

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRICOLA

**IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE
ESTRATÉGIAS DE CONTROLE APLICADAS EM UM
SISTEMA DE ARMAZENAMENTO REFRIGERADO**

ALEXANDRE TIZZEI

CAMPINAS
JANEIRO DE 2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRICOLA

**IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE
ESTRATÉGIAS DE CONTROLE APLICADAS EM UM
SISTEMA DE ARMAZENAMENTO REFRIGERADO**

Dissertação submetida à banca examinadora
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Agrícola na área de
concentração de Máquinas Agrícolas.

ALEXANDRE TIZZEI

Orientador: Prof. Dr. Nelson Luis Cappelli

CAMPINAS
JANEIRO DE 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

T545i Tizzei, Alexandre
Implementação e avaliação de desempenho de
estratégias de controle aplicadas em um sistema de
armazenamento refrigerado / Alexandre Tizzei. --
Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Nelson Luis Cappelli.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Refrigeração. 2. Controle. 3. Controladores PID.
4. Lógica Fuzzy. I. Cappelli, Nelson Luis. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Implementation and performance evaluation of control
strategies applied in a storage system for refrigerated

Palavras-chave em Inglês: Cooling, Control, PID controllers, Fuzzy logic

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Nelson Luis Cappelli, Vicente Idalberto Becerra Sablón,
Cláudio Kiyoshi Umezu

Data da defesa: 18/01/2011

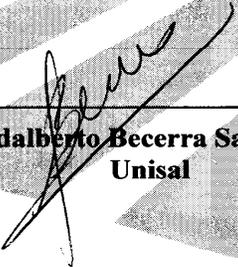
Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Alexandre Tizzei**, aprovado pela Comissão Julgadora em 18 de janeiro de 2011, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

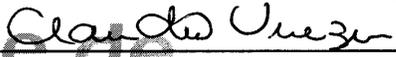
FEAGRI



Prof. Dr. Nelson Luis Cappelli – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp



Prof. Dr. Vicente Idalberto Becerra Sablón – Membro Titular
Unisal



Dr. Cláudio Kiyoshi Umezu - Membro Titular
Feagri/Unicamp

Faculdade de Engenharia Agrícola
Unicamp

DEDICATÓRIA

A minha esposa Regina e às minhas
filhas Maria Luiza e Beatriz.
Dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado o dom da vida.

A minha família que sempre me deram forças para continuar trabalhando.

Aos meus pais Lourdes e Nelson (*in memoriam*) que contribuíram sem medir esforços para a formação do meu caráter.

Ao Prof. Dr. Nelson Luis Cappelli por criar todas as condições para o meu desenvolvimento acadêmico, pelo ensino e paciência que teve ao me orientar.

Ao Prof. Dr Cláudio Kiyoshi Umezu pela dedicação e ensinamentos.

Aos integrantes da banca examinadora por colaborarem de maneira construtiva para o desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos de trabalho Carlos Renato e João Carlos pela amizade e apoio.

Aos colegas do laboratório de instrumentação e controle pela colaboração dedicada e despretensiosa.

Ao Pedro do laboratório de termodinâmica pelo inestimável apoio técnico e amizade.

A Prof^a. Dra. Marisa Franzoni pelo auxílio e dedicação.

Ao Prof. Dr. Luis Augusto Barbosa Cortez pela cessão do laboratório de termodinâmica e energia.

A UNICAMP e a coordenação da pós-graduação da FEAGRI, agradeço a todos os professores e funcionários que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao CNPq pelo apoio financeiro dado ao projeto de pesquisa.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1.1 CICLO DE REFRIGERAÇÃO.....	15
2.1.2 AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE PROCESSOS.....	16
2.1.3 CONTROLADOR LIGA-DESLIGA.....	17
2.1.4 CONTROLADOR PID	19
2.1.5 CONTROLADORES <i>FUZZY</i>	25
2.1.6 CRITÉRIOS DE DESEMPENHO PARA MALHAS DE CONTROLE.....	27
2.1.7 ÍNDICES DE DESEMPENHO PARA MALHAS DE CONTROLE.....	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.....	30
3.1.1 COMPRESSOR.....	31
3.1.2 CONDENSADOR.....	31
3.1.3 EVAPORADOR.....	31
3.1.4 DISPOSITIVO DE EXPANSÃO.....	31
3.1.5 TRANSMISSORES DE PRESSÃO.....	32
3.1.6 SENSORES DE TEMPERATURA	32
3.1.7 TRANSMISSORES DE TEMPERATURA.....	34
3.1.8 INVERSOR DE FREQUÊNCIA	37

3.1.9 TRANSDUTOR DE GRANDEZAS ELÉTRICAS	38
3.1.10 CONTROLE DE POTÊNCIA.....	40
3.1.11 PLACA PCI PARA AQUISIÇÃO DE SINAIS NI-6224	41
3.1.12 DIAGRAMAS DA INSTRUMENTAÇÃO.....	41
3.1.13 APLICATIVO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS, MONITORAMENTO E CONTROLE.....	44
3.1.14 MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE SINAIS	45
3.1.15 MÓDULO DE MONITORAMENTO E CONTROLE.....	46
3.1.16 CONTROLADOR LIGA – DESLIGA	50
3.1.17 ESTRATÉGIA DE CONTROLE LIGA-DESLIGA.....	50
3.1.18 CONTROLADOR PID	51
3.1.19 ESTRATÉGIA DE CONTROLE PID	54
3.1.20 CONTROLADOR <i>FUZZY</i>	55
3.1.21 ESTRATÉGIA DE CONTROLE <i>FUZZY</i>	56
3.1.22 VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS	56
3.1.23 BASE DE REGRAS.....	59
3.1.24 DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES INICIAIS DOS EXPERIMENTOS.....	59
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5. CONCLUSÃO.....	71
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Unidades frigorificadas no Brasil – ABIAF 2008.	2
Figura 2: Sistema experimental utilizado por (Aprea et al. 2004).....	11
Figura 3: Modelo matemático MIMO (HUA et al. 2008)	12
Figura 4 : Diagrama de blocos do modelo desenvolvido por SOYGUDER e ALLI 2008.	13
Figura 5: Ciclo termodinâmico, (COSTA, 1982).....	15
Figura 6: Controlador liga-desliga sem histerese	18
Figura 7: Histerese no controlador liga-desliga.....	18
Figura 8: Estratégia de controle liga-desliga	19
Figura 9: Sistema de controle em malha fechada	20
Figura 10: Diagrama de blocos do PID paralelo clássico.....	20
Figura 11: Diagrama de Blocos de um controlador PID paralelo alternativo	21
Figura 12: Controle em malha fechada com ganho proporcional	22
Figura 13: Estrutura de um controlador <i>fuzzy</i>	25
Figura 14: Critérios de desempenho	28
Figura 15: Instrumentação original do sistema.....	30
Figura 16: Curva característica do sensor Pt-100. Fonte: ERICSON, 2002.....	33
Figura 17: Sensor de temperatura - Pt100	34
Figura 18: (a) Configuração física do transmissor de temperatura (Sensym)	35
Figura 19: Software syscal (Sensym)	36
Figura 20: Transmissores de temperatura.....	37
Figura 21: Inversor de frequência.....	38
Figura 22: Esquema de ligação do medidor de grandezas elétricas (Kron).	39
Figura 23: Transdutor de grandezas elétricas	40
Figura 24: Resistências elétricas para simulação da carga térmica	40
Figura 25: Vistas da câmara de armazenamento e posição dos sensores TE105 e TE107 e do banco de resistências térmicas JC101.....	42
Figura 26: Instrumentação do sistema de refrigeração	43
Figura 27: Sistema computacional desenvolvido	44

Figura 28: Controle para aquisição de dados.....	45
Figura 29: Aplicativo para aquisição de dados, monitoramento e controle	46
Figura 30: Mostradores de temperatura e pressão	47
Figura 31: Mostradores das grandezas elétricas	47
Figura 32: Seletores de valor de referência , frequência elétrica e carga térmica.	48
Figura 33: Mostrador gráfico de temperaturas	48
Figura 34: Seleção das ações de controle	49
Figura 35: Diagrama dos blocos de controle liga-desliga – LabVIEW	50
Figura 36: Diagrama de blocos - ação proporcional.....	51
Figura 37: Diagrama de blocos – ação de controle integral	52
Figura 38: Diagrama de blocos - ação de controle derivativa	53
Figura 39: Diagrama de blocos – tempo de amostragem	54
Figura 40: Controlador PID - LabVIEW	54
Figura 41: Diagrama de blocos do controlador <i>fuzzy</i> - LabVIEW	55
Figura 42: Parâmetros da variável linguística V_Temp_E_C.....	57
Figura 43: Parâmetros da variável linguística DIF__Erro_Temp	58
Figura 44: Parâmetros da variável linguística Var_SP.....	58
Figura 45: Controle liga-desliga com 1.530kcal h ⁻¹ de carga térmica.....	61
Figura 46: Controle liga-desliga com 2.384,3kcal h ⁻¹ de carga térmica.....	62
Figura 47: Controle liga-desliga com 1.530kcal h ⁻¹ de carga térmica e histerese 1°C.....	63
Figura 48: Controle PID com 1.530kcal h ⁻¹ de carga térmica - Temperaturas.....	64
Figura 49: Controle PID com 1.530kcal h ⁻¹ de carga térmica – Frequência elétrica	64
Figura 50: Controle PID com 2.384,3kcal h ⁻¹ de carga térmica - Temperaturas.....	65
Figura 51: Controle PID com 2.384,3kcal h ⁻¹ de carga térmica – Frequência elétrica	66
Figura 52: Controle <i>fuzzy</i> com 1.530kcal h ⁻¹ de carga térmica - Temperaturas	67
Figura 53: Controle <i>fuzzy</i> com 1.530kcal h ⁻¹ de carga térmica – Frequência elétrica.....	67
Figura 54: Controle <i>fuzzy</i> com 2.384,3kcal h ⁻¹ de carga térmica - Temperaturas	68
Figura 55: Controle <i>fuzzy</i> com 2.384,3kcal h ⁻¹ de carga térmica – Frequência elétrica.....	69

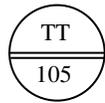
LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros ZIEGLER & NICHOLS(1942)	24
Tabela 2: Parâmetros CHR (CHIEN et al.,1952)	24
Tabela 3: Características do sensor de temperatura - Pt100 - Sensym.....	33
Tabela 4: Características do transmissor de temperatura - Sensym	35
Tabela 5: Características do inversor de frequência - WEG	37
Tabela 6: Características do transdutor de grandezas elétricas - Kron.....	39
Tabela 7: Características da placa PCI-NI6221	41
Tabela 8: Descrição dos instrumentos utilizados para a aquisição de dados e controle.....	43
Tabela 9: Temperatura de armazenamento de frutas.....	56
Tabela 10 : Base de regras do controlador <i>fuzzy</i>	59
Tabela 11: Comparação entre a simulação e o experimento	70

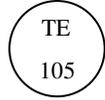
LISTA DE SIGLAS

ANFIS	<i>Adaptive network based fuzzy inference systems</i>
COM	<i>Component object module</i>
COP	Coeficiente de eficácia
CP	Computador utilizado para o controle do processo
EEV	<i>Electronic expansion valve</i>
HVAC	<i>Heating, ventilating and air conditioning</i>
IAE	Integral absoluta do erro
IEEE	<i>Institute of electrical and electronics engineers</i>
ISE	Integral do erro quadrático
ITAE	Integral do erro absoluto ponderada pelo tempo
JC	Relé de estado sólido
JIT	Transdutor indicador de grandezas elétricas
MSE	Média do erro quadrático
OV	<i>Output value</i>
PID	Proporcional integral e derivativo
PT	Transdutor de pressão
PV	<i>Process variable</i>
PWM	<i>Pulse width modulation</i>
RNA	Redes neurais artificiais
SIC	Controlador inversor de frequência
SP	<i>Set point</i>
TE	Elemento sensor de temperatura
TIC	Controlador indicador de temperatura
TT	Transmissor de temperatura
VI	<i>Virtual instruments</i>
VSC	<i>Variable speed control</i>

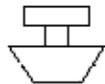
LISTA DE SÍMBOLOS



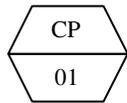
Instrumento discreto montado em painel local.



Instrumento discreto montado no campo.



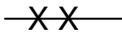
Compressor.



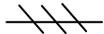
Computador do processo montado no painel principal de controle.



Sinal elétrico 4 a 20mA.



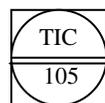
Tubo capilar do elemento de enchimento terminal.



Conexão à rede trifásica.



Válvula de controle auto operada.



Controlador indicador de temperatura montado em painel local.

RESUMO

O armazenamento refrigerado dos produtos agrícolas visa atender a uma demanda de produtos mais saudáveis por parte dos mercados e dos consumidores. Tende também, proporcionar aos produtores uma alternativa de aprazar o tempo para a comercialização dos produtos armazenados. O armazenamento refrigerado é importante para uma melhor conservação dos produtos perecíveis, pois com o decréscimo da temperatura de armazenamento, as reações metabólicas diminuem. Os sistemas de refrigeração por compressão de vapor, em sua grande maioria, executam o algoritmo de controle liga-desliga, mantendo o motor elétrico do compressor em uma rotação fixa, e não contemplando as condições variáveis as quais o sistema está sujeito. O motor elétrico do compressor é acionado à plena capacidade quando apenas é necessário suprir pequenas variações de temperatura. A estratégia de controle liga-desliga provoca uma grande variação de temperatura no interior da câmara de armazenamento e um maior consumo de energia elétrica, quando comparado a sistemas que utilizam técnicas mais eficazes de controle. Nesse trabalho, estudou-se a possibilidade de se reduzir o consumo de energia elétrica em um sistema de refrigeração, submetendo o motor elétrico do compressor a um regime de rotação variável, segundo a carga térmica a ser suprimida. Para tanto, instrumentou-se o sistema de refrigeração e foi desenvolvido um aplicativo para aquisição de dados, monitoramento e controle do processo, a fim de possibilitar a implementação das ações de controle, tais como: liga – desliga, proporcional, integral e derivativo (PID) e *fuzzy*. Buscou-se através da implementação das ações de controle, uma menor variação da temperatura no interior da câmara de armazenamento e uma economia de energia elétrica. O controlador *fuzzy* apresentou os melhores resultados, superando tanto o controlador liga – desliga, quanto o controlador PID.

Palavras - chave: câmara fria; controle; liga – desliga; PID; *fuzzy*;

ABSTRACT

The cold storage of agricultural products intended to meet a demand for healthier products by markets and consumers. You can also give producers an alternative to extend the time for the marketing of products stored. Cold storage is important for a better conservation of perishable products. Because with the decrease in storage temperature, the metabolic reactions subside. The refrigeration vapor compression, mostly running the control algorithm on-off, keeping the electric motor of the compressor in a flat spin and not contemplating the varying conditions which the system is subjected. The electric motor of the compressor is driven at full capacity only when it is necessary to fill small temperature variations. The control strategy on-off causes a large variation in temperature within the storage chamber and a higher power consumption compared to systems using more effective techniques of control. We studied the possibility of reducing the power consumption in a refrigeration system, subjecting the electric motor of the compressor to a variable speed of the second heat load to be removed, for both, if the instrument cooling system and a software was developed for data acquisition, monitoring and process control, to enable the implementation of control measures such as on - off, proportional, integral and derivative (PID) and fuzzy. Sought through the implementation of control measures, a smaller variation of temperature inside the storage chamber and greater energy saving. The fuzzy controller showed the best results, exceeding both the on-off controller as PID controller.

Keywords: cooling; control; on - off; PID, fuzzy;

1. INTRODUÇÃO

Com a mudança dos hábitos alimentares, a demanda por produtos saudáveis e bem conservados está se tornando cada vez mais valorizada por parte dos mercados e dos consumidores. Em geral, isso se explica entre outros aspectos, pela concorrência cada vez mais acirrada entre diferentes ofertas e pela maior conscientização da sociedade em priorizar a qualidade nos produtos que irão consumir; aspectos que contribuem para o aumento na produtividade e uma melhoria na qualidade da cadeia de produção de alimentos. As perdas de alimentos no Brasil, segundo GOMES (2006) se caracterizam por dois aspectos: quantitativo e qualitativo. O primeiro se relaciona com a quantidade de alimentos perdidos pela falta de cuidados em seu manuseio e conservação, enquanto que o segundo envolve a perda de qualidade com relação ao aspecto do produto e perda no valor nutricional.

O setor de frutas, legumes e verduras, com os demais produtos perecíveis, totalizam 56,4% das perdas totais, em sua grande parte por falta de transporte e armazenamento adequados. Perdas que poderiam ser minimizadas colocando-se em prática alguns conceitos de engenharia, tais como a cadeia do frio, que consiste em resfriar o produto desde a sua produção ou extração e mantê-lo refrigerado até a chegada ao consumidor final.

Segundo o Instituto de Economia Agrícola – IEA (2009), no ano de 2008 o Brasil teve uma produção de frutas de aproximadamente 40 milhões de toneladas, em uma área plantada de aproximadamente 2,5 milhões de hectares. O país ocupa a terceira posição no *ranking* mundial dos maiores produtores de frutas, atrás apenas da Índia e da China, e o valor da produção da fruticultura é superior a 10 bilhões de reais anuais. Do total da produção, 47% vão para o consumo na forma de frutas frescas, sendo 45% destinados ao mercado interno e outros 2%, destinados às exportações. Os outros 53% da produção são utilizados nas agroindústrias, sendo a maior parte sob a forma de suco de laranja, produto pelo qual o Brasil é o maior produtor e exportador mundial, tendo como principais destinos o mercado europeu e norte-americano.

O baixo índice de exportações se deve a falta de tecnologia adequada aplicada a cada etapa da cadeia de produção, de modo a atender as rigorosas normas impostas pelos países importadores, dentre elas a de seguir rigorosamente as etapas da cadeia do frio, pois o produto irá percorrer um longo caminho até chegar ao consumidor final.

A capacidade de armazenagem refrigerada pública no Brasil, passou de 100 mil m³ em 1972 para 1,4 milhões de m³ em 1987; em 1995 passou a ser de 2,1 milhões de m³. Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Armazenagem Frigorificada - ABIAF (2008) existem cerca de 4,9 milhões de m³ de câmaras frigoríficas de uso público em todo o país, concentrados nas regiões Sul e Sudeste, contra 48 milhões nos Estados Unidos, 60 milhões na Europa e 25 milhões no Japão, o que revela o potencial de crescimento desse setor. Aproximadamente 87% do total de câmaras frigoríficas instaladas no Brasil pertencem à iniciativa privada, enquanto que o restante pertence a empresas governamentais. A Figura 1 mostra a distribuição das unidades frigoríficas em alguns estados brasileiros.

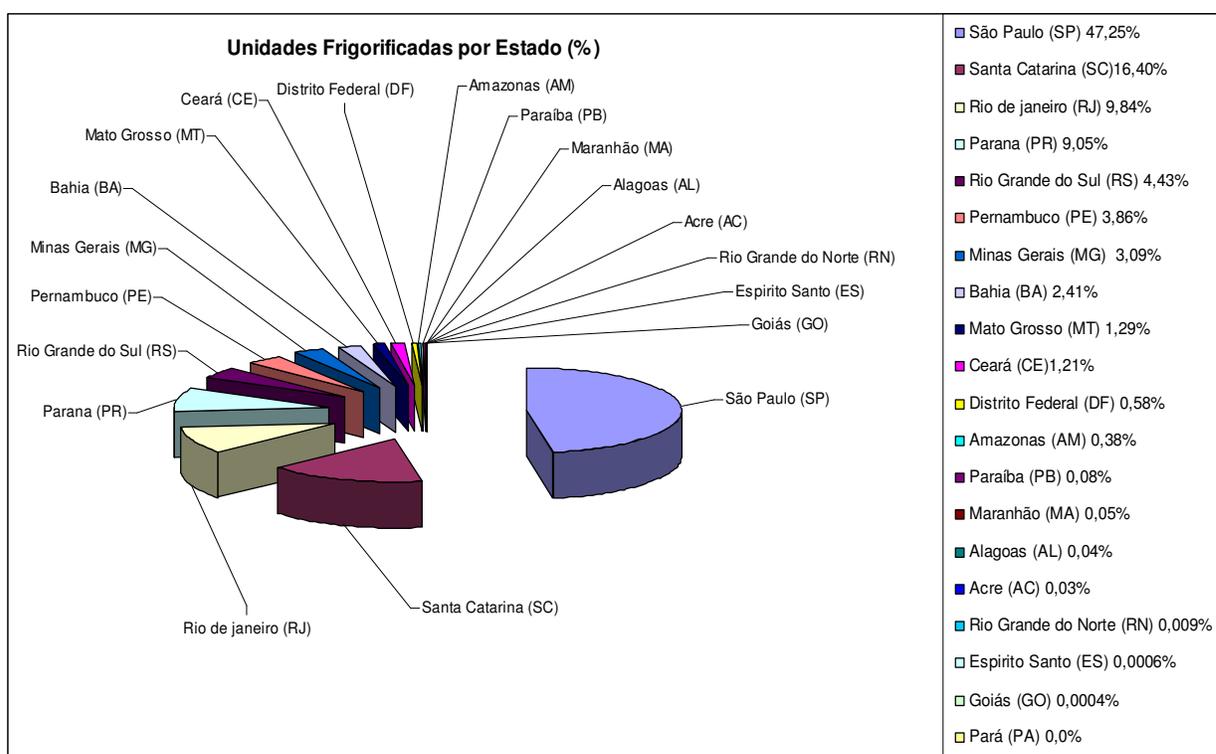


Figura 1: Unidades frigorificadas no Brasil – ABIAF 2008

A utilização de sistemas de refrigeração em câmaras de armazenamento deverá crescer devido aos altos índices de produção, e a tendência ao aumento das exportações TIBOLA e FACHINELLO (2004). Neste cenário, a parcela de responsabilidade da refrigeração no consumo de energia elétrica é significativa. Cerca de um terço de toda energia elétrica produzida no mundo é destinada aos sistemas de refrigeração e climatização, segundo MOREIRA e VIANA (2005).

Considerando os aspectos levantados anteriormente, bem como, a crescente escassez dos recursos naturais que se pronuncia, faz-se necessário o desenvolvimento de novas tecnologias mais eficientes do ponto de vista da utilização da energia elétrica, em especial, no que se refere ao armazenamento de produtos perecíveis.

Os sistemas de refrigeração atualmente disponíveis no mercado utilizam, em sua maioria, apenas a estratégia de controle convencional liga-desliga em sua operação. Essa estratégia de controle, além de apresentar um alto consumo de energia elétrica, face à alta demanda de potência elétrica na partida dos motores, favorece o desgaste mecânico dos compressores (altos valores de torque, maior vibração, problemas com a lubrificação, entre outros), o que aumenta os custos operacionais (BUZELIN, 2003).

No Brasil, alguns trabalhos estão sendo realizados na direção do desenvolvimento de novas estratégias de controle; contudo, há ainda a necessidade de novos estudos nesta área, principalmente levando-se em consideração aplicações específicas em câmaras para resfriamento de produtos agrícolas.

A expectativa é que, à luz do referencial teórico adotado, este trabalho possa contribuir amplamente com a área de automação e controle, ao projetar um dispositivo que venha validar o modelo matemático desenvolvido por MENEGHETTI (2009), comparar o resultado das simulações para as ações de controle liga-desliga, proporcional, integral e derivativo (PID) e, também, lógica *fuzzy*, considerando o consumo de energia elétrica e, ainda, a menor oscilação da temperatura no interior da câmara, que indiretamente pode refletir na qualidade do armazenamento dos produtos. Para tanto, serão utilizadas técnicas de controle e automação, em conjunto com técnicas de inteligência artificial, atuando na frequência elétrica fornecida ao motor do compressor, para variar a sua rotação e controlar a temperatura no interior da câmara de armazenamento em um valor desejado.

Este trabalho propôs o desenvolvimento de um projeto de instrumentação e controle, a implementação de um software aplicativo para a aquisição de dados, monitoramento e controle do processo, a validação dos modelos matemáticos e ações de controle: liga-desliga, PID e *fuzzy* de um sistema de refrigeração por compressão de vapor, visando à redução no consumo de energia elétrica em comparação com o sistema tradicional, e a mínima variação de temperatura no interior da câmara de armazenamento.

