



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA MECÂNICA

SINTONIA DE UM CONTROLADOR PID ADAPTATIVO
PARA CONTROLE DO SUPERAQUECIMENTO
ATRAVÉS DO ALGORITMO DA COLÔNIA ARTIFICIAL
DE ABELHAS

NATHALIE MARTINS PANOEIRO

Belo Horizonte, 26 de Maio de 2017

Nathalie Martins Panoeiro

**SINTONIA DE UM CONTROLADOR PID ADAPTATIVO
PARA CONTROLE DO SUPERAQUECIMENTO
ATRAVÉS DO ALGORITMO DA COLÔNIA ARTIFICIAL
DE ABELHAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade

Orientador: Prof. Dr. Antônio Augusto Torres Maia

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Machado

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2017

P195s	<p>Panoeiro, Nathalie Martins. Sintonia de um controlador PID adaptativo para controle do superaquecimento através do algoritmo da colônia artificial de abelhas [manuscrito]/Nathalie Martins Panoeiro. – 2017. 81 f., enc.: il.</p> <p>Orientador: Antônio Augusto Torres Maia. Coorientador: Luiz Machado.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f. 81.</p> <p>Bibliografia: f. 75-80.</p> <p>1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Modelos matemáticos - Teses 3. Algoritmos - Teses. 4. Controladores PID - Teses. I. Maia, Antônio Augusto Torres. II. Machado, Luiz. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p>CDU: 621(043)</p>
-------	---



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG
Tel.: +55 31 3409.5145
E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**"SINTONIA DE UM CONTROLADOR PID ADAPTATIVO PARA
CONTROLE DO SUPERAQUECIMENTO ATRAVÉS DO ALGORITMO
DA COLÔNIA ARTIFICIAL DE ABELHAS"**

NATHALIE MARTINS PANOEIRO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Energia e Sustentabilidade**".

Dissertação aprovada no dia 26 de maio de 2017

Por:

Prof. Antônio Augusto Torres Maia

Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Prof. Luiz Machado

Coorientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Prof. Ricardo Poley Martins Ferreira

Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Prof. Fabiano Drumond Chaves

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Aos meus Pais, meu Irmão, meu Primo Fred, e meu noivo Rodrigo,
pelo apoio, incentivo e orações em todos os desafios que enfrentei.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter iluminado meu caminho e auxiliado nas decisões difíceis.

Aos meus Pais Antonia e Gilmar pela educação, valores morais, apoio constante e acima de tudo muito incentivo em seguir meus sonhos.

Ao meu irmão Jonathan e meu primo Frederico pela amizade, companheirismo e cumplicidade de sempre.

Às minhas avós Lola, não mais presente, e Iraci que me deram muito carinho, apoio, conselhos e orações.

Ao meu noivo Rodrigo pelo carinho, companheirismo, por ter respeitado minha falta de tempo e pela paciência.

Às amigas do mestrado Nathalia Menezes e Luisa Castello Branco de Sá pelo apoio no desenvolvimento do trabalho e a amizade.

Ao meu orientador Prof. Maia e co-orientador Prof. Luiz Machado pelos ensinamentos, paciência e pela oportunidade de realizar esse trabalho.

A todos professores do Cefet –MG e do Colégio Ruy Barbosa que contribuíram para minha formação. E a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho.

Meus sinceros agradecimentos.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

Albert Einstein

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE GRÁFICOS	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	14
NOMENCLATURA	15
RESUMO	15
ABSTRACT	16
1. INTRODUÇÃO	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Introdução	21
2.2 Sistemas de Refrigeração por Compressão de Vapor	21
2.3 Eficiência energética e controle do Superaquecimento.....	26
2.4 Controladores PID	28
2.4.1. O Método de Ziegler e Nichols de Malha aberta	30
2.4.2. O Método de Cohen-Coon	30
2.4.3. O Método SIMC	31
2.4.4. Avaliação do desempenho em malhas de controle	32
2.5 Algoritmos Bioinspirados	33
2.5.1. Colônia de Formigas.....	35
2.5.2. Enxame de Partículas	35
2.5.3. Colônias de Abelhas	36
2.5.4. Comportamentos de coleta de alimento – Colônia Artificial de Abelhas.	37
2.5.5 Comportamento de acasalamento de abelhas– Honey-Bee Mating Optimization.....	39
2.5.6 Evolução da Abelha Rainha.....	40
2.6 Conclusões Parciais	41
3. MATERIAIS E MÉTODOS	42

3.1 Introdução	42
3.2 Dispositivo Experimental	42
3.3 Os sensores digitais de temperatura.....	45
3.4 O modelo matemático da planta.....	49
3.5 Sintonia do controlador PID	52
3.5.1 Sintonia do controlador PID utilizando o algoritmo ABC	52
3.5.2 Sintonia do controlador PID pelo método SIMC	55
3.5.3 Sintonia do controlador PID pelo método de Ziegler e Nichols	55
3.5.4 Sintonia do controlador PID pelo método de Cohen e Coon	56
3.5.5 Sintonia do controlador PID não adaptativo	57
3.6 Conclusões Parciais	57
4. RESULTADOS	58
4.1 Introdução	58
4.2 Resultados Teóricos	58
4.2.1 O Controlador Adaptativo.....	58
4.2.2 O Controlador Não Adaptativo	61
4.3 Resultados Experimentais	64
4.3.1 O Controlador Adaptativo.....	64
4.3.2 O Controlador Não Adaptativo	68
4.3.3 Comparação Entre os Controladores Adaptativo e Não Adaptativo.....	70
4.4 Conclusões Parciais	72
5. CONCLUSÕES	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
TRABALHOS PUBLICADOS	81

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 Esquema de um sistema de refrigeração por compressão de vapor.....	22
FIGURA 2.2 Esquema de uma válvula de expansão termostática	24
FIGURA 2.3 Histórico dos Algoritmos Bioinspirados, (Kar, 2016)	34
FIGURA 2.4 Histórico dos Algoritmos de Abelhas (Serapião, 2009)	36
FIGURA 2.5 Fluxograma do algoritmo ABC	39
FIGURA 3.1 Esquema da planta do laboratório de refrigeração	42
FIGURA 3.2 Fotografia da planta do laboratório de refrigeração	43
FIGURA 3.3 Placa de controle	49

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 Configuração do controlador PID pelo método de Zigler-Nichols.....	30
TABELA 2.2 Configuração do controlador PID pelo método de Cohen-Coon.....	31
TABELA 2.3 Configuração do controlador PID pelo método SIMC	31
TABELA 3.1 Cálculo da constante de tempo dos sensores	48
TABELA 3.2 Ganhos do controlador ABC e IAE para cada temperatura	54
TABELA 3.3 Ganhos do controlador SIMC e IAE.....	55
TABELA 3.4 Ganhos do controlador de Ziegler e Nichols e IAE.....	56
TABELA 3.5 Ganhos do controlador de Cohen e Coon e IAE.....	56
TABELA 3.6 Ganhos dos controladores não adaptativos	57
TABELA 4.1 Índices de desempenho para temperatura de evaporação de 10°C	60
TABELA 4.2 Índices de desempenho para temperatura de evaporação de 0°C	60
TABELA 4.3 Índices de desempenho para temperatura de evaporação de -5°C.....	61
TABELA 4.4 Índices de desempenho para o controlador não adaptativo na temperatura de evaporação de 5°C	63
TABELA 4.5 Índices de desempenho para o controlador não adaptativo na temperatura de evaporação de 0°C	63
TABELA 4.6 Índices de desempenho para o controlador não adaptativo na temperatura de evaporação de -5°C	64
TABELA 4.7 Índices de desempenho na temperatura de evaporação de 9°C	65
TABELA 4.8 Índices de desempenho na temperatura de evaporação de 3°C	67
TABELA 4.9 Índices de desempenho na temperatura de evaporação de -3°C.....	68
TABELA 4.10 Índices de desempenho do SIMC e temperatura de evaporação de 3°C	71
TABELA 4.11 Índices de desempenho do SIMC e temperatura de evaporação de -3°C	71
TABELA 4.12 Índices de desempenho do ABC e temperatura de evaporação de 3°C .	71
TABELA 4.13 Índices de desempenho do ABC e temperatura de evaporação de -3°C	71

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 3.1 Curva de erro típica do sensor DS18B20	45
GRÁFICO 3.2 Tempo de conversão em função da temperatura	46
GRÁFICO 3.3 Tempo de transmissão em função da temperatura	47
GRÁFICO 3.4 Variação da temperatura em função do tempo para os dois sensores ...	48
GRÁFICO 3.5 Resposta do superaquecimento para temperatura de -5°C	49
GRÁFICO 3.6 Resposta do superaquecimento para temperatura de 0°C	50
GRÁFICO 3.7 Resposta do superaquecimento para temperatura de 5°C	50
GRÁFICO 3.8 Resposta do superaquecimento para temperatura de 10°C	50
GRÁFICO 3.9 Constante de tempo e ganho estático em função da temperatura.....	51
GRÁFICO 3.10 Comparação entre as ações de controle usando ITAE, IAE, ITSE e ISE no cálculo.....	52
GRÁFICO 3.11 Comparação entre o número de abelhas e o IAE final.....	53
GRÁFICO 3.12 Comparação entre o número de abelhas e o número de iterações.....	54
GRÁFICO 4.1 Controlador Sintonizado pelo método de Ziegler e Nichols	58
GRÁFICO 4.2 Controlador sintonizado através do método de Cohen e Coon.....	59
GRÁFICO 4.3 Controlador sintonizado através do método SIMC	59
GRÁFICO 4.4 Controlador sintonizado através do algoritmo ABC	60
GRÁFICO 4.5 Controlador não adaptativo sintonizado através do método de Ziegler e Nichols.....	61
GRÁFICO 4.6 Controlador não adaptativo sintonizado através do método de Cohen Coon	62
GRÁFICO 4.7 Controlador não adaptativo sintonizado pelo método SIMC	62
GRÁFICO 4.8 Controlador não adaptativo sintonizado pelo método ABC	63
GRÁFICO 4.9 Controlador sintonizado pelo método SIMC e temperatura de evaporação de 9°C	65
GRÁFICO 4.10 Controlador sintonizado pelo método ABC e temperatura de evaporação de 9°C	65
GRÁFICO 4.11 Controlador sintonizado pelo método SIMC e temperatura de evaporação de 3°C	66
GRÁFICO 4.12 Controlador sintonizado pelo método ABC e temperatura de evaporação de 3°C	66

GRÁFICO 4.13 Controlador sintonizado pelo método SIMC e temperatura de evaporação -3°C.....	67
GRÁFICO 4.14 Controlador sintonizado pelo método ABC e temperatura de evaporação -3°C.....	68
GRÁFICO 4.15 Controlador não adaptativo sintonizado pelo método SIMC e temperatura de evaporação 3°C	69
GRÁFICO 4.16 Controlador não adaptativo sintonizado pelo método ABC e temperatura de evaporação 3°C	69
GRÁFICO 4.17 Controlador não adaptativo sintonizado pelo método SIMC e temperatura de evaporação -3°C.....	70
GRÁFICO 4.18 Controlador não adaptativo sintonizado pelo método ABC e temperatura de evaporação -3°C.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC. Colônia Artificial de Abelhas
ACO. Ant Colony Optimization
AS. Ant System
BS. Bee System
COP. Coeficiente de Performance
EEV. Electronic Expansion Valve
FODT. First Order Delay Time
HBA. Honey Bee Algorithm
HBMO. Honey-Bee Mating Optimization
IAE. Integral Absoluta do Erro
IMC. Internal Model Control
ISE. Integral do Erro Quadrático
ITAE. Integral do Erro Absoluto Multiplicado pelo Tempo
ITSE. Integral do Erro Quadrático Multiplicado pelo Tempo
MAE. Erro máximo absoluto
MBO. Matting Bee Optimization
P. Controlador Proporcional
PI. Controlador Proporcional Integral
PID. Controlador Proporcional Integral e Derivativo
PSO. Particle Swarm Optimization
QEGA. Queen Bee Evolution Algorithm
RMSE. Raiz do erro quadrático médio
RMSU. Raiz da saída do controlador
SIMC. Skogestad Internal Model Control
TEV. Thermostatic Expansion Valve
UFMG. Universidade Federal de Minas Gerais
PV. Variável de Processo
SP. Setpoint

NOMENCLATURA

$u(t)$	<i>Saída do Controlador Proporcional-Integral-Derivativo</i>
K_p	<i>Ganho proporcional</i>
$e(t)$	<i>Erro</i>
T_i	<i>Tempo Integral</i>
T_d	<i>Tempo derivativo</i>
u_p	<i>Saída do Controlador Proporcional</i>
u_{PI}	<i>Saída do Controlador Proporcional-Integral</i>
u_{PD}	<i>Saída do Controlador Proporcional-Derivativo</i>
$G(s)$	<i>Função de transferência</i>
K	<i>Ganho estático do Sistema</i>
θ	<i>Tempo morto</i>
τ	<i>Constante de tempo</i>
s	<i>Operador de Laplace</i>
u_i	<i>Saída do controlador</i>
x_i	<i>Fontes de alimento escolhida pelas abelhas seguidoras</i>
n	<i>Número de amostras</i>
P_i	<i>Probabilidade de uma fonte de alimento</i>

RESUMO

Na sintonia de controladores PID, métodos clássicos como Ziegler-Nichols e Cohen-Coon vêm sendo utilizados por anos, especialmente quando não há muita informação sobre o sistema a ser controlado. Apesar de apresentarem um controle robusto e estável, não é possível garantir que os ganhos são ótimos. Em plantas com comportamento não-linear, de ordem alta ou com atraso de transporte, os métodos de sintonia convencionais algumas vezes falham em atingir uma resposta satisfatória. Uma alternativa é a utilização de métodos bioinspirados na sintonia de controladores. O algoritmo da colônia artificial de abelhas foi utilizado na sintonia de um controlador PID adaptativo no controle de uma válvula de expansão eletrônica de um sistema de refrigeração. Esse sistema foi simulado através de um modelo matemático de primeira ordem com atraso de transporte e a resposta do sistema à ação do controlador, comparada com a resposta a métodos clássicos de controle. Nos testes experimentais dos controladores adaptativos, é possível verificar que tanto o controlador SIMC, quanto o ABC foram capazes de rastrear o setpoint. O controlador ABC se destacou em dois dos três testes realizados, apresentando uma melhora no MAE (Erro máximo absoluto), RMSE (Raiz do erro quadrático médio) e IAE (Integral do erro absoluto). Nos testes experimentais dos controladores não adaptativos, o resultado esperado era de que o controlador adaptativo apresentasse melhores resultados. Entretanto, o observado foi que os controladores não adaptativos SIMC e ABC se destacaram. Os resultados indicam que o controlador proposto apresentou uma boa rejeição aos distúrbios e rastreamento do setpoint, e foi capaz de controlar o superaquecimento de forma eficiente.

Palavras chave: *Algoritmo de otimização ABC, Controle de válvulas de expansão, Controle Adaptativo*

ABSTRACT

Classic approaches such as Ziegler-Nichols and Cohen-Coon methods have been used for years in tuning PID controllers, especially when there is not much information about the system subject to control. Besides these methods allow stable and robust control, the controller gains are never guaranteed for being optimal. When the system are nonlinear, of high order or have time delay, the conventional tuning methods sometimes fail to achieve satisfactory performance. Thus, other approaches have been used such as bio-based methods. The Artificial Bee Colony (ABC) algorithm were used to adjust the gainf of an adaptive PID controller to regulate the opening of an electronic expansion valve. A dynamic model obtained from experimental tests was used in the controller design. The controller effectiveness was evaluated through computer simulations and compared to classical methods. The experimental tests showed that the ABC adaptive controller could track the setpoint after a setpoint change from 10 °C to 7 °C. The control action was also compared to the SIMC method and the responses were similar, although the ABC method tracks the set point faster with a smaller overshoot and a smaller MAE (Absolute maximum error), RMSE (Root mean squared error) and IAE (Integral of absolute error) in two of the three tests. Comparing adaptive and non-adaptive controllers, the adaptive controllers were slower to track the setpoint but presented less overshooting and oscilations, in a general way, the non-adaptive controller was better than the adaptive one when comparing the performance indexes. The expected was that the adaptive was better. The results indicated that the proposed controller provides good disturbance rejection and set point tracking, and was able to control the superheating efficiently.

