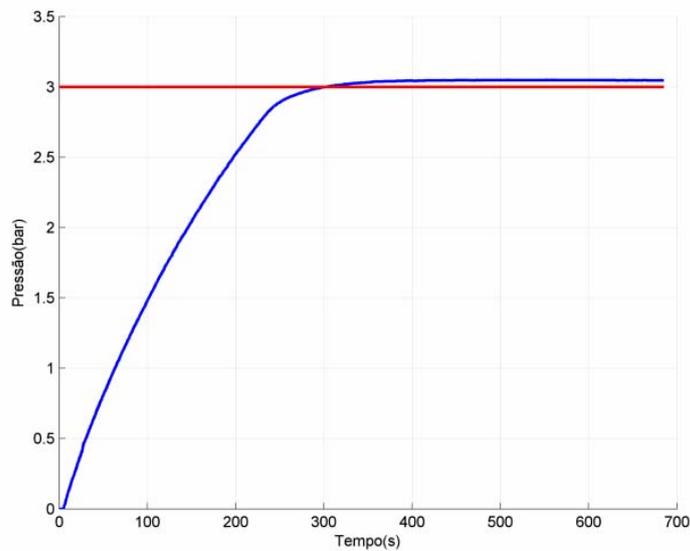
Conforme pode ser observado, o controlador PI com  $k_p$  fixo também consegue manter o *set point* de pressão para diferentes aberturas. Desse modo, verifica-se que o sistema é estável para a faixa de  $k_p$  encontrada na simulação, o que não invalida o uso do controlador PI *Fuzzy*, uma vez que ele desempenha sua função de maneira bastante satisfatória variando os parâmetros do PI quando a região de operação é variada. A vantagem desse sistema é que não há necessidade de intervenção do operador na planta para, por exemplo, alterar a sintonia do controlador.

Um exemplo de aplicação de um controlador com mesmo princípio de funcionamento pode ser encontrado em [40].

Outro ponto de fundamental importância a ser discutido é a eficiência energética do sistema de controle utilizado. Foram realizadas comparações do ponto de vista da eficiência energética do sistema. Foi medida a potência ativa consumida utilizando-se os dois tipos de controle: o controle Partida e Parada (mostrado na secção 3.3.1) e o controle PI *Fuzzy*. Para o controle Partida e Parada, a pressão limite superior definida foi 3,5 bar e a pressão limite inferior foi 3 bar. Para o controlador PI *Fuzzy* foi definido um *set point* de 3 bar. A Figura 5.16 e a Figura 5.17 ilustram o comportamento da pressão utilizando-se o controle Partida e Parada e o controlador PI *Fuzzy* respectivamente.

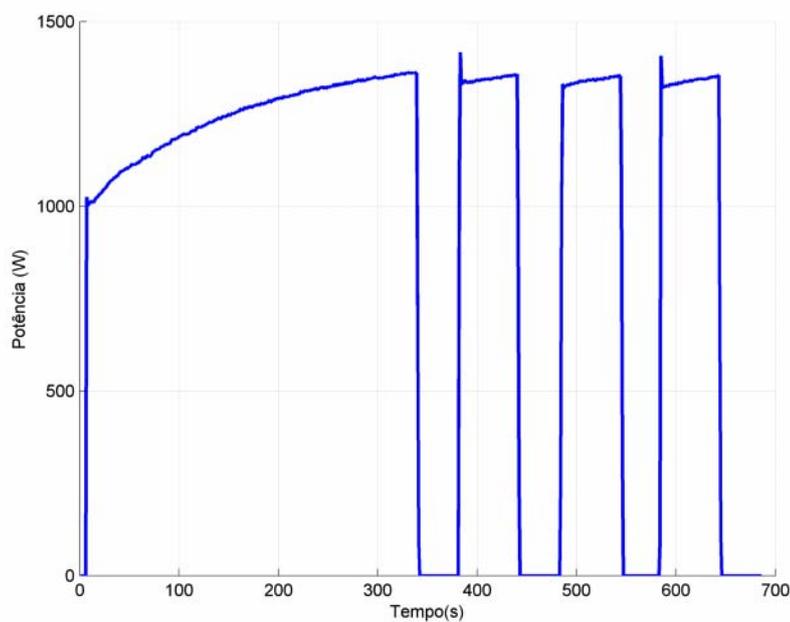


**Figura 5.16** Curva da Pressão Utilizando o Controle Partida e Parada para uma abertura de 15% da válvula de saída de ar.