O estudo experimental do sistema de refrigeração por compressão de vapor tem por objetivos específicos:

- Especificação dos instrumentos a serem instalados no sistema.
- Instrumentação do sistema de refrigeração por compressão de vapor.
- Desenvolvimento de um aplicativo em LabVIEW 8.5 para aquisição de dados, monitoramento e controle das variáveis do processo.
- Medição do consumo de energia elétrica do processo submetido a diferentes condições de operação.
- Validação experimental, dos modelos matemáticos e ações de controle propostos por MENEGHETTI (2009).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados e comentados os artigos científicos que serviram como referência para o desenvolvimento desse trabalho.

A pesquisa aplicada a sistemas de refrigeração, no sentido de visar a economia de energia elétrica, tem sido realizada e apresentada de diversas maneiras, como na utilização de novos processos de degelo, no uso de válvulas servo-controladas para expansão, sub-resfriamento, projetos e dimensionamento de tubulações, além da utilização de micro-controladores, entre outros KRAKOW et al.(1992).

O compressor do sistema de refrigeração por compressão de vapor é o equipamento que mais consome energia elétrica no sistema, contribuindo com cerca de 80%. Aumentando a eficiência deste equipamento, aumenta-se o desempenho de todo o sistema (GARCIA et al., 2007).

Uma alternativa para a redução do consumo de energia elétrica pelo motor do compressor é variar a sua rotação, atuando na frequência elétrica fornecida ao motor do compressor, por meio de um inversor de frequência.

A possibilidade de se atuar diretamente na fonte de maior consumo num sistema de refrigeração, que são os motores elétricos dos compressores, surgiu a partir da evolução na tecnologia dos inversores de frequência. Nesse contexto tem sido estudado um conjunto de aplicações para a sua utilização no controle da rotação dos motores dos compressores (BUZZELIN, 2003).

Os inversores de frequência utilizam a tecnologia dos semicondutores de potência, para que a partir da tensão e frequência fornecidas pela rede, possam proporcionar uma fonte de frequência variável ao motor elétrico do compressor. São compostos por duas partes: uma de retificação, que converte uma tensão alternada, com frequência fixa em tensão contínua, e outra de inversão, que converte uma tensão contínua, em tensão alternada com frequência variável (SILVA, 2003).

Segundo FLÓRES (2004), o controle da velocidade de rotação variável tem sido utilizado para se reduzir a vazão de refrigerante no compressor, em resposta as condições de refrigeração com carga parcial, diminuindo, assim o consumo de energia elétrica quando comparado com o mesmo compressor com velocidade fixa.

Segundo TEITEL et al. (2008), a utilização de inversores de frequência, instalados em ventiladores para climatização de casas de vegetação e aviários, resultou em uma redução no consumo médio de energia elétrica no período de um mês de cerca de 0,64% e 0,75% respectivamente, em comparação com o sistema tradicional liga-desliga. Outra constatação foi a de que, no sistema com rotação variável dos motores dos ventiladores, a gama de variações de amplitude na temperatura do ambiente, tanto nas casas de vegetação quanto nas granjas, foi menor do que no sistema liga-desliga.

Os pesquisadores, TASSOU E QURESHI (1997), avaliaram o desempenho de modo dinâmico em compressores de refrigeração controlados por inversores de frequência. Os resultados mostraram que partidas sem utilização de inversores de frequência consomem 5% a mais de energia elétrica do que com a utilização do inversor. Isso se deve, principalmente, à rampa de partida em inversores. Nesse mesmo estudo foi igualmente verificado que a redução no consumo de energia elétrica é uma função do tipo de compressor empregado no sistema de velocidade variável.

Para um sistema de refrigeração ficou comprovado que a variação da rotação do compressor, em função da variação de frequência elétrica, mostrou ser a melhor variável manipulada para compor as malhas de controle, pois proporcionou as menores oscilações das variáveis, embora implique num maior consumo de energia elétrica, quando necessária à supressão das perturbações positivas na carga térmica, imposta ao sistema (SILVA, 2003).

Segundo ALVAREZ E TRYSTRAM (1995), a diferença entre o valor de referência da temperatura do ar na câmara de armazenamento e o valor real de medição da temperatura no produto, é uma maneira interessante de considerar a dificuldade que o modelo clássico tem de manter o controle da temperatura em toda a câmara, devido à heterogeneidade na distribuição do ar em meio aos produtos armazenados.

Frente ao comportamento transiente e as não linearidades de alguns processos, as teorias de controle clássico apresentam limitações quanto à representação desses processos através de modelos matemáticos (PINHEIRO, 2000).

Os efeitos da não linearidade e a variação dos ganhos podem ser minimizados pelo controlador *fuzzy* para as aplicações mais complexas, quando comparado ao controlador PID convencional. Estas propriedades foram observadas por CARVAJAL et al. (2000) no projeto de um controlador *fuzzy*-PID, aplicado a diversos casos não lineares.

Segundo PEREIRA FILHO (1999), o tratamento das informações de forma qualitativa, utilizando expressões linguísticas, representa uma alternativa quando os processos a serem controlados são de difícil modelagem matemática por apresentarem não linearidades. O controlador *fuzzy* pode ser aplicado no controle desses processos, por possuir a característica de trabalhar com incertezas, tratando as informações de maneira semelhante ao raciocínio humano.

FERREIRA e PARANHOS (2004) enfatizam o caráter aproximado e qualitativo que a lógica *fuzzy* trata as informações podendo, dessa forma, reproduzir o modelo de inteligência humana.

ZADEH (1965) propõe, pela lógica *fuzzy*, uma simplificação dos complexos modelos matemáticos. Com esta simplificação, a lógica *fuzzy* se aproxima da linguagem humana no uso de conceitos para descrição de atributos dos conhecimentos como: alto, baixo, frio, quente e outros parâmetros subjetivos e suficientes para a tomada de decisões.

As vantagens e desvantagens do uso dos controladores *fuzzy* foram elencadas por PEREIRA FILHO (1999), sendo elas:

Vantagens:

- Não necessita de um modelo matemático do processo;
- Permite implementar o conhecimento e a experiência de um especialista humano por meio de regras linguísticas compreensíveis;
- Possibilita controlar processos não lineares.

Desvantagens:

- Não há padronização no processo de aquisição do conhecimento humano e de estabelecimento das regras;
- Existe dificuldade no ajuste das funções de pertinência e estabilidade do sistema, pois em geral o modelo é desconhecido.

Os sistemas de controle *fuzzy* se classificam em controladores *fuzzy* convencionais e adaptativos. Os primeiros são usados em processos complexos não lineares e variantes no tempo, para os quais se conhece a grandeza dessas variações, enquanto que os controladores *fuzzy* adaptativos são mais adequados aos processos nos quais essas variações são desconhecidas.

A utilização de controladores *fuzzy* em processos lineares não apresenta um melhor desempenho quando comparada aos controladores clássicos. Em sistemas dinâmicos, nos quais as não linearidades estão presentes, a utilização de controladores *fuzzy*, que contenham comportamentos não lineares, pode produzir melhores resultados que os controladores lineares. Segundo esse mesmo autor, os controladores *fuzzy* adaptativos, por possuírem a capacidade de lidar com incertezas, alteram os parâmetros do sistema, quando as variáveis do processo controlado apresentam variações. A ação de adaptação modifica as funções de pertinência, os fatores de escala, ou mesmo as regras do controlador (PINHEIRO, 2000).

A participação de um determinado elemento em um conjunto *fuzzy* é determinada por um grau de pertinência (função de pertinência) que define o quanto aquele elemento pertence ao conjunto.

Existem vários tipos de funções de pertinência em controladores *fuzzy* para a avaliação dos dados de entrada e saída. De forma geral, elas se dividem em dois grupos: as funções lineares, tais como as funções triangulares e trapezoidais e as funções não lineares, como as funções gaussianas (DRIANKOV et al.1996).

Para PEREIRA FILHO (1999), as funções de pertinência lineares são as mais utilizadas, principalmente as triangulares, devido à sua implementação ser mais simples e o menor tempo gasto com o processo de defuzzificação.

O processo de defuzzificação consiste em tomar o conjunto *fuzzy* de saída, gerado pela ativação das regras no processo de inferência, e transformá-lo em um valor numérico correspondente.

LEITE (2007) afirma que o método de defuzzificação mais utilizado é o do centro de gravidade. Nesse método é efetuado o cálculo de massa da área formada pela união das contribuições de todas as regras, enquanto que os graus de pertinência são utilizados como pesos para o cálculo de uma média ponderada. Existem ainda outros métodos de defuzzificação, como critério dos máximos, média dos máximos e bissetor da área.

Devido a sua natureza heurística, os controladores *fuzzy* possuem desempenho superior aos controladores convencionais, fornecendo tratamento de não linearidade, quando sintonizados de forma adequada (LEITE, 2007).

Para PEREIRA FILHO (1999), devido à flexibilidade na implementação do controlador *fuzzy* e, também, ao grande número de parâmetros de entrada, em função dos quais

são implementadas as funções de pertinência, a sintonia de um controlador *fuzzy* torna-se mais difícil do que a sintonia de um controlador convencional, sendo a tentativa e erro o método mais comum de sintonia.

A aplicação de diferentes modos de controle convencionais, tais como, proporcional e integral (PI) e proporcional, integral e derivativo (PID), foram estudadas por SILVA (2003), para malhas individuais e multi malhas. Comparando o desempenho com ações de controle inteligentes, do tipo, *fuzzy* – PI e *fuzzy* - PID de um sistema de refrigeração para resfriamento de líquido, através do resfriamento de um líquido secundário (propileno glicol), referente ao erro em regime permanente, para as variáveis controladas, os controladores convencionais obtiveram um melhor desempenho, quando comparados aos controladores *fuzzy*. Com relação ao consumo de energia elétrica pelo compressor, o controlador *fuzzy* obteve um melhor desempenho, economizando cerca de 14,4% em média, para a malha de controle do resfriamento do líquido secundário (propileno glicol). Para a malha de controle de temperatura do evaporador, o controlador PID, mostrou –se mais apropriado, mesmo quando o consumo de energia elétrica foi superior que os demais controladores.

SILVEIRA Jr. et al.(2005) e SILVA (2003) enfatizaram um rápido crescimento na utilização de controladores *fuzzy*, devido à capacidade destes controladores atuarem nos sistemas, baseando-se no conhecimento especialista. Para o segundo autor “O uso do controle *fuzzy* nos processos industriais vem crescendo rapidamente nas últimas décadas, principalmente em processos de difícil modelagem matemática, devido à sua capacidade de atuar no sistema baseando-se apenas no conhecimento especialista e na capacidade de inter-relacionar todas as variáveis do processo”.

O uso do controle *fuzzy* nos processos industriais tem aumentado muito nas últimas décadas, especialmente em processos de difícil modelagem matemática, devido à sua capacidade de funcionar em um sistema baseado exclusivamente em conhecimentos de especialistas e também inter-relacionar todas as variáveis de processo (SILVEIRA JR et al. 2005).

Em um resfriador de líquido, a qualidade está diretamente relacionada à capacidade de manter a temperatura do fluido secundário exatamente no valor exigido pelo processo. O desenvolvimento e a avaliação experimental dos controladores *fuzzy*-PI e *fuzzy*-PID aplicados a um sistema de refrigeração líquida (*chiller*), mostraram que os controladores *fuzzy* foram

satisfatoriamente adaptáveis aos processos de resfriamento líquido. (SILVEIRA JR et al. 2005).

APREA et al. (2004), propuseram o controle de um sistema de refrigeração por compressão de vapor, baseado em lógica *fuzzy*, capaz de selecionar a velocidade mais adequada do motor elétrico do compressor em função da temperatura de armazenamento do produto, em um aparato construído especificamente para o experimento.

O objetivo principal foi o de avaliar a economia de energia elétrica proporcionada pelo algoritmo *fuzzy*, que continuamente regula a velocidade do compressor, por meio de um inversor de frequência, na faixa de 30Hz a 50Hz, em comparação com o controle clássico que impõe ciclos liga-desliga, no qual o motor do compressor opera na frequência nominal de 50Hz. Os resultados experimentais mostram uma redução de 13% no consumo de energia elétrica.

A Figura 2 ilustra o aparato utilizado pelos autores para aplicação do sistema baseado em lógica *fuzzy*. É possível verificar que o motor do compressor é acionado por um inversor de frequência e dentro da câmara existem aquecedores para a simulação da carga térmica. A temperatura do condensador foi controlada, para tornar possível a simulação do comportamento do sistema em diferentes estações do ano. Foram executados testes com dois fluídos refrigerantes o R407C e o R507. Nestas circunstâncias, os autores obtiveram uma redução média de 10% no consumo de energia quando comparado ao sistema liga-desliga.

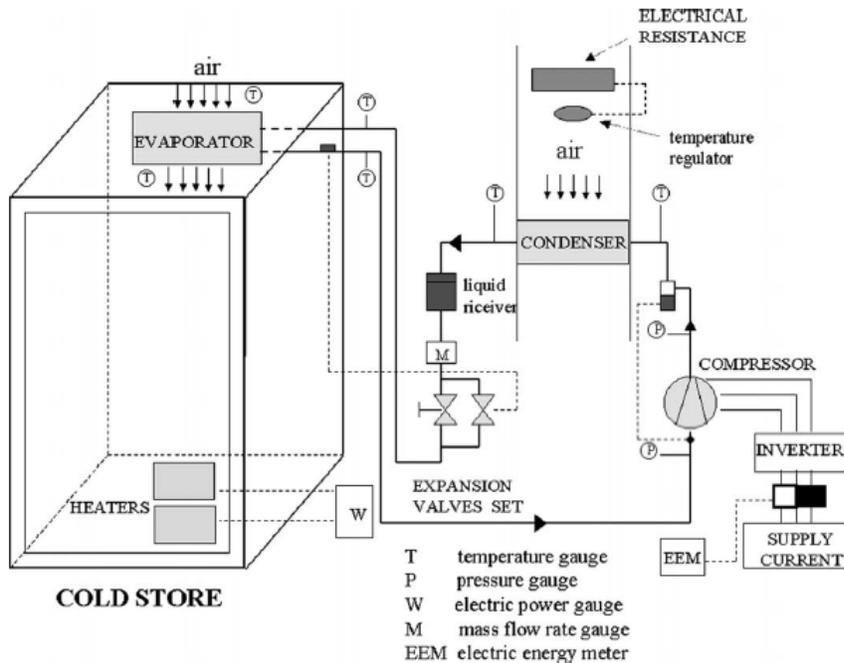


Figura 2: Sistema experimental utilizado por (Aprea et al. 2004)

O experimento de HUA et al.(2008), numa câmara de 1200x700x1650mm, utilizando controle de rotação do compressor hermético, condensador e evaporador com troca de calor por ar, e também, controle eletrônico da válvula de expansão, afirmaram que é possível alcançar até 30% de economia de energia no compressor. Aplicando controle PI, utilizaram simulações em um sistema *MIMO* (múltiplas entradas e múltiplas saídas), conforme representado na Figura 3. As entradas T_a e SH representam, respectivamente, a referência da temperatura da câmara e da temperatura de superaquecimento na saída do evaporador. Os blocos C_1 e C_2 representam os controladores PI de cada malha. O bloco $G_{1_{T_a}}$ e $G_{2_{SH}}$ transferem as grandezas de saída de seus respectivos controladores em temperatura da câmara e de superaquecimento. Os blocos $G_{1_{SH}}$ e $G_{2_{T_a}}$ representam a influência de uma variável na outra.

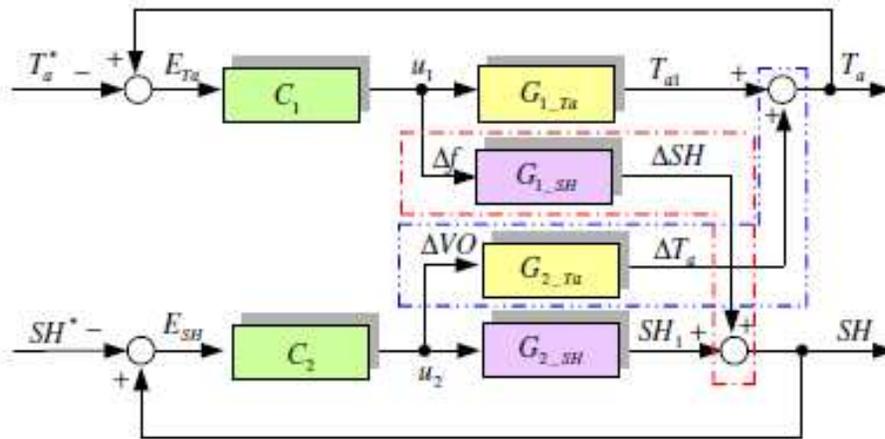


Figura 3: Modelo matemático MIMO (HUA et al. 2008)

Um controle inteligente para sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC - *heating, ventilating and air-conditioning*) foi desenvolvido por SOYGUDER e ALLI (2009), com vazão de ar variável para o controle da temperatura de ambientes. Os modelos e correlações entre a vazão de ar do sistema e a temperatura foram obtidos no software simulink com controladores PID - *fuzzy*, derivativos e com auto-sintonia, e comparados com aplicações de controladores PD e PI. Os resultados mostraram uma melhor resposta do sistema, em termos de erro, estabilidade e resolução, quando usado o controlador PID - *fuzzy*.

SOYGUDER e ALLI (2006) apresentaram o projeto de otimização de um sistema HVAC, no qual o ambiente foi dividido em duas zonas distintas, como demonstra o diagrama de blocos da Figura 4. Para o controle do processo foi projetado um controlador PID convencional, que controla o fluxo de ar variável para cada zona, tendo como referência a temperatura ambiente e um terceiro controlador PID, baseado em redes adaptativas e sistema de inferência *fuzzy* (ANFIS – *Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems*), para prever a velocidade do ventilador, com o propósito de minimizar o consumo de energia elétrica do sistema de climatização. Nas simulações realizadas pelos autores, os valores previstos com a ANFIS podem ser utilizados para prever a velocidade do ventilador, proporcionando ao sistema bastante precisão.

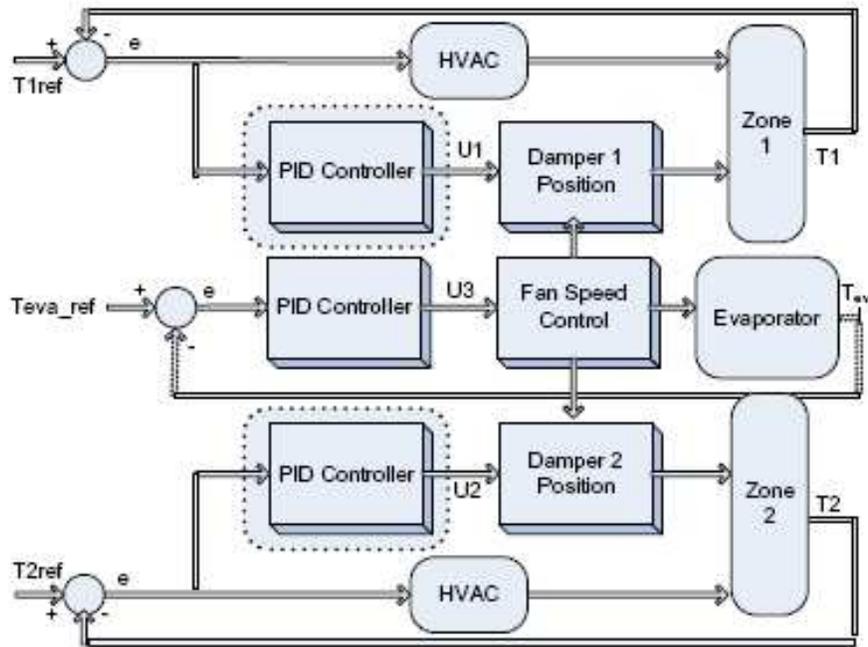


Figura 4 : Diagrama de blocos do modelo desenvolvido por SOYGUDER e ALLI 2008

O desenvolvimento de um modelo matemático, de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO) para um sistema de refrigeração, foi realizado por MENEGHETTI (2009), e mostra a possibilidade de se reduzir o consumo de energia elétrica num sistema de refrigeração convencional, submetendo o sistema a um regime de rotação variável e, também, de proporcionar ao sistema uma menor variação da temperatura do ar no interior da câmara de refrigeração.

Nas simulações foram implementadas e testadas estratégias de controle do tipo liga – desliga, proporcional, integral e derivativo (PID) e *fuzzy*. Os resultados apresentados demonstram que, tanto o controlador PID quanto o controlador *fuzzy*, obtiveram um melhor desempenho quanto a menor variação da temperatura do ar no interior da câmara de armazenamento em comparação com a estratégia de controle liga-desliga. O controlador PID apresentou melhor desempenho quanto ao erro em regime permanente, e o controlador *fuzzy* obteve os melhores resultados quanto à economia de energia elétrica.

Um estudo realizado por EKREN et al. (2010), aborda os efeitos de diferentes métodos de controle em um compressor tipo *scroll*, com velocidade variável (VSC), e válvula de expansão controlada eletronicamente por motor de passo (EEV) em um sistema *chiller*.

Dois procedimentos diferentes foram aplicados para o controle EEV e VSC: controlar cada componente individualmente, enquanto a outra foi fixada a um valor constante e, o controle de ambas as partes em conjunto utilizando o mesmo algoritmo. Três diferentes algoritmos de controle, tais como proporcional, integral e derivativo (PID), lógica fuzzy e redes neurais artificiais (RNA) foram experimentadas. No primeiro procedimento, o controlador PID apresentou solução razoável para o controle, proporcionando estabilidade na temperatura de superaquecimento do fluido refrigerante. No segundo procedimento, o controlador baseado em redes neurais artificiais (RNA) foi escolhido para atingir o consumo mínimo de energia elétrica e mais estabilidade na temperatura de superaquecimento do fluido refrigerante. Desta forma, o controlador RNA proporcionou um menor consumo de energia elétrica de 8,1% para o primeiro procedimento e 6,6% para o segundo procedimento do que os dois controladores PID e *fuzzy*, respectivamente.

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1.1 CICLO DE REFRIGERAÇÃO

A produção de frio por compressão mecânica de vapor utiliza um sistema que retira calor de um ambiente e transporta para outro.

Conforme Figura 5, verifica-se que o sistema possui um compressor (entre os pontos 1 e 2) que é responsável por admitir o vapor saturado, elevando sua pressão. Este vapor em alta pressão é conduzido ao condensador que efetua a troca de calor com ambiente externo, fazendo com que o vapor seja condensado e liquefeito. O líquido refrigerante é impelido até a válvula de expansão, que permite que o mesmo, em alta pressão, tenha seu volume expandido, voltado ao estado de vapor saturado. Nesta fase o líquido perde calor e se vaporiza passando pelo evaporador e retirando calor do ambiente interno.

A análise do ciclo termodinâmico efetuado pelo sistema tem início no compressor. Segundo COSTA (1982) a compressão é hipoteticamente isentrópica, na qual o vapor saturado passa da pressão P_0 para pressão P_c e da entalpia h_1 para h_2 , pelo trabalho mecânico realizado pelo compressor, representado pela passagem do ponto 1 para o ponto 2 da Figura 5.

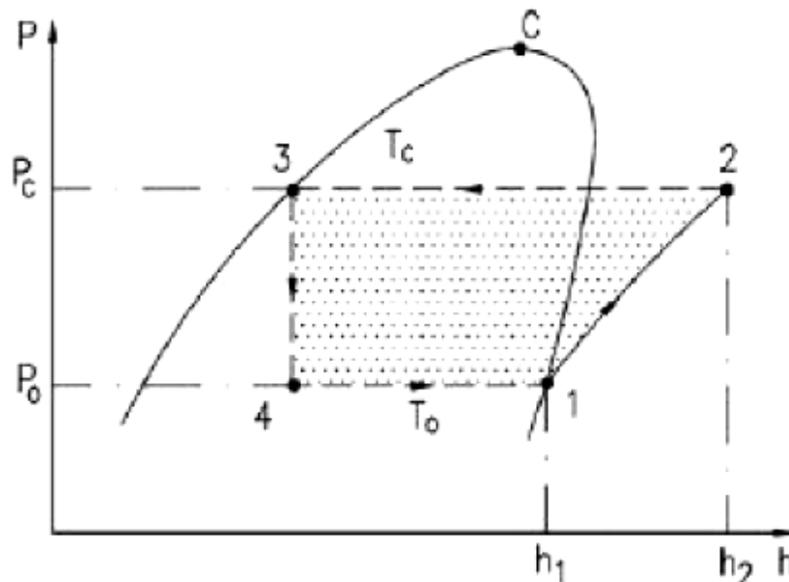


Figura 5: Ciclo termodinâmico, (COSTA, 1982)

De acordo com a Figura 5, o vapor saturado, proveniente do compressor, é resfriado por meio de um processo isobárico até a temperatura de saturação para, então, ser condensado por meio de um processo isobárico e isotérmico, cedendo calor para o ambiente externo. Esse processo é representado no diagrama da Figura 5 pela transição entre os pontos 2 e 3. Ao passar pela válvula de expansão o vapor condensado é expandido e o processo que ocorre é isentálpico, passando da pressão P_c novamente para pressão P_o , o que está representado na Figura 5 pela transição entre os pontos 3 e 4. Por fim, tem-se a fase de evaporação, que o vapor, ao passar pelo evaporador é expandido e sofre sua vaporização, processo parcialmente iniciado pela válvula de expansão, retirando calor do ambiente interno ao qual se deseja refrigerar.