Key Words: *ABC optimization algorithm, Electronic Expansion Valve Control, Adaptive Control*

1. INTRODUÇÃO

Diante de recursos limitados e da crescente demanda de energia, as indústrias estão investindo cada vez mais na melhoria da eficiência de seus produtos e, com isso, redução do consumo de energia. Segundo Ghisi, Gosch e Lamberts (2007), nas residências Brasileiras, 40% da energia elétrica é gasta na refrigeração de alimentos, 20% no chuveiro elétrico, 11% na iluminação e 10% com ar-condicionado, podendo esse último variar conforme a época do ano. Dessa forma, melhorar a eficiência dos sistemas de refrigeração pode resultar em uma economia de energia significativa. Nesse contexto, existem abordagens recentes sobre compressores, trocadores de calor mais eficientes (Park et al, 2015) e ainda algoritmos para controle do superaquecimento na saída do evaporador (Maia et al, 2014). O superaquecimento é a diferença entre a temperatura na entrada e na saída do evaporador e seu controle pode contribuir no aumento da eficiência do sistema (Borja, 2006).

Através do controle do superaquecimento, é possível aumentar a quantidade de fluido refrigerante bifásico no interior do evaporador. Uma vez que o fluido de refrigeração neste estado apresenta um coeficiente de transferência de calor muito maior do que o refrigerante vaporizado, aumentar a quantidade de refrigerante bifásico no interior do evaporador irá melhorar a capacidade de refrigeração do sistema. Ao mesmo tempo afim de evitar danos ao compressor, o controle do superaquecimento deve assegurar que apenas fluido refrigerante vaporizado entre no compressor. Dessa forma, a escolha do valor nominal da temperatura de superaquecimento é muito importante. Visando economizar energia, o superaquecimento tem de ser regulado para um valor razoavelmente baixo. Entretanto um valor de superaquecimento próximo de 0K pode levar ao *hunting*, e um valor muito alto diminui a eficácia do evaporador através da redução da área disponível para a evaporação do refrigerante (Beghi et al, 2011). Além disso, a temperatura na saída do compressor será muito alta reduzindo assim o tempo de vida desse compressor (Porto et al, 2015).

O Controle do superaquecimento geralmente é realizado através da vazão mássica de fluido refrigerante que entra no evaporador. A regulação do fluxo de refrigerante bem como a redução da pressão de condensação ocorre através dos

dispositivos de expansão como, por exemplo, os tubos capilares, válvula termostática, válvula de expansão eletrônica, entre outros.

De uma forma geral, dispositivos como um tubo capilar ou uma válvula termostática não podem funcionar em uma grande faixa de condições de operação. Dessa forma, eles são normalmente configurados para operar com um grau de superaquecimento que satisfaça as piores condições de operação do sistema. Entretanto essa estratégia leva a um superaquecimento consideravelmente maior que o valor ótimo e que reduzem a eficiência do sistema (Maia et al, 2014).

Válvulas de expansão eletrônica (EEV) são utilizadas em muitos sistemas de refrigeração na substituição aos dispositivos de expansão convencionais, pois sua resposta rápida às mudanças nas condições de operação melhora o superaquecimento em estado estacionário (Maia et al, 2014). Sistemas de refrigeração com EEVs apresentam uma menor variação na capacidade de refrigeração e tendem a gerar um maior coeficiente de performance (COP) por meio do controle ideal do superaquecimento (Choi & Kim, 2004; Lazzarin & Noro, 2008).

EEVs são normalmente utilizadas com controladores automáticos de forma a manter o superaquecimento próximo de seu valor ótimo. Entre os controladores utilizados nesses dispositivos, o Proporcional, Integral e Derivativo (PID) é o mais comum (Maia et al, 2010).

Na indústria, uma das desvantagens da utilização dos controladores PID está associado à sintonia do controlador. Engenheiros e gerentes descrevem a sintonia como um desafio (Hersh and Johnson 1997), pois muitas vezes a escolha dos parâmetros é realizada por um profissional que não recebeu treinamento adequado. Quando os ganhos do controlador não são sintonizados corretamente, o sistema pode apresentar uma resposta oscilatória, instável, com baixa rejeição a distúrbios e pouca robustez (Maia et al, 2014).

Os métodos que auxiliam na sintonia dos controladores PID são utilizados para que usuário não precise ajustar os ganhos do controlador manualmente. Métodos clássicos como Ziegler-Nichols e Cohen-Coon vêm sendo utilizados por anos na sintonia de controladores PID, especialmente quando não há muita informação sobre o sistema a ser controlado. Apesar desses métodos apresentarem um controle robusto e estável (Batista et al, 2015), não é possível garantir que esses ganhos são ótimos. Em plantas com

comportamento não-linear, de ordem alta ou com atraso de transporte, os métodos de sintonia convencionais algumas vezes falham em atingir uma resposta satisfatória. Por tudo isso, outros métodos como lógica Fuzzy, redes neurais artificiais e outros métodos como a colônia artificial de abelhas (ABC) vêm sendo utilizados na sintonia de controladores.

O comportamento de coleta de alimentos, características de aprendizagem, memorização e compartilhamento de informações têm sido umas das mais interessantes áreas em inteligência de enxames (Bonabeau et al, 1999; Dorigo & Stutzle, 2004). As abelhas estão entre os insetos sociais mais estudados, devido à sua alta capacidade organizacional. Por causa disso, nos últimos anos, a quantidade de algoritmos desenvolvidos baseados em colônias de abelhas tem aumentado bastante. Diversas abordagens relativas a diferentes características comportamentais da abelha foram propostas, produzindo algoritmos distintos (SERAPIÃO, 2009).

O algoritmo da colônia artificial de abelhas (ABC) é baseado no comportamento de busca de alimento das abelhas. A coleta de alimentos é feita pelas abelhas campeiras (operárias). Depois que colhe o néctar, a abelha volta à colmeia, mas se lembra do odor, cor e forma das flores. Cada colmeia tem uma assim chamada área de pista de dança na qual as abelhas que descobrirem fontes de néctar dançam, de modo a tentar convencer suas companheiras a segui-las. Cada abelha seguidora decide atingir a fonte de néctar ou pólen seguindo uma abelha dançarina que já descobriu uma florada. Durante o vôo, a abelha campeira pega uma carga de néctar e retorna à colmeia transferindo o néctar para uma abelha operária que armazena-o (BHAGADE e PURANIK, 2012).

Depois de ceder o alimento, a abelha pode: (a) abandonar a fonte de alimento e tornar-se novamente uma exploradora, (b) continuar a coleta na fonte de alimento sem recrutar as companheiras, ou (c) dançar e assim recrutar as companheiras antes de retornar para a fonte de alimento. Os mecanismos pelos quais a abelha decide seguir uma dançarina específica não são bem conhecidos, mas considera-se que o recrutamento entre as abelhas é sempre uma função da qualidade da fonte de alimento (BHAGADE e PURANIK, 2012).

No algoritmo, a posição de uma fonte de alimento representa uma solução possível do problema de otimização e a quantidade de néctar corresponde à qualidade ou medida de aptidão da solução associada (PAREEK et al, 2014).

O algoritmo da colônia artificial de abelhas pode ser utilizado em diversos problemas de otimização, inclusive, na sintonia de controladores PID. Dessa forma, o presente trabalho tem por objetivo obter os ganhos K_p , K_i e K_d ótimos para o controlador PID utilizado em uma válvula de expansão eletrônica para regular o grau de superaquecimento na saída do evaporador de um sistema de refrigeração por compressão de vapor usando-se o algoritmo ABC.

Além desta introdução, este trabalho conterà mais cinco capítulos. O segundo capítulo é a revisão bibliográfica, que apresenta detalhes sobre métodos utilizados na sintonia de controladores PID e algoritmos de otimização.

No terceiro capítulo é apresentada a descrição da bancada experimental usada nesta pesquisa, incluindo a placa de controle utilizada. Neste capítulo, também é apresentada a sintonia dos controladores PID através dos diferentes métodos.

No quarto capítulo são apresentados os principais resultados dos testes teóricos e experimentais. Também são comparados os controladores adaptativos e não adaptativos. Ao final deste trabalho, no quinto capítulo, são apresentadas as principais conclusões obtidas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Estudos sobre sistemas de evaporação com válvulas de expansão eletrônicas geralmente focam em dois aspectos: as características do sistema de refrigeração e o algoritmo de controle da válvula de expansão.

As válvulas de expansão eletrônicas são utilizadas na substituição de outros equipamentos de expansão. Sua resposta rápida às mudanças nas condições de operação melhoram o superaquecimento em estado estacionário. Elas são normalmente utilizadas com controladores a fim de se manter o superaquecimento próximo de seu valor ótimo em todas as condições de operação e melhorar assim sua capacidade de refrigeração.

No presente capítulo será apresentado uma visão geral sobre sistemas de refrigeração por compressão de vapor destacando também os principais dispositivos de expansão e suas particularidades. Será apresentada a importância do controle do superaquecimento e métodos para a sintonia de controladores PID.

2.2 Sistemas de Refrigeração por Compressão de Vapor

De acordo com Dossat (1991), a refrigeração é definida como qualquer processo de remoção de calor. De uma forma mais específica, pode ser definida como o ramo da ciência que lida com processos que visam reduzir e manter a temperatura de um espaço ou material menor que das redondezas. Dessa forma, o calor deve ser removido do corpo a ser refrigerado e transferido para um outro corpo que está a uma temperatura inferior à do corpo a ser refrigerado. Em qualquer processo de refrigeração, o corpo utilizado para absorver calor ou agente de resfriamento é chamado refrigerante (Dossat, 1991).

Os sistemas de refrigeração por compressão de vapor são os sistemas de refrigeração mais comuns em uso atualmente e consistem de uma série de processos executados sobre e por um fluido de trabalho, o refrigerante. Em ciclo real difere do ciclo ideal ocorrem diversas irreversibilidades nos diversos componentes como por exemplo o

atrito do fluido e a transferência de calor, que não são considerados no ciclo ideal (Incropera & Witt, 2003).

Em um ciclo ideal, representado na FIG 2.1, o refrigerante entra no compressor como vapor saturado e é comprimido de forma isentrópica até a pressão do condensador. A temperatura do refrigerante aumenta durante a compressão até bem acima da temperatura da vizinhança. O refrigerante entra no condensador como vapor superaquecido e sai como líquido saturado, sem perda de pressão. O líquido saturado é estrangulado até a pressão do evaporador ao passar por um mecanismo de expansão. O refrigerante entra no evaporador como uma mistura saturada com baixo título (dependendo do ponto de operação) de vapor e evapora completamente pelo calor que é absorvido do espaço refrigerado. O refrigerante sai do evaporador saturado (sem perda de pressão) e entra novamente no compressor (Incropera & Witt, 2003).

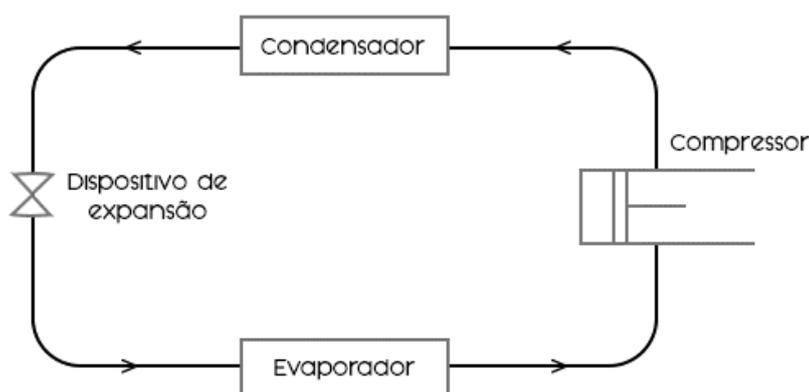


FIGURA 2.1 Esquema de um sistema de refrigeração por compressão de vapor

No ciclo de refrigeração por compressão de vapor os dispositivos de expansão são utilizados para reduzir a pressão de condensação à pressão de evaporação através da expansão do fluido refrigerante e também para a regulação do fluxo de refrigerante a uma taxa igual à taxa de evaporação. Com isso, o dispositivo de expansão divide o sistema em duas zonas, uma de alta pressão e uma de baixa pressão (Aprea & Mastrullo, 2002). É importante que o dispositivo de expansão e o compressor operem em condições de equilíbrio entre as pressões de evaporação e condensação, de forma a permitir que o compressor bombeie do evaporador a mesma quantidade de fluido refrigerante que o dispositivo de expansão alimenta o evaporador. Um sistema em desequilíbrio pode originar o secamento ou encharcamento do evaporador. Válvulas de expansão termostática, placas de orifício, tubos capilares e válvulas de expansão eletrônicas são os

principais tipos de dispositivos usados atualmente para regular a quantidade de fluido refrigerante que entra no evaporador.

A escolha do mecanismo de expansão depende, dentre outros aspectos, do custo, da capacidade do sistema de refrigeração e da precisão de controle de temperatura desejada. O mecanismo de expansão pode influenciar bastante na eficiência energética do sistema. A escolha incorreta pode provocar desde uma redução no COP do sistema até a quebra do compressor. Um dispositivo sub-dimensionado diminui a alimentação de refrigerante para o evaporador e, com isso, reduz a capacidade projetada para o sistema. Já um dispositivo super-dimensionado permite a entrada de muito refrigerante no evaporador o que pode levar a entrada de líquido no compressor (Choi e Kim, 2004; Lazzarin e Noro, 2008).

O tubo capilar consiste de um tubo de cobre trefilado, com diâmetro interno entre 0,5 e 2 mm e comprimento entre 1 e 6 m. É um dos dispositivos de expansão mais simples e sua utilização comum em sistemas de pequena capacidade (geladeiras e aparelhos de ar condicionado) e com compressores herméticos (Alegrias *et al*, 2010). Devido às suas dimensões, o tubo capilar causa uma diferença de pressão entre o condensador e o evaporador. Essa diferença provoca uma alta perda de carga e com isso a pressão no escoamento atinge valores menores que a condição de saturação, levando a vaporização do refrigerante (Alegrias, 2009). O fluxo através do tubo capilar depende diretamente dessa diferença de pressão, do estado do refrigerante na entrada do capilar, das propriedades do refrigerante e da geometria do capilar.

De acordo com Dossat (1991), um sistema operando com tubo capilar apresentará uma boa eficiência em pontos de operação específicos. Aumentar o diâmetro interno do tubo capilar reduz a restrição ao escoamento aumentando a vazão no tubo capilar e com isso aumenta o superaquecimento.

Dentre as vantagens do capilar como dispositivo de expansão destaca-se o baixo custo e o fato de permitir uma equalização de pressões quando o sistema está parado possibilitando assim a utilização de compressores com motores com baixo torque de partida. A principal desvantagem é a capacidade limitada de regular o fluxo de refrigerante em resposta a variações operacionais no sistema. Para equipamentos com grandes variações no ponto de operação, a válvula de expansão termostática (TEV) e a válvula de expansão eletrônica (EEV) são os dispositivos de expansão mais adequados.

A válvula de expansão termostática tem o propósito de manter o superaquecimento constante através do controle da vazão do fluido refrigerante na entrada do evaporador (Fabris *et al*, 2010). Conforme descrito na FIG 2.2, quando o superaquecimento aumenta, devido ao aumento da carga térmica, a temperatura na saída do evaporador sobe, elevando também a temperatura do bulbo. O fluido em contato com o bulbo expande forçando o diafragma para baixo levando a uma abertura da válvula. Assim, o fluxo de refrigerante aumenta até que o superaquecimento retorne ao valor ajustado na válvula (Stoecker, 1985).

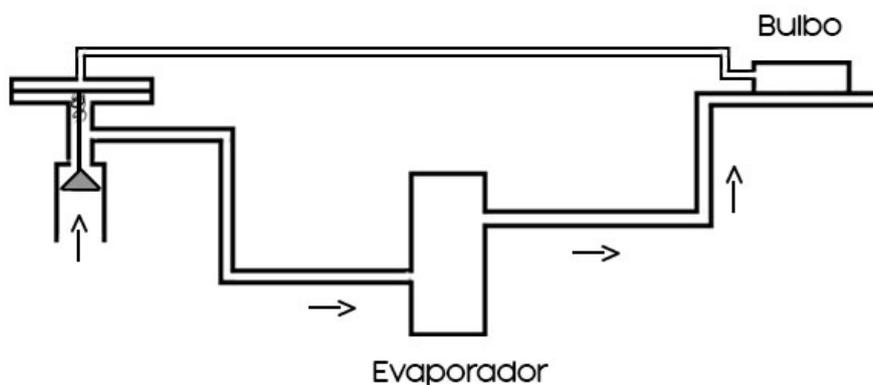


FIGURA 2.2 Esquema de uma válvula de expansão termostática

Fatores como a diferença de pressão através da válvula, subresfriamento do fluido, massa específica do fluido na entrada da válvula, sub ou superdimensionamento da válvula ou ainda variações na carga térmica no evaporador afetam o comportamento da válvula no controle do superaquecimento. Esse tipo de válvula não apresenta características de antecipação e compensação e nem são capazes de responder instantaneamente a variações térmicas no evaporador e impedir variações em torno do ponto de controle. Nos casos em que é desejável uma resposta rápida a qualquer variação no superaquecimento, uma válvula de expansão eletrônica é o dispositivo de expansão mais adequado.