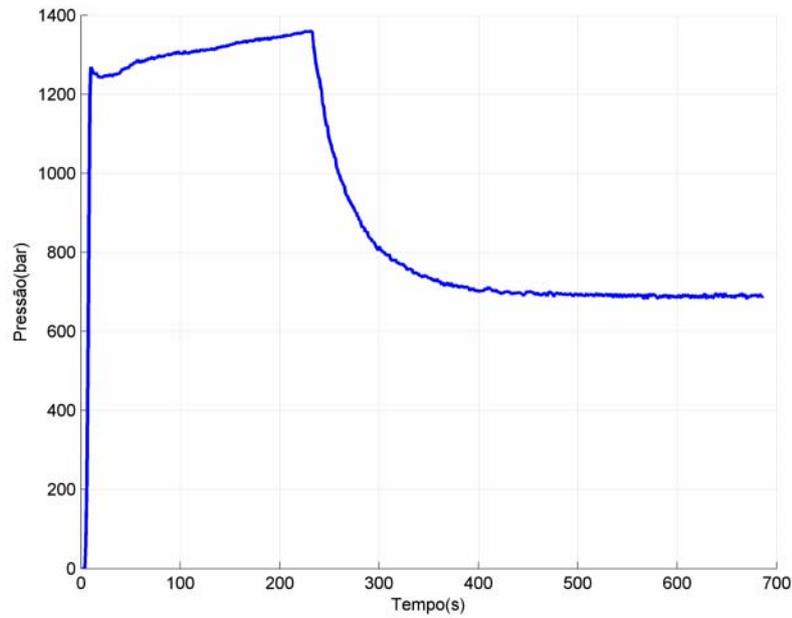


**Figura 5.17** Curva da Pressão Utilizando o controlador PI Fuzzy para uma abertura de 15% da válvula de saída de ar.

A Figura 5.18 mostra a potência consumida utilizando-se o controle partida e parada para uma faixa de pressão de 3 a 3.5 bar com a válvula de saída de ar 15% aberta e a Figura 5.19 mostra a potência consumida utilizando-se o controlador PI Fuzzy para um ponto de operação de 3 bar com a válvula de saída de ar 15 %.



**Figura 5.18** Potência Consumida Utilizando-se o Controle Partida e Parada .



**Figura 5.19** - *Potência consumida utilizando-se o controlador PI Fuzzy.*

Calculando-se o consumo de energia para os dois casos, temos 182,3 Wh quando é utilizado o controle partida e parada e 176,1 Wh quando se utiliza o controlador PI. É verificada uma economia de 3,4% com o uso do PI Fuzzy.

# 6 CONCLUSÃO

## 6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Foi analisada a eficiência energética do sistema de compressão de ar do LAMOTRIZ. Embora o sistema ensaiado seja de pequeno porte, apresentando como consequência resultados pouco expressivos, as técnicas apresentadas podem ser utilizadas para sistemas maiores, com motores e compressores de maior potência, podendo assim apresentar resultados mais significativos quanto à eficiência energética.

Apesar de compressores a pistão necessitarem ficar desligado, por pelo menos 20% do seu tempo de operação devido às altas temperaturas desenvolvidas, sendo por isso normalmente controlados por partida e parada, o controlador apresentado nesse trabalho teve desempenho satisfatório mantendo o compressor ligado a pressão constante por um período de tempo determinado, sendo assim indicado para compressores que são usados apenas em cargas de pico, ou seja, necessitada durante alguns períodos específicos, devido às necessidades de alguns consumidores.

Foi observado também oportunidades de melhoria da eficiência do sistema com a redução da pressão de trabalho do compressor e a detecção e eliminação de vazamentos na instalação de ar comprimido.