A eficiência no ciclo de refrigeração é normalmente definida como a relação entre a energia útil e a energia aplicada no processo. Nessa linha, e considerando o sistema um ciclo de Carnot, a eficiência denominada Coeficiente de Eficácia (COP) pode ser definida conforme a Equação (1).

$$COP_{carnot} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \quad (1)$$

Na Equação 1, T_1 representa a temperatura do fluido refrigerante na saída do evaporador e T_2 representa a temperatura do fluido refrigerante na entrada do condensador, ambas em Kelvin.

A obtenção de um valor elevado do COP envolve a redução da energia aplicada no processo para um determinado efeito de refrigeração. A redução da temperatura de condensação (T_1) ou aumento da temperatura de evaporação (T_2) proporcionam um aumento do COP.

2.1.2 AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE PROCESSOS

A introdução de um controlador, em um determinado sistema visa a modificação de sua dinâmica, manipulando a relação entrada/saída, através da atuação sobre um ou mais dos seus parâmetros, com o objetivo de satisfazer certas especificações com relação a sua resposta OGATA (2003).

Os parâmetros do sistema que sofrem uma ação direta do controlador são denominados variáveis manipuladas, enquanto que, os parâmetros no qual se deseja obter as mudanças que satisfaçam as dadas especificações, denominam-se variáveis controladas. O controlador é um dispositivo físico, e pode ser eletrônico, elétrico, mecânico, pneumático, hidráulico ou um produto de combinações destes. O controlador atua no sistema para manter as variáveis em valores pré-determinados. No projeto real de um sistema de controle, o projetista deverá decidir pela utilização de um ou mais controladores. Tal escolha, no entanto, depende de vários fatores. O tipo de controlador mais comumente usado, mesmo em plantas das mais diversas naturezas, é o controlador eletrônico. De fato, os sinais não elétricos são, normalmente, transformados em sinais elétricos através de transdutores e devido à simplicidade de transmissão, aumento do desempenho, aumento da confiabilidade e, principalmente, facilidade de compensação.

De acordo com LEITE (2007), a qualidade em um sistema de controle é medida pela capacidade de proporcionar um desvio mínimo da variável de processo, como resultado de uma perturbação qualquer, retomando a condição de funcionamento pré-estabelecida em um intervalo mínimo de tempo. Busca-se assegurar a repetibilidade e confiabilidade dos sistemas, bem como, reduzir os custos energéticos, aperfeiçoar a supervisão e melhorar a qualidade dos produtos finais.

2.1.3 CONTROLADOR LIGA-DESLIGA

O controlador liga-desliga pode ser considerado o sistema mais simples e mais econômico existente, contudo, proporciona um tipo de estratégia de controle que possui limitações quanto ao seu comportamento dinâmico e em regime permanente do sistema em malha fechada. As aplicações deste tipo de controlador são restritas a sistemas onde não é necessária precisão nem um bom desempenho dinâmico.

Na ação, o controlador é modulado por um relé, como mostrado na Figura 6.

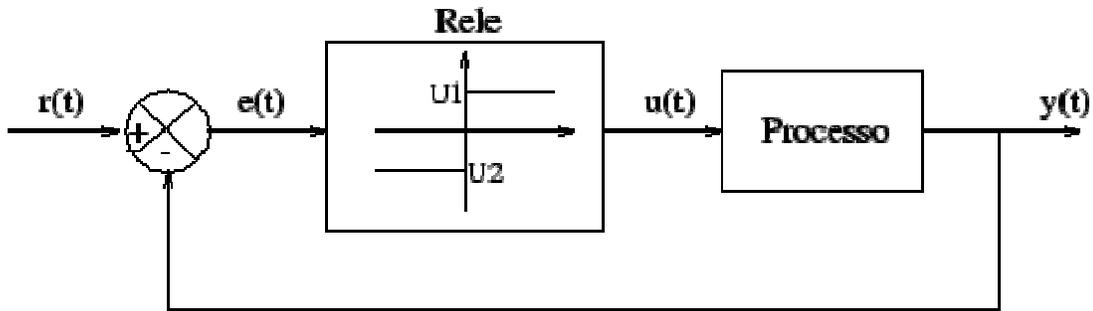


Figura 6: Controlador liga-desliga sem histerese

O sinal de controle $u(t)$ pode assumir apenas dois valores, e ocorre de acordo com o erro, ou seja, positivo ou negativo. Para os valores próximos de zero haverá chaveamentos constantes, o que poderá causar danos aos equipamentos do processo.

Para se evitar esse tipo de ação, um controlador liga-desliga com histerese deve ser implementado. A histerese minimiza os constantes chaveamentos, mas ocasiona uma variação da variável controlada em torno do ponto de operação (*set point*), como ilustra a Figura 7.

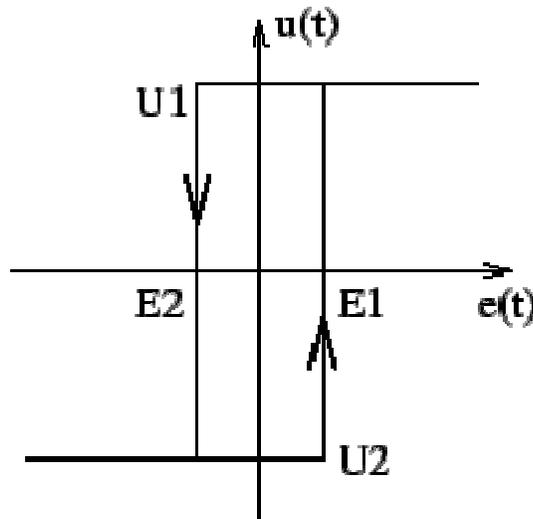


Figura 7: Histerese no controlador liga-desliga

- Se $u(t) = U1$ é necessário que o valor de $e(t)$ desça abaixo de $-E2(t)$ para que haja um chaveamento para $U2$.
- Se $u(t) = U2$, é necessário que o valor de $e(t)$ ultrapasse o valor de $E1$, para que haja um chaveamento para $U1$.

O gráfico da Figura 8 mostra um típico exemplo da curva de resposta em malha fechada e o respectivo sinal de controle para um sistema com controlador liga-desliga com

histerese. Nota-se que, em regime permanente, a saída do sistema apresenta uma variação em torno do valor de referência. Este fato demonstra a baixa precisão obtida com esse tipo de controlador. A amplitude e a frequência da variação são funções do intervalo $[E1, E2]$. A determinação do intervalo $[E1, E2]$ deve ser feita levando-se em consideração a precisão desejada, os níveis de ruído e a vida útil dos componentes.

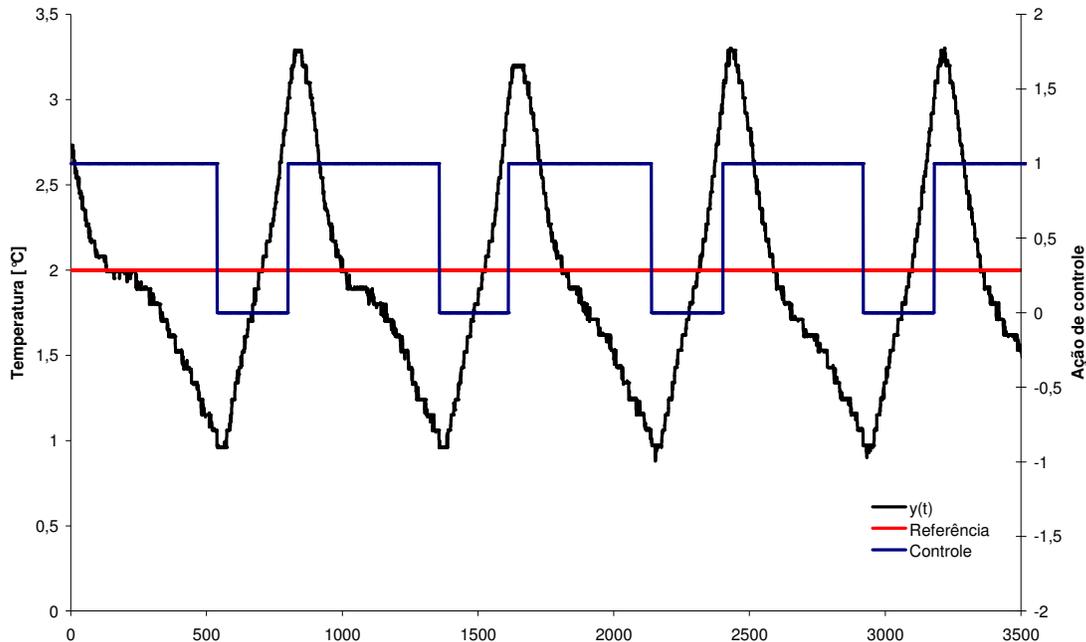


Figura 8: Estratégia de controle liga-desliga

2.1.4 CONTROLADOR PID

O controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID) é certamente o algoritmo de controle mais tradicional na indústria. Sua popularidade deve-se à simplicidade no ajuste dos seus parâmetros para se obter um bom desempenho, e do fato desse algoritmo estar disponível em quase todos os equipamentos de controle na indústria (LUYBEN, 1990).

Um controlador PID calcula, inicialmente, a diferença entre a variável do processo e o valor de referência obtendo, assim, o “erro” (e). Em função deste erro é gerado um sinal de controle, de forma a eliminar este desvio. O algoritmo PID utiliza o erro em três módulos distintos para produzir a sua saída ou variável controlada: o termo proporcional (P), o termo diferencial (D) e o termo integral (I).

De forma a apresentar a estrutura de um controlador PID, considera-se inicialmente o sistema de controle em malha-fechada, que está apresentado na Figura 9.

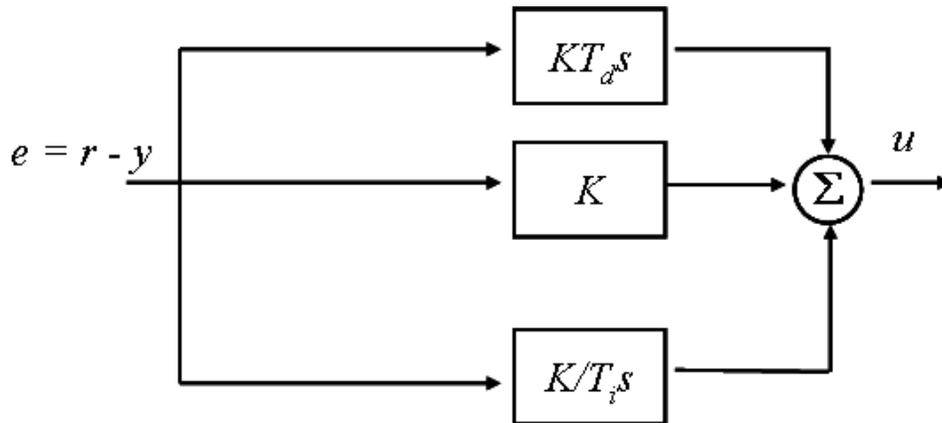


Figura 9: Sistema de controle em malha fechada

Em linhas gerais, a tarefa do controlador é gerar em sua saída um sinal de controle $u(t)$, com base na diferença $e(t)$ entre o valor de operação desejado, $r(t)$ e o sinal de realimentação da malha $y(t)$, que seja capaz de corrigir e se possível anular tal diferença (Figura 9).

Atualmente, há duas configurações mais aplicadas de controladores PID, o PID paralelo clássico e o PID paralelo alternativo.

A Figura 10 demonstra o diagrama de blocos de um sistema PID na configuração paralelo clássico. Nota-se que o sinal de erro é enviado à ação proporcional, e posteriormente, às demais ações integral e derivativa, portanto, o ganho proporcional também afeta as ações integral e derivativa.

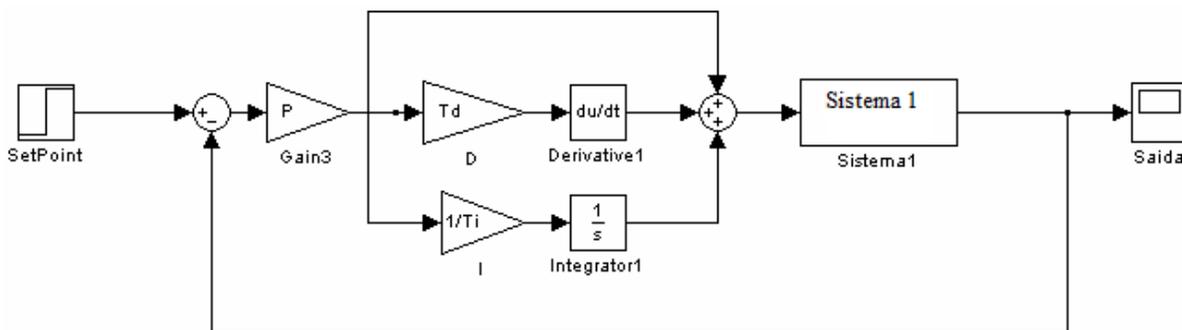


Figura 10: Diagrama de blocos do PID paralelo clássico

A equação matemática do controlador da Figura 10 é dada por:

$$c_{(t)} = K_p (e_{(t)} + \frac{1}{T_i} \int e_{(t)} dt + T_d \frac{d}{dt} e_{(t)}) \quad (2)$$

Onde K_p representa o ganho proporcional, valor a ser multiplicado pelo sinal de erro gerando a ação proporcional. O termo T_i , chamado de tempo de integral, compõe a fração que será multiplicada por K_p e pela integral do erro, gerando a ação integral, sendo T_d denominado tempo de derivativo que será multiplicado por K_p e pela derivada do erro, formando a ação derivativa.

As somatórias dessas três ações geram o sinal de saída do controlador $c_{(t)}$, que é responsável por agir sobre o atuador do sistema com o objetivo de corrigir as variações indesejadas da variável controlada.

A Figura 11 representa o diagrama de blocos de um controlador PID utilizando a configuração em paralelo alternativo. Nota-se que o sinal de erro é distribuído diretamente às três ações de controle.

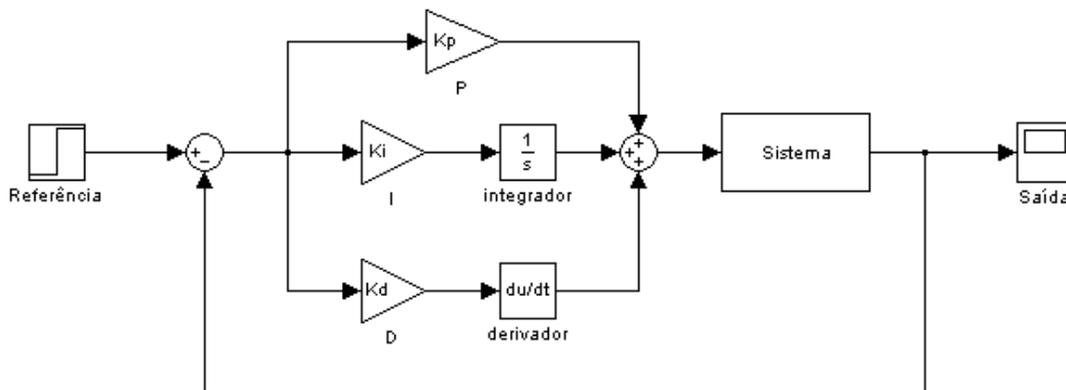


Figura 11: Diagrama de Blocos de um controlador PID paralelo alternativo

Para esta configuração do controlador tem-se a seguinte equação:

$$c_{(t)} = K_p e_{(t)} + K_i \int e_{(t)} dt + K_d \frac{d}{dt} e_{(t)} \quad (3)$$

O parâmetro K_p representa o ganho proporcional, valor a ser multiplicado pelo sinal de erro gerando a ação proporcional.

O termo K_i , chamado de constante de proporcionalidade integral compõe a fração que será multiplicada pela integral do erro, gerando a ação integral.

Sendo K_d denominado constante de proporcionalidade derivativa, será multiplicado pela derivada do erro, formando a ação derivativa.

Estas três ações são então somadas gerando o sinal de saída do controlador $c_{(t)}$, que é responsável por agir sobre o atuador do sistema com o objetivo de corrigir as variações indesejadas da variável controlada.

No controle proporcional, quanto maior a magnitude do erro atuante, maior é a ação corretiva aplicada. Um compensador deste tipo, como não acrescenta pólos nem zeros ao sistema principal, representa apenas um ajuste no seu ganho original.

O controlador proporcional é um amplificador com ganho ajustável (K), o aumento do ganho K , diminui o erro de regime, em geral, o aumento de K torna o sistema mais oscilatório, podendo torná-lo instável melhorando o regime permanente e piorando o transitório, sendo bastante limitado.

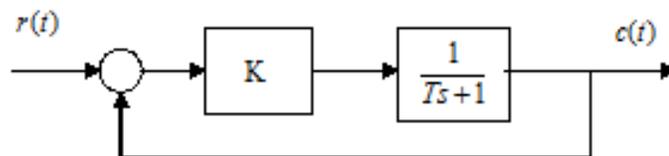


Figura 12: Controle em malha fechada com ganho proporcional

O valor da saída do controlador $u(t)$ é variado a uma taxa proporcional ao sinal do erro atuante $\varepsilon(t)$:

$$u(t) = K_i \int_0^t \varepsilon(t) dt \quad (4)$$

Se o valor de $\varepsilon(t)$ é dobrado, então o valor de $u(t)$ varia duas vezes mais rápido. Para um erro atuante nulo, o valor de $u(t)$ permanece estacionário.

O valor da saída do controlador $u(t)$ é proporcional à derivada do erro atuante $\varepsilon(t)$. Esse tipo de controle não produz nenhuma ação corretiva para qualquer erro atuante constante, não importando sua magnitude; assim, essa estratégia de controle isoladamente não tem utilidade prática.

O PID une as ações proporcional, integral e derivativa num só controlador, atuando tanto no regime transitório quanto no regime permanente. A estratégia de controle de um controlador proporcional, integral e derivativo é definida pela Equação 5:

$$\frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = Kp + \frac{Kp}{Ti} * \frac{1}{s} + Kp * Td * s = \frac{Kp}{Ti} \left(\frac{Td * Ti * s^2 + Ti * s + 1}{s} \right) \quad (5)$$

O princípio dos métodos baseados em malha fechada é o de se trabalhar com margem de segurança, escolhendo para o ganho proporcional um valor suficientemente afastado do ganho limite. Uma margem de segurança típica pode ser de 50%, ou seja, reduzir o ganho proporcional pela metade, promovendo uma dessintonia do controlador para afastá-lo do limiar da instabilidade. A determinação dos parâmetros de um controlador PID denomina-se sintonia do controlador.

O método heurístico de ZIEGLER e NICHOLS (1942) foi concebido para um critério de desempenho que prevê uma razão de declínio de 0,25 apresentado em dois tipos de sintonia, uma para sistemas que tendem a entrar em variação, e outra para sistemas que tendem a estabilização naturalmente. Para o segundo caso, a Tabela 1 apresenta os parâmetros determinados por este método, baseado nas constantes do sistema de primeira ordem com constante de tempo (T), ganho (K) e tempo morto (L).

Tabela 1: Parâmetros ZIEGLER & NICHOLS(1942)

Controlador	Kp	Ti	Td
P	$\frac{T}{(K \times L)}$		
PI	$\frac{0.9T}{(K \times L)}$	$(3.33 \times L)$	
PID	$\frac{1.2T}{(K \times L)}$	$(2 \times L)$	$(0.5 \times L)$

As tabelas de sintonia de Z&N são desenvolvidas apenas para alterações no sinal de referência ou *set point*, o controlador considerado é o paralelo clássico.

O método CHR foi baseado no trabalho de CHIEN et al. (1952). Consideram-se dois tipos de critérios de desempenho: resposta mais rápida possível sem sobre-sinal e outra para resposta mais rápida possível com sobre sinal de 20%. Divide-se também em duas outras condições: alteração da variável de referência e perturbação na variável controlada. O PID considerado é de configuração paralela clássica. Para a resposta mais rápida sem sobre valor e perturbação na variável controlada, tem-se os seguintes parâmetros do controlador conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros CHR. (CHIEN et al., 1952)

Controlador	Kp	Ti	Td
P	$\frac{0,3T}{(K \times L)}$		
PI	$\frac{0,6T}{(K \times L)}$	$(4 \times L)$	
PID	$\frac{0,95T}{(K \times L)}$	$(2,375 \times L)$	$(0,421 \times L)$

2.1.5 CONTROLADORES FUZZY

Na teoria clássica de conjuntos, um determinado elemento possui apenas duas possibilidades, pertencer ou não a um conjunto. Na teoria dos conjuntos *fuzzy*, desenvolvida por ZADEH (1965), um conjunto não apresenta limites bem definidos. Um elemento pode pertencer a dois conjuntos ao mesmo tempo. A transição entre pertencer ou não a um conjunto *fuzzy* está em uma faixa gradual entre zero (0 - totalmente não membro) e um (1 - totalmente membro).

A definição do modelo matemático do processo não é necessária para se projetar um controlador *fuzzy* (DRIANKOV et al.1993).

Para descrever em um procedimento que imite a maneira de pensar de um especialista humano, levando em consideração a heurística e a intuição, o controlador *fuzzy* faz uso de regras lógicas para o controle de um processo (LEITE, 2007).

O processamento sequencial de equações matemáticas, realizado pelos controladores convencionais, pode causar a propagação de um erro inicial, comprometendo a atuação do controlador na saída do processo. O tratamento individual de cada regra, realizado pelo controlador *fuzzy*, minimiza a propagação de um possível erro, não comprometendo o controle do processo (SHAW e SIMÕES, 2007).

A estrutura de um controlador *fuzzy* proposta por GOMIDE e GUDWIN (1994) é apresentada na Figura 13, conforme idealização de MANDANI (1974).

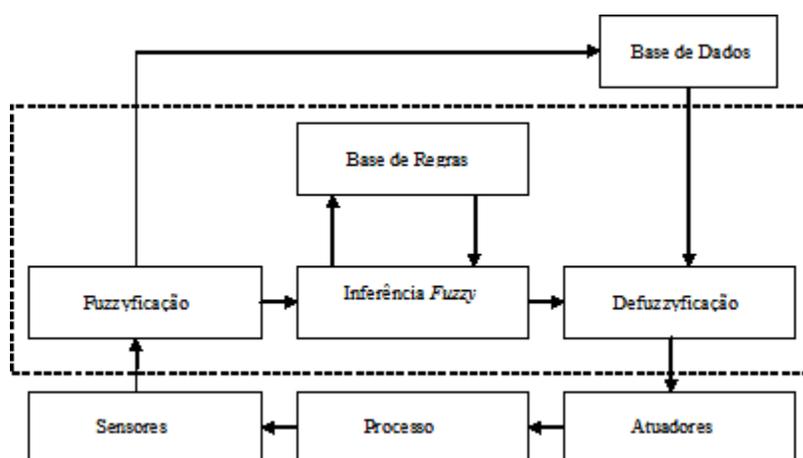


Figura 13: Estrutura de um controlador *fuzzy*

A fuzzificação, a construção da base do conhecimento e a defuzzificação são consideradas como os principais mecanismos da estrutura do controlador *fuzzy*.

Interface de fuzzificação: é responsável pelo processo de designar ou calcular um valor para representar o grau de pertinência de uma entrada em um ou mais grupos qualitativos (conjuntos *fuzzy*). O grau de pertinência é determinado por uma função de pertinência, que é definida baseando-se na experiência ou na intuição.