A válvula de expansão eletrônica pode aumentar ou diminuir a área de passagem de refrigerante, em resposta às variações das condições de operação do sistema. Dessa forma, através das leituras de temperatura e pressão do sistema, o superaquecimento é calculado por um algoritmo e assim é determinado o comportamento do atuador da válvula (Marcinichen *et al*, 2004).

Os sistemas de refrigeração com válvulas de expansão eletrônica permitem uma menor diminuição da capacidade de refrigeração e um maior coeficiente de performance (COP) através do controle ideal de superaquecimento (Choi e Kim, 2004; Lazzarin e Noro, 2008). A escolha do valor nominal da temperatura de superaquecimento é muito importante. Visando economizar energia, o superaquecimento tem de ser regulado para um valor razoavelmente baixo. Por outro lado, um valor muito baixo pode levar ao *hunting*, e um valor muito alto na temperatura de superaquecimento diminui a eficácia do evaporador através da redução da área disponível para a evaporação do refrigerante (Beghi *et al*, 2011).

De uma forma geral, dispositivos como um tubo capilar não podem funcionar em uma grande faixa de condições de operação. Dessa forma, esses dispositivos são normalmente configurados para operar com um grau de superaquecimento que satisfaça as piores condições de operação do sistema. Entretanto, essa estratégia leva a um superaquecimento consideravelmente maior que o valor ótimo e que, por longos períodos de tempo, reduzem a eficiência do sistema (Maia *et al*, 2014).

Em algumas faixas de operação, sistemas de refrigeração com válvula de expansão eletrônica apresentam maior rendimento quando comparados aos tubos capilares. De acordo com Pottker (2006) em seu trabalho foi avaliado o efeito da abertura do dispositivo de expansão, da carga de fluido refrigerante e da rotação do compressor simultaneamente, comparando também o efeito da substituição de um dispositivo de expansão constante por um dispositivo de expansão eletrônico em um sistema dotado de um compressor com rotação variável e foi possível verificar que sistemas de refrigeração dotados de um compressor de rotação variável e com válvulas de expansão eletrônica são mais eficientes que sistemas de compressor variável e dispositivo de expansão constante.

Dentre os mecanismos de expansão mais utilizados, a válvula de expansão eletrônica é o dispositivo que melhor responde a variações no ponto de operação. Esse dispositivo apresenta resposta rápida a mudanças no ponto de operação e maior controle do superaquecimento em estado estacionário (Aprea e Mastrullo, 2002). Isso leva a uma diminuição na amplitude das oscilações no fluxo de refrigerante e o valor da capacidade de refrigeração em estado estacionário é atingido mais rapidamente (Tassou e Al-Nizari, 1993).

Comparando-se a válvula de expansão eletrônica com a termostática, as EEVs apresentam uma resposta mais rápida e são normalmente utilizadas com controladores automáticos, a fim de manter o superaquecimento próximo do seu valor ótimo em todas as condições de operação e melhorar assim a capacidade de refrigeração do sistema. Entre os controladores utilizados nesses dispositivos, o Proporcional, Integral e Derivativo (PID) é o mais comum (Maia et al, 2010).

Sistemas de refrigeração que não possuem um controle eficaz, apresentam uma menor eficiência energética. A atual tendência e necessidade de conservação de energia tem impulsionado pesquisas que visam promover o desenvolvimento de novas tecnologias viáveis economicamente para sistemas de ventilação, aquecimento e ar condicionado. Melhores eficiências térmicas e energéticas podem ser obtidas de forma direta através do controle de cargas individuais, ventiladores, bombas e compressores ou ainda de forma indireta através do gerenciamento e controle do dispositivo de expansão.

2.3 Eficiência energética e controle do Superaquecimento

Devido a atual necessidade de economia de energia nos últimos anos, as indústrias têm investido em pesquisas que visam identificar aspectos em seus produtos que possam ser modificados para aumentar a sua eficiência energética. De uma forma geral, a eficiência energética descreve a extensão do esforço despendido para um determinado propósito. Em refrigeração, a eficiência energética representa a relação entre a energia desejada e a energia utilizada e é descrita pelo COP, coeficiente de performance, apresentado na EQ (2.1)

$$COP = \frac{\text{Energia Desejada}}{\text{Energia Paga}} \quad (2.1)$$

No caso específico da refrigeração, estudam-se trocadores de calor e compressores mais eficientes do ponto de vista energético (Park et al, 2015) e técnicas de controle que visam melhorar os rendimentos eletromecânico e térmico. Para isso são utilizados métodos de degelo, sub resfriamento, uso de micro controladores, inversores de frequência, projeto e dimensionamento de tubulações e ainda a utilização de válvulas de expansão eletrônica como dispositivo de expansão (Costa, 2014).

Equipamentos de refrigeração utilizados na indústria e no comércio consomem uma quantidade significativa de energia. De acordo com Tassou e Al-Nizari

(1993), cerca de 20 a 25% dessa energia poderia ser economizada através de melhorias no design do equipamento, procedimentos de manutenção e práticas de controle. Em seu trabalho, Tassou & Al-Nizari, (1993) mostram que um aumento na temperatura de superaquecimento de 8K para 14K leva a uma redução de cerca de 9% no COP.

O superaquecimento corresponde às diferenças de temperatura na entrada e saída do evaporador e pode ser controlado pelos seguintes parâmetros, individualmente ou em conjunto: pressão, temperatura e vazão mássica. Em sistemas de refrigeração que apresentam muitas variações nas condições de operação, dependendo do dispositivo de expansão, não é possível realizar ajustes na temperatura do superaquecimento de forma que o superaquecimento possa ser configurado abaixo do valor mínimo estável por longos períodos de tempo o que leva a reduções na eficiência do sistema (Costa, 2014).

Para a melhoria do desempenho de um compressor é fundamental que apenas vapor de refrigerante entre no compressor, uma vez que gotículas de refrigerante podem prejudicar a operação do compressor através do superaquecimento. Dessa forma, um ponto importante é o controle do grau de superaquecimento no evaporador (Borja, 2006).

Quando há instabilidades no fim da zona de ebulição e no início da zona de superaquecimento, causados por baixos valores de superaquecimento ou fatores hidrodinâmicos mais complexos ocorre o fenômeno do *hunting*. Estudos apontam para duas possíveis causas do *hunting*: alguns acreditam que ele está relacionado às características do evaporador, outros que ele é um reflexo da estabilidade do fornecimento de fluido ao evaporador pelo sistema de controle (Shang *et al*, 2015). Dessa forma, é interessante manter o superaquecimento próximo de seu valor ótimo. Isso pode ser feito através do controle da válvula de expansão eletrônica e com isso é possível aumentar a quantidade de fluido refrigerante bifásico no interior do evaporador. Uma vez que o fluido de refrigeração apresenta um coeficiente de transferência de calor muito maior do que o refrigerante vaporizado, aumentar a quantidade de refrigerante bifásico no interior do evaporador irá melhorar a capacidade de refrigeração do sistema. Ao mesmo tempo afim de evitar danos ao compressor, o controle do superaquecimento deve assegurar que apenas fluido refrigerante vaporizado entre compressor.

De forma a manter um superaquecimento próximo de seu valor ótimo, dispositivos como a válvula de expansão eletrônica são utilizados juntamente a controladores PID. Os métodos convencionais para obter os ganhos do controlador, por

vezes, não conseguem alcançar um desempenho satisfatório, dessa forma, nas duas últimas décadas foram propostas formas alternativas de se obter esses ganhos, através de redes neurais artificiais, algoritmos genéticos, lógica fuzzy e muitos outros algoritmos como os bioinspirados (Abachizadeh *et al*, 2010).

2.4 Controladores PID

O controle de processos leva em consideração a existência de um sistema que tem por objetivo manter certas variáveis de uma planta industrial entre os limites de operação desejáveis. Para esses sistemas a intervenção humana pode ser necessária ou ainda o sistema pode ser automático (Campos e Teixeira, 2006)

O controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é um dos mais tradicionais meios de controle da indústria. Esse tipo de controlador vem sendo utilizado desde o início do século passado, quando se tornou comercialmente disponível e teve grande reconhecimento no meio acadêmico (Bennett, 2001; Bennett, 1996; Bennett, 1984; Kumar, *et al.*, 2014). De acordo com Aström & Hägglund (1995) em mais de 11000 malhas de controle analisadas em diversas plantas industriais, aproximadamente 97% eram controladas com o PID. Isso devido à sua robustez e fácil implementação.

O modelo usualmente encontrado na literatura para um controlador PID é apresentado na EQ (2.2).

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(s) ds + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.2)$$

Em que $u(t)$ representa o sinal de controle, $e(t)$ o erro entre o sinal de referência e a resposta do sistema. O controlador é composto pelas parcelas Proporcional, Integral e Derivativa.

A parcela proporcional, representada pela EQ (2.3), age amplificando o erro entre o sinal de referência e a resposta do sistema afim de estabelecer uma mudança rápida no sinal de controle. Um K_p muito alto pode levar a uma resposta oscilatória do sistema e um K_p muito baixo pode não direcionar a resposta efetivamente ao setpoint (Warwick, 1996).

$$u_p(t) = K_p e(t) \quad (2.3)$$

A parcela proporcional-integral representada pela EQ (2.4), age de forma proporcional à integral do erro do sistema. Ela é responsável por garantir um erro zero em estado estacionário. Um ganho alto pode levar o sistema a atuar mais rápido do que a planta é capaz o que gera oscilações, já um ganho muito baixo pode gerar um controle lento.

$$u_{PI}(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\lambda) d\lambda \quad (2.4)$$

A parcela proporcional-derivativa representada pela EQ (2.5), age de forma proporcional à derivada do erro. Ela possibilita uma ação rápida do controle, em resultado a alterações repentinas da variável controlada. Devido à dinâmica do processo, ocorre um atraso entre a ação de controle e sua influência no sinal de saída, um controlador com a parcela proporcional atua na previsão do sinal do erro, essa previsão é feita extrapolando-se a curva do erro e utilizando sua tangente no instante de tempo t .

$$u_{PD}(t) = K_p e(t) + K_p T_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.5)$$

Na teoria de controle clássico, os controladores apresentam características operacionais fixas e sistemas reais necessitam de certa capacidade de adaptação devido às variações dos processos envolvidos (Coelho, 2000). A maioria dos sistemas reais apresentam características não lineares, com variações de parâmetros, atrasos de transporte e perturbações diversas. Os controladores adaptativos ajustam seus ganhos levando em consideração a resposta do sistema em diferentes pontos de operação, garantindo assim um controle mais eficiente.

Existem vários métodos de sintonia para controladores PID, métodos clássicos como Ziegler & Nichols e Cohen-Coon são baseados na resposta do sistema ao degrau. Os ganhos obtidos a partir desses métodos se baseiam em modelos identificados para o processo controlado. As técnicas de identificação propõem um modelo de três parâmetros e baseiam-se na curva de resposta do processo obtida em malha aberta.

Uma aproximação utilizada para sintonia de controladores PID é o modelo de 1ª ordem com três parâmetros FODT (First Order Delay Time) representado pela EQ (2.6), em que K é o ganho estático do sistema, τ é a constante de tempo e θ o tempo morto (Åström; Hängglund, 1995).

$$G(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (2.6)$$

2.4.1. O Método de Ziegler e Nichols de Malha aberta

Esse é um método clássico de controle e foi desenvolvido com o objetivo de facilitar a sintonia dos controladores de processos industriais e ainda hoje é muito utilizado (Batista *et al.*, 2015). No trabalho de Ziegler e Nichols são propostos dois métodos para se obter um modelo da dinâmica de um processo com uma entrada e uma saída. (Campos e Teixeira, 2006)

O primeiro método de Ziegler e Nichols, de sensibilidade limite, baseia-se no período e ganho crítico diretamente, sem a necessidade de sua conversão para um modelo baseado em função de transferência e é um método de malha fechada. Já o segundo é de malha aberta e suas fórmulas são apresentados na TAB 2.1, que apresenta os parâmetros para o cálculo de controladores P, PI e PID a partir das fórmulas de Ziegler e Nichols (Carmo, 2006).

TABELA 2.1 Configuração do controlador PID pelo método de Ziegler-Nichols

Kp	Ti	Td
$\frac{1,2T}{\theta K}$	2θ	$0,5\theta$

2.4.2. O Método de Cohen-Coon

Esse método utiliza como critério de sintonia a rejeição a distúrbios. Os parâmetros de sintonia obtidos a partir desse método são agressivos fazendo com que o sistema apresente uma resposta oscilatória com razão de declínio de 1:4 (Batista *et al.*, 2015). Os ganhos são obtidos baseando-se na constante de tempo do processo, no tempo de atraso e no ganho estático (Cohen e Coon, 1953). A TAB 2.2 apresenta as equações dos ganhos dos controladores para esse método.

TABELA 2.2 Configuração do controlador PID pelo método de Cohen-Coon

Kp	Ti	Td
$\frac{1,2\tau}{\theta K} \left(\frac{4}{3} + \frac{\theta}{4\tau} \right)$	$\frac{\theta \left(32 + \frac{6\theta}{\tau} \right)}{13 + \frac{8\theta}{\tau}}$	$\frac{4\theta}{11 + \frac{2\theta}{\tau}}$

2.4.3. O Método SIMC

O método SIMC (Skogestad, 2003) é uma otimização do método IMC. O objetivo desse método é propor regras simples para a sintonia, sem perder a qualidade do comportamento do processo em malha fechada. Dessa forma é proposta uma única regra que é válida para modelos de primeira e segunda ordem com tempo morto.

Esse método propõe as regras de ajuste dos parâmetros do controlador PID, como uma função de um parâmetro ajustável λ , o qual determina a velocidade da resposta. O T_i é reduzido de forma a melhorar a rejeição à distúrbios e λ é ajustado para θ (Batista *et al*, 2015). A TAB 2.3 apresenta as equações dos ganhos dos controladores para esse método.

TABELA 2.3 Configuração do controlador PID pelo método SIMC

Kp	Ti	Td
$\frac{2\tau + \theta}{3\theta K}$	Menor valor entre $\tau + \frac{\theta}{2}$ ou 8θ	$\frac{\tau\theta}{2\tau + \theta}$

É importante ainda verificar se o sistema para o qual o controlador foi projetado realmente é controlado por ele. Para isso a medida quantitativa do desempenho do sistema é necessária. A avaliação de desempenho pode ser realizada através de índices como a Integral absoluta do erro, Integral do erro quadrático vezes o tempo, Integral do erro absoluto vezes o tempo, Integral do erro quadrático, a variância de controle, a média de controle e a variância da saída da malha (Carmo e Gomes, 2006). Na prática, é importante levar em consideração que nem todos os critérios de desempenho podem ser satisfeitos simultaneamente.

2.4.4. Avaliação do desempenho em malhas de controle

Os índices de desempenho podem ser calculados através do acompanhamento da trajetória da variável controlada em relação ao seu valor de referência e com isso é possível encontrar uma medida quantitativa do desempenho do sistema. Uma malha apresenta um controle ótimo quando seus parâmetros são ajustados de forma a minimizar ou maximizar os índices (Maia *et al*, 2011).

A integral absoluta do erro (IAE), EQ (2.7), representa o somatório do módulo dos erros durante um determinado período de tempo. É necessário que a simulação seja realizada por um longo período para que seu valor seja significativo (Carmo, 2006).

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2.7)$$

A integral do erro quadrático (ISE), EQ (2.8), representa o somatório do erro quadrático durante um determinado período de tempo. Ele é mais utilizado em sistemas com características menos oscilatórias e permite quantificar em maior escala os erros iniciais que possam ocorrer em sistemas oscilatórios (Carmo, 2006).

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (2.8)$$

A fim de lidar dar um peso menor à quantificação dos erros iniciais quando a malha é oscilatória, utilizam-se a Integral do erro absoluto multiplicado pelo tempo (ITAE) EQ (2.9) e Integral do erro quadrático multiplicado pelo tempo (ITSE) EQ (2.10) (Carmo, 2006).

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (2.9)$$

$$ITSE = \int_0^{\infty} t e^2(t) dt \quad (2.10)$$

A média da saída do sistema permite verificar a variação da saída em relação ao valor de referência. Um valor muito alto indica pouca rastreabilidade do sistema, podendo o mesmo apresentar também características oscilatórias. Tem-se ainda a variância da saída a fim de saber quanto o sinal se dispersou em relação à média e também

a variância do sinal de controle que permite avaliar o esforço do sinal de controle sobre os atuadores (Carmo, 2006).