Desse modo, o sistema de compressão de ar do LAMOTRIZ da UFPE está colaborando com as metas do PROCEL INDÚSTRIA – Programa de Eficiência Energética Industrial, pois, esse trabalho traz um aumento na eficiência energética e busca a redução do consumo de energia elétrica em sistemas industriais.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de dar continuidade ao trabalho de pesquisa na área de eficiência industrial e de estendê-lo às indústrias brasileiras ficam como sugestões para trabalhos futuros:

- Buscar metodologias para determinação de  $k_p$  mais específico para uma determinada abertura e assim tornar mais efetiva a operação do PI *Fuzzy* para estas e outras possíveis aplicações.
- Utilização do controlador PI *Fuzzy* em outros sistemas motrizes industriais.
- Estudo/pesquisa da modelagem de sistemas industriais através de Lógica *Fuzzy*.
- Avaliação do desempenho do controlador PI *Fuzzy* em sistemas de ar comprimido que utilizem compressores do tipo parafuso.
- Levantamento de Plantas Industriais com grandes sistemas de ar comprimido.
- Avaliação da viabilidade de usos dos sistemas de controle nestas Plantas Industriais.
- Avaliação do impacto energético no parque industrial NE.
- Desenvolver modelos mistos de controle, que utilizem lógica *fuzzy* e redes neurais.

## Referências Bibliográficas

- [1] MOREIRA, G. S., ARAÚJO, R. W., JUNIOR, S. R. A. “Análise de um Sistema de Bombeamento Hidráulico sob o Ponto de Vista da Eficiência Energética”, SBSE 2008 - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Belo Horizonte - MG, 2008.
- [2] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Consumo Nacional de Energia Elétrica por Classe 1995-2009*. Disponível em [www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br). Acessado em 11/06/2010.
- [3] GARCIA, P. G. A., “Impacto da Lei de Eficiência Energética para Motores Elétricos no Potencial de Conservação de Energia na Indústria”. Rio de Janeiro – RJ, 2003 Tese de doutorado, UFRJ.
- [4] RIBEIRO, M. A. “Automação Industrial”, 4ª ed. Tek Treinamento & Consultoria Ltda. Salvador-BA, 2001.
- [5] GUERRA, F., LOPES, J. S., GUEDES, L. A., et all, “Implementação de Controladores PID Utilizando Lógica Fuzzy e Instrumentação Industrial”, VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, SBAI, São Luís - MA, 2005.
- [6] WANG, C. H., LIN, T. C., LEE, T. T., LIU, H. L., “Adaptive Hybrid Intelligent Control for Uncertain Nonlinear Dynamical Systems”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics, Vol. 32, No. 5, October 2002.
- [7] W. R. Araújo, S. G. Moreira, A. R. da Silva Júnior, L. C. Leite, “Sistemas Motrizes Industriais: Os Nexos entre Eficiência Energética e Inteligência Artificial”, SBSE 2008, Belo Horizonte-MG.
- [8] R. R. B. Aquino, Z. D. Lins, P. A. C. Rosas, J. F. A. Cordeiro, J. R. C. Ribeiro, P. S. Amorim, I. A. Tavares, “Eficiência Energética no Controle e Automação de Processos Industriais Utilizando Redes Neurais Artificiais”, Revista Eletrônica de Potência, Vol. 14, nº 2, Maio 2009.
- [9] AQUINO, R. R. B., LIRA, M. M. S., COELHO, R. F. C., AMORIM, P. S., SANTOS, A. F., RIBEIRO, J.R.C., “Controle Inteligente de Vazão Aplicado a um Sistema de Bombeamento”, III CBEE, Belém-PA, Setembro 2009.
- [10]CORDEIRO, L. F. A., “Eficiência Energética No Controle Inteligente de Sistemas de Bombeamento”. Recife – PE, 2008 Dissertação de mestrado, UFPE.
- [11]LIN, F. J. e WAI R. J., “Adaptive Fuzzy-Neural-Network Control for Induction Spindle Motor Drive”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, nº. 4, December 2002.
- [12]HUANG, C. Y., CHEN, T. C., HUANG, C. L., “Robust Control of Induction Motor with A Neural-Network Load Torque Estimator and A Neural-Network Identification”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 46, nº 5, October 1999.
- [13]W. R. Araújo, L. C. Leite , S. G. Moreira, V. M. Pereira, A. R. da Silva Júnior, “Aplicação de Técnicas de Inteligência Artificial Visando Eficiência Energética e Estimação de Parâmetros em Sistemas Motrizes Industriais”, Eletrônica de Potência, vol. 13, nº. 4, Novembro de 2008.
- [14]GUIMARÃES, F.A., “Controladores PID Auto-Ajustável e Nebuloso Aplicados em Plantas Industriais”, Fortaleza-CE, 2007, Dissertação de mestrado, UFC.
- [15]AQUINO, R. R. B., LINS, Z. D., RIBEIRO, J.R.C., AMORIM, P. S., SANTOS, A. F., “Eficiência Energética no Controle Automático de Vazão de Ar de um Sistema de Exaustão Usando Lógica Fuzzy”, III CBEE, Belém-PA, Setembro 2009.