Base de regras: consiste da base do conhecimento. Possui um formato de declarações *Se...Então*, onde a parte *Se*, contém uma ou mais chamadas denominadas antecedentes; a parte *Então*, contém uma ou mais ações denominadas conseqüentes.

As regras são normalmente construídas com o auxílio de especialistas, que organizam a estratégia de controle de acordo com os seus objetivos;

Base de dados: armazena as definições dos parâmetros das funções de pertinência e os fatores de escala a serem utilizados no controlador;

Procedimento de inferência: processa os dados nebulosos de entrada junto com as regras, de modo a inferir as ações de controle *fuzzy*;

Interface de defuzzificação: consiste na conversão de informações qualitativas da variável *fuzzy* produzida pelo mecanismo de inferência em informação quantitativa, que será utilizada no processo.

Os sistemas *fuzzy*, ao contrário das redes neurais artificiais, são desprovidos de uma capacidade de aprendizagem (YAGER e FILEV, 1994).

Para LEITE (2007), a falta de métodos padronizados para o projeto de controladores baseados em lógica *fuzzy*, bem como, a dificuldade de sintonia, são as maiores desvantagens da utilização desses controladores, enquanto que, considerando processos não lineares são mais adequados na descrição de uma função de controle apropriada, em comparação com as equações de controle PI e PID.

Técnicas de identificação de sistemas são amplamente utilizadas para se projetar sistemas de controle. Os modelos de controladores que podem ser descritos através de equações matemáticas, foram apresentados por SERRA (2005) em uma revisão da literatura existente.

Atualmente, com a aplicação das técnicas de controle moderno, principalmente em sistemas dinâmicos, que possuem características não lineares, surgiram novos métodos de

análise, identificação e controle, sendo os sistemas *fuzzy* um dos elementos chave para essas aplicações.

Para LEITE (2007), o projeto e o desenvolvimento de controladores *fuzzy* têm como principal diretriz a quantidade de conjuntos *fuzzy* correspondentes às variáveis de entrada e às variáveis de saída e, também, a forma desses conjuntos.

PINHEIRO (2000) constatou que a utilização de partições simétricas nas funções de pertinência provoca uma ação linear nos controladores *fuzzy* convencionais.

Os controladores *fuzzy* se assemelham aos controladores convencionais quando são usadas funções de pertinência triangulares e simétricas. No entanto, se as funções de pertinência não forem simétricas, o comportamento do controlador *fuzzy* se torna não linear (ROMANINI, 2009).

O aumento na quantidade de variáveis lingüísticas, e um conseqüente aumento das funções de pertinência podem suavizar a ação de saída do controlador *fuzzy*. Em contraposição, esse aumento poderá ocasionar a instabilidade do controlador (SHAW e SIMÕES, 2007).

Outro modo de suavizar a saída do controlador *fuzzy* é a utilização do método do centro de gravidade para a defuzzificação (COX, 1995).

2.1.6 CRITÉRIOS DE DESEMPENHO PARA MALHAS DE CONTROLE

O principal critério de desempenho de uma malha de controle é a estabilidade. A Figura 14 representa o gráfico da reação típica da variável de um sistema de controle, quando a entrada foi submetida a um degrau unitário, e cuja resposta apresenta variação com amortecimento. Desta figura é possível se extrair informações sobre o desempenho do sistema que são denominadas critérios de desempenho.

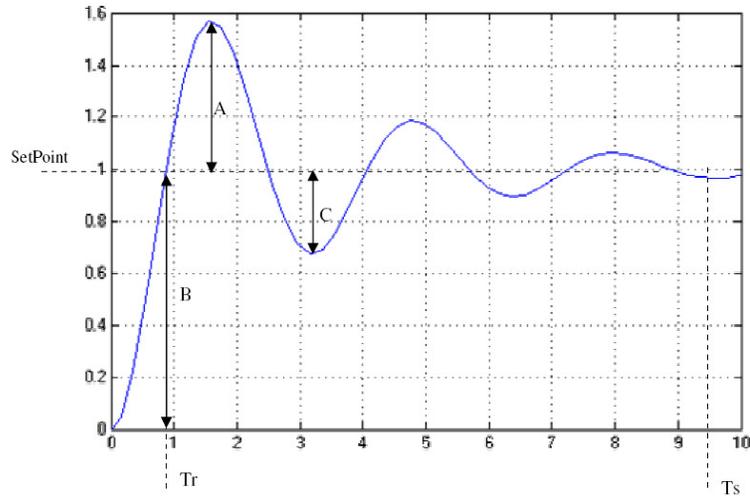


Figura 14: Critérios de desempenho

No desenvolvimento de um sistema de controle deve-se estabelecer qual o comportamento requerido da variável controlada, denominados de critérios de desempenho, que podem ser:

- * O menor sobre-sinal ou *overshoot* - expressa pela razão (A/B) ;
- * Uma determinada razão de declínio (C/A) ;
- * O menor tempo de ascensão ou subida (Tr) ;
- * O menor tempo de assentamento (desvio da variação menor que 5% ou 2%) (Ts) ;
- * Mínima energia ou atuação na variável manipulada;
- * Utilização de um índice de desempenho para avaliar a qualidade do controle.

Nem todos os critérios de desempenho podem ser atendidos simultaneamente, sendo necessário encontrar uma solução de compromisso entre as características relevantes ao sistema. Deve-se, portanto, estabelecer uma escala de prioridade em função do que é requerido para o sistema a ser controlado, como propuseram LJUNG e GLAD (1994), OGATA (2003), CAMPOS e TEIXEIRA (2006).

2.1.7 ÍNDICES DE DESEMPENHO PARA MALHAS DE CONTROLE

É importante monitorar e avaliar o desempenho de malhas de controle a fim de otimizar o sistema. Os métodos mais utilizados são: integral do erro, variabilidade (dobro do desvio padrão do erro dividido pela média da variável do processo), a variância na saída do

controlador, o percentual do tempo fora do modo automático e o percentual do tempo com o controle saturado.

No método Integral do Erro Absoluto ponderada pelo Tempo (ITAE), o erro absoluto é ponderado pelo tempo. O resultando é que, para um erro inicial que geralmente é grande, há uma pequena ponderação, diferentemente de um erro que ocorre em um tempo, sendo este mais penalizado. Define-se o ITAE matematicamente da seguinte forma:

$$I_{ITAE} = \int_0^{\infty} t |e_{(t)}| dt \quad (6)$$

Segundo LEITE (2007), quanto menor a amplitude da variável controlada em torno do valor de referência, menor será o valor do parâmetro de desempenho ITAE e, conseqüentemente melhor desempenho da malha de controle.

O método da Integral do Erro Quadrático (ISE) gera ponderações proporcionais para erros maiores e menores. Matematicamente tem-se o ISE como:

$$I_{ISE} = \int_0^{\infty} e^2_{(t)} dt \quad (7)$$

O índice Integral Absoluta do Erro (IAE) utiliza o módulo do erro, sendo muito utilizado em simulações. O IAE é de fácil implementação prática sendo determinado por:

$$I_{IAE} = \int_0^{\infty} |e_{(t)}| dt \quad (8)$$

O método MSE - Média do Erro Quadrático reflete todas as variações e desvios em relação à referência, sendo matematicamente definido por:

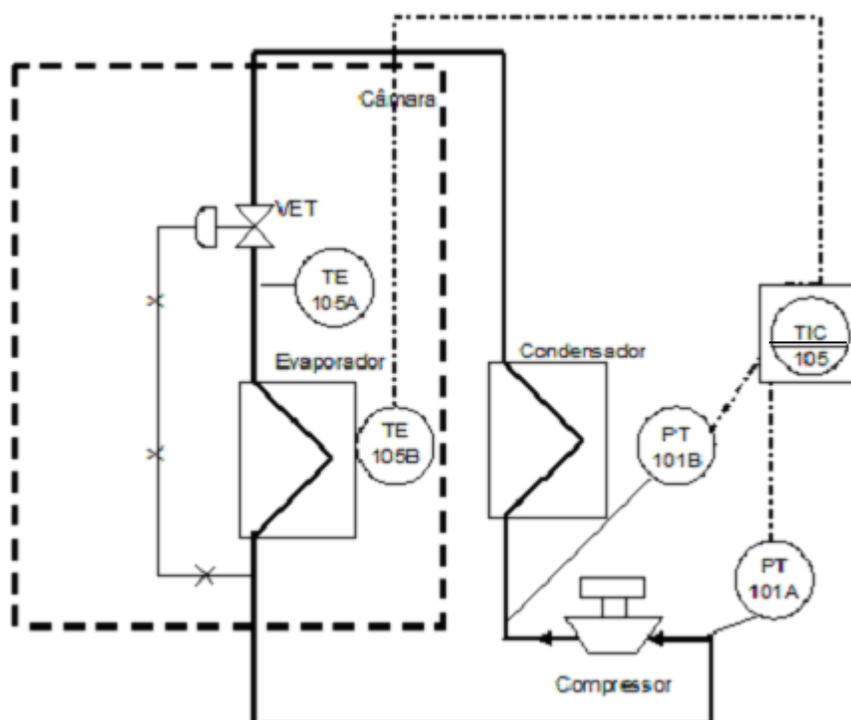
$$I_{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{n-1}^n (e_{(t)})^2 \quad (9)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

Em sua configuração original, o sistema de refrigeração estava composto pelos seguintes instrumentos para o controle do processo como mostra a Figura 15:

- Um sensor de temperatura (TE) do tipo Pt100, localizado na entrada de ar do evaporador, conectado diretamente ao controlador do processo que executa somente a estratégia de controle liga-desliga.
- Dois transdutores de pressão piezelétricos (PT), cuja função de aferir as linhas de alta e baixa pressão e enviar um sinal elétrico ao controlador, para que este tome a ação de manter ligado ou desligar o motor do compressor.
- O controlador de temperatura (TIC) que executa a estratégia de controle liga-desliga.



*TE105A e TE105B – sensores de temperatura tipo Pt-100

*PT 101A e PT 101B – transdutores de pressão

*TIC 105 – Controlador indicador de temperatura

Figura 15: Instrumentação original do sistema

O sistema de refrigeração utilizado neste trabalho está situado no Laboratório de Termodinâmica e Energia (LTE) da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), e é composto por uma câmara de refrigeração de 30m^3 e sistema de refrigeração por compressão de vapor, com uma capacidade de refrigeração de 4.256kcal h^{-1} . A câmara possui uma estrutura modular, constituída de placas de poliuretano expandido, revestida de alumínio corrugado com as seguintes dimensões:

Externas: $3,95\text{m}$ (comprimento) x $2,95\text{m}$ (largura) x $2,95\text{m}$ (altura).

Internas: $3,75\text{m}$ (comprimento) x $2,75\text{m}$ (largura) x $2,85\text{m}$ (altura).

3.1.1 COMPRESSOR

O compressor instalado no sistema é do tipo hermético da marca copeland de 1HP, trifásico, modelo CREQ-0225-PFV-590, com rotação nominal de 3500min^{-1} e potência frigorífica de 4.256kcal h^{-1} . Acoplados às linhas de alta e baixa pressão do compressor estão instalados dois pressostatos, um de alta pressão na linha de descarga do compressor e outro de baixa pressão na linha de sucção do compressor para ativar e desativar o motor do compressor quando este está operando no modo liga-desliga.

3.1.2 CONDENSADOR

A unidade condensadora instalada no sistema é produzida por Macquay Heatcraft do Brasil. Esta unidade possui 981mm (comprimento) x 718mm (largura) x 502mm (altura), com 2 ventiladores de $0,5\text{hp}$ cada, com capacidade de 4.256kcal h^{-1} , e temperatura de condensação de -35°C .

3.1.3 EVAPORADOR

A unidade evaporadora é produzida por Macquay Heatcraft do Brasil cujo modelo é FBA -190 e possui capacidade frigorífica de 4.400kcal h^{-1} a -10°C . A temperatura de evaporação de -16°C (variação de 6°C), com 4 ventiladores de $0,5\text{hp}$ e o degelo é feito por resistência de 3.6W (220V).

3.1.4 DISPOSITIVO DE EXPANSÃO

A válvula de expansão termostática é de equalização interna modelo TISE HM ($1/2''$), R-22 marca ALCO.

3.1.5 TRANSMISSORES DE PRESSÃO

Para a medição de pressão de sucção e descarga do compressor estão instalados dois transmissores de pressão da marca wika, com entrada de alimentação de 10 a 30V, faixa de medição de 0 a 60bar, sinal de saída de 4 a 20mA.

Conforme o projeto de instrumentação foram instalados novos instrumentos para tornar possível a aquisição de dados e o controle do processo. Todos os componentes foram especificados e definidos de modo a possibilitar uma ampla variedade de aplicações.

Os instrumentos que estavam instalados no sistema original foram mantidos, e operam em paralelo ao novo sistema de controle implementado, proporcionando uma redundância, caso ocorra algum problema no sistema de controle utilizado nos experimentos.

Um aplicativo foi implementado na linguagem LabVIEW 8.5, para tornar automática a aquisição de dados e possibilitar, também, a execução das estratégias de controle propostas.

Os novos instrumentos que foram instalados no sistema serão descritos na seção 3.1.6, bem como o aplicativo desenvolvido.

3.1.6 SENSORES DE TEMPERATURA

Termômetros de resistência (Pt100) são sensores de alta precisão e excelente repetibilidade de leitura. O seu funcionamento se baseia na variação da resistência elétrica em função da temperatura, sendo que a 0°C apresenta uma resistência de 100 ohms, aumentando a resistência de maneira diretamente proporcional em função da temperatura aferida, como representado na Figura 16, que mostra a curva característica de um Pt-100.

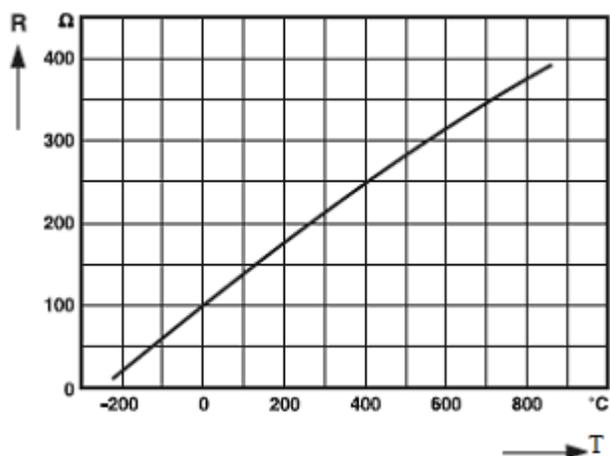


Figura 16: Curva característica do sensor Pt-100. Fonte: ERICSON, 2002

Seu elemento sensor é feito de platina e encapsulado em bulbos de cerâmica, vidro ou metal. As termo resistências, assim também chamadas por apresentarem excelentes características, se tornaram um dos sensores de medição de temperatura mais utilizados nos processos industriais, são também um dos principais padrões para laboratórios de calibração. Existem três modelos de Pt100: o modelo de dois fios, mais susceptível a ruídos, pois a resistência dos fios e a temperatura a que os fios estão expostos interferem nas medidas, o modelo de três fios, para os quais a resistência dos fios não interfere nas medidas, estando assim, sujeitos a ruídos causados pela temperatura do meio a que estão expostos e, por fim, o modelo de quatro fios isento a ruídos e, portanto mais preciso do que os outros dois modelos.

As características dos sensores de temperatura instalados no sistema estão descritas na Tabela 13.

Tabela 3: Características do sensor de temperatura - Pt100 - Sensym

Características	Valores
Fabricante	Sensym
Tipo	Pt100
Modelo	TR106
Conexão	Três fios

No sistema, nove sensores do tipo Pt100 foram instalados em vários pontos do sistema de refrigeração com a finalidade de aferir a temperatura do fluido refrigerante, dentro

da tubulação. Cinco sensores foram instalados para aferir a temperatura do fluido refrigerante, cada um nos seguintes pontos: no tubo antes do condensador, no tubo na saída do condensador, no tubo no centro do evaporador, no tubo de entrada do fluido do evaporador e no tubo de saída do evaporador. Os sensores foram fixados em contato direto com a tubulação e isolados do ambiente com manta térmica. Para medir a temperatura do ar no interior da câmara, três sensores foram posicionados, um no centro da câmara, um na saída de ar do evaporador, conforme a Figura 17, e outro na entrada do ar do evaporador. O último sensor ficou posicionado fora da câmara para medir a temperatura externa.



Figura 17: Sensor de temperatura - Pt100

3.1.7 TRANSMISSORES DE TEMPERATURA

Os transmissores de temperatura convertem o sinal emitido pelo sensor de temperatura em sinal diretamente proporcional a corrente elétrica na faixa de 4 a 20mA. A utilização dos transmissores de temperatura, instalados próximos aos sensores de temperatura, proporcionam maior precisão nas medidas. A calibração dos parâmetros, tais como, tipo de conexão, tipo de sensor, faixa de medição do sensor, é realizada por meio do aplicativo (syscal) fornecido pelo fabricante. A Tabela 14 mostra as características dos transmissores de temperatura instalados no sistema.

Tabela 4: Características do transmissor de temperatura - Sensym

Características	Valores
Fabricante	Sensym
Tipo	Microprocessado
Modelo	TT100
Precisão Total	0,20% da faixa máxima
Saída	4 a 20mA 2 fios - linear
Programação	Interface RS-232

Este transmissor é calibrado por padrões rastreados pela Rede Brasileira de Calibração, na fábrica. A Figura 18(a), mostra a ligação em operação normal de trabalho do transmissor de temperatura, onde se liga o Pt100 aos bornes 5, 6 e 7. A alimentação elétrica do transmissor pode ser na faixa de 12V a 36V, e o terminal positivo da fonte deve ser ligado ao borne 1 e o terminal negativo deverá ser ligado a uma carga e ao borne 2. Os bornes 4 e 5 correspondem a ligação com o software de configuração através da porta serial do PC, como demonstra a Figura 18(b).

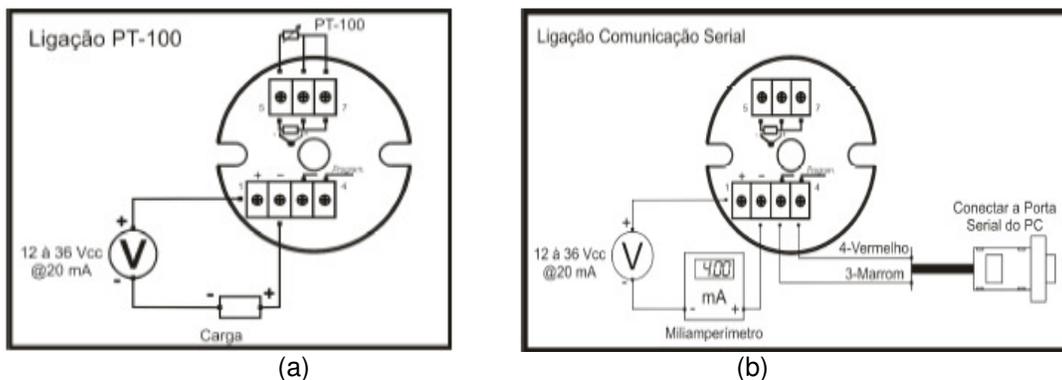


Figura 18: (a) Configuração física do transmissor de temperatura (Sensym)

(b) Ligações para a configuração dos parâmetros (Sensym)

O software *syscal* é fornecido pelo fabricante do transmissor de temperatura para que seja possível a sua configuração de acordo com a utilização desejada. O tipo de conexão selecionada para este trabalho foi a COM1(*Component Object Module*); para a calibração da faixa de corrente ficou mantida o padrão de fábrica na faixa de 4 a 20mA. Quanto ao sensor, o Pt100 foi o escolhido, por ser o utilizado na instrumentação. A faixa de medição de

temperatura para os sensores Pt100, instalados no interior da câmara é configurada por meio do aplicativo *syscal*, apresentado na Figura 19.



Figura 19: Software *syscal* (Sensym)

Os transmissores de temperatura, num total de 13, foram montados numa sala auxiliar em um gabinete (Figura 20) e estão configurados da seguinte maneira: os transmissores que recebem dados dos sensores instalados nos tubos do sistema operam na faixa de -10°C a 50°C , os transmissores que recebem os sinais dos sensores que medem a temperatura do ar no interior da câmara operam na faixa de -5°C a 25°C , o transmissor que recebe o sinal do sensor posicionado fora da câmara opera em uma faixa de 0°C a 40°C .



3.1.8 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Um inversor de frequência fabricado pela WEG do Brasil, com potência de 5,0cv, modelo CFW08 0160 T 2024 PSZ, foi usado para possibilitar o controle de velocidade do motor elétrico trifásico do compressor, permitindo a variação ampla da velocidade, com entradas e saídas digitais e analógicas, e um circuito eletrônico de controle micro-controlado, que permite o ajuste dos parâmetros através de uma interface com o aplicativo desenvolvido. As principais características desse equipamento estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5: Características do inversor de frequência - WEG

Características	Valores
Tensão de Alimentação	220V trifásico
Potência	6,1kVA
Corrente nominal de saída	16A
Corrente máxima de saída	24A
Corrente nominal de entrada	19A
Frequência de chaveamento	5kHz
Motor máximo	5HP
Resolução	8 bits

O inversor de frequência está instalado numa sala auxiliar ao lado da câmara, em um gabinete, como se pode observar na Figura 21. Este equipamento possui uma interface de comunicação com o computador do processo, podendo, assim, ser controlado remotamente. A rotação do compressor é alterada através do inversor de frequência, por meio de um sinal analógico de 0 a 10V. Sua ativação e desativação é comandada por um sinal digital de 0 ou 24V. Desta forma é possível ligar, desligar e variar a frequência de acionamento do compressor entre 30Hz e 60Hz. Esta faixa de frequência foi estabelecida em função das especificações técnicas do compressor para evitar problemas de lubrificação e refrigeração do mesmo.



Figura 21: Inversor de frequência

3.1.9 TRANSDUTOR DE GRANDEZAS ELÉTRICAS

O equipamento transdutor de grandezas elétricas da marca Kron modelo multi K05, efetua as leituras dos valores de tensão, corrente, frequência, potência ativa fornecida ou recebida por fase trifásica, potência reativa, potência aparente e fator potência. O sistema possui um software que permite a análise dos dados coletados e a elaboração de gráficos, porém, este software não permite a geração de arquivo com as grandezas mensuradas. Assim, no aplicativo de aquisição de dados, foi desenvolvida uma *interface* para que fosse possível a comunicação com o transdutor, e com isso, gerar um arquivo com os valores das grandezas elétricas desejadas. Foi utilizado, para tanto, o protocolo ModBus RTU, desenvolvido pela Modicom Inc, no qual os dados estão disponíveis no formato ponto flutuante, de acordo com o padrão, IEEE-754 32-Bit-*floating point*. As principais características desse equipamento estão descritas na Tabela 6.

Tabela 6: Características do transdutor de grandezas elétricas - Kron

Características	Valores
Precisão de tensão, corrente, potências	0,2%
Frequência	0,1Hz
Fator de potência	0,5%
Entrada de Tensão(medição)	500Vca
Frequência	50 ou 60Hz
Interface de comunicação	RS-485 a 2 fios
Velocidade	9600bps.
Codificação das informações	padrão IEEE-754.
Protocolo	MODBUS-RTU

Através deste medidor foi monitorado e determinado o consumo de energia elétrica do sistema para as diferentes condições de operação. A Figura 22 apresenta o esquema de ligação à rede elétrica para o transdutor de grandezas elétricas Kron-multi k5.

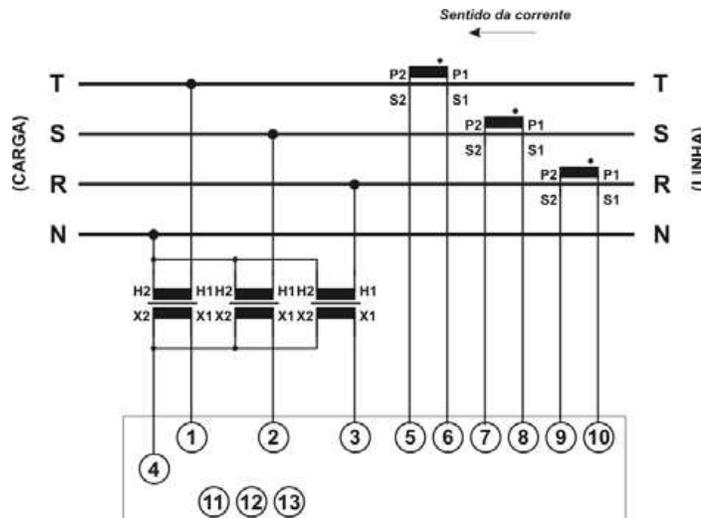


Figura 22: Esquema de ligação do medidor de grandezas elétricas (Kron).