O Erro máximo absoluto (MAE) é utilizada de forma a avaliar o maior erro encontrado levando-se em consideração todos os pontos das amostras, como mostrado na EQ 2.11 (Maia, 2014).

$$MAE = Max|e(t)| \quad (2.11)$$

A Raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) é uma medida do desvio entre o setpoint e a variável de processo para uma amostra de n pontos, como mostrado na equação EQ 2.12 (Maia, 2014)..

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e(t))^2}{n}} \quad (2.12)$$

2.5 Algoritmos Bioinspirados

Diversos problemas de engenharia não podem ser tratados através de métodos analíticos, seja por causa da complexidade ou do esforço matemático exigido na sua solução. Dessa forma, os algoritmos bioinspirados vêm sendo utilizados na resolução de problemas de busca e otimização, principalmente quando soluções robustas são difíceis ou impossíveis de se encontrar através de abordagens tradicionais, como a programação matemática (Serapião, 2009).

A Inteligência de Enxames é um conjunto de técnicas baseadas no comportamento coletivo de sistemas auto-organizados, distribuídos, autônomos, flexíveis e dinâmicos. A Inteligência de Enxames também é considerada um ramo da abordagem computacional conhecida como Computação Natural. Isso significa que esses sistemas computacionais são desenvolvidos baseando-se na natureza (Pareek et al, 2014).

De acordo com Millonas (1994), as principais características de sistemas de inteligência de enxames são:

- Proximidade – é importante que os agentes sejam capazes de interagir;
- Qualidade – os agentes devem ser capazes de avaliar seus comportamentos;

- Diversidade – permite ao sistema reagir a situações inesperadas;
- Estabilidade – nem todas as variações ambientais devem afetar o comportamento de um agente;
- Adaptabilidade – capacidade de adequação a variações ambientais.

Os algoritmos bioinspirados mais conhecidos são as redes neurais artificiais, algoritmo genético, a otimização por colônia de formigas, enxame de partículas, algoritmo *leaping frog*, algoritmos de coleta de alimentos por bactérias e algoritmos de colônia de abelhas e ainda abordagens mais recentes como busca do cuco, algoritmo dos morcegos e polinização de flores (Kar, 2016). A FIG 2.3 apresenta a evolução da utilização e pesquisas desses algoritmos em problemas heurísticos, meta-heurísticos e hiper-heurísticos.

Um algoritmo é considerado um método heurístico quando não há conhecimentos matemáticos completos sobre seu comportamento de forma que não há uma garantia de que uma solução ótima será encontrada. Já as meta-heurísticas são estratégias genéricas (esqueletos de algoritmos) para a construção de heurísticas e pode ser aplicada a um extenso conjunto de diferentes problemas. O conceito de hiper-heurística surgiu nos anos 2000 e se refere a algoritmos com um alto nível de generalidade e viabiliza a utilização inteligente de diversos métodos heurísticos no mesmo processo de resolução de um problema (Sucupira, 2004).

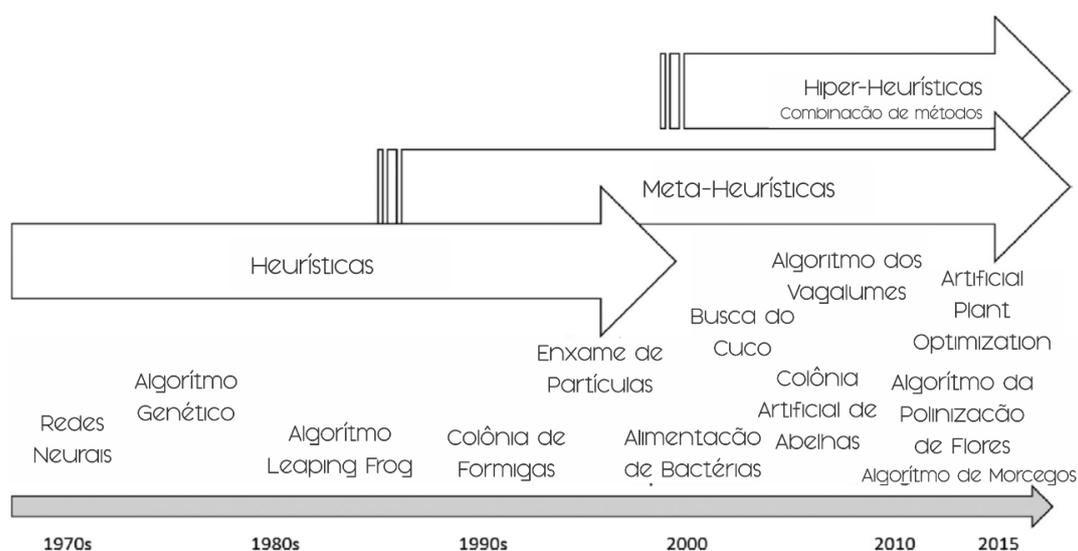


FIGURA 2.3 Histórico dos Algoritmos Bioinspirados, (Kar, 2016)

A seguir serão apresentados alguns dos algoritmos que fazem parte da inteligência de enxames e em especial as variações dos algoritmos baseados no comportamento de abelhas.

2.5.1. Colônia de Formigas

A otimização por colônia de formigas é baseada no comportamento de coleta de alimento desses insetos e sua comunicação através de feromônios. Enquanto caminham, as formigas liberam feromônio no chão, formando assim uma trilha química. Elas são também capazes de escolher caminhos onde tenham uma maior concentração química. A trilha química é uma estrutura emergente e auto-organizada e resulta de um *feedback* positivo, dessa forma, quanto mais química uma trilha, mais formigas são atraídas, reforçando assim o caminho que novamente atrai ainda mais formigas, em uma espiral crescente (Šešum-Čavić *et al.*, 2016).

O termo algoritmo de otimização por colônia de formigas (Ant Colony Optimization – ACO) é genérico e representa um procedimento geral de uma classe de metaheurísticas baseadas no comportamento de formigas (Serapião, 2009). Dorigo (1991) desenvolveu o primeiro algoritmo baseado em formigas, conhecido por AS (*Ant System*). Nesse algoritmo, um grafo G com V vértices representando um problema, uma formiga artificial é colocada em cada um dos vértices. Cada formiga percorre um caminho seguindo uma fórmula probabilística em função do feromônio “depositado” em cada aresta do grafo para chegar ao destino. As soluções parciais do problema são os estados e cada formiga muda de estado, correspondendo a uma solução mais completa, visando assim chegar a um estado final que seria a solução do problema.

2.5.2. Enxame de Partículas

James Kennedy e Russell Elberhart em 1995 idealizaram o algoritmo de otimização por enxame de partículas PSO (*Particle Swarm Optimization*) para tratar problemas no domínio contínuo. O PSO surgiu a partir de experiências que modelam o “comportamento social” de espécies de pássaros, cardumes de peixes e até mesmo humano. Nesse algoritmo, as partículas são os indivíduos da população e exploram uma região, determinada pela função objetivo ou (*fitness*), buscando uma solução para o problema.

2.5.3. Colônias de Abelhas

O comportamento de coleta de alimentos, características de aprendizagem, memorização e compartilhamento de informações têm sido umas das mais interessantes áreas em inteligência de enxames. As abelhas estão entre os insetos sociais mais estudados, devido à sua alta capacidade organizacional. Por causa disso, nos últimos anos, a quantidade de algoritmos desenvolvidos baseados em colônias de abelhas tem aumentado bastante. Diversas abordagens relativas a diferentes características comportamentais da abelha foram propostas, produzindo algoritmos distintos (Serapião, 2009).

Lucic & Teodorovic (2001) foram os primeiros a utilizar as abelhas como inspiração na solução de problemas de otimização combinatorial através de um algoritmo chamado *Bee System* (BS). Após essa abordagem, diversos outros autores propuseram algoritmos baseados no processo de acasalamento das abelhas, Evolução da Abelha Rainha - *Queen Bee Evolution Algorithm* (QEGA), Algoritmo das abelhas - *Honey Bee Algorithm* (HBA), Colméia de abelhas - *Bee Hive*, Vôo nupcial das abelhas - *Matting Bee Optimization* (MBO) que posteriormente foi melhorado para o *Honey-Bee Mating Optimization* (HBMO), entre diversos outros representados na linha do tempo da FIG 2.4.

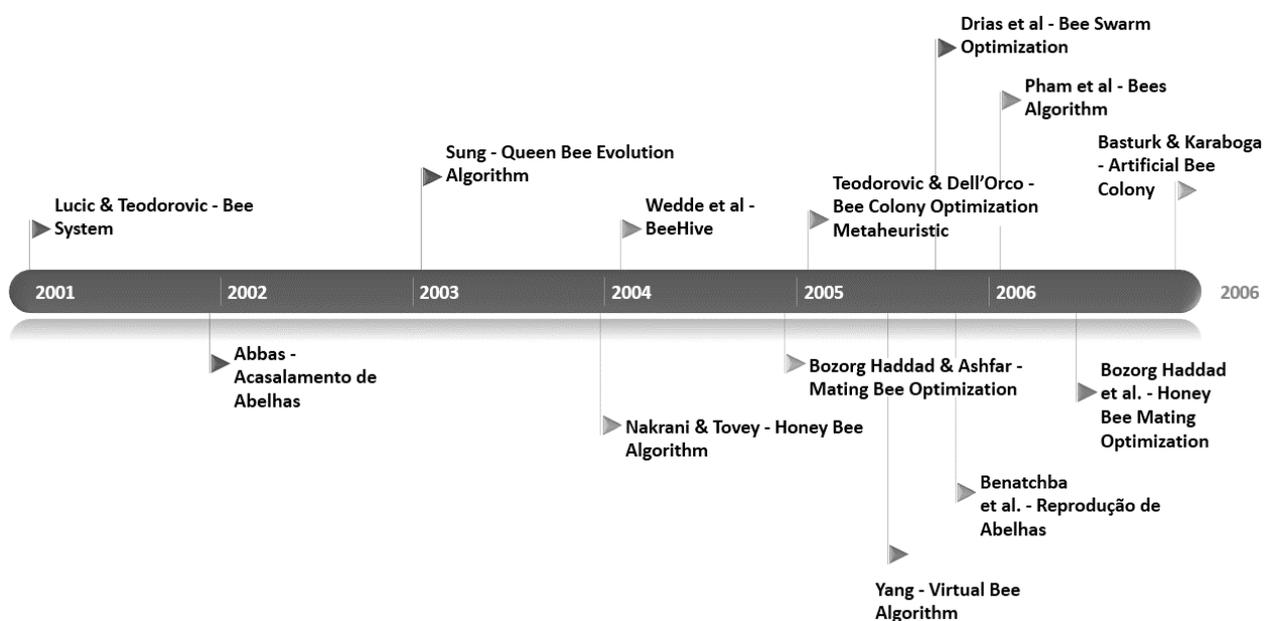


FIGURA 2.4 Histórico dos Algoritmos de Abelhas (Serapião, 2009)

De acordo com Baykasoglu *et al* (2007) os algoritmos de abelhas podem ser categorizados em três tipos: Comportamentos de coleta de alimento, Comportamentos de Acasalamento e Conceito de Abelha Rainha.

Apesar dos algoritmos baseados no comportamento de abelhas serem recentes, diversas aplicações têm sido propostas na literatura, como despacho econômico de energia (Qin *et al.*, 2004), otimização de pesos de redes neurais (Pham *et al.*, 2006a,b,c), projeto de células de manufatura (Pham *et al.*, 2007), determinação de conformação de proteínas (Bahamish *et al.*, 2008), análise de clusters (Fathian e Amiri, 2008), sintonia de controladores (Azeem e Saad, 2004; Leiviskä e Joensuu, 2006; Pham *et al.*, 2007a; Serapião, 2009;) entre diversas outras aplicações, o que mostra que a técnica é promissora e tem despertado interesse da comunidade científica.

2.5.4. Comportamentos de coleta de alimento – Colônia Artificial de Abelhas

O algoritmo da colônia artificial de abelhas (ABC) é baseado no comportamento de busca de alimento das abelhas. A coleta de alimentos é feita pelas abelhas campeiras (operárias). Depois que colhe o néctar, a abelha volta à colmeia, mas se lembra do odor, cor e forma das flores. Cada colmeia tem uma assim chamada área de pista de dança na qual as abelhas que descobriram fontes de néctar dançam, de modo a tentar convencer suas companheiras a segui-las. Cada abelha seguidora decide atingir a fonte de néctar ou pólen seguindo uma abelha dançarina que já descobriu uma florada. Durante o vôo, a abelha campeira pega uma carga de néctar e retorna à colmeia transferindo o néctar para uma abelha operária que armazena-o (Bhagade e Puranik, 2012).

Depois de ceder o alimento, a abelha pode: (a) abandonar a fonte de alimento e tornar-se novamente uma exploradora, (b) continuar a coleta na fonte de alimento sem recrutar as companheiras, ou (c) dançar e assim recrutar as companheiras antes de retornar para a fonte de alimento. Os mecanismos pelos quais a abelha decide seguir uma dançarina específica não são bem conhecidos, mas considera-se que o recrutamento entre as abelhas é sempre uma função da qualidade da fonte de alimento (Bhagade e Puranik, 2012). No algoritmo, a posição de uma fonte de alimento representa uma solução possível do problema de otimização e a quantidade de néctar corresponde à qualidade ou medida de aptidão da solução associada (Pareek *et al*, 2014).

A implementação do algoritmo ABC segue o seguinte pseudocódigo (Serapião, 2009):

1. Determine o tamanho da colônia (COL); o número inicial de abelhas campeiras (BN); o número de fontes de alimento (SN) que é igual a BN; o número de abelhas seguidoras (BC); o número de tentativas de melhorar uma fonte de alimento (lim);
2. Envie aleatoriamente as abelhas campeiras para as fontes de alimento iniciais;
3. Envie as abelhas seguidoras para as melhores fontes de alimento e determine a qualidade de cada fonte através do $fit(x_i)$ EQ (2.13) .

$$fit(x_i) = \frac{1}{Error} \quad (2.13)$$

4. Calcule a probabilidade P_i , EQ (2.14), das fontes escolhidas pelas abelhas seguidoras;

$$P_i = \frac{fit(x_i)}{\sum_{n=1}^{SN} fit(x_n)} \quad (2.14)$$

5. Abandone as piores fontes de alimento;
6. Envie as abelhas campeiras aleatoriamente nas proximidades das fontes de alimento;
7. Memorize a melhor fonte de alimento;
8. Se o número de tentativas de melhorar uma fonte de alimento for alcançado ($nt > lim$), ou se a fonte de alimento não pode melhorar, abandone essa fonte de alimento e busque aleatoriamente uma nova fonte (xi);
9. Se os critérios de parada não forem atingidos, volte ao passo 3.

Esse pseudocódigo pode ser ilustrado seguindo-se o fluxograma descrito na FIG 2.5.

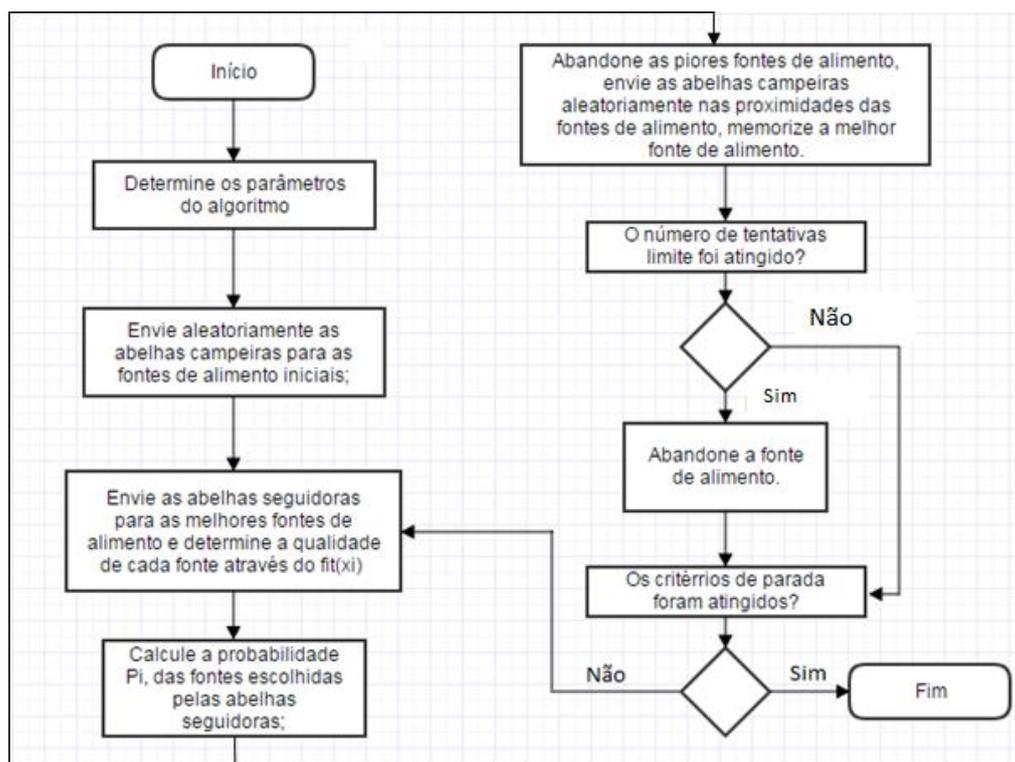


FIGURA 2.5 Fluxograma do algoritmo ABC

2.5.5 Comportamento de acasalamento de abelhas– Honey-Bee Mating Optimization

Uma colmeia de abelhas possui uma abelha rainha, abelhas operárias e pode ou não possuir zangões. Na colmeia os zangões têm a função de fecundar a rainha, os ovos que são fecundados podem dar origem a rainhas ou operárias e os não fecundados a zangões. Como na colmeia só pode haver uma rainha, as rainhas que nascem lutam entre si até que apenas uma sobreviva e caso ela seja mais forte, a abelha atual é expulsa com algumas centenas de operárias (Abbas, 2001).