- [16] SOARES, V. A., SOARES, G. A., PERRONE, F. P. D., BRÁULIO, C. H., MOYA, R., PIFFER, E., “Otimização de Sistemas Motrizes Industriais”, VI SBQEE, Agosto 2005, Brasil.
- [17] ELETROBRÁS, Acesso em 11/06/2010, disponível em <http://www.eletrobras.gov.br>.
- [18] FERREIRA, A. C., PERRONE, F. P. D., MOREIRA, M. A. R. G., OLIVEIRA, H. L., PINTO, A. B. A., SOBRAL, A. S., MOTTA, B. R., MOYA, C. H., SPERA, M. R., VILELA, L. C. T., GÓES, R.R. de A., TEIXEIRA, M. V.P., SOBRAL, R. L., “Atuação da Eletrobrás, através do Procel, na Eficiência Energética de Indústrias Brasileiras”, CLAGTEE, Outubro 2009, Ubatuba, Brasil.
- [19] AMÉRICO, M., “Eficiência Energética Industrial-Módulo Acionamento Eletrônico”, Procel Indústria/Eletrobrás, RJ, 2004.
- [20] FILHO, M. J., “Instalações Elétricas Industriais”, 7ª edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, 2007.
- [21] SIMATIC Software Siemens: WinCC flexible 2005 SP1, Compact/Standard/Advanced, Siemens, 04/2006.
- [22] ROCHA, N. R., MONTEIRO, M. A. G., “Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido”, Eletrobrás/Procel, 2005.
- [23] HANS, A., “Eficiência Energética Industrial-Módulo Compressores”, Procel Indústria/Eletrobrás, RJ, 2004.
- [24] AGUIAR, V. P. B., “Estudo de Eficiência Energética no Acionamento de um Compressor Parafuso em um Sistema de Ar Comprimido”, Fortaleza-CE, 2008, Dissertação de mestrado, UFC.
- [25] BROWN, R. N., “Compressors: selection and sizing”, 2<sup>nd</sup>., Gulf Professional Publishing, Texas-EUA, 1997.
- [26] PARR, A. A., “Hydraulics and Pneumatics“, Elsevier Science & Technology Books, March 1999.
- [27] PARKER Training, Tecnologia Pneumática Industrial-Apostila M1001-1 BR, Jacareí-SP.
- [28] BEALS, C., GHISLAIN, J., KEMP, H., MCCULLOCH, D., PERRY, W., PRATOR, D., SCALES, W., SHAFER, G., SMITH, D., TARANTO, T., ORMER, H.P. V., “Improving Compressed Air System Performance”, Compressed Air Challenge (CAC) and United States Department of Energy, Washington, 2003.
- [29] AGUIAR, V. P. B., PONTES, R. S. T., MOREIRA, A. B., JÚNIOR, C. R. S., “Simulação do Potencial de Eficiência Energética em um Sistema de Ar Comprimido com Acionamento a Velocidade Variável”, II CBEE, Vitória-ES.
- [30] R. R. B. Aquino, Z. D. Lins, P. A. C. Rosas, L. F. A. Cordeiro, J. R. C. Ribeiro, I. A. Tavares, P. S. Amorim, “Eficientização Energética em Métodos de Controle de Vazão”, Anais da VIII Conferência Internacional em Aplicações Industriais, VIII INDUSCON, Poço de Caldas-MG, Agosto 2008.
- [31] H. W. Weiss, “Adjustable Speed AC Drive Systems for Pump and Compressor Applications”, IEEE Transactions On Industry Applications, VOL. IA-10, n° 1, January/February 1974.
- [32] ALMEIDA, T. A., 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, No. 1, January/February 2005.