O transdutor de energia elétrica foi instalado em uma sala auxiliar ao lado da câmara, como pode ser observado na Figura 23. As principais grandezas aferidas e utilizadas são:

tensão trifásica, corrente trifásica, fator de potência trifásico, potência aparente e potência ativa trifásica.

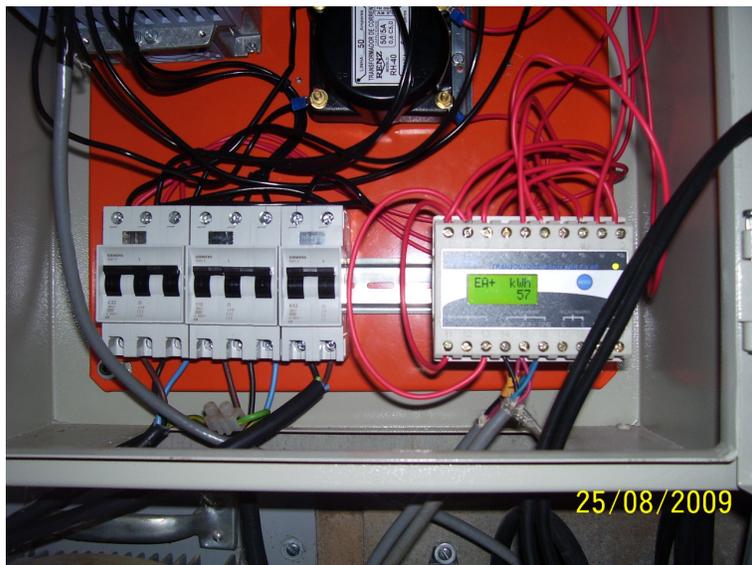


Figura 23: Transdutor de grandezas elétricas

3.1.10 CONTROLE DE POTÊNCIA

Relé de estado sólido - MKRL-100-4-4 substitui o relé eletro-mecânico e tem a função de aumentar ou diminuir a intensidade de potência dissipada em banco de resistências, através de um comando PWM (*Pulse Width Modulation*), que simulará a carga térmica do produto no interior da câmara de armazenamento, utilizando, para isso, resistências elétricas, tipo cônicas com potência total de 2,8kW (Figura 24).

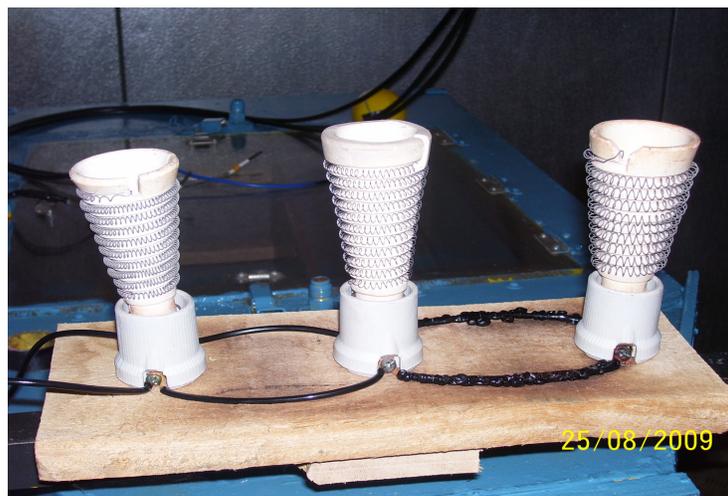


Figura 24: Resistências elétricas para simulação da carga térmica

3.1.11 PLACA PCI PARA AQUISIÇÃO DE SINAIS NI-6224

A placa PCI-NI6221 pode suportar até 16 entradas analógicas (AI0 a AI15) e duas saídas analógicas. As entradas analógicas podem ser de tensão, temperatura, corrente, resistência, frequência, posição, aceleração e pressão sonora, enquanto as saídas analógicas podem ser tensão ou de corrente. Nesse trabalho foram utilizadas 11 entradas analógicas que recebem os sinais na faixa de 4 a 20mA dos instrumentos instalados no sistema, uma saída digital para acionar ou desligar o inversor de frequência, uma saída analógica para o controle PWM da potência no interior da câmara. As principais características da placa estão na Tabela 7.

Tabela 7: Características da placa PCI-NI6221

Características	Valores
Resolução	16bits
Entradas analógicas(AI)	16 (AI0 – AI15)
Saídas analógicas(AO)	2 (AO0 – AO1)
Taxa de aquisição	250kS/s

3.1.12 DIAGRAMAS DA INSTRUMENTAÇÃO

Os instrumentos instalados no sistema de refrigeração, e que serão utilizados para o controle do processo, estão representados na Figura 25, sendo que, as vistas superiores, laterais e frontais da câmara de armazenamento mostram as posições dos sensores de temperatura utilizados para o controle. Pode-se observar que o TE 107 está posicionado no centro da câmara e o TE 105 está na entrada de ar do evaporador.

O banco de resistências térmicas JC-101, está também representado, e se localiza 600mm abaixo do sensor de temperatura TE-107, no centro da câmara e terá a função de simular uma carga térmica a ser suprimida pelo sistema de refrigeração.

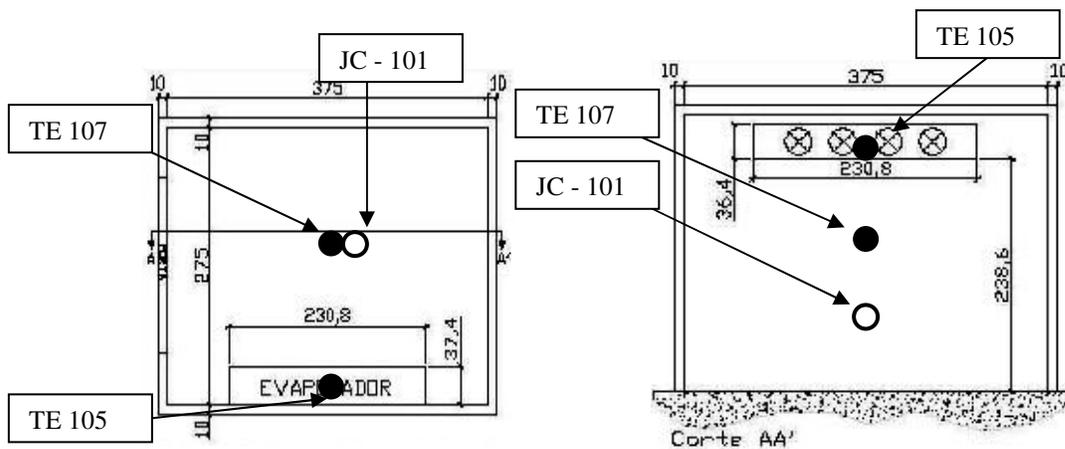


Figura 25: Vistas da câmara de armazenamento e posição dos sensores TE105 e TE107 e do banco de resistências térmicas JC101.

O diagrama da instrumentação é representado na Figura 26, e mostra os dispositivos instalados no sistema que serão utilizados para o controle do processo, bem como, os sinais de controle para a comunicação entre o computador do processo e os dispositivos de monitoramento e atuação. Os elementos sensores de temperatura (Pt 100) enviam sinais elétricos que correspondem à variação de resistência elétrica para os transmissores de temperatura, e esses convertem e enviam sinais elétricos na faixa de 4 a 20mA para as entradas analógicas da placa de aquisição de dados, instalada no computador do processo (CP).

O transdutor, indicador de grandezas elétricas (JIT), envia os parâmetros referentes às grandezas elétricas atuantes no motor do compressor ao computador do processo por meio de uma interface serial, padrão RS-485, para que esses dados possam ser armazenados e, posteriormente analisados. O controlador inversor de frequência (SIC) recebe os sinais de controle do *software* aplicativo, através da saída analógica da placa de aquisição de dados e proporciona a variação da frequência elétrica fornecida ao motor do compressor. Os relés de estado sólido (JC) recebem, por meio da saída analógica da placa de aquisição de dados, o sinal PWM para variar a potência das resistências térmicas instaladas no interior da câmara. A Tabela 7, mostra o código de identificação, a localização e a função dos instrumentos utilizados para o controle do sistema de refrigeração.

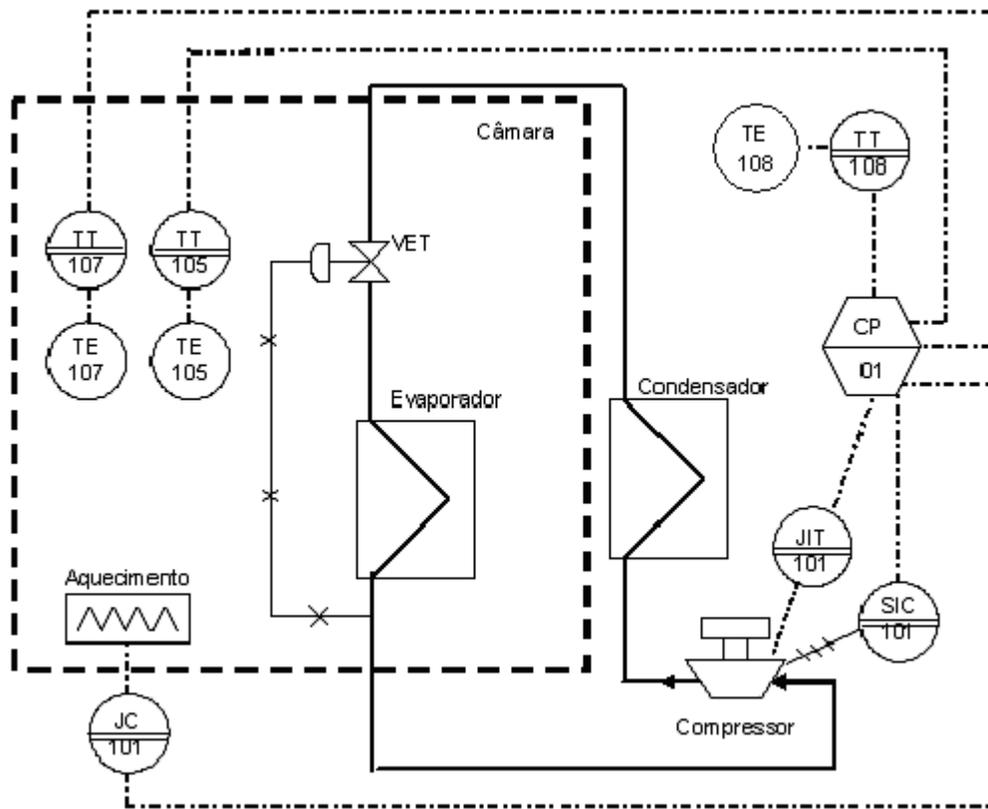


Figura 26: Instrumentação do sistema de refrigeração

Tabela 8: Descrição dos instrumentos utilizados para a aquisição de dados e controle.

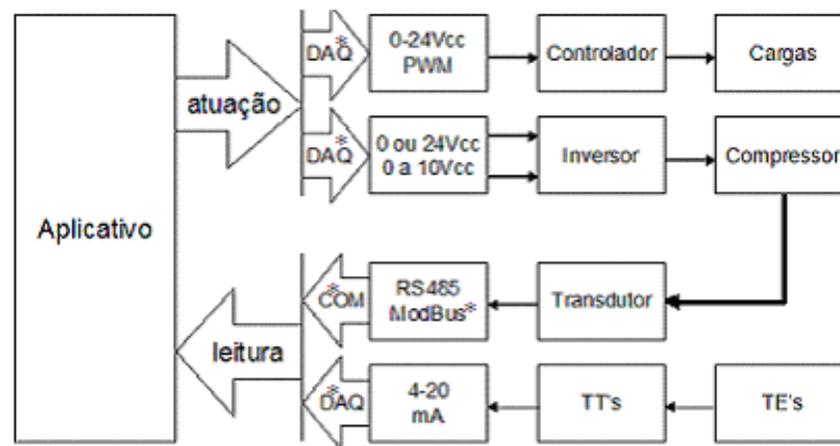
Identificação	Função	Localização
TE 105	Sensor de temperatura Pt100	Entrada do evaporador
TT 105	Transmissor de temperatura	Painel auxiliar
TE 107	Sensor de temperatura Pt100	Centro da câmara
TT 107	Transmissor de temperatura	Painel auxiliar
TE 108	Sensor de temperatura Pt100	Ambiente fora da câmara
TT 108	Transmissor de temperatura	Painel auxiliar
CP 01	Computador do processo	Sala de controle
SIC 101	Inversor de frequência	Painel auxiliar
JIT 101	Transdutor de grandezas elétricas	Painel auxiliar
JC 101	Controle de potência	Painel auxiliar

3.1.13 APLICATIVO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS, MONITORAMENTO E CONTROLE

A linguagem de programação LabVIEW é um ambiente gráfico de desenvolvimento que permite a implementação de aplicativos para aquisição de dados, processamento de sinais, sistemas de controle, e outros. Essa linguagem se caracteriza por ser gráfica e pela facilidade de acesso a dispositivos de hardware.

O aplicativo LabVIEW se baseia em duas interfaces: uma é denominada “VI” (*Virtual Instruments*) e se destina ao interfaceamento gráfico com o usuário. A outra, denominada “Diagram” (diagrama), permite a realização de conexões de hardware e processamento matemático de informações. São disponíveis rotinas de aquisição e processamento de sinais, funções lógicas e matemáticas, sistemas de controle, banco de dados, bem como, diversos módulos, denominados *toolkits*, que englobam diversas funções específicas e que podem ser acrescentados ao programa principal. (REGAZZI et al., 2005).

O aplicativo desenvolvido é composto por três módulos: módulo de aquisição de sinais, módulo de monitoramento do sistema e módulo de controle do processo. O sistema computacional desenvolvido está representado na Figura 27.



*DAQ(Data acquisition): Dispositivo PCI(Peripheral component interconnect)de entrada e saída de sinais para aquisição de dados e atuação.

*COM(Component object model): Tecnologia que permite a comunicação de dados entre o *software* e o *hardware*.

*ModBus: Protocolo de comunicação de dados, utilizado em sistemas de automação industrial.

Figura 27: Sistema computacional desenvolvido

3.1.14 MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE SINAIS

Neste modo de operação, é realizada a cada segundo, a aquisição dos sinais dos instrumentos instalados no sistema de refrigeração por meio da placa de aquisição de dados modelo PCI-NI6221 fabricada pela National Instruments, instalada no computador do processo. Ao ser acionada a chave liga, como ilustra a Figura 29, automaticamente será criada uma planilha eletrônica no aplicativo Excell, cujo nome será a palavra dados seguida pela data e a hora, como segue no exemplo: Dados_5_10_2009_08_39_33.xls.

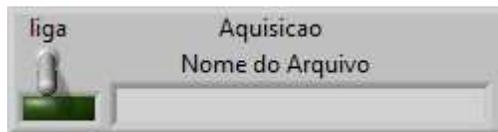


Figura 28: Controle para aquisição de dados

Os dados armazenados são:

- Tempo [s]
- Temperatura do fluido refrigerante, no tubo:
 - Na entrada do condensador
 - Na saída do condensador
 - Na entrada do evaporador
 - No centro do evaporador
 - Na saída do evaporador
- Temperatura do ar:
 - Na entrada do evaporador
 - Na saída do evaporador
- Temperatura do ar no centro da câmara de refrigeração
- Temperatura do ambiente externo à câmara de refrigeração
- Pressão na linha de descarga do compressor
- Pressão na linha de admissão do compressor
- Tensão nas três fases, corrente nas três fases e potência nas três fases
- Potência aparente trifásica
- Fator de potência

- Frequência elétrica de alimentação do compressor
- Potência da carga térmica
- Referência (*set point*)
- Parâmetros P, I e D do controlador.
- Condição do motor do compressor (ligado ou desligado)

3.1.15 MÓDULO DE MONITORAMENTO E CONTROLE

O monitoramento das variáveis do sistema é realizado a cada segundo. A Figura 29 apresenta a tela do aplicativo, que foi elaborada para que o operador tenha informações de todos os parâmetros do processo em tempo real, e com fácil visualização, gráfica e numérica.

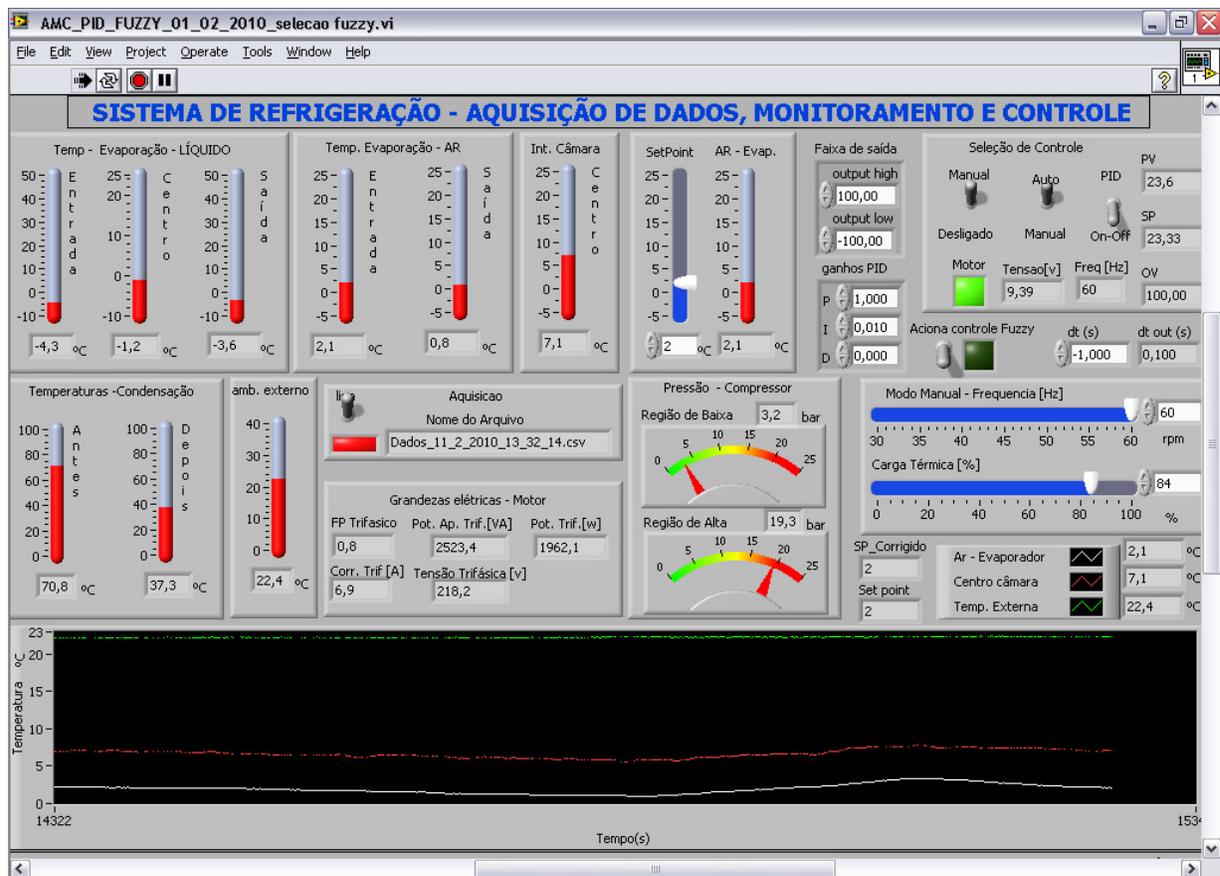


Figura 29: Aplicativo para aquisição de dados, monitoramento e controle

No aplicativo, todos os controles estão situados na mesma tela, e os mostradores informam os valores das variáveis temperatura e pressão do processo no formato analógico e digital. Os valores de temperatura são informados em graus Celsius e os valores das pressões, informados em bar, conforme a Figura 30.



Figura 30: Mostradores de temperatura e pressão

As grandezas elétricas, relativas ao motor do compressor do sistema de refrigeração, são apresentadas no formato digital, como mostrado na Figura 31, sendo essas grandezas: o fator de potência, a potência aparente nas três fases, a potência nas três fases, a corrente nas três fases e a tensão nas três fases.

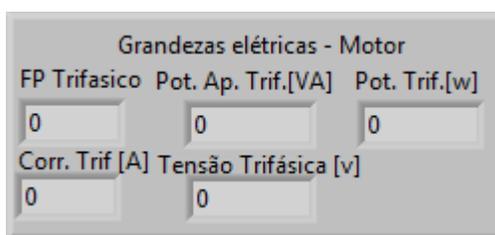


Figura 31: Mostradores das grandezas elétricas

Para a seleção dos parâmetros: valor de referência da temperatura (*set point*), frequência elétrica e, também, o valor da carga térmica foram disponibilizados, objetos de entrada de dados, apresentadas na Figura 32. O valor de referência da temperatura poderá variar de -5°C a 25°C , a frequência elétrica poderá variar de 30Hz a 60Hz e o banco de resistências elétricas, que simula a carga térmica, poderá variar de 0 a 100%. Todos estes valores podem ser digitados através do teclado numérico do microcomputador ou podem ser selecionados por meio do controle deslizante (*slider*).

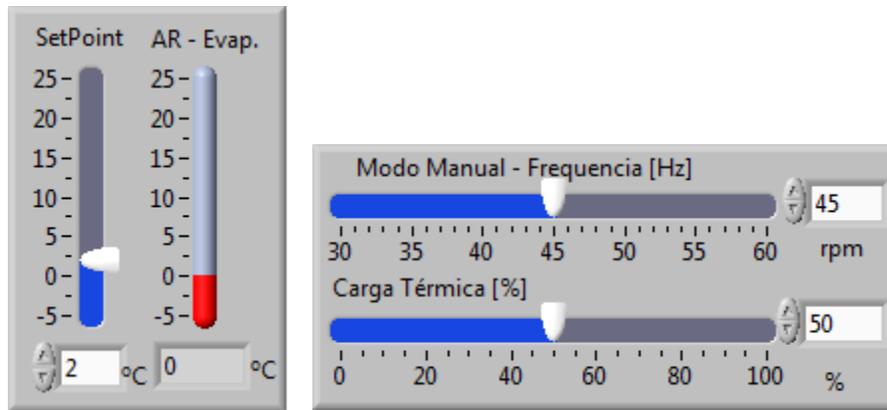


Figura 32: Seletores de valor de referência , frequência elétrica e carga térmica.

Um mostrador gráfico apresentado na Figura 33 mostra, em tempo real, o valor da temperatura do ar dentro da câmara de armazenamento, a temperatura do ar na entrada do evaporador e o valor da temperatura do ar no ambiente externo à câmara, em graus Celsius.

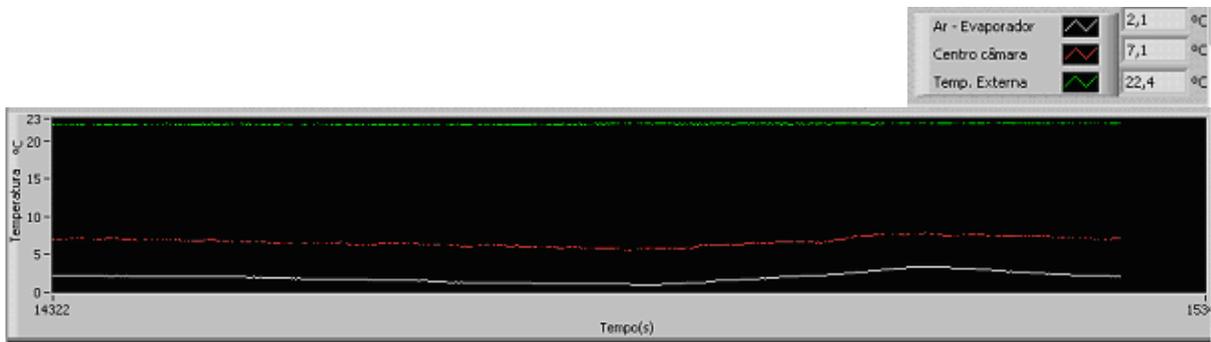


Figura 33: Mostrador gráfico de temperaturas

A seleção de controle, representada na Figura 34, permite ao operador determinar a estratégia de controle do sistema, tendo como opções o controle manual (malha aberta) ou controle automático (liga-desliga), o controle automático PID e o controle automático *fuzzy*. Nesta mesma tela também são apresentados, no formato digital, o valor da variável do processo (PV) em porcentagem, o valor de referência da temperatura (SP) em graus *Celsius*, o valor da saída do controlador ao processo (OV- *output value*) em porcentagem, o valor da tensão de controle do inversor de frequência de 5V a 10V e a frequência elétrica do inversor fornecida ao motor elétrico do compressor em Hertz. Há também um sinal luminoso que informa o estado do motor do compressor (ligado ou desligado).