O acasalamento representa a única vez em que a abelha rainha sai da colmeia, no chamado voo nupcial, e ela é seguida pelos zangões. A rainha voa rápido e alto de forma que apenas os zangões mais rápidos, aptos e fortes são capazes de alcançá-la. Numa colônia artificial o voo nupcial representa um conjunto de transações em um espaço de estados em que a rainha move-se podendo acasalar com um zangão com uma certa probabilidade. A rainha possui uma determinada quantidade de energia e retorna à colmeia caso a energia acabe ou caso a espermateca (local onde fica armazenado o esperma dos zangões) esteja cheio. No algoritmo as abelhas rainhas representam possíveis soluções e as operárias cuidam da prole (soluções candidatas) (Serapião, 2009). A

implementação do algoritmo HBMO (*Honey-Bee Mating Optimization*) segue o seguinte pseudocódigo (Serapião, 2009):

1. Determine os parâmetros iniciais do algoritmo: o número de operárias, zangões, tamanho da espermoteca, o número total de crias da rainha, a velocidade da rainha no início (S_{max}) e no final do voo (S_{min}), a taxa de redução da velocidade de voo ($\alpha = [0, 1]$), a quantidade de energia da rainha (E), e o fator de redução da quantidade de energia da rainha (γ);
2. Gere aleatoriamente os zangões e operárias;
3. Calcule a função-objetivo f da população;
4. Ordene a população conforme a aptidão;
5. Selecione a operária com melhor aptidão, ela será a rainha;
6. Determine a velocidade (S) e a energia (E) de voo da rainha;
7. Determine a probabilidade de um zangão (D) de formar uma espermoteca;
8. Determine a probabilidade desse zangão estar na lista de inseminação e caso esteja, ordene o esperma do zangão na espermoteca da rainha;
9. Decremente a velocidade de voo e a energia da rainha;
10. Enquanto $S > S_{min}$, $E > 0$ e espermoteca não estiver cheia, retorne ao passo 7;
11. Gere novas crias (soluções de teste) através de operadores de genéticos de cruzamento ou heurísticas entre os genótipos dos zangões escolhidos e da rainha;
12. Atualize as aptidões das crias baseado nas melhorias obtidas;
13. Substitua a rainha mais fraca pela cria mais forte, levando em consideração que a rainha não pode ser mais fraca que a cria e elimine as crias restantes.
14. Gere novos zangões aleatoriamente;
15. Caso os critérios de parada não sejam atingidos, retorne ao passo 6;

2.5.6 Evolução da Abelha Rainha

A abelha rainha é a responsável pela manutenção populacional da colmeia e quando sua capacidade de colocar ovos diminui as operárias providenciam o desenvolvimento de uma nova rainha para continuar a colmeia. O algoritmo de evolução da abelha rainha proposto por Sung (2003) tem o objetivo de melhorar a capacidade de otimização do algoritmo genético.

No algoritmo genético, os pais $P(t)$ são compostos por um número n de indivíduos gerados aleatoriamente. Já no algoritmo QEGA (*Queen Bee Evolution Algorithm*) $P(t)$ consistem de $n/2$ parceiros (I_m) de uma abelha rainha ($I_q(t-1)$) e cada abelha é escolhida conforme um algoritmo de seleção. No algoritmo genético os indivíduos sofrem mutação de acordo com uma pequena probabilidade p_m , no QEGA uma parte dos indivíduos sofre mutação com uma probabilidade normal de p_m e parte com uma probabilidade forte p'_m . Esse algoritmo refina as soluções existentes e aumenta a probabilidade de uma convergência antecipada e ajuda ainda o algoritmo genético a explorar novas áreas de busca (Serapião, 2009).

A implementação do algoritmo QEGA segue o seguinte pseudocódigo (Serapião, 2009):

1. Determine os parâmetros iniciais do algoritmo: o tamanho da população (P), razão de mutação, probabilidade normal de mutação p_m e probabilidade forte de mutação p'_m ;
2. Inicialize aleatoriamente os indivíduos da população (P);
3. Avalie a aptidão da população;
4. Selecione $P(t)$ através de $P(t-1)$, encontrando a abelha rainha I_q e as abelhas selecionadas;
5. Recombine $P(t)$ através do cruzamento;
6. Para cada indivíduo i na população faça a mutação, levando em consideração mutação normal e mutação forte;
7. Avalie a aptidão da população;
8. Caso os critérios de parada não forem atingidos, retorne ao passo 4.

2.6 Conclusões Parciais

O capítulo apresentou uma visão geral sobre os sistemas de refrigeração por compressão de vapor e destacou os principais dispositivos de expansão. Mostrou-se a importância do controle do superaquecimento e a sintonia de controladores. Foi apresentada também a evolução dos algoritmos bioinspirados, em especial os baseados no comportamento de abelhas, que fazem parte da sintonia do controlador PID apresentada no presente trabalho.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Introdução

Afim de verificar a resposta do superaquecimento ao controlador sintonizado através da colônia artificial de abelhas, foram realizadas simulações e posteriormente testes experimentais. Os resultados experimentais foram obtidos através de ensaios realizados no banco de testes de máquinas frigoríficas do Grupo de Refrigeração do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG. Dessa forma, esse capítulo apresenta a descrição da bancada e testes, do modelo matemático utilizado, da placa de controle e da definição dos parâmetros do algoritmo da colônia artificial de abelhas.

3.2 Dispositivo Experimental

O projeto original do banco de testes utilizado foi tema de um trabalho de graduação (Tibo, 1999) e a construção foi realizada pela empresa Friominas. Ele foi projetado para operar com capacidade de refrigeração máxima de 3 kW e apresenta um sistema de refrigeração e aquecimento por compressão de vapor, tendo o R134a como fluido primário e a água como fluido secundário. As FIGs 3.1 e 3.2 representam esse sistema, que é composto basicamente por um compressor alternativo, um condensador, um subresfriador, um evaporador e três válvulas de expansão montadas em paralelo, sistemas auxiliares para o controle da temperatura de evaporação e condensação e por sistemas de medição e aquisição de dados.

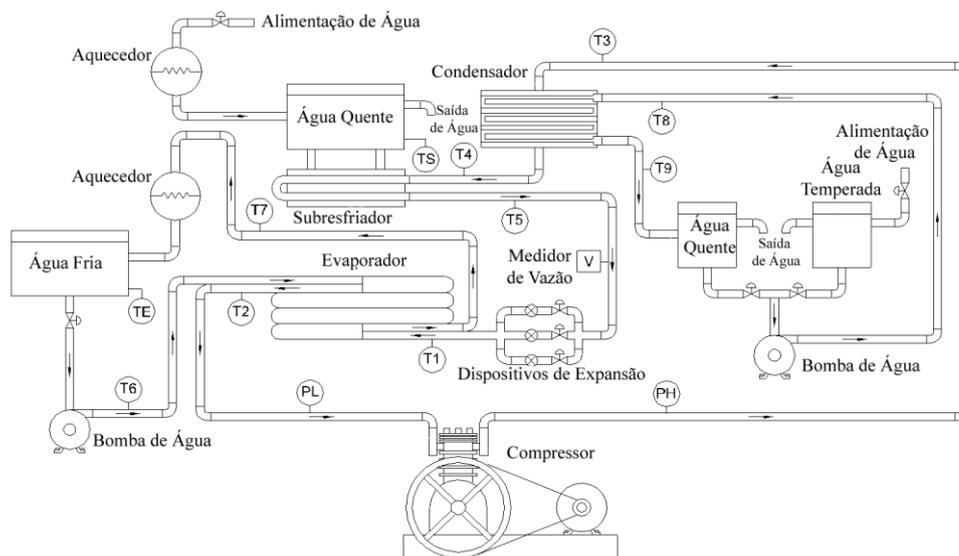


FIGURA 3.1 Esquema da planta do laboratório de refrigeração

- 1 e 7 - Reservatório de água (evaporador/sub-resfriador)
- 2 e 12 - Bomba de recirculação (evaporador/condensador)
- 3 e 4 – Aquecedor elétrico (subresfriador / evaporador)
- 5 – Subresfriador
- 6 – Evaporador
- 8 – Condensador
- 9 – Válvulas de expansão (termostática, manual e eletrônica)
- 10 – Compressor alternativo e motor elétrico
- 11 – Tanque de água quente
- 13 – Tanque de água fria
- 14 – Entrada de água da rede de abastecimento
- V – Medidor de vazão mássica
- Pa e Pb – Medidores de pressão de condensação e ebulição
- S1 e S2 – Medidores de temperatura (PT-100)
- T1 – T5 – Medidores de temperatura do fluido frigorífico
- E1 e E2 – Medidores de temperatura da água na entrada e saída do evaporador
- C1 e C2 – Medidores de temperatura da água na entrada e saída do condensador

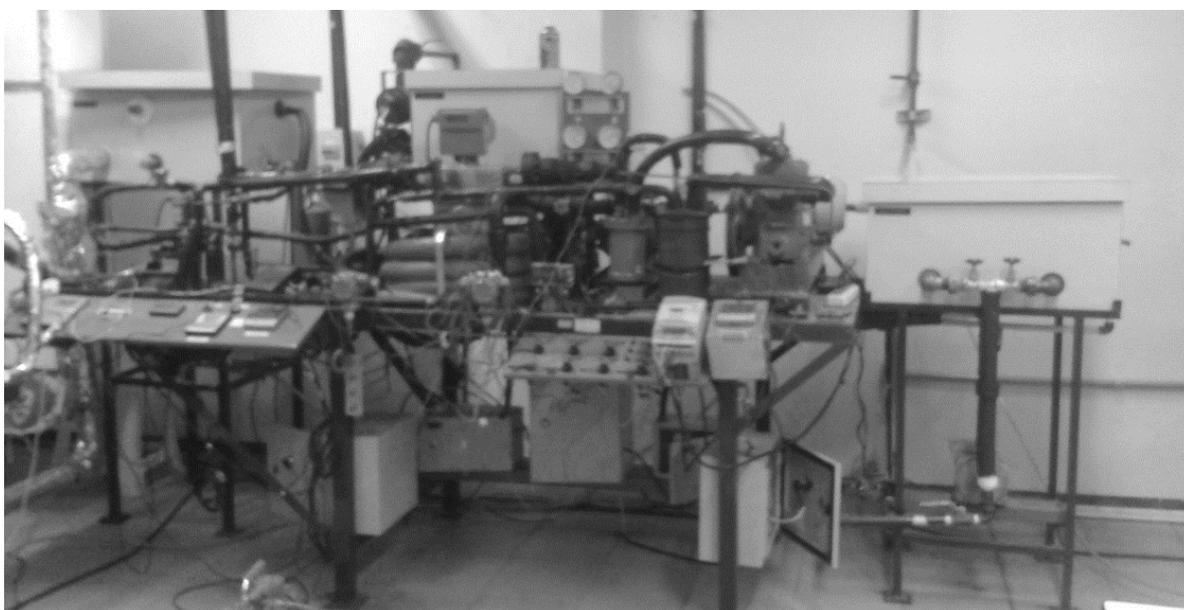


FIGURA 3.2 Fotografia da planta do laboratório de refrigeração

O compressor é da marca Bitzer, modelo III, tipo alternativo, aberto, com cilindrada de 157 cm³. O motor elétrico utilizado em seu acionamento é da marca Eberle e é assíncrono, trifásico, com rotação nominal de 1720 RPM. É possível variar a

velocidade de rotação do conjunto motor-compressor através de um inversor de frequência da WEG, modelo CFW08 em uma faixa de 0 a 300Hz.

O condensador é da marca Apema, modelo CST-4, tipo casco e tubos, com capacidade de dissipação térmica de 6 kW. A temperatura do fluido secundário é ajustada através da mistura entre a água aquecida do condensador e a água proveniente do sistema de abastecimento.

O subresfriador foi projetado para satisfazer uma potência de 0,4 kW afim de assegurar o subresfriamento do fluido frigorífico de até 10°C. Ele é do tipo coaxial, sendo um tubo envelope e um tubo interno em U. Neste trabalho este sistema não foi utilizado.

Os dispositivos de expansão montados em paralelo consistem de uma válvula tipo agulha de regulação manual, uma válvula termostática Danfoss, modelo TEN2 com equalização externa e capacidade nominal de 1,86 kW, e uma válvula de expansão eletrônica Danfoss, modelo TQ-5, orifício N° 1 e capacidade nominal de 10,8 kW. A planta possui também válvulas de bloqueio de forma a possibilitar a utilização do dispositivo de expansão desejado.

O evaporador consiste de três tubos de cobre alojados na parte interna de um tubo de PVC flexível. O evaporador foi projetado para uma potência máxima de refrigeração de 3 kW. De forma a tornar o componente mais compacto e promover uma maior turbulência nos escoamentos, ele foi montado em hélice. O controle da temperatura do fluido secundário no evaporador e no subresfriador é realizado por um sistema de aquecimento elétrico. Através desse controle ocorre a regulação da temperatura de ebulição e do sub-resfriamento do fluido frigorífico. Esse sistema consiste de um controlador PID, um módulo de disparos de tiristores, um medidor de temperatura do tipo PT-100 e uma resistência de 3kW.

A planta possui nove termopares do tipo T (cobre-constantan), com 1,5 mm de diâmetro, instalados no interior da tubulação de fluido refrigerante, na entrada e na saída de cada um dos componentes. Foram instalados, também, dois sensores digitais DS18B20, protegidos por um envólucro de aço inoxidável, na parede externa da tubulação do fluido refrigerante, para medir as temperaturas na entrada e saída do evaporador. As temperaturas medidas por estes sensores são utilizadas como dado de entrada no algoritmo de controle apresentado neste trabalho.

Os medidores de pressão são da marca Keywest, tipo Bourdon instalados na entrada e saída do compressor. Eles atuam numa faixa de medição de 0 a 10 bar para uma linha de sucção de 0 a 34 bar para a linha de descarga. A velocidade de rotação do compressor é medida através de um tacômetro digital de contato da marca Mitutoyo que permite medir até 5000 RPM.

3.3 Os sensores digitais de temperatura

As temperaturas na entrada e saída do evaporador são medidas através de dois sensores digitais DS18B20. Esses sensores se comunicam através do protocolo 1-Wire, ou seja, apenas uma ligação é utilizada na transmissão de dados. Eles operam em uma faixa de -55°C a 125°C . A precisão entre a faixa de temperatura de -10°C à 85°C é de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, que condiz com a faixa de operação na entrada e saída do evaporador. O GRA 3.1 apresenta a curva de erro típica do DS18B20. Ela apresenta as incertezas relacionadas às medições de temperaturas.