- [33]HADDAD, J., FLORES, L. F. V., BRANDÃO, C. A. X., ESPER, F., DA SILVA, V. F., YAMACHITA, R. A., “Conservação de Energia em Sistemas de Ar Comprimido”, XVII SNPTEE, Uberlândia-MG, 2003.
- [34]ZAPPELINI, A. B., “Análise de Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido”, Uberlândia-MG, Dissertação de mestrado, UFU.
- [35]CAMELO, E., “Análise Teórica da Geração de Ar Comprimido”, Programa de Eficientização Industrial-Módulo Compressores, Eletrobrás/Procel.
- [36]ROCHA, C. R., MONTEIRO, M. A. G., “Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido-Manual Prático”, Eletrobrás/Procel, 2005.
- [37]PERRONE, F. P. D., AFONSO, S., CAVALCANTI, E. S. C., CAPELLA, P. S., “A Solução no Caso Daimlerchrysler para Redução do Consumo de Energia em Sistemas de Ar Comprimido”, XVI SNPTEE, Campinas-SP, 2001.
- [38]MENDIS, N. N. R., PERERA, N., “Energy Audit: A Case Study”, 2<sup>nd</sup> International Conference on Information and Automation, 2006.
- [39]Companhia Paranaense de Energia-COPEL, “Manual de Eficiência Energética na Indústria”, Novembro, 2005.
- [40]DE CAMPOS, M. M., SAITO, K., “Sistemas Inteligentes em Controle e Automação de Processos”, Editora Ciência Moderna Ltda., RJ, 2004.
- [41]SIMÕES, M. G., SHAW, I. S., “Controle e Modelagem Fuzzy”, 2<sup>a</sup> ed., Editora Blucher, SP, 2007.
- [42]KAVACIC, Z., BOGDAN, S., “Fuzzy Controller Design”, Taylor & Francis Group, EUA, 2006.
- [43]LEE, C. C., “Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller – Part 1. IEEE Transactions on Industrial Systems, Man and Cybernetics, vol 20, n<sup>o</sup>2, 1990.
- [44]MIMBELA, R. R. F., “Modelo Fuzzy para Predição Conjunta de Porosidade e Permeabilidade Via Perfis Convencionais de Poço do Campo de Namorado – Bacia de Campos Renzo Rigo”, Macaé-RJ, 2005, Dissertação de mestrado, UENF.
- [45]YU, C. C., “Autotuning of PID Controllers”, 2<sup>nd</sup>, Springer London, 2006.
- [46]Simulink Matlab, R2006b, The MathWorks, Inc., September 2006.
- [47]LUYBEN, W. L., “Process Modeling, Simulation, and Control for Chemical Engineers”, 2<sup>nd</sup>, McGraw-Hill, New York, 1996.
- [48]OGATA, K., “Engenharia de Controle Moderno”, 4<sup>a</sup> ed., Prentice Hall do Brasil, SP, 2003.
- [49]ASTROM, K. J., HAGGLUND, T., “PID Controllers: Theory, Design, and Tuning”, 2<sup>nd</sup>, Instrument Society of America (ISA), EUA, 1995.
- [50]JÚNIOR, J. R.C., “Controladores PID Industriais com Sintonia Automática por Realimentação a Relé”, São Carlos-SP, 1999, Dissertação de mestrado, USP.

## Links úteis

[www.energy.gov](http://www.energy.gov)

[www.compressedairchallenge.org](http://www.compressedairchallenge.org)

[www.mme.gov.br](http://www.mme.gov.br)

[www.procelinfo.com.br](http://www.procelinfo.com.br)

[www.parker.com.br/training](http://www.parker.com.br/training)