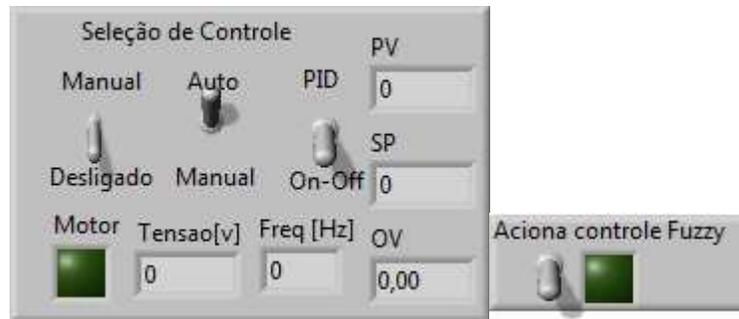


Figura 34: Seleção das ações de controle

Ao selecionar o modo de operação manual, o operador deverá informar os valores de referência da temperatura em graus Celsius, o valor da frequência elétrica que será fornecida ao motor do compressor em Hertz e também o valor da intensidade da carga térmica em porcentagem.

Selecionando o modo automático, o operador não terá como alterar a frequência elétrica fornecida ao motor do compressor, que será 0 ou 60Hz para a estratégia de controle liga-desliga, e poderá variar na faixa de 30 a 60Hz se selecionada a estratégia de controle PID ou *fuzzy*. A intensidade da carga térmica poderá ser alterada a qualquer momento, independente do modo de estratégia de controle selecionado.

Ao acionar a chave correspondente ao controle *fuzzy*, o sistema calcula a diferença entre a temperatura do centro da câmara e a temperatura na entrada do evaporador e, também o valor do erro em regime se a diferença entre a temperatura do ar na entrada do evaporador (TE105) e a temperatura do ar no centro da câmara (TE107), estiver na faixa de 2°C a 4°C. O sistema *fuzzy* atua no valor de referência do controlador PID, aumentando ou diminuindo seu valor de referência de acordo com a intensidade da carga térmica a ser retirada da câmara de armazenamento, bem como, da tendência de aumento ou diminuição do erro em regime.

O controle do processo utiliza como variável a ser controlada a temperatura do ar na entrada do evaporador. Esse ponto de aferição foi escolhido por servir como referência para os sistemas de refrigeração que utilizam controladores que executam a estratégia liga-desliga. A temperatura é mensurada pelo sensor posicionado na entrada de ar do evaporador (TE105).

A variável manipulada será a frequência da tensão de alimentação do motor do compressor, utilizando para isso o inversor de frequência.

3.1.16 CONTROLADOR LIGA – DESLIGA

A Figura 35 mostra os blocos de controle implementados em LabVIEW que executam a estratégia de controle liga-desliga, tanto no modo manual como também no modo automático.

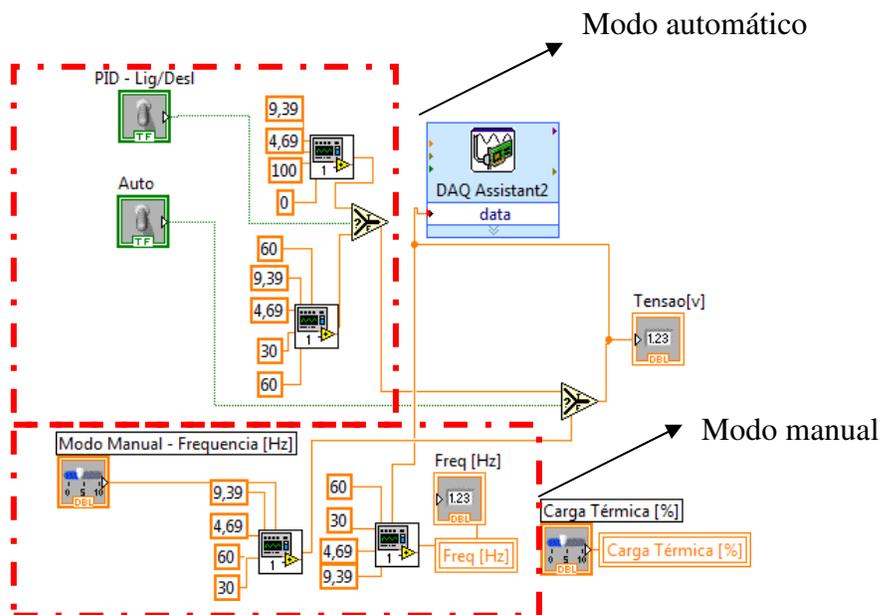


Figura 35: Diagrama dos blocos de controle liga-desliga – LabVIEW

3.1.17 ESTRATÉGIA DE CONTROLE LIGA-DESLIGA

Para a estratégia de controle liga-desliga foi realizada a leitura da temperatura na entrada do ar do evaporador, utilizando o sensor de temperatura (TE105). Este sensor varia a sua resistência de maneira diretamente proporcional à variação de temperatura, enviando este sinal ao transmissor de temperatura (TT105); o transmissor de temperatura converte o sinal do sensor para uma faixa de corrente de 4 a 20mA e o envia para a placa de aquisição de dados, e estes valores de corrente foram digitalizados e enviados para o aplicativo desenvolvido em LabVIEW, demonstrado na Figura 35.

No módulo de aquisição de dados do aplicativo, os valores foram armazenados em um arquivo para posterior análise.

No módulo de controle do aplicativo, o sinal foi comparado com a temperatura de acionamento ou desligamento do motor do compressor; se a temperatura atingir o ponto de

acionamento, o motor do compressor será ligado através do inversor de frequência, utilizando a frequência nominal da rede elétrica de 60Hz, pois existe uma carga térmica a ser retirada do interior da câmara de refrigeração. Se a temperatura atingir o ponto de desligamento, o motor do compressor será desligado. Para o funcionamento do sistema, será considerada uma temperatura de referência de 2°C, utilizada por MENEGHETTI (2009) em suas simulações, que deverá ser mantida constante, e uma histerese de $\pm 2^\circ\text{C}$, para que o ciclo de ativação e desligamento do motor do compressor não tenha um período muito curto e possa danificá-lo. Esses valores de máximo e mínimo foram determinados também em função do produto a ser armazenado, devendo ser respeitados os limites para cada produto.

3.1.18 CONTROLADOR PID

O instrumento virtual (VI), controlador PID, disponibilizado no *software* LabVIEW, é composto por quatro sub VIs, proporcional, integral, derivativa e variação do tempo de amostragem(Δt). O algoritmo matemático executado pelo controlador PID no LabVIEW é mostrado pela Equação 11:

$$V_{out}(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{d(e(t))}{dt} \quad (11)$$

Onde: $e(t)$ representa o erro, K_p , K_i e K_d são os coeficientes que representam os ganhos das ações proporcional, integral e derivativa respectivamente.

A ação proporcional executada pelo instrumento virtual (VI) multiplica o erro pela constante de proporcionalidade (ganho) K_p . O diagrama de blocos deste instrumento virtual é apresentado na Figura 36.

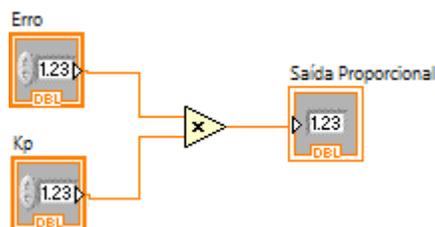


Figura 36: Diagrama de blocos - ação proporcional

A ação integral é avaliada utilizando o método trapezoidal, que possui a representação matemática apresentada pela Equação 12

$$\int_0^n e(t)dt - \sum_{k=0}^n \left(\frac{e(KT) + e[(K+1)T]}{2} \right) T \quad (12)$$

Onde $K= 0, 1, 2, \dots, n$, e T é igual a Δt que corresponde a taxa de amostragem. O diagrama de blocos para a ação integral está mostrado na Figura 37.

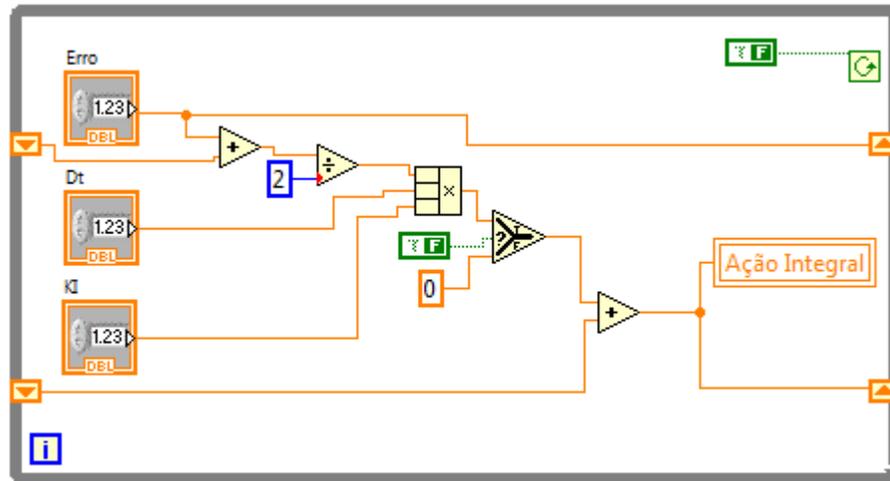


Figura 37: Diagrama de blocos – ação de controle integral

Quando o instrumento virtual ação integral é chamado, o laço de repetição *while* é executado uma vez, dado que o terminal é condicional conectado a uma constante *booleana* (*false*). O valor de erro é adicionado ao valor do erro gerado anteriormente, o que é realizado pelo registrador de deslocamento (*shift register*). Em seguida, o valor da soma é dividido por dois e multiplicado pelo ganho KI e pelo tempo de amostragem dt . Depois disso, um valor lógico passa através do controle *booleano* para verificar se os limites de saída PID estão sendo atingidos ou não. Se o valor *booleano* é verdadeiro, significa que a saída PID encontra-se dentro de seus limites, e o valor calculado de integração é adicionado aos valores anteriores. Se o valor *booleano* for falso, então o PID está saturado e o valor na saída da ação integral deve permanecer constante até que a saída do PID esteja dentro do intervalo novamente.

A Equação 13 representa a ação derivativa:

$$V_{0d} = Kd \frac{de(t)}{dt} \quad (13)$$

A ação derivativa foi calculada utilizando o método de diferença para trás (*backward difference method*), como mostra a Equação 14:

$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{e(KT) - e[(K-1)T]}{T} \quad (14)$$

A variável do processo passa através do controle (PV), o valor anterior da variável do processo é subtraído do valor atual da mesma variável. Em seguida, o resultado é dividido pelo tempo dt de amostragem e, o resultado final, após a divisão, é multiplicado pelo ganho derivativo K_d .

Utilizando a função de seleção, uma condição para evitar a divisão por zero está prevista. Se o valor de dt for maior do que zero, o valor calculado passa fora do indicador de ação derivativa. Se dt for igual ou inferior a zero, um valor de zero é passado para o indicador de ação derivativa. A Figura 38 representa o diagrama de blocos para a ação derivativa.

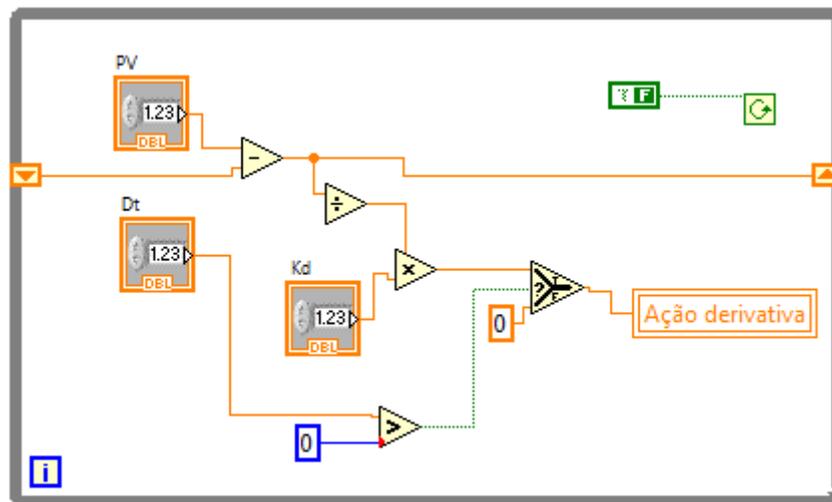


Figura 38: Diagrama de blocos - ação de controle derivativa

O instrumento virtual para determinação do tempo de amostragem (Δt) é utilizado para calcular o tempo entre duas amostras, o que é necessário para que o controle ocorra em tempo real. O diagrama de blocos desse instrumento virtual é apresentado na Figura 39.

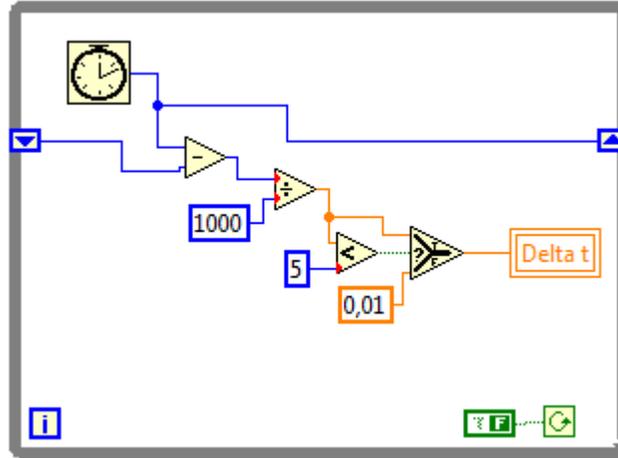


Figura 39: Diagrama de blocos – tempo de amostragem

O bloco PID, que reúne os instrumentos virtuais apresentados nas Figuras 36 a 39, é representado na Figura 40. A saída desse bloco corresponde à soma das ações proporcional, integral e derivativa e o valor da variável do processo é passado para o instrumento virtual PID através da entrada correspondente. Outros terminais de entrada são: o valor de referência, os valores correspondentes ao ganho proporcional (P), ao tempo de integração (I) e ao tempo de derivação (D).

Os terminais de saída são representados pela faixa de saída do controlador, que estipula os limites superior e inferior de atuação, bem como a saída do controlador ao processo.

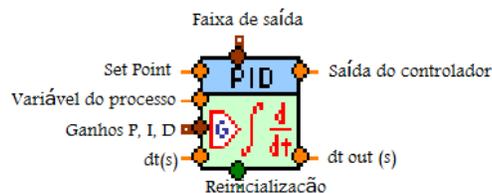


Figura 40: Controlador PID - LabVIEW

3.1.19 ESTRATÉGIA DE CONTROLE PID

A estratégia de controle em malha fechada proposta neste trabalho é baseada no controle proporcional, integral e derivativo (PID).

O sistema em malha fechada opera de forma a variar a rotação do compressor de acordo com a diferença de temperatura do valor de referência previamente selecionado e a temperatura do ar na entrada do evaporador, fornecendo uma variação de temperatura (erro) a cada segundo. O sinal de erro receberá três ações distintas: uma ação proporcional, que multiplica o erro por um valor constante, uma ação derivativa, que reage à taxa de variação do erro e uma ação integral, que aumenta sua atuação enquanto o sinal de erro não for nulo. Essas três ações são somadas definindo a atuação do controlador sobre o sistema.

O objetivo desta estratégia de controle é o de minimizar a diferença entre o valor de referência e o valor da realimentação - PV (*process variable*).

3.1.20 CONTROLADOR FUZZY

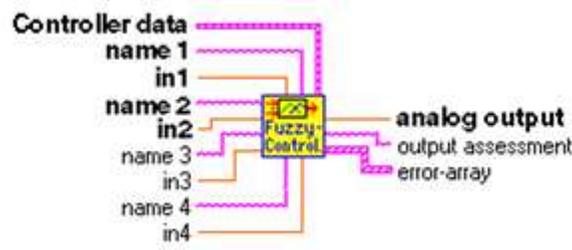


Figura 41: Diagrama de blocos do controlador *fuzzy* - LabVIEW

O controlador *fuzzy*, disponibilizado no software LabVIEW 8.5, cujo diagrama está representado na Figura 41, segue três etapas:

- A fuzificação, que consiste em converter os valores numéricos de entrada do controlador em termos lingüísticos.
- O processo de inferência *fuzzy*, no qual os termos lingüísticos obtidos na entrada do controlador ativam regras do tipo *if...then*, podendo se associar dois termos lingüísticos com a conjunção “e”, gerando um valor lingüístico na saída.
- A defuzzificação, que consiste em converter os valores lingüísticos da saída em valores numéricos.

A estratégia de controle é implementada na base de regras, obtidas junto a um especialista do processo em malha fechada que se deseja controlar.

3.1.21 ESTRATÉGIA DE CONTROLE *FUZZY*

O sistema de refrigeração tem como objetivo manter a temperatura da câmara de armazenamento em um valor previamente selecionado, para os produtos agrícolas, como frutas. A temperatura de armazenamento pode variar dentro de uma faixa pré-estabelecida como mostra a Tabela 8. Para algumas dessas frutas, tais como o abacaxi e a manga, uma variação maior do que 4°C, poderá comprometer o seu aspecto; para outras frutas como no caso da uva, o controle tradicional liga-desliga não seria recomendável, pois a variação na temperatura de armazenamento superior a 1°C poderia causar prejuízos ao produto.

Tabela 9: Temperatura de armazenamento de frutas

Produto	Temperatura [° C]
Abacaxi	10 – 14
Manga	8 – 12
Uva	1,1 – 2,2
Banana	12 – 14
Laranja	4,4 – 7,2

Adaptado de: CHITARRA & CHITARRA, 1990

Neste trabalho, o controlador *fuzzy*, ajusta o valor de referência do controlador PID, de modo que este valor possa variar dentro de uma faixa de 0°C a 1°C acima do valor de referência, dependendo da oscilação de temperatura do ar no centro da câmara de armazenamento e da temperatura do ar na entrada do evaporador, e também, da oscilação do erro entre as duas medidas de temperatura. Essa estratégia de controle propõe a utilização de um valor de referência mais alto, em até 1° C, quando a carga térmica a ser retirada do interior da câmara de armazenamento for pequena, isto é, quando a diferença entre a temperatura do ar no centro da câmara de armazenamento e a temperatura do ar na entrada do evaporador estiver na faixa entre 2°C a 4°C, e o diferencial do erro for zero ou negativo; caso contrário o valor de referência será o que foi pré-estabelecido pelo operador.

3.1.22 VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS

As variáveis linguísticas de entrada utilizadas para o controle *fuzzy* são:

V_Temp_E_C - Variação de temperatura do ar entre o centro da câmara e a entrada do ar do evaporador. Esta variável recebe o valor da diferença das temperaturas, como anteriormente citado, a cada segundo e admite valores na faixa de 2,0 a 4,0 divididos entre os seguintes termos lingüísticos: Muito Baixo (MB), Baixo (B), Médio (M), Alto (A) e Muito Alto (MA). Observa-se na Figura 42 a inter relação entre os termos lingüísticos para a variável V_Temp_E_C.

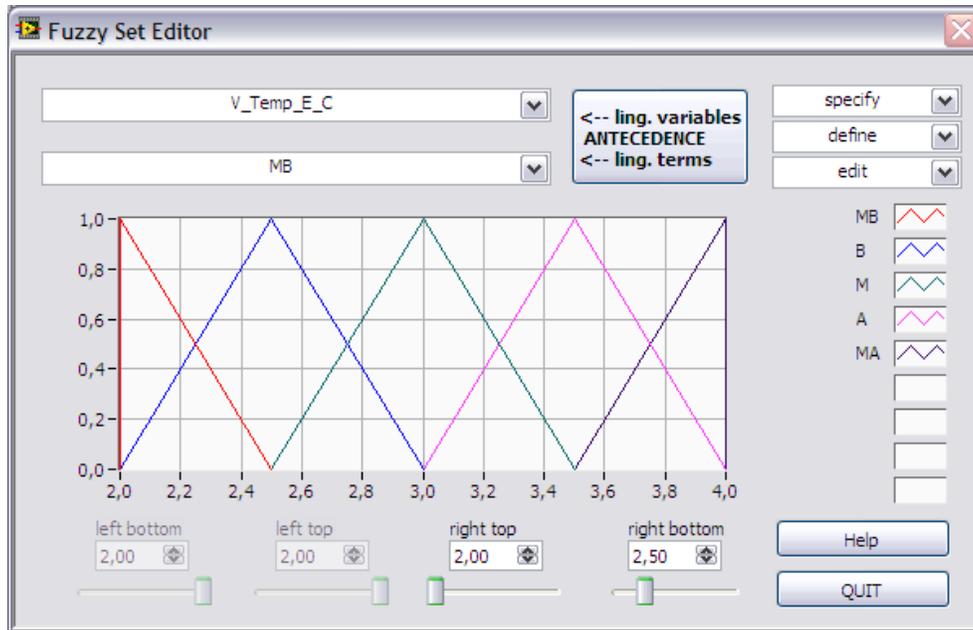


Figura 42: Parâmetros da variável lingüística V_Temp_E_C

DIF_Erro_Temp – Diferencial do erro entre as temperaturas do ar no centro da câmara e da temperatura do ar na entrada do evaporador. Esta variável recebe o cálculo do diferencial do erro entre as temperaturas do ar no centro da câmara e do ar na entrada do evaporador e admite valores entre -1 e 1, divididos entre os seguintes termos lingüísticos: Negativo (N), Zero (Z) e Positivo (P). Observa-se na Figura 43 uma faixa de valores de -0,2 a 0,2, gerando uma espécie de “banda morta”, o que evita que o controlador reaja a qualquer ruído que possa ser gerado pelos sensores.

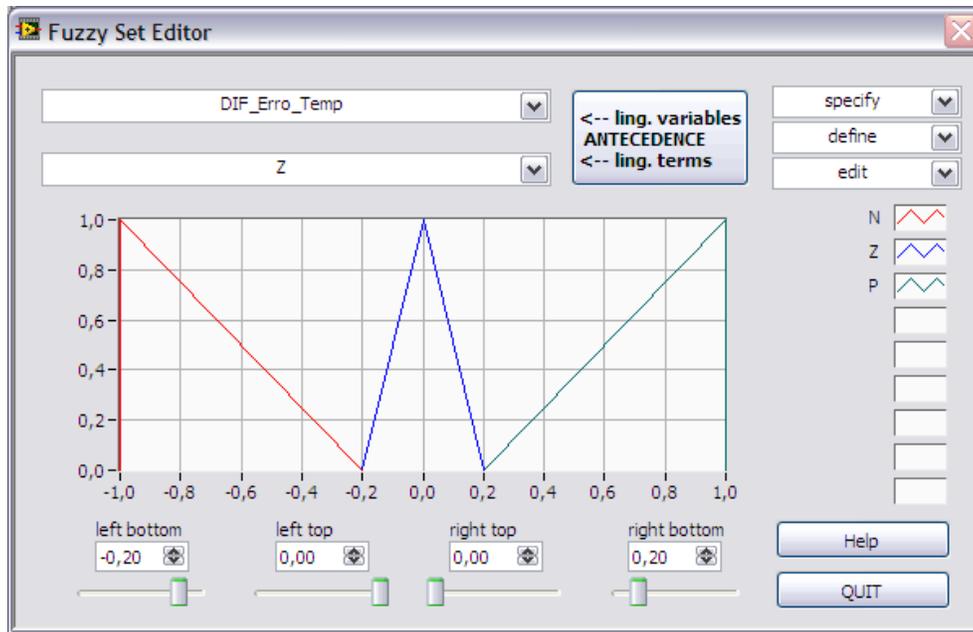


Figura 43: Parâmetros da variável linguística DIF_Erro_Temp

A variável linguística de saída Var_SP (variação no valor de referência), representa o valor a ser acrescido ao valor de referência do controlador PID. Esta variável admite valores de saída na faixa de 0 a 1 e possui os seguintes termos linguísticos: Zero (Z), Alto 1 (A1) Alto 2 (A2), Muito Alto 1 (MA1) e Muito Alto 2 (MA2), como mostrados na Figura 44.