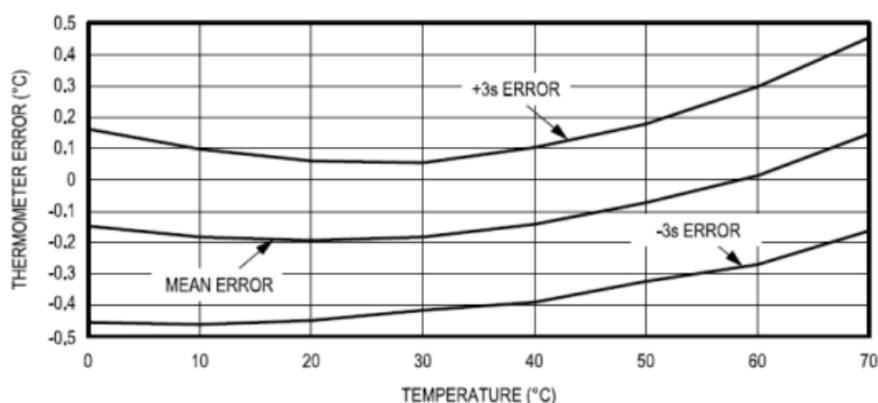


GRÁFICO 3.1 Curva de erro típica do sensor DS18B20

A resolução do sensor pode ser ajustada em uma faixa de 9 a 12 bits, que representam incrementos de temperatura de $0,5^{\circ}\text{C}$, $0,25^{\circ}\text{C}$, $0,125^{\circ}\text{C}$ e $0,0625^{\circ}\text{C}$. No projeto do controlador foi utilizada a resolução de 12 bits afim de obter uma precisão de leitura maior. Para essa resolução adotada, a *datasheet* prevê um tempo máximo de 750ms de conversão.

Foi verificado experimentalmente o tempo de conversão dos sensores digitais e o tempo de transmissão dos dados via usb. De acordo com o fabricante, o tempo de conversão de cada sensor é de no máximo 750ms. Dessa forma, para dois sensores sendo utilizados simultaneamente, espera-se um tempo máximo de 1500 ms. O experimento

consistiu de se enviar continuamente para o computador através de uma conexão serial, o tempo imediatamente anterior e o posterior às conversões de temperatura e o tempo instantâneo, afim de validar também o tempo de transmissão.

Ambos os sensores foram imersos em um recipiente com água em temperatura ambiente e quando a leitura da temperatura foi estabilizada ambos foram imersos em um recipiente com água e gelo. Neste momento foi iniciada a contagem de tempo. O GRA 3.2 representa o tempo de conversão em função da temperatura. É possível observar que o tempo de conversão aumentou à medida que a temperatura diminuiu. Para uma temperatura de 21°C verificou-se um tempo de conversão de 163ms e para uma temperatura de 0°C verificou-se um tempo de 169ms. Em ambos os casos, o tempo encontrado foi menor que o tempo máximo descrito na *datasheet*. Na *datasheet* não foi encontrado um motivo para isso ocorrer.

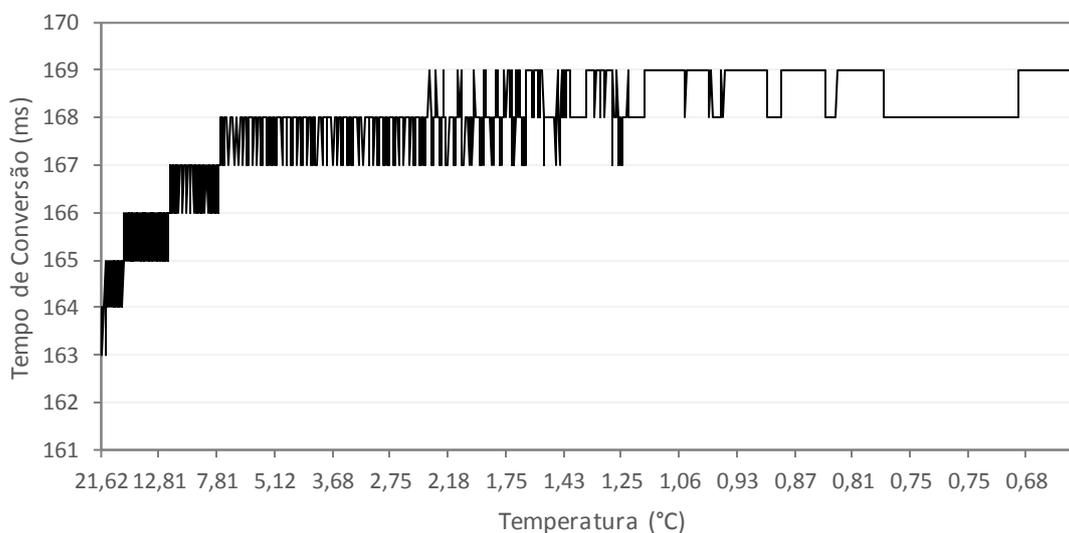


GRÁFICO 3.2 Tempo de conversão em função da temperatura

O tempo de transmissão pode ser observado no GRA 3.3 e ele independe da temperatura e varia entre 7ms e 8ms.

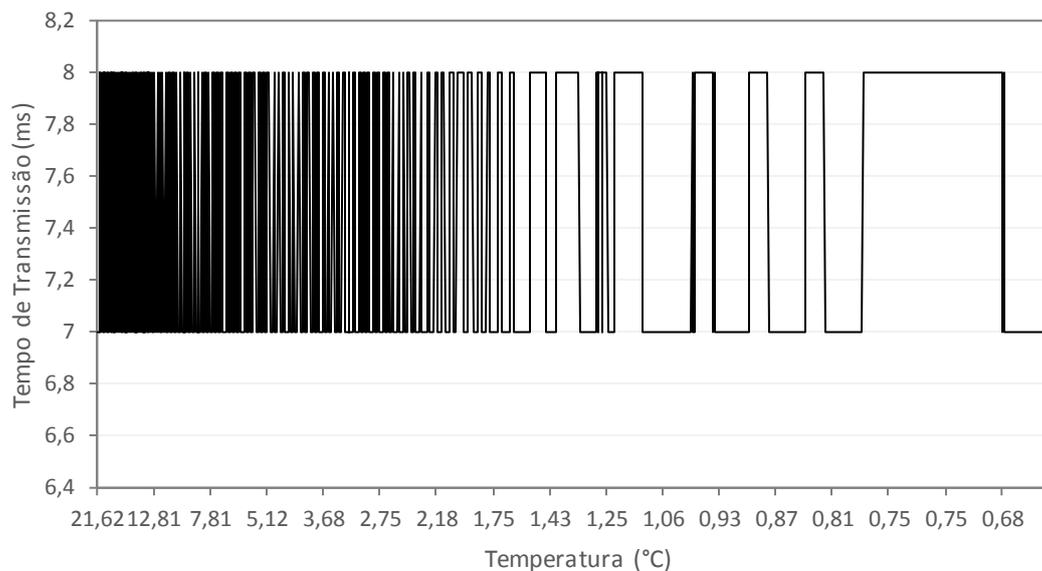


GRÁFICO 3.3 Tempo de transmissão em função da temperatura

A constante de tempo do sensor também foi determinada experimentalmente. Essa constante representa o tempo que o sensor leva para responder a 63,2% de variação quando exposto a um degrau de temperatura. O experimento consistiu de se enviar continuamente para o computador o valor das temperaturas medidas pelos sensores e o instante de tempo correspondente. Ambos os sensores foram imersos em um recipiente com água em temperatura ambiente e quando a leitura da temperatura foi estabilizada ambos foram imersos em um recipiente com água e gelo e foi iniciada a contagem de tempo até que a temperatura medida fosse estabilizada. A constante de tempo medida foi de 16925ms para um dos sensores e 19338ms para o outro, o que leva a um tempo médio de 18132ms.

O cálculo para obtenção dos valores da constante de tempo foi realizado da seguinte forma: Foi determinada a variação total de temperatura ΔT entre os dois recipientes e o tempo transcorrido (τ) para que 63,2% dessa diferença ($\Delta T\tau$) fossem registrados, conforme a TAB 3.1. O GRA 3.4 mostra a evolução das temperaturas dos dois sensores durante o teste.

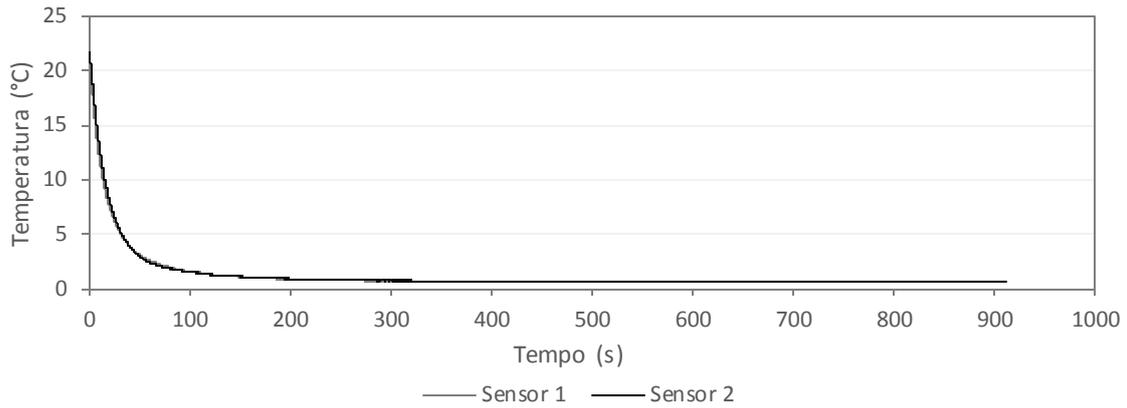


GRÁFICO 3.4 Variação da temperatura em função do tempo para os dois sensores

TABELA 3.1 Cálculo da constante de tempo dos sensores

	Sensor 1	Sensor 2
T_0 (°C)	22,06	22,31
T_f (°C)	0,56	0,81
$\Delta T = T_0 - T_f$	21,5	21,5
$\Delta T\tau = T_0 - 0,632*\Delta T$	8,472	8,722
τ (ms)	16925	19338

Devido ao valor alto encontrado para a constante de tempo, foi necessário considerar a dinâmica do sensor no modelo matemático do sistema. O modelo matemático do sensor descrito é descrito pela EQ (3.1). Essa equação representa os parâmetros de primeira ordem em que o ganho estático é 1.

$$G(s) = \frac{1}{18,132s + 1} \quad (3.1)$$

De forma a considerar a dinâmica desses sensores, o modelo matemático da planta foi identificado utilizando-se a placa de controle com os sensores. A FIG 3.3 apresenta a placa utilizada.

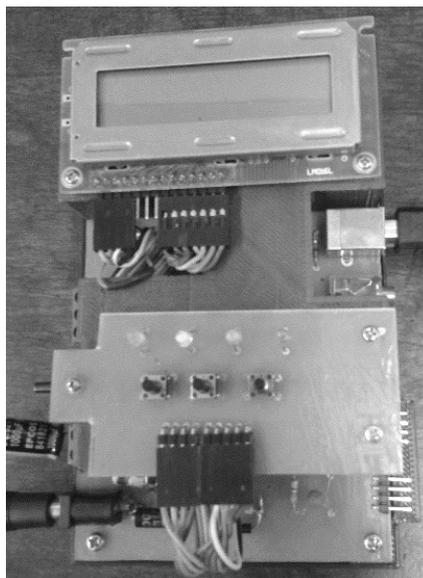
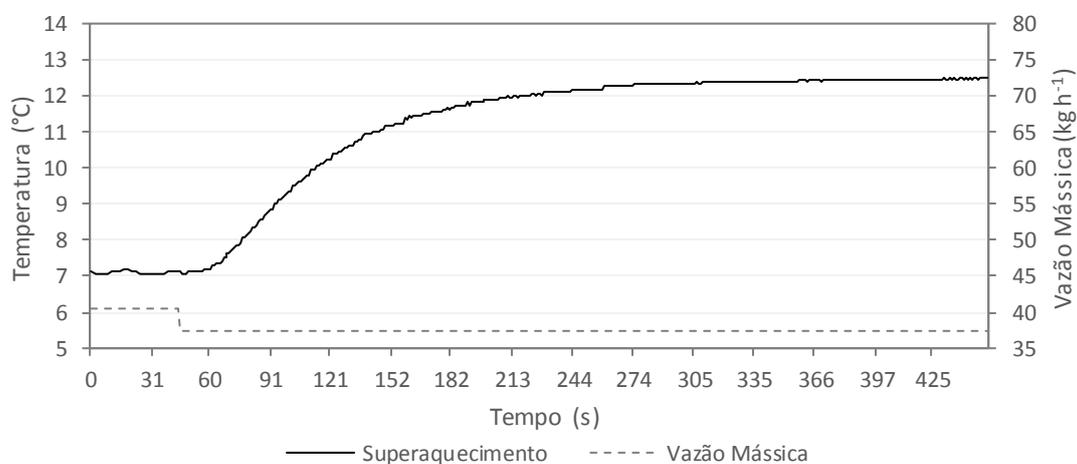


FIGURA 3.3 Placa de controle

3.4 O modelo matemático da planta

Diversos testes foram realizados em temperaturas de evaporação de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ afim de obter dados experimentais para utilização na formulação de um modelo para o sistema. Durante os testes, a temperatura do superaquecimento na saída do evaporador foi de aproximadamente $7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta condição de operação foi obtida através do controle da válvula de expansão eletrônica. A temperatura de condensação foi mantida em aproximadamente $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a velocidade do compressor foi mantida a 650 RPM . Os GRAs 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8 mostram a resposta de superaquecimento à redução na vazão mássica na entrada do evaporador para as temperaturas de evaporação de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente.

GRÁFICO 3.5 Resposta do superaquecimento para temperatura de -5°C

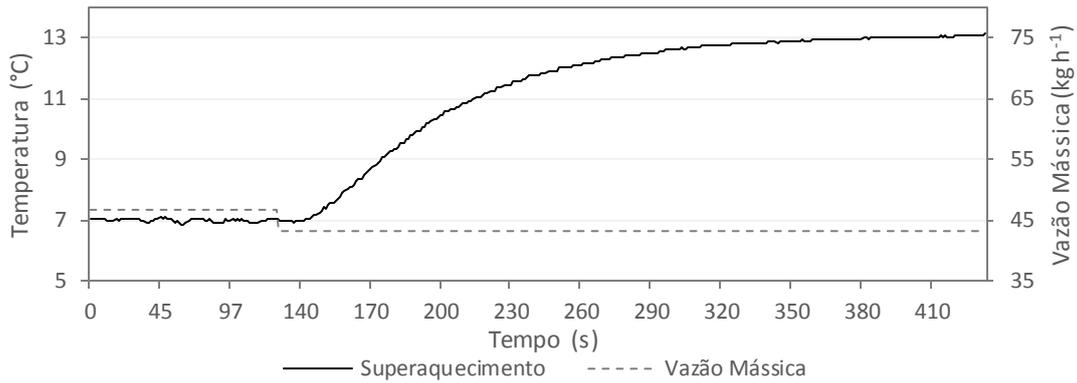


GRÁFICO 3.6 Resposta do superaquecimento para temperatura de 0°C

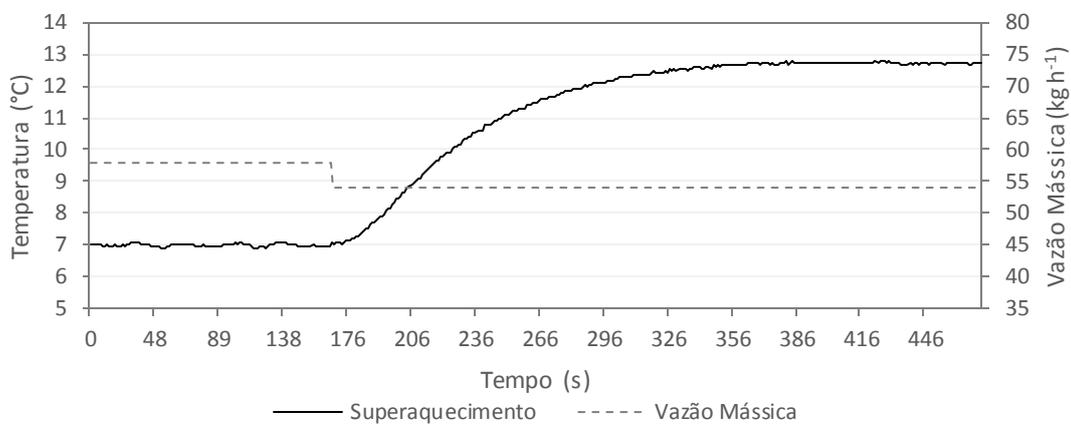


GRÁFICO 3.7 Resposta do superaquecimento para temperatura de 5°C

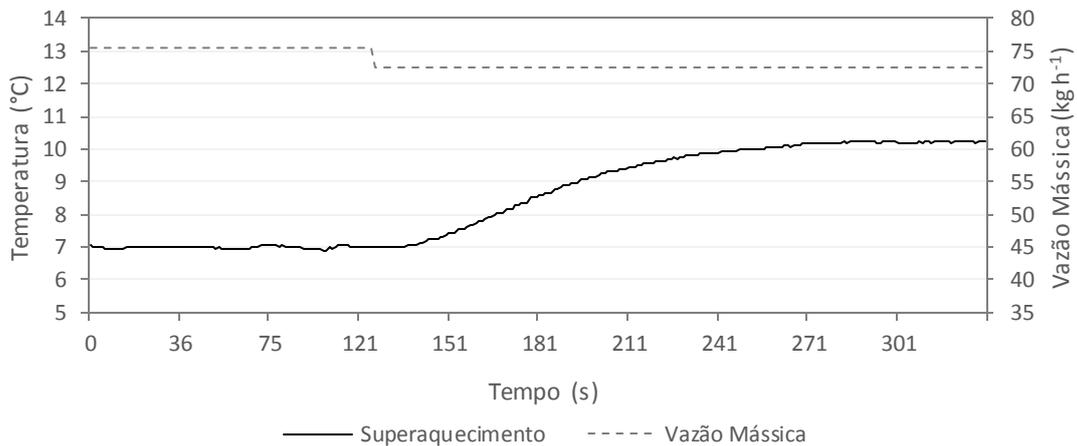


GRÁFICO 3.8 Resposta do superaquecimento para temperatura de 10°C

Depois de fechar o dispositivo de expansão, a massa do fluido refrigerante no interior do evaporador diminuiu devido à diferença entre as vazões mássicas na entrada e saída. A medida que a região de evaporação reduziu, a região de superaquecimento

aumentou. A resposta do superaquecimento pode ser modelada usando um modelo de três parâmetros de primeira ordem com tempo de atraso (Maia et al, 2014).

$$G(s) = \frac{K e^{\theta s}}{\tau s + 1} \quad (3.2)$$

Na EQ (3.2), K é o ganho estático, τ a constante de tempo, θ o retardo de tempo e s denota o operador de Laplace. O ganho estático e a constante de tempo foram estimados para cada condição de operação em função da temperatura de evaporação (T), como mostrado no GRA 3.9.