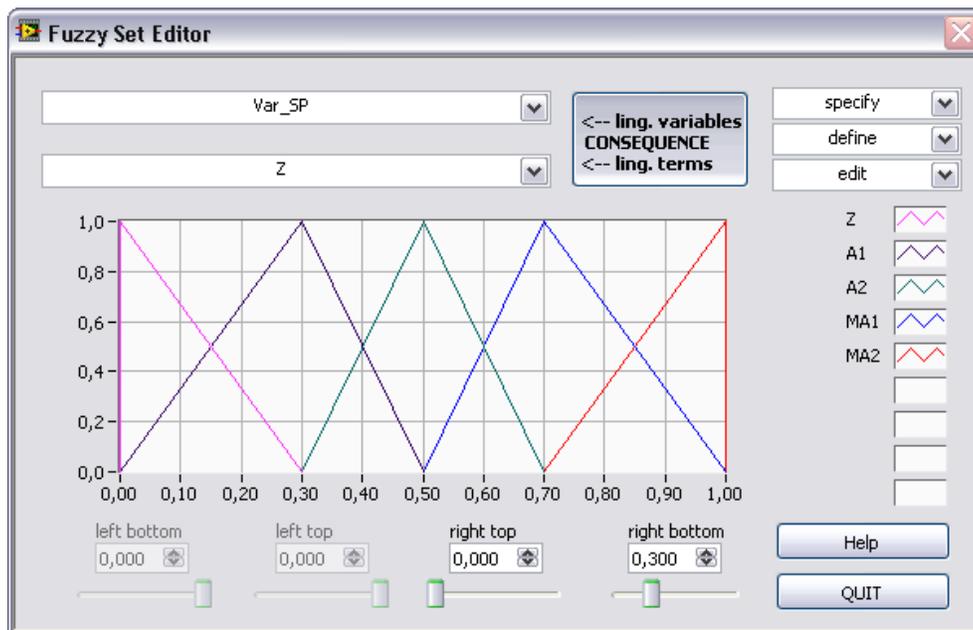


Figura 44: Parâmetros da variável linguística Var_SP

3.1.23 BASE DE REGRAS

A base de regras conta com 15 regras: se...então (*if...then*), que serão ativadas conforme os valores das variáveis lingüísticas de entrada, gerando um valor de saída *defuzzificado* e utilizando o método do centro de gravidade. As regras estão representadas na Tabela 9.

Tabela 10 : Base de regras do controlador *fuzzy*

Número da regra	V_Temp_E_C	DIF_Erro_Temp	Var_SP
1	MB	N	MA2
2	MB	Z	MA2
3	MB	P	A2
4	B	N	MA1
5	B	Z	MA1
6	B	P	A1
7	M	N	A2
8	M	Z	A2
9	M	P	A2
10	A	N	A1
11	A	Z	A1
12	A	P	Z
13	MA	N	Z
14	MA	Z	Z
15	MA	P	Z

3.1.24 DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES INICIAIS DOS EXPERIMENTOS

Os parâmetros para a realização dos experimentos tais como: o valor de referência, a intensidade da carga térmica, a taxa de aquisição dos dados, o tempo de cada experimento, foram determinados, levando-se em consideração a condição do armazenamento refrigerado. O valor de referência, para todos os experimentos, foi fixado em 2°C, dado que esse valor corresponde ao *steady-state* do sistema, isto é, na operação do sistema em malha aberta com a frequência do compressor a 30Hz e uma carga térmica de 800kcal h⁻¹, a temperatura no interior da câmara se estabilizou em 2°C.

A carga térmica foi ajustada em 1530kcal h⁻¹. Este valor representa 36% da potência frigorífica total do sistema de refrigeração e simula a condição do armazenamento refrigerado, isto é, o sistema deverá suprir pequenas variações de temperatura no interior da câmara, causadas, principalmente, pelo calor de respiração do produto e, também, pelas perdas através

das paredes, piso e teto. A carga térmica de $2384,3\text{kcal h}^{-1}$, simula uma carga cuja potência representa 64,2% a mais do que a primeira carga e foi testada para verificar o comportamento dos controladores quando o sistema for solicitado por uma carga térmica maior. O tempo total dos experimentos foi de 1h e 40min, a uma taxa de aquisição de uma amostra por segundo. Foram tomados como referência para a validação dos modelos matemáticos, utilizados por MENEGHETTI (2009) em suas simulações, os parâmetros: ganho proporcional, tempo de integração e tempo de derivação do controlador PID, obtidos segundo a metodologia de ZIEGLER e NICHOLS (1942) e tiveram os seguintes valores: 121 para o ganho proporcional, 44s para o tempo de integração e 11s para o tempo de derivação. Como nos experimentos o objetivo do sistema de refrigeração é de suprimir pequenas variações na carga térmica, isto é, manter o produto armazenado sob refrigeração. Em todos os experimentos esperou-se que o sistema atingisse o regime permanente de operação quando a temperatura do ar na entrada do evaporador fosse estabilizada em torno do valor de referência, para que se iniciasse a aquisição dos dados para cada estratégia de controle.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos sete experimentos realizados são mostrados a seguir:

PRIMEIRO EXPERIMENTO: Neste experimento foi testada a estratégia de controle liga-desliga, com histerese de 2°C. A potência do banco de resistências foi selecionada em 1784W, valor que corresponde a 1530kcal h⁻¹, sendo então iniciada a aquisição de dados a taxa de uma amostra por segundo. Nota-se na Figura 45 que a temperatura do ar na entrada do evaporador oscilou em 1,3°C acima do valor de referência e 1,0°C abaixo do valor de referência, portanto houve uma variação 2,3°C na temperatura no interior da câmara de armazenamento. O motor elétrico do compressor foi acionado seis vezes durante o experimento à frequência de 60Hz, permanecendo para cada ciclo desligado por 280s e ligado por 670s, o que corresponde respectivamente a 29,5% e 70,5% do tempo em análise. O índice de desempenho IMSE calculado para esta malha de controle foi de 0,17.

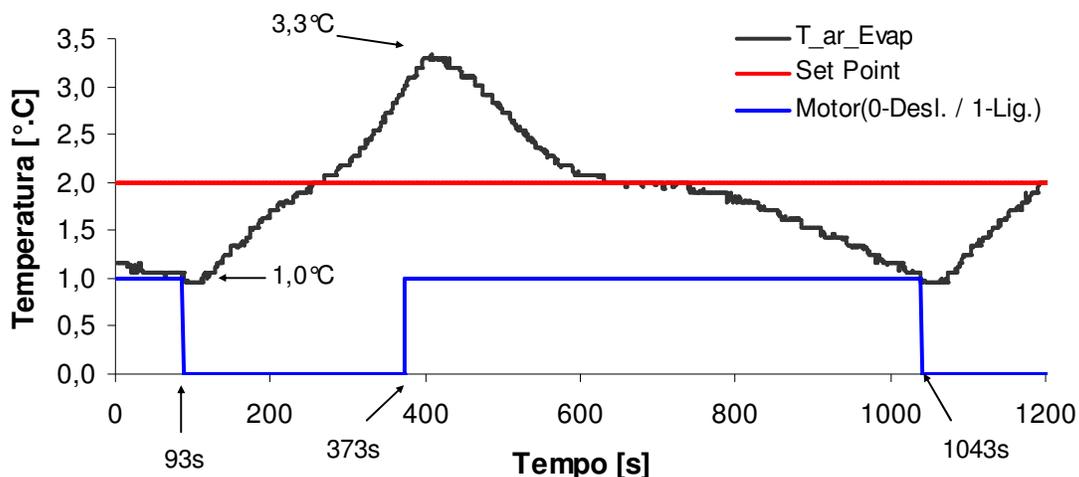


Figura 45: Controle liga-desliga com 1.530kcal h⁻¹ de carga térmica.

Nessas condições foi calculado o consumo de 2,01kWh de energia elétrica pelo motor do compressor do sistema de refrigeração.

SEGUNDO EXPERIMENTO: Para este experimento, a potência do banco de resistências foi elevada para 2775,4W o que corresponde a 2384,3kcal h⁻¹, a histerese foi mantida em 2°C e a taxa de aquisição de dados em uma amostra por segundo. Nota-se na Figura 46 que a temperatura do ar na entrada do evaporador novamente oscilou 1,3°C acima

do valor de referência e $1,0^{\circ}\text{C}$ abaixo do valor de referência, portanto houve uma variação $2,3^{\circ}\text{C}$ na temperatura no interior da câmara de armazenamento. O motor elétrico do compressor foi acionado cinco vezes durante o experimento à frequência de 60Hz , permanecendo para cada ciclo desligado por 216s e ligado por 751s , isto é, $23,3\%$ do tempo ligado e $73,9\%$ do tempo desligado. O índice de desempenho IMSE calculado para esta malha de controle foi de $0,39$.

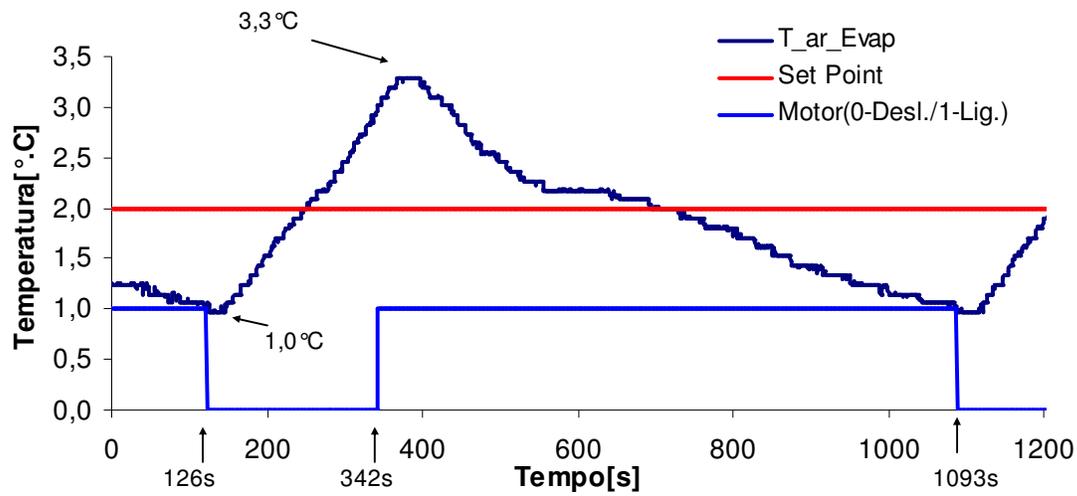


Figura 46: Controle liga-desliga com $2.384,3\text{kcal h}^{-1}$ de carga térmica.

Nessas condições foi calculado o consumo de $2,11\text{kWh}$ de energia elétrica pelo motor do compressor do sistema de refrigeração.

TERCEIRO EXPERIMENTO: Estratégia de controle liga – desliga com 1530kcal h^{-1} e histerese de 1°C . Este experimento foi realizado, com a finalidade de verificar o consumo de energia elétrica para uma menor variação de temperatura na câmara de armazenamento, estando esta variação mais aproximada dos valores obtidos para as estratégias de controle PID e *fuzzy*. Nota-se na Figura 47 que a temperatura do ar na entrada do evaporador oscilou em torno de $0,8^{\circ}\text{C}$ acima do valor de referência e $0,6^{\circ}\text{C}$ abaixo do valor de referência; portanto houve uma variação $1,4^{\circ}\text{C}$ na temperatura no interior da câmara de armazenamento. Para manter o sistema nessas condições, o motor elétrico do compressor foi acionado nove vezes no intervalo de tempo do experimento à frequência de 60Hz , permanecendo para cada ciclo desligado por 99s e ligado por 846s , o que representa respectivamente $10,5\%$ do tempo desligado e $89,5\%$ do tempo ligado. O índice de desempenho IMSE calculado para esta malha de controle foi de $0,17$.

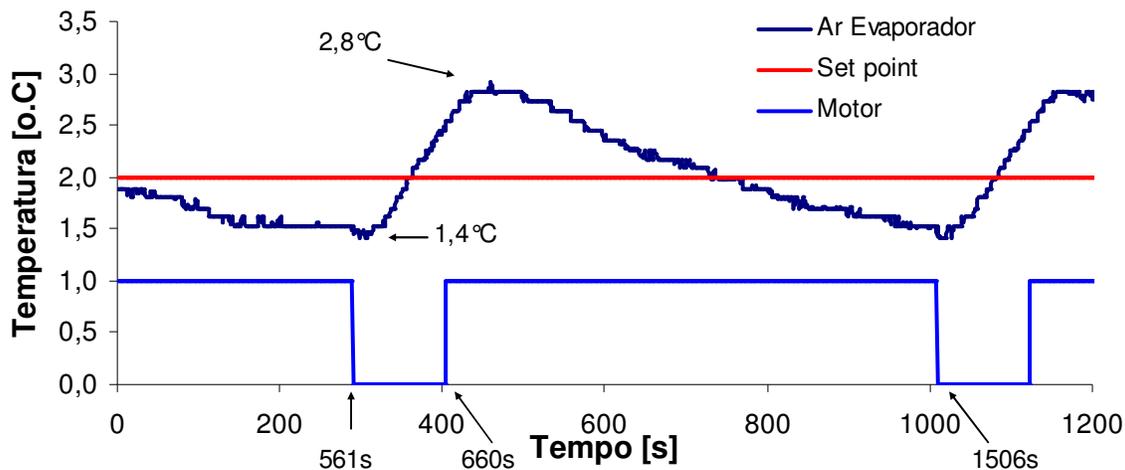


Figura 47: Controle liga-desliga com $1.530 \text{ kcal h}^{-1}$ de carga térmica e histerese 1°C .

Nessas condições foi calculado um consumo de $2,20 \text{ kWh}$ de energia elétrica pelo motor do compressor do sistema de refrigeração.

QUARTO EXPERIMENTO: Para a estratégia de controle PID, a potência do banco de resistências foi selecionada em 1784 W , o que corresponde a 1530 kcal h^{-1} , sendo então iniciada a aquisição dos dados à taxa de uma amostra por segundo. Nota-se na Figura 48 que a temperatura do ar na entrada do evaporador teve uma variação em torno de $0,2^\circ\text{C}$ acima e $0,2^\circ\text{C}$ abaixo do valor de referência; portanto houve uma variação $0,4^\circ\text{C}$ na temperatura do ar na entrada do evaporador. A diferença entre a temperatura do centro da câmara de armazenamento e a temperatura na entrada do evaporador não passou de $0,5^\circ\text{C}$. Para esta estratégia de controle o sistema se apresentou mais estável quanto à variação de temperatura, e o consumo de energia elétrica pelo motor do compressor foi sensivelmente maior, em comparação com a estratégia de controle liga – desliga, cerca de 3%, o que representa $2,07 \text{ kWh}$. A variável de atuação, frequência elétrica do motor do compressor (Figura 49), apresentou uma variação de 60,6% a 91,0% (36,3Hz a 54,6Hz).

O índice de desempenho IMSE calculado para esta malha de controle foi de 0,019.

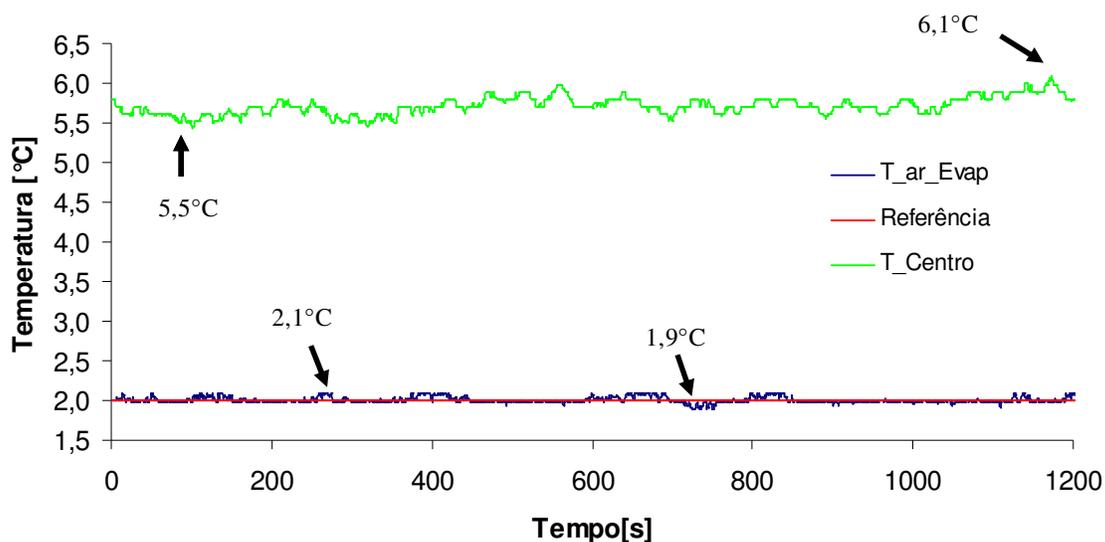


Figura 48: Controle PID com $1.530 \text{ kcal h}^{-1}$ de carga térmica - Temperaturas

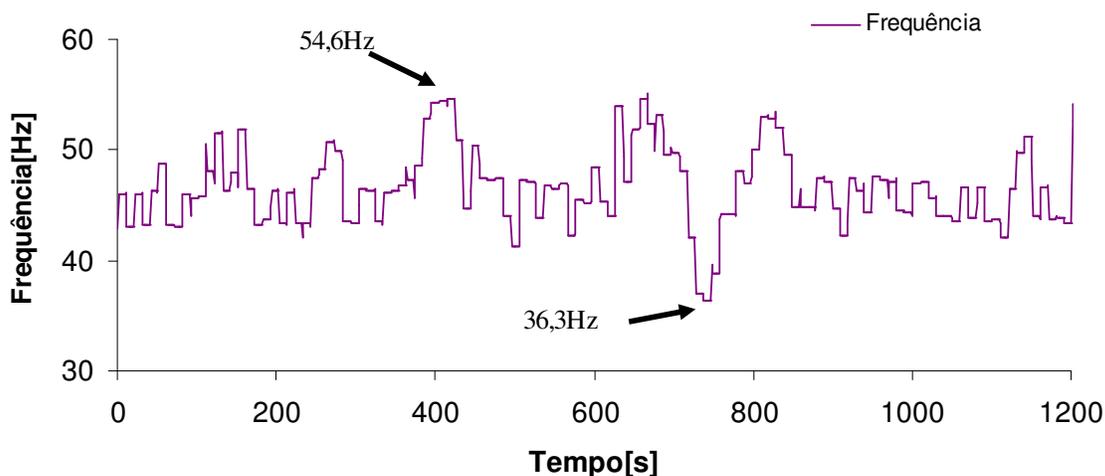


Figura 49: Controle PID com $1.530 \text{ kcal h}^{-1}$ de carga térmica – Frequência elétrica

QUINTO EXPERIMENTO: Neste experimento foi testada a estratégia de controle PID, selecionando a potência do banco de resistências em $2775,4 \text{ W}$, o que corresponde a $2384,3 \text{ kcal h}^{-1}$. Nota-se na Figura 50 que a temperatura do ar na entrada do evaporador teve uma variação de $0,1^\circ\text{C}$ acima e abaixo do valor de referência; portanto houve uma variação $0,2^\circ\text{C}$ na temperatura do ar. A diferença entre a temperatura do centro da câmara de armazenamento e a temperatura na entrada do evaporador apresentou uma variação de $6,4^\circ\text{C}$ a $7,1^\circ\text{C}$; portanto,

para esta estratégia de controle o sistema se apresentou mais estável quando comparado à estratégia de controle liga-desliga no que diz respeito à variação da temperatura na câmara. O consumo de energia elétrica pelo motor do compressor foi sensivelmente maior, em torno de 2,2kWh, o que representa 6,16% em comparação com a estratégia de controle liga-desliga submetidos à mesma carga térmica. A variável de atuação, frequência elétrica do motor do compressor (Figura 51), variou de 64,0% a 100,0% (38,4Hz a 60,0Hz).

O índice de desempenho IMSE calculado para esta malha de controle foi de 0,002.

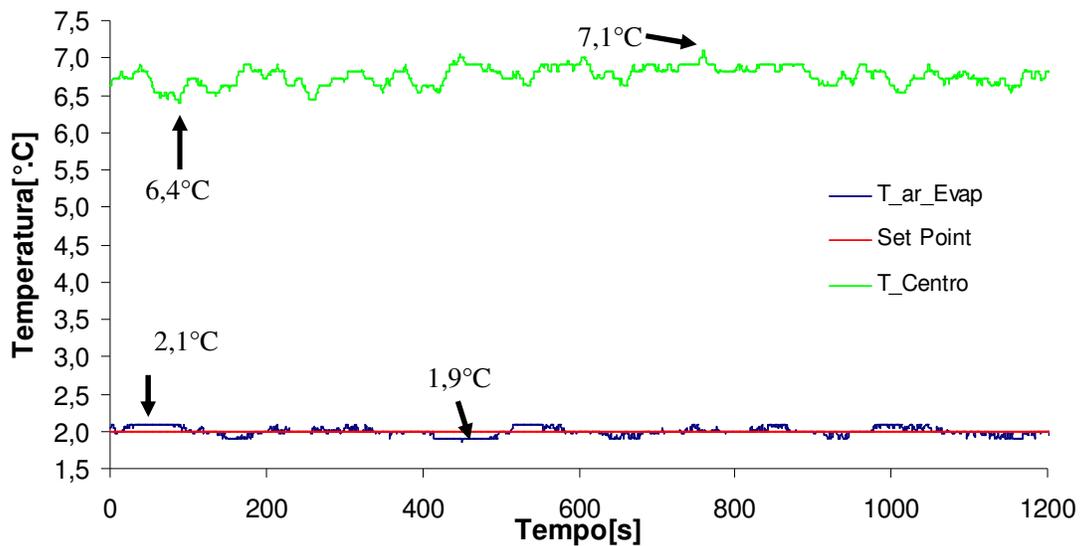


Figura 50: Controle PID com 2.384,3kcal h⁻¹ de carga térmica - Temperaturas

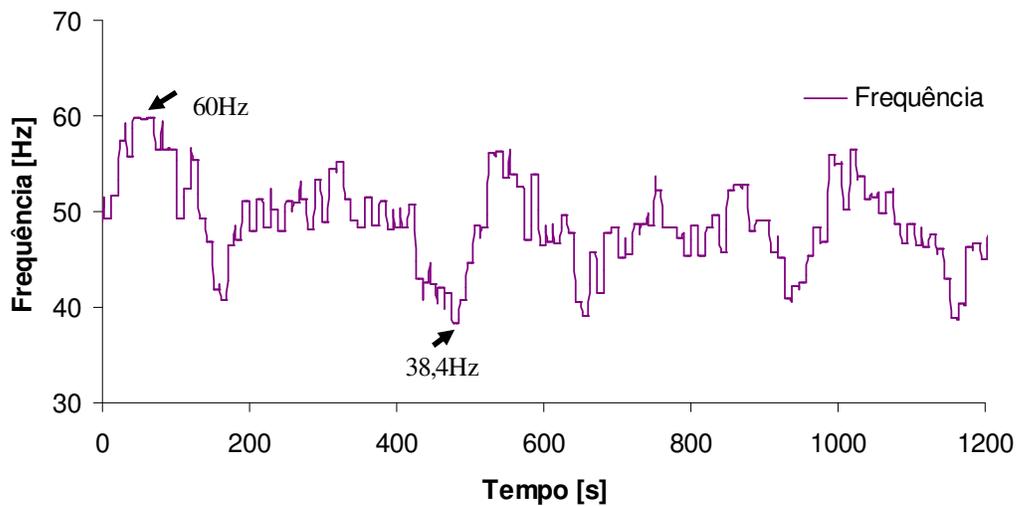


Figura 51: Controle PID com $2.384,3 \text{ kcal h}^{-1}$ de carga térmica – Frequência elétrica

SEXTO EXPERIMENTO: Nesse experimento, foi utilizada a estratégia de controle *fuzzy* com a potência do banco de resistências selecionada em 1784 W , o que corresponde a 1530 kcal h^{-1} . Após o sistema entrar em regime permanente, a chave que liga o controlador *fuzzy* foi acionada, e a partir deste momento o valor de referência do controlador PID passou a ser corrigido pelo controlador *fuzzy*. Nota-se na Figura 50, que o valor de referência do controlador PID passa a variar na faixa de $2,3^\circ\text{C}$ a $2,5^\circ\text{C}$, sendo que a diferença entre a temperatura do ar na entrada do evaporador e a temperatura do ar no centro da câmara ficou em torno de $3,4^\circ\text{C}$. Observa-se, também, que a temperatura no centro da câmara variou minimamente em torno de $5,8^\circ\text{C}$. Nestas condições houve um consumo de $1,87 \text{ kWh}$ de energia elétrica pelo motor do compressor do sistema de refrigeração. A Figura 53 mostra a frequência elétrica fornecida ao motor do compressor, que representa a variável controlada, e que variou de $50,8\%$ a $85,6\%$ ($30,5 \text{ Hz}$ a $51,4 \text{ Hz}$). O índice de desempenho I_{MSE} calculado para esta malha de controle foi de $0,002$.

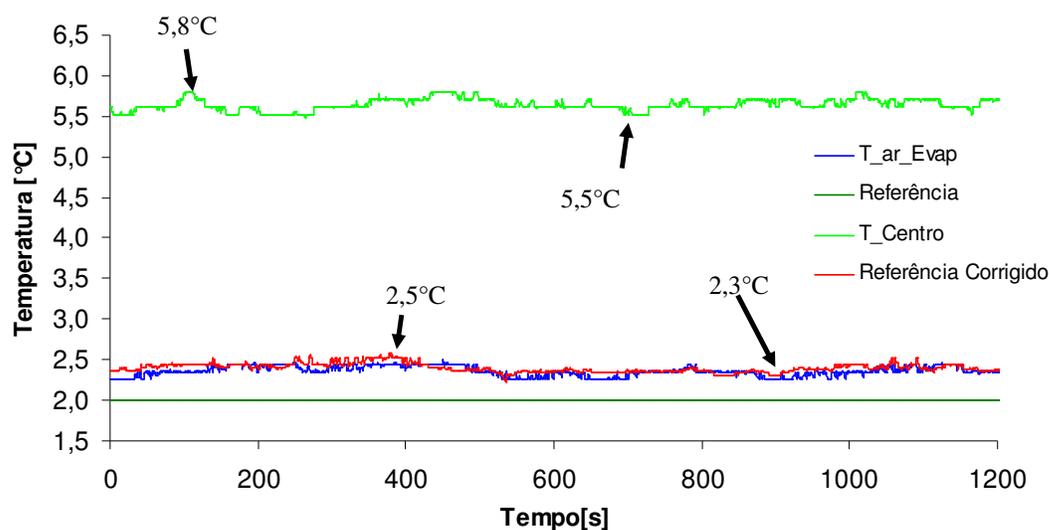


Figura 52: Controle *fuzzy* com $1.530 \text{ kcal h}^{-1}$ de carga térmica - Temperaturas

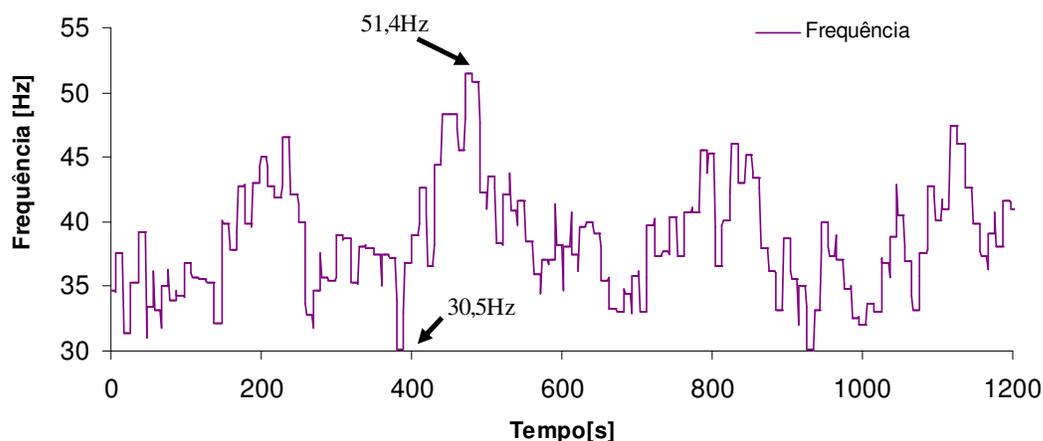


Figura 53: Controle *fuzzy* com $1.530 \text{ kcal h}^{-1}$ de carga térmica – Frequência elétrica

SÉTIMO EXPERIMENTO: Estratégia de controle *fuzzy* a $2384,3 \text{ kcal h}^{-1}$.

A potência do banco de resistências foi selecionada em $2775,4 \text{ W}$, o que corresponde a $2384,3 \text{ kcal h}^{-1}$. Iniciou-se a aquisição dos dados quando o sistema entrou em regime permanente. Como os valores da diferença da temperatura do ar na entrada do evaporador e a temperatura do ar no centro da câmara, permaneceram em torno de $4,7^\circ\text{C}$, não houve atuação da estratégia de controle *fuzzy* no valor de referência do controlador PID. Isto significa que,

quando existe uma grande carga térmica a ser retirada do interior da câmara de armazenamento, o controlador PID assume o controle da malha, fixando o valor de referência no valor previamente estabelecido, retornando a supervisão *fuzzy* do valor de referência, quando a variação de temperatura do ar, entre o centro da câmara e da temperatura do ar na entrada do evaporador estiver dentro da faixa compreendida entre 2°C a 4°C, para este valor de carga térmica o consumo de energia elétrica pelo motor do compressor permaneceu igual (2,26 kWh), ao registrado na estratégia de controle PID. Pode-se notar na Figura 54 que o valor de referência corrigido se mantém no valor previamente estabelecido para o controlador PID. A Figura 55 mostra uma variação 71,6% a 100% na variável de atuação, frequência elétrica fornecida ao motor do compressor, sendo que a mesma variou na faixa de 43,0Hz a 60,0Hz. O índice de desempenho IMSE calculado para esta malha de controle foi de 0,002.

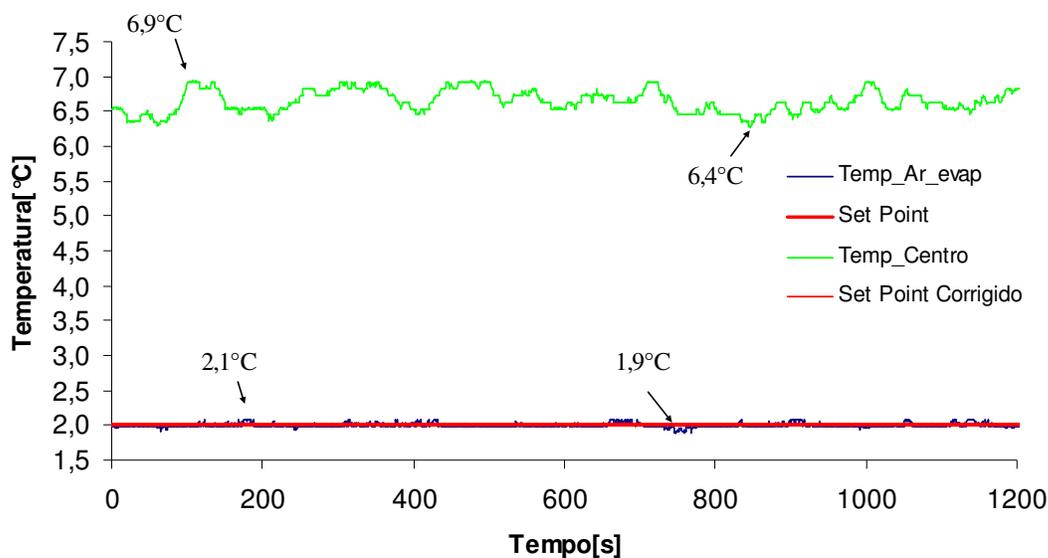


Figura 54: Controle *fuzzy* com $2.384,3 \text{ kcal h}^{-1}$ de carga térmica - Temperaturas

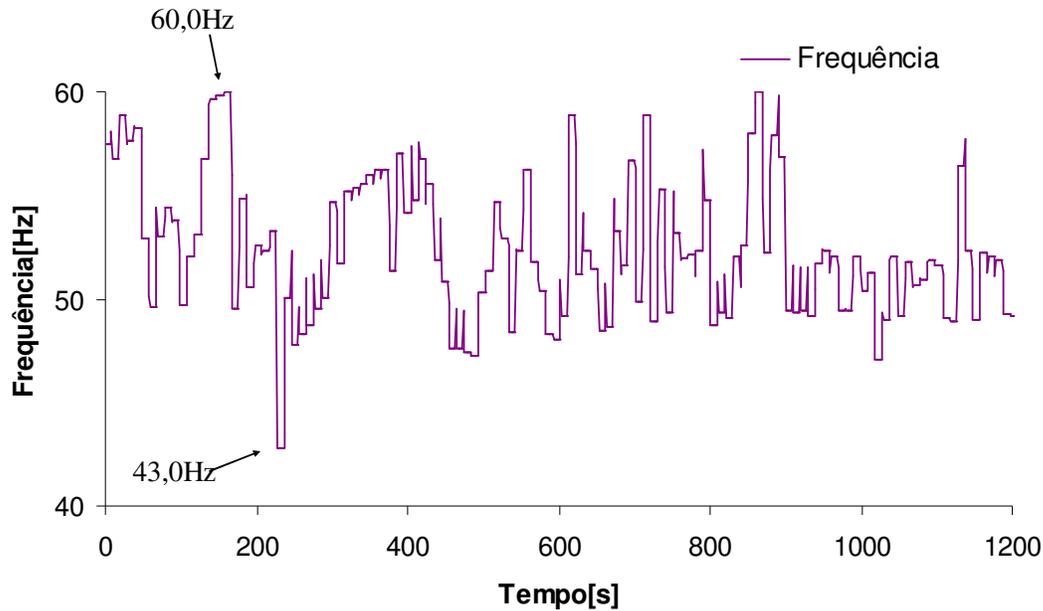


Figura 55: Controle *fuzzy* com $2.384,3 \text{ kcal h}^{-1}$ de carga térmica – Frequência elétrica

Comparando-se o consumo de energia elétrica, as ações de controle PID e liga-desliga, obtiveram resultados semelhantes, consumindo $2,01 \text{ kWh}$ e $2,07 \text{ kWh}$, respectivamente, nos experimentos com a carga térmica a 1530 kcal h^{-1} , a estratégia de controle *fuzzy*, se destacou, e dentro da sua faixa de atuação possibilitou que o motor do compressor economizasse em torno de 10% de energia elétrica, isso representa $1,87 \text{ kWh}$ de energia elétrica consumida.

Os resultados obtidos permitem concluir que o controle PID manteve a variável controlada sem grandes variações, e com menor erro em relação ao valor de referência quando comparado ao controlador liga-desliga, mantendo, ainda, o consumo de energia elétrica em níveis semelhantes aos do controlador liga-desliga.

A estratégia de controle *fuzzy* obteve uma melhor solução de compromisso quando se avalia o conjunto dos índices: variação da temperatura na câmara; erro em regime e economia de energia elétrica, pois para a sua faixa de atuação, obteve um menor erro em regime permanente e uma menor oscilação da variável controlada, quando comparado às outras duas estratégias de controle, além de proporcionar um menor consumo de energia elétrica pelo motor do compressor.

O comportamento das estratégias de controle, em termos de economia de energia elétrica e da oscilação da variável controlada, foi similar quando comparado às simulações realizadas por MENEGHETI (2009), no modelo matemático que representa o sistema de refrigeração. A Tabela 11 mostra a comparação entre os resultados obtidos nas simulações e os resultados obtidos nos experimentos. A carga térmica considerada para as comparações foi de 1530 kcal h^{-1} , o valor de referência foi fixado em 2°C e o inversor de frequência atuou na faixa de 30 a 60Hz.

Tabela 11: Comparação entre a simulação e o experimento

Estratégias	Consumo de energia elétrica (kWh)		Variação da temperatura ($^\circ\text{C}$)	
	Simulação	Experimento	Simulação	Experimento
Liga-Desliga	1,97	2,01	2,0	2,3
PID	2,01	2,07	<0,2	<0,2
<i>Fuzzy</i>	1,90	1,87	<0,2	< 0,2

Um experimento com a carga térmica a 1530 kcal h^{-1} , e com uma histerese de 1°C foi realizado para comparar a estratégia de controle liga-desliga com a estratégia de controle PID. A redução na histerese implica numa menor variação de temperatura no interior da câmara para a estratégia de controle liga-desliga. Os resultados deste experimento mostraram que, a estratégia de controle liga-desliga com histerese de 1°C consumiu, 2,20 kWh contra 2,07 kWh da estratégia de controle PID. Quanto à variação da temperatura, a estratégia de controle PID, obteve o melhor resultado.

Quando a carga térmica foi elevada para $2384,3 \text{ kcal h}^{-1}$, a estratégia de controle liga-desliga consumiu 2,11 kWh e a estratégia de controle PID consumiu 2,24 kWh; portanto, para essa intensidade de carga térmica, a estratégia de controle liga-desliga economizou mais energia, em torno de 6%. Quanto à estabilidade, a estratégia de controle PID superou novamente o controlador liga-desliga. Para esse valor de carga térmica, a estratégia de controle *fuzzy* não atuou no valor de referência do controlador PID, pois a variação da temperatura no interior da câmara foi superior a 4°C .

5. CONCLUSÃO

Foi constatada, nesse trabalho, a importância da automação e controle de processos aplicadas aos sistemas de refrigeração para armazenamento de produtos agrícolas, que utilizando técnicas avançadas de controle e instrumentos de precisão, mostraram ser uma opção eficaz quando se deseja um controle preciso da temperatura no interior da câmara de armazenamento, em conjunto com a diminuição no consumo de energia elétrica.

Os instrumentos especificados, selecionados e instalados no sistema de refrigeração, atenderam as expectativas, proporcionando precisão adequada aos dados utilizados para as comparações.

O aplicativo desenvolvido em linguagem LabVIEW, foi de grande importância ao automatizar e organizar o processo de coleta de dados, e também, na execução das estratégias de controle.

Os algoritmos de controle liga-desliga, PID e *fuzzy* foram implementados no aplicativo desenvolvido na linguagem LabVIEW e executados, controlando a variável temperatura do ar na entrada do evaporador, atuando na variável frequência elétrica do motor do compressor do sistema de refrigeração. A análise dos resultados obtidos permitem concluir que o controle PID manteve a variável controlada sem grandes variações e com menor erro em relação ao valor de referência quando comparado ao controlador liga-desliga, mantendo, ainda, o consumo de energia elétrica em níveis semelhantes aos do controlador liga-desliga.

Pode-se concluir que a estratégia de controle *fuzzy* obteve uma melhor solução de compromisso quando se avalia o conjunto dos índices: a variação da temperatura na câmara, o erro na operação em regime permanente e, também, a economia de energia elétrica, pois para a sua faixa de atuação (entre 2°C e 4°C), a estratégia de controle *fuzzy* obteve um menor erro em regime permanente e uma menor oscilação da variável controlada, quando comparado às outras duas estratégias de controle, além de proporcionar uma redução de 10% no consumo de energia elétrica pelo motor do compressor.

Os resultados obtidos neste trabalho estão de acordo com os resultados obtidos por MENEGHETTI (2009) em suas simulações dos modelos matemáticos implementados no *software* Matlab.

Para a realização de trabalhos futuros, fica como sugestão, a substituição das resistências cônicas por um tambor com determinado volume de água para simular a carga térmica no interior da câmara, visando uma maior capacitância térmica para o sistema.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIAF - Associação Brasileira da Indústria de Armazenagem Frigorificada. <www.abiaf.com.br> . 15/09/2009.
- ALVAREZ, G.;TRYSTAM, G. - **Designer of a new strategy for the control of the refrigeration process: fruit and vegetables conditioned in a pallet.** *Food Control*, Guilford, v.6, n.6, p.347-55. 1995.
- APAS – Associação paulista de supermercados. <www.portalapas.org.br>. 15/09/2009.
- APREA, Ciro; MASTRULLO, Rita; RENNO, Carlos. - **Fuzzy control of the compressor speed in a refrigeration plant.** *International Journal of Refrigeration*, Uxbridge, volume 27, p. 639-648. 2004.
- BUZELIN, Luis Otavio Soranço. - **Concepção e desenvolvimento teórico-experimental de um sistema de refrigeração inteligente.** 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2003.
- CAMPOS, Mario Cesar M. Massa; TEIXEIRA, Herbert C. G. - **Controles típicos de equipamentos e processos industriais.** 1ed. São Paulo: Editora Blucher, 2006.
- CARVAJAL, James; CHEN, Guanrong; OGMEN, Haluk. - **Fuzzy PID controller: Design, performance evaluation, and stability analysis.** *Information Sciences*. 123p. 249-270. 2000
- CHIEN,K.L.; HRONES, J.A.; RESWICK, J.B. - **On the Automatic Control of eneralized Passive Systems.** *Trans. ASME*, n.74, p.175-185, 1952.
- CHITARRA, Maria Isabel Fernandes; CHITARRA, Admilson Bosco. - **Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio.** 2. ed. rev. e ampl. Lavras: UFLA, 2005.
- COSTA, Ennio Cruz da - **Refrigeração.** 3ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1982.
- COX, Earl - **Fuzzy logic for business and industry.** 1ed. Rockland: Charles River Media, Inc. 1995.
- DRIANKOV, D.; HELLENDORRN, H.; REINFRANK, M. - **An introduction to fuzzy control.** 2ed. 316 p. New York: Springer-Verlag, 1996.
- EKREN, Orhan; SAHIN, Savas; ISLER, Yalcin - **Comparison of Different Controllers for Variable Speed Compressor and Electronic Expansion Valve,** *International Journal of Refrigeration*. Volume 33, Pages 1161-1168. 2010.

FERREIRA, A.L.G.; PARANHOS, J.P.S. - **Controle em tempo real por lógica fuzzy.** Projeto Final (Curso de Engenharia Elétrica/Eletrônica) – Faculdade de Engenharia de Resende. 2004.

FLÓREZ, Fabio Alejandro Carvajal. - **Implementação de uma bancada de ensaios para análise de estratégias de controle de sistemas de refrigeração e ar condicionado.** 138p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004.

GARCIA, Francisco Ernesto Moreno; BANDARRA, Enio P.; MENDOZA, Oscar S. Hernandez - **Avaliação do desempenho de um sistema de refrigeração por compressão de vapor a velocidade variável 17º.** Simpósio do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia. (2007)

GOMES, André Rodrigues Corrêa - **Influência da cadeia do frio na qualidade da maçã gala em uma rede varejista em Viçosa-MG:** 15p. (Trabalho de conclusão de curso) – Departamento de Engenharia Elétrica e de Produção - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2006

GOMIDE, F A. C.; GUDWIN, R. R. - **Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy.** Controle e Automação, vol 4. n. 3, 97 – 115p. 1994.

HUA, Li; JEONG, Seok-Kwon; YOU, Sam-Sang - **Feedforward control of capacity and superheat for a variable speed refrigeration system.** Applied Thermal Engineering, Uxbridge, p. 1067-1074. 2008.

IEA – Instituto de Economia Agrícola – <www.iea.sp.gov.br> – Consulta em agosto de 2009

KRAKOW, K. I.; YAN L.; LIN S. - **A Model of hot-gas defrosting of evaporators. Heat and mass transfer theory.** ASHRAE Transactions 98(1), 1992

LEITE, Manuela Souza - **Estudo comparativo do desempenho de controladores fuzzy e convencional aplicados em um bioprocesso:** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2007.

LJUNG, Lennart.; GLAD, Torkel - **Modeling of Dynamic Systems.** 361p. Prentice-hall New Jersey:, 1994..

- LUYBEN, William L. - **Process Modeling Simulation and Control for Chemical Engineers**. 2ed. Pensilvania: Mc Graw Hill. 1990.
- MANDANI, E. H. - **Applications of fuzzy algorithms for control of a simple Dynamic plant**. *Prodeedings IEEE*, 121, 12; 1585-1588. 1974
- MENEGHETTI, Carlos Renato - **Estratégias de controle em câmara de refrigeração por compressão de vapor**: 154p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola).- Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2009.
- MOREIRA, Rubens C.; VIANA, Silvia T. - **Estudo preliminar econômico de um refrigerador térmico por ciclo de adsorção movido a gás natural**: XII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica. Ilha Solteira – SP. 2005
- OGATA, K. - **Engenharia de Controle Moderno**. 788 p. 4^a.ed. Pearson Education do Brasil. São Paulo. 2003.
- PEREIRA FILHO, Renato Dutra. - **Desenvolvimento e implementação de controladores nebulosos em uma coluna piloto de destilação em batelada**: 189p. Dissertação (Mestrado em Sistema de Processos Químicos e Informática) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.
- PINHEIRO, Carlos Alberto Murari. - **Análise e projeto de sistemas de controle fuzzy: uma abordagem no domínio da frequência**: 141p. Tese (Doutorado em Automação) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2000.
- REGAZZI, Rogério Dias; PEREIRA, Paulo Sergio; SILVA JR. Manoel Feliciano da - **Soluções Práticas de Instrumentação e Automação Utilizando a Programação Gráfica LabVIEW**, 1ed. São Paulo, 2005.
- ROMANINI, Carlos Eduardo Bites - **Desenvolvimento de um sistema de controle fuzzy para incubadora de ovos**: 117p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2009
- SHAW, Ian S.; SIMÕES, Marcelo Godoy - **Controle e Modelagem Fuzzy**. 2ed. Edgar Blucher/FAPESP: São Paulo. 2007.

SILVA, Flávio Vasconcelos - **Comparação do desempenho de um sistema de refrigeração para resfriamento de líquido, controlado a diferentes modos de controle:** 327 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.2003.

SERRA, Ginauber Luiz de Oliveira - **Propostas de metodologias para identificação e controle inteligentes:** 146p. Tese (Doutorado em Automação) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2005.

SILVEIRA Jr, Vivaldo - **Experimental evaluation of fuzzy controllers for the temperature control of the secondary refrigerant in a liquid chiller** - Journal of Food Engineering 75 (2006) 349–354, 2005.

SOYGUDER, Servet; ALLI, Hasan - **Simulation and modelling of HVAC system having two zones with different properties.** TOK2006 conference (Vol. 1, pp. 346-352),. 2006

SOYGUDER, Servet; ALLI, Hasan - **Design and simulation of self-tuning PID-type fuzzy adaptive control for an expert HVAC** - Expert Systems with Applications. Volume 36. 4566-4573p. 2009.

STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M. Saiz - **Refrigeração Industrial.** 384p. 2ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2002.

TANABE, Celso Shiguetoshi; CORTEZ, Luis Augusto Barbosa - **Perspectivas da cadeia do frio para frutas e hortaliças no Brasil.** MERCOFRIO 1998. Feira e Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul. Disponível em: <<http://www.revistadofrio.com.br/pdf/artigo5.pdf>>. 15/09/2009.

TASSOU S. A.; QURESHI T. Q. - **Dynamic mode performance evaluation and energy analysis of mains and inverter driven refrigeration compressor.** J. od Power and Energy,1997, 211(4): 339-346

TEITEL, M.; LEVI, A.; ZHAO, Y.; BARAK, M.; BAR-LEV, E.; SHMUEL, D. - **Energy saving in agricultural buildings through fan motor control by variable frequency drives.** Energy and Buildings - Volume 40, Issue 6, 2008, Pages 953-60
Energy and Buildings, J. od Power and Energy, 2008, 40, 953–960.

TIBOLA Casiane S.; FACHINELLO José C. - **Tendências e estratégias de mercado para a fruticultura.** - Revista brasileira de Agrociência, v.10, n. 2, p. 145-150p. 2004

YAGER, R. R.; FILEV, D.P. - **Essentials of fuzzy modeling and control**, John Wiley & Sons: New York, NY. (1994).

ZADEH, Lofti Askar - **Fuzzy sets. Informatics and Control**, 338-353p. Berkeley. 1965.

ZIEGLER, J.G.; NICHOLS, N.B. - **Optimum settings for automatic controller.** ASME Trans.,v.1, p.64-759, 1942.