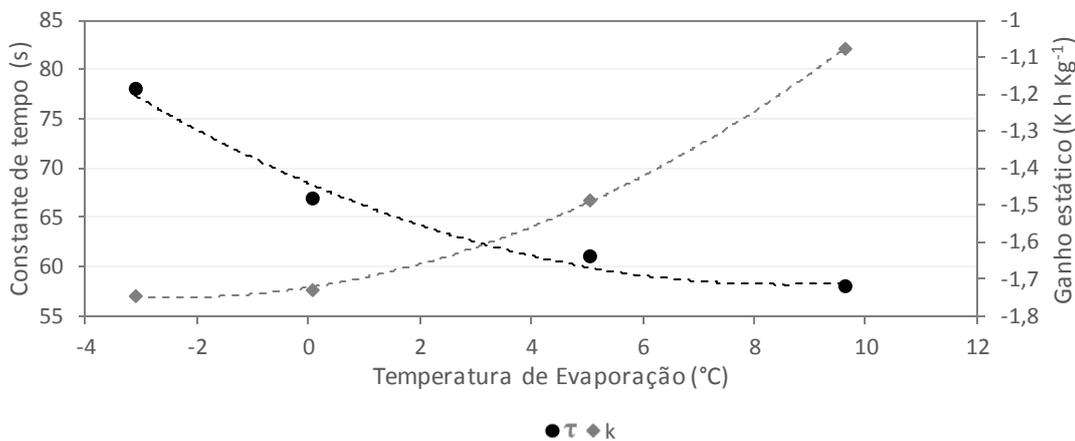


GRÁFICO 3.9 Constante de tempo e ganho estático em função da temperatura

O ganho estático foi estimado usando a relação $\Delta(\Delta T_s) / \Delta \dot{m}_f$ e a constante de tempo corresponde ao instante em que o superaquecimento atingiu 63% de seu valor final. Os dados apresentados no GRA 3.7 foram utilizados para formular expressões matemáticas para o ganho e a constante de tempo em função da temperatura de evaporação, descritos pelas EQs (3.3) e (3.4).

$$\tau = 0,1413T^2 - 2,4108T + 68,487 \quad (3.3)$$

$$K = 0,0047T^2 + 0,0223T - 1,7232 \quad (3.4)$$

O tempo de atraso encontrado nos experimentos foi de 8,25 s. A EQ (3.5) descreve o modelo obtido.

$$G(s) = \frac{(0,0047T^2 + 0,0223T - 1,7232)e^{8,25s}}{(0,1413T^2 - 2,4108T + 68,487)s + 1} \quad (3.5)$$

Em muitos processos, a maneira como a dinâmica do sistema varia em função do ponto de operação é conhecida. Esta informação pode ser usada para determinar os

ganhos do controlador. Nos últimos anos, a sintonia de controladores baseadas em técnicas de otimização têm se destacado na literatura. Os objetivos principais destes métodos são assegurar uma boa estabilidade e robustez para o sistema controlado. Entre os métodos de otimização, os algoritmos bioinspirados têm sido utilizados na solução de problemas de busca e otimização, especialmente quando soluções robustas são difíceis ou impossíveis de encontrar através de abordagens tradicionais.

3.5 Sintonia do controlador PID

Neste trabalho serão utilizados algoritmos conhecidos para se determinar os ganhos do controlador PID adaptativo e não adaptativo para cada ponto de operação. O algoritmo ABC também será utilizado na determinação da sintonia adequada.

3.5.1 Sintonia do controlador PID utilizando o algoritmo ABC

No algoritmo ABC, existem alguns parâmetros que precisam ser especificados pelo usuário. Estes parâmetros consistem do valor do erro utilizado para avaliar a qualidade da fonte de alimento, o número de abelhas e o limite de tentativas de melhorar uma fonte de alimento (Panoeiro et al, 2016). Para avaliar a qualidade da fonte de alimento, o erro na EQ 2.11 foi considerado como sendo o ITAE, IAE, ISE e ITSE. O sistema foi simulado considerando o uso de cada índice baseado no erro no cálculo de ajuste $fit(x_i)$, a resposta final do sistema e a ação de controle foram comparadas no GRA 3.10. O controle de superaquecimento usando ITAE, IAE, ISE e ITSE foi muito similar e sem oscilações. Dessa forma o IAE foi o escolhido a ser utilizado no ABC.

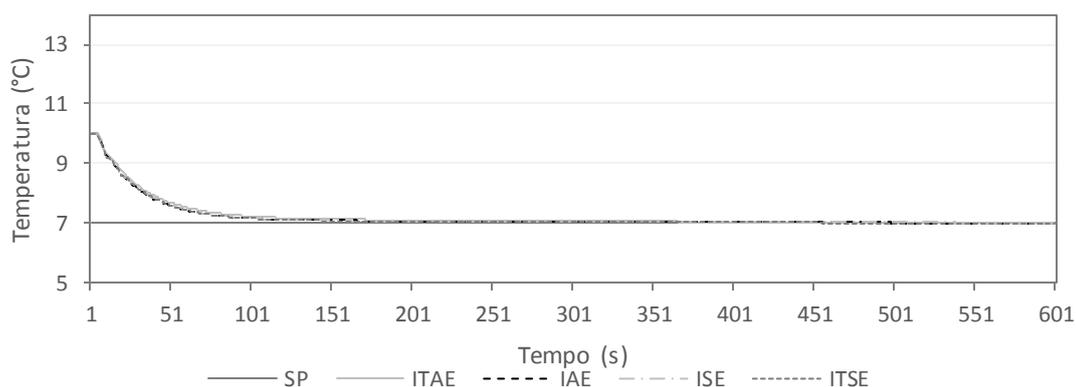


GRÁFICO 3.10 Comparação entre as ações de controle usando ITAE, IAE, ITSE e ISE no cálculo

O número de abelhas na colônia é um parâmetro importante a ser determinado, porque um número pequeno de abelhas pode não levar a um valor ótimo e

um número alto de abelhas aumenta consideravelmente o esforço computacional. Para determinar um número adequado de abelhas, foram realizadas simulações considerando uma colônia de 16, 20, 26, 30, 36, 40 e 46 abelhas. O número ideal de abelhas foi escolhido considerando o número máximo de iterações e o valor do IAE. O GRA 3.11 mostra o valor final de IAE encontrado para cada temperatura.

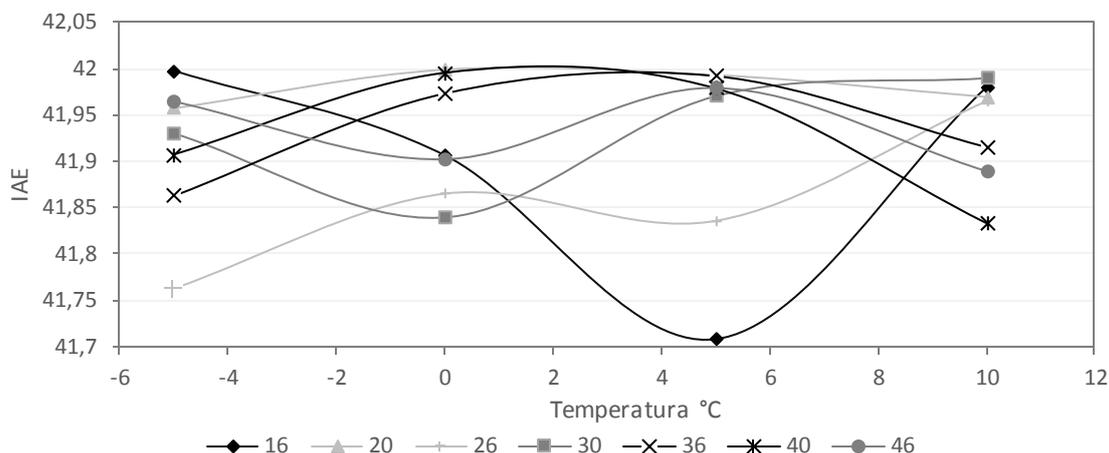


GRÁFICO 3.11 Comparação entre o número de abelhas e o IAE final

Para definir o número máximo de iterações, inicialmente o algoritmo foi limitado a 5000 iterações, para as temperaturas de -5, 0, 5 e 10 ° C. Não foi observada nenhuma alteração relevante nos valores do ganho após 200 iterações. Por esta razão, o número máximo de iterações foi estabelecido em 1000. O GRA 3.12 apresenta o número de iterações quando o melhor ganho foi atingido para cada temperatura e número de abelhas. É possível observar no GRA 3.12 que nenhuma das simulações atingiu o número máximo de iterações. Todas as simulações também alcançaram bons resultados antes de 200 iterações, o que é bom quando se considera o esforço computacional. O algoritmo para de procurar ganhos ótimos quando o número máximo de iterações (1000) é atingido ou quando o IAE é menor do que estabelecido (43), uma vez que as melhores respostas do sistema em malha fechada foram obtidas com um IAE de 43 ou inferior. Considerando a análise dos GRAs 3.11 e 3.12, o número de abelhas escolhidas foi 26, em função do IAE pequeno e também pelo número de iterações quando o melhor ganho foi encontrado.

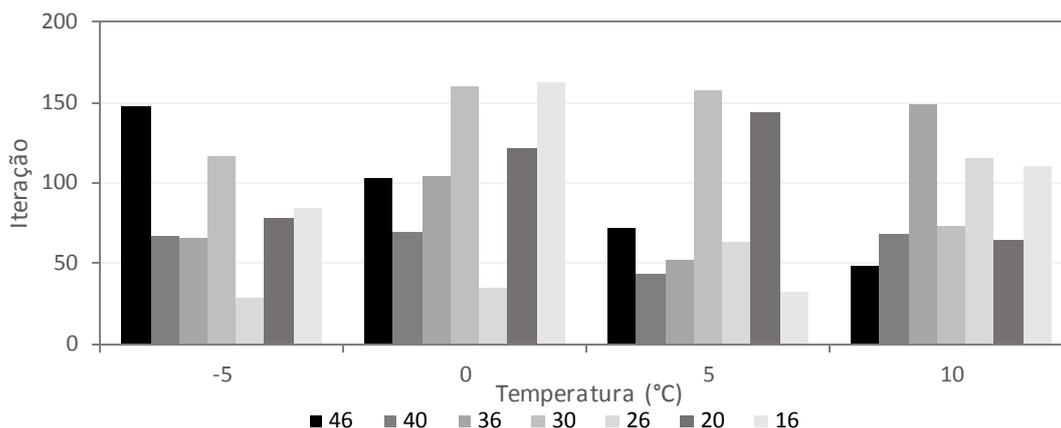


GRÁFICO 3.12 Comparação entre o número de abelhas e o número de iterações

Na TAB 3.2 são apresentados os ganhos ótimos do controlador PID para as temperaturas de evaporação de 10°C a -5°C. Esta temperatura foi utilizada como parâmetro para determinar o ganho e a constante de tempo EQs (3.3) e (3.4) da função de transferência que define a dinâmica do sistema e pode ser utilizada para reconhecer uma mudança no ponto de operação. Como os ganhos do controlador foram calculados para diferentes temperaturas de evaporação, a escolha de quais ganhos utilizar pode ser realizada a partir da avaliação da temperatura de evaporação. Os valores de K_p , K_i e K_d foram obtidos variando T na função de transferência e executando o algoritmo ABC para encontrar os ganhos ideais do PID para cada temperatura.

TABELA 3.2 Ganhos do controlador ABC e IAE para cada temperatura

Tevap (°C)	Kp	Ki	Kd	IAE
10	-4,25	-0,05	-19,49	42,96
9	-3,82	-0,04	-18,37	42,91
8	-3,52	-0,04	-17,15	42,94
7	-3,00	-0,03	-12,59	42,87
6	-3,11	-0,03	-15,39	43,00
5	-2,66	-0,03	-11,62	42,74
4	-2,70	-0,03	-12,72	42,53
3	-2,85	-0,03	-15,23	42,93
2	-2,92	-0,03	-14,60	42,91
1	-2,97	-0,03	-14,44	42,92
0	-2,57	-0,03	-9,11	42,96
-1	-3,08	-0,03	-16,17	42,79
-2	-2,86	-0,02	-15,58	42,98
-3	-3,36	-0,03	-18,54	42,99
-4	-3,12	-0,03	-17,23	42,57
-5	-3,35	-0,03	-15,65	42,09

3.5.2 Sintonia do controlador PID pelo método SIMC

No método SIMC descrito na TAB 2.3, os ganhos do controlador dependem da constante de tempo, do ganho estático e do atraso. Na TAB 3.3 são apresentados os ganhos do controlador e o valor do IAE em cada ponto de operação estudado. Este método de sintonia foi comparado com o método ABC em simulações e em testes experimentais.

TABELA 3.3 Ganhos do controlador SIMC e IAE

Tevap (°C)	Kp	Ki	Kd	IAE
10	-2,81	-0,04	-11,14	54,49
9	-2,52	-0,04	-10,00	54,46
8	-2,32	-0,04	-9,18	54,46
7	-2,17	-0,03	-8,59	54,49
6	-2,06	-0,03	-8,16	54,55
5	-1,98	-0,03	-7,87	54,62
4	-1,93	-0,03	-7,69	54,73
3	-1,91	-0,03	-7,60	54,85
2	-1,90	-0,03	-7,59	55,14
1	-1,92	-0,03	-7,65	55,93
0	-1,95	-0,03	-7,79	56,78
-1	-2,00	-0,03	-8,00	57,71
-2	-2,06	-0,03	-8,28	58,68
-3	-2,14	-0,03	-8,64	59,69
-4	-2,25	-0,03	-9,07	60,72
-5	-2,37	-0,03	-9,60	61,77

3.5.3 Sintonia do controlador PID pelo método de Ziegler e Nichols

No método de Ziegler e Nichols, descrito na TAB 2.1, os ganhos do controlador dependem da constante de tempo, do ganho estático e do atraso. A TAB 3.4 são apresentados os ganhos do controlador em cada ponto de operação e o respectivo IAE. Esse método foi comparado ao ABC apenas nas simulações.

TABELA 3.4 Ganhos do controlador de Ziegler e Nichols e IAE

Tevap (°C)	Kp	Ki	Kd	IAE
10	-4,72	-0,28	-20,04	90,82
9	-4,24	-0,25	-18,00	90,39
8	-3,89	-0,23	-16,52	90,40
7	-3,64	-0,21	-15,45	90,87
6	-3,46	-0,20	-14,69	91,78
5	-3,33	-0,20	-14,16	93,14
4	-3,26	-0,19	-13,84	94,95
3	-3,22	-0,19	-13,67	97,20
2	-3,21	-0,19	-13,66	99,90
1	-3,24	-0,19	-13,78	103,05
0	-3,30	-0,19	-14,03	106,65
-1	-3,39	-0,20	-14,40	110,69
-2	-3,51	-0,21	-14,91	115,18
-3	-3,66	-0,22	-15,55	120,17
-4	-3,84	-0,23	-16,33	125,61
-5	-4,07	-0,24	-17,28	131,50

3.5.4 Sintonia do controlador PID pelo método de Cohen e Coon

No método de Cohen e Coon, descrito na TAB 2.2, os ganhos do controlador dependem da constante de tempo, do ganho estático e do atraso. Na TAB 3.5 que representa os ganhos em cada ponto e o IAE.

TABELA 3.5 Ganhos do controlador de Cohen e Coon e IAE

Tevap (°C)	Kp	Ki	Kd	IAE
10	-5,38	-0,27	-16,21	126,71
9	-4,83	-0,25	-14,56	126,19
8	-4,44	-0,23	-13,36	126,20
7	-4,15	-0,21	-12,50	126,76
6	-3,94	-0,20	-11,88	127,86
5	-3,80	-0,19	-11,45	129,49
4	-3,71	-0,19	-11,19	131,67
3	-3,67	-0,19	-11,06	134,40
2	-3,66	-0,18	-11,04	137,67
1	-3,69	-0,19	-11,14	141,49
0	-3,75	-0,19	-11,34	145,87
-1	-3,85	-0,19	-11,65	150,80
-2	-3,98	-0,20	-12,05	156,28
-3	-4,15	-0,21	-12,57	162,32
-4	-4,35	-0,22	-13,21	168,93
-5	-4,60	-0,23	-13,97	176,10

3.5.5 Sintonia do controlador PID não adaptativo

Foram elaborados também, para os métodos ABC, SIMC, Ziegler e Nichols e Cohen Coon, controladores não adaptativos com o objetivo de comparar a resposta do sistema com o controle adaptativo. Para esses controladores foram considerados os ganhos K_p , K_i e K_d obtidos para a temperatura de 2 °C, que é um ponto intermediário na faixa de -5 °C a 10 °C. A TAB 3.6 apresenta os ganhos utilizados.

TABELA 3.6 Ganhos dos controladores não adaptativos

Controlador	K_p	K_i	K_d
ABC	-4,25	-0,05	-19,49
SIMC	-2,81	-0,04	-11,14
Ziegler e Nichols	-4,72	-0,28	-20,04
Cohen - Coon	-5,38	-0,27	-16,21

3.6 Conclusões Parciais

Esse capítulo apresentou a bancada de testes utilizadas bem como os detalhes sobre os controladores PID sintonizados. A partir dos parâmetros obtidos para os controladores foram realizados testes teóricos e experimentais considerando os controladores adaptativos e não adaptativos afim de se avaliar a resposta do superaquecimento.

4. RESULTADOS

4.1 Introdução

De forma a avaliar a eficiência do controlador adaptativo e a resposta do superaquecimento, o modelo matemático do sistema foi simulado em diferentes pontos de operação. As simulações foram realizadas para o controlador ABC, SIMC, Ziegler e Nichols e Cohen e Coon. As mesmas simulações foram realizadas considerando-se um controlador não adaptativo. Através das simulações foi possível identificar que os métodos ABC e SIMC se destacaram, dessa forma, para esses métodos também foram realizados testes experimentais.

4.2 Resultados Teóricos

Todas as simulações iniciam-se com um superaquecimento de 10°C e o objetivo é um setpoint de 7°C . O modelo matemático descrito na EQ (3.5) foi simulado para as temperaturas de evaporação de 10°C , 0°C e -5°C para os controladores de Ziegler e Nichols, Cohen e Coon, SIMC e ABC.

4.2.1 O Controlador Adaptativo

O controlador sintonizado através do método de Ziegler e Nichols foi capaz de rastrear o setpoint entretanto apresentou um sobressinal máximo de 32,71%. É possível observar no GRA 4.1 que inicialmente a temperatura de superaquecimento desce até aproximadamente $4,7^{\circ}\text{C}$ e posteriormente se eleva até 8°C até finalmente rastrear o setpoint com pequenas oscilações, estabilizando-se com erro nulo após 175 s.

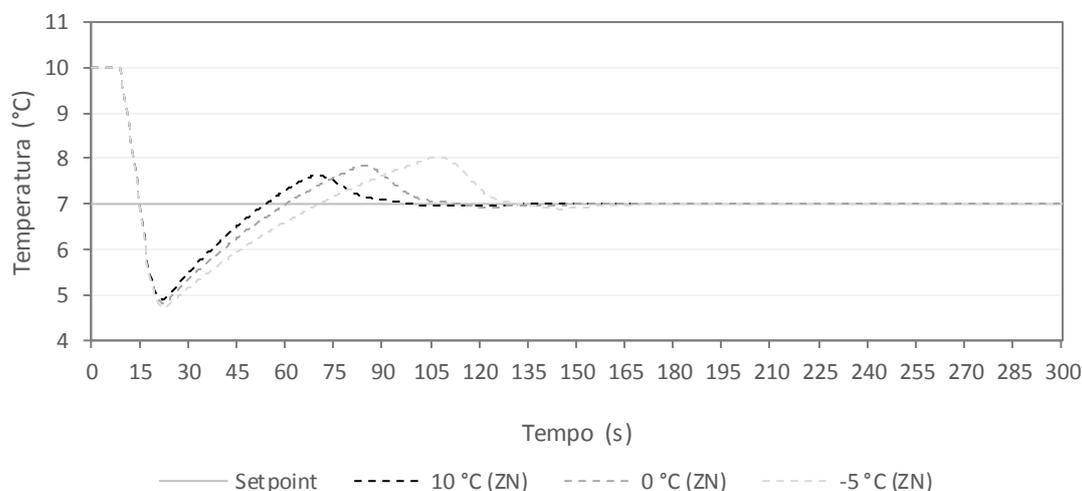


GRÁFICO 4.1 Controlador Sintonizado pelo método de Ziegler e Nichols

Assim como a resposta do sistema para o controlador de Ziegler e Nichols, a resposta do sistema para o controlador de Cohen e Coon também apresentou um grande sobressinal de aproximadamente 40,14%. É possível observar no GRA 4.2 que inicialmente a temperatura de superaquecimento desce até aproximadamente 4,18 °C e, posteriormente, se eleva até 8,3°C até finalmente rastrear o setpoint com pequenas oscilações, estabilizando-se com erro nulo após 200s.

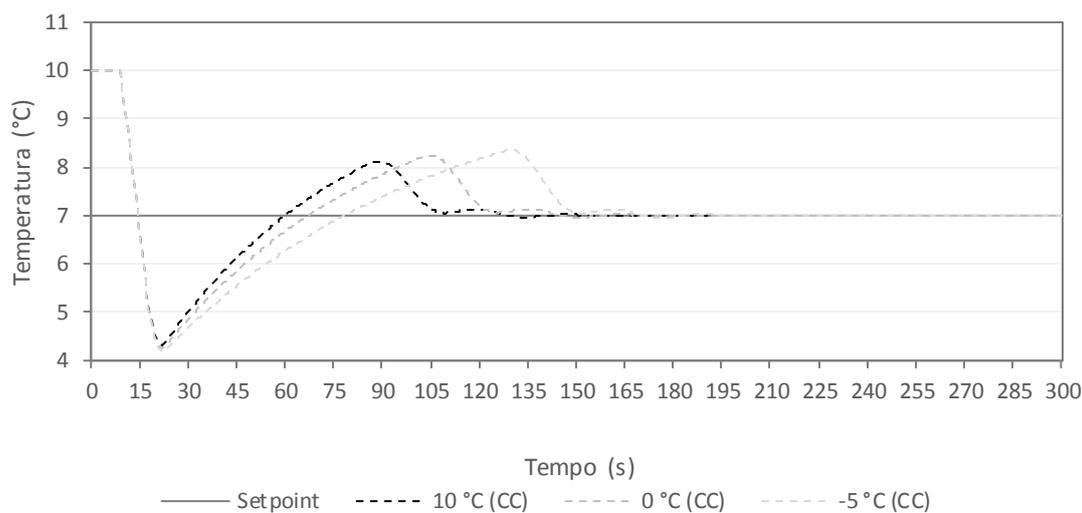


GRÁFICO 4.2 Controlador sintonizado através do método de Cohen e Coon

O controlador sintonizado através do método SIMC, rastreou o setpoint sem sobressinal ou oscilações sendo necessários 175s até que o setpoint fosse efetivamente atingido com erro nulo, como pode ser observado no GRA 4.3.

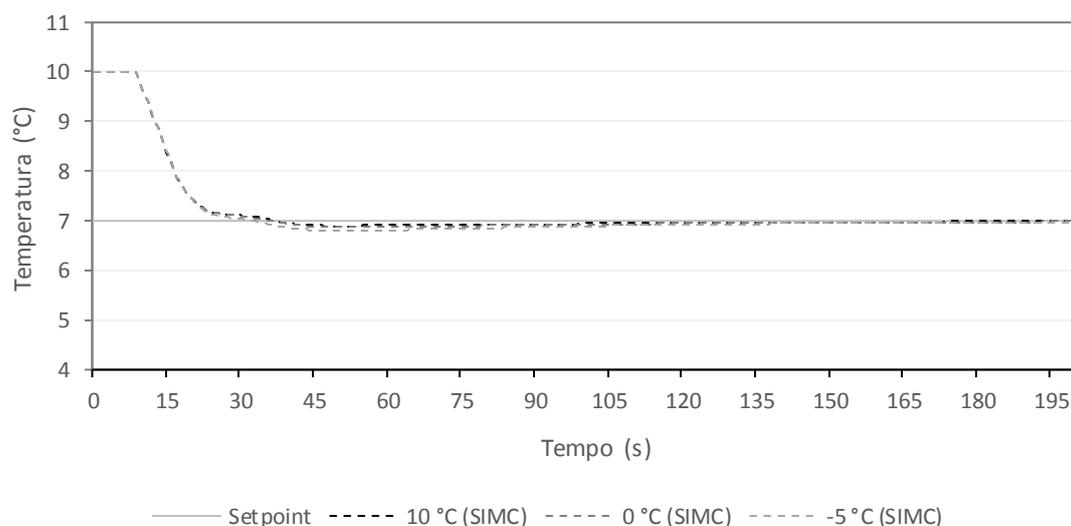


GRÁFICO 4.3 Controlador sintonizado através do método SIMC

O controlador sintonizado através do método ABC rastreou o setpoint para todas as temperaturas simuladas com um pequeno sobressinal de aproximadamente 6,57% e pequenas oscilações no início que desapareceram após 70 segundos de simulação quando o setpoint foi rastreado sem erro, como pode ser observado no GRA 4.4.

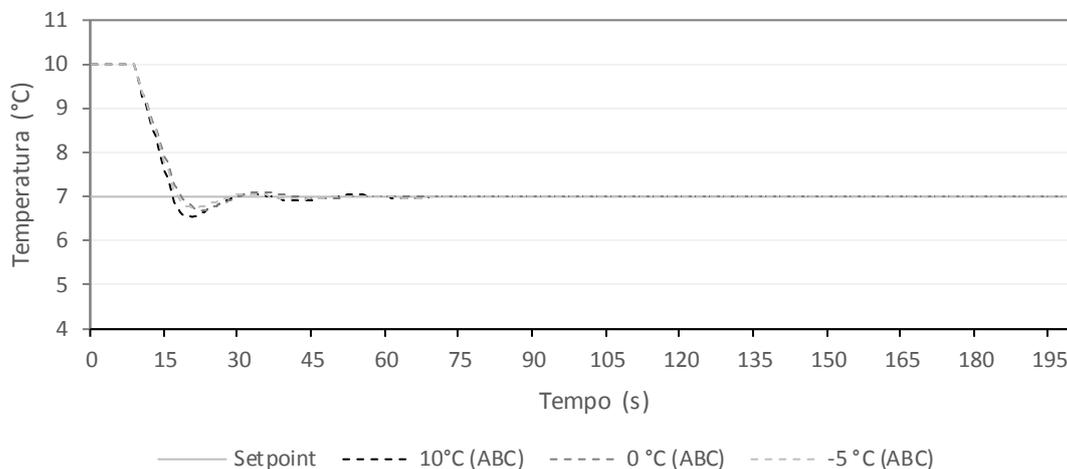


GRÁFICO 4.4 Controlador sintonizado através do algoritmo ABC

Afim de avaliar o desempenho dos quatro controladores estudados foram analisados os índices MAE, IAE e RMSE. As TABs 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam esses índices para as temperaturas de evaporação de 10°C, 0°C e -5°C.

TABELA 4.1 Índices de desempenho para temperatura de evaporação de 10°C

	MAE	RMSE	IAE
Ziegler e Nichols	2,11	0,74	90,82
Cohen e Coon	2,68	0,88	126,71
SIMC	0,10	0,62	54,49
ABC	0,46	0,59	42,96

TABELA 4.2 Índices de desempenho para temperatura de evaporação de 0°C

	MAE	RMSE	IAE
Ziegler e Nichols	2,19	0,79	106,65
Cohen e Coon	2,75	0,93	145,87
SIMC	0,12	0,62	56,78
ABC	0,31	0,60	42,96

TABELA 4.3 Índices de desempenho para temperatura de evaporação de -5°C

	MAE	RMSE	IAE
Ziegler e Nichols	2,29	0,85	131,50
Cohen e Coon	2,81	1,02	176,10
SIMC	0,19	0,63	51,77
ABC	0,26	0,59	42,09

É possível observar que os controladores ABC e SIMC se destacaram tanto no MAE quanto no RMSE e IAE, apresentando os melhores índices, sendo o ABC o melhor deles quando considerados o RMSE e IAE.

4.2.2 O Controlador Não Adaptativo

Os ganhos dos controladores não adaptativos foram sintonizados considerando-se um único ponto de operação, nesse caso com uma temperatura de evaporação de 10°C e foram mantidos estáticos. As simulações foram realizadas considerando-se as temperaturas de evaporação de -5°C , 0°C e 5°C

O controlador sintonizado através do método de Ziegler e Nichols foi capaz de rastrear o setpoint com pequenas oscilações e apresentou um sobressinal de 51,57%. É possível observar no GRA 4.5 que a temperatura desceu até aproximadamente $3,41^{\circ}\text{C}$ e posteriormente subiu até aproximadamente $8,32^{\circ}\text{C}$ até finalmente permanecer oscilando cerca de $0,2^{\circ}\text{C}$ em torno do setpoint.

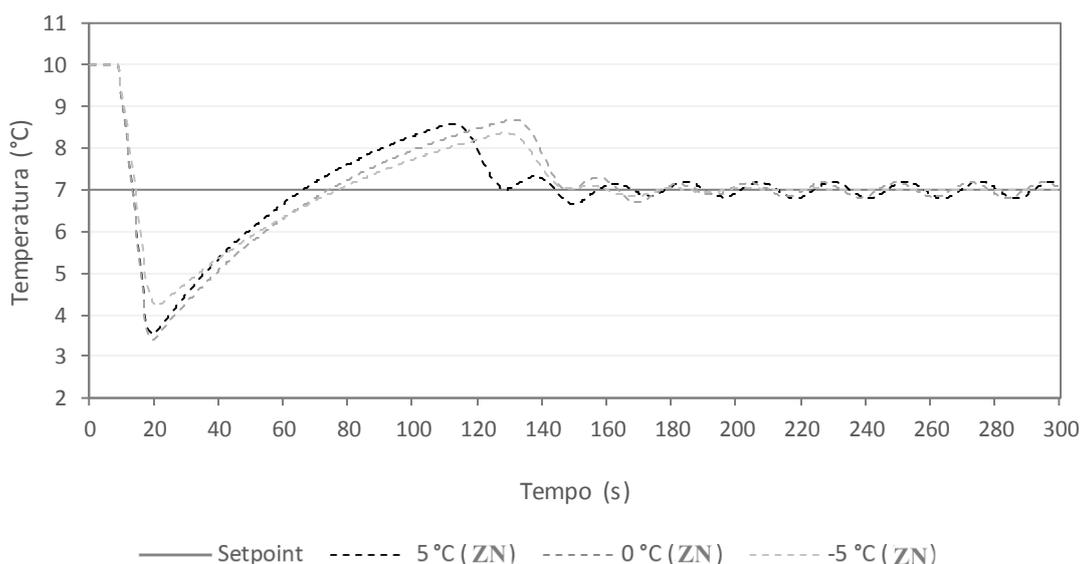


GRÁFICO 4.5 Controlador não adaptativo sintonizado através do método de Ziegler e Nichols

O controlador sintonizado através do método de Cohen e Coon foi capaz de rastrear o setpoint com pequenas oscilações e apresentou um sobressinal de 63,14%. É possível observar no GRA 4.6 que a temperatura desceu até aproximadamente 2,58°C e posteriormente subiu até aproximadamente 8,96°C até finalmente permanecer oscilando cerca de 0,1°C em torno do setpoint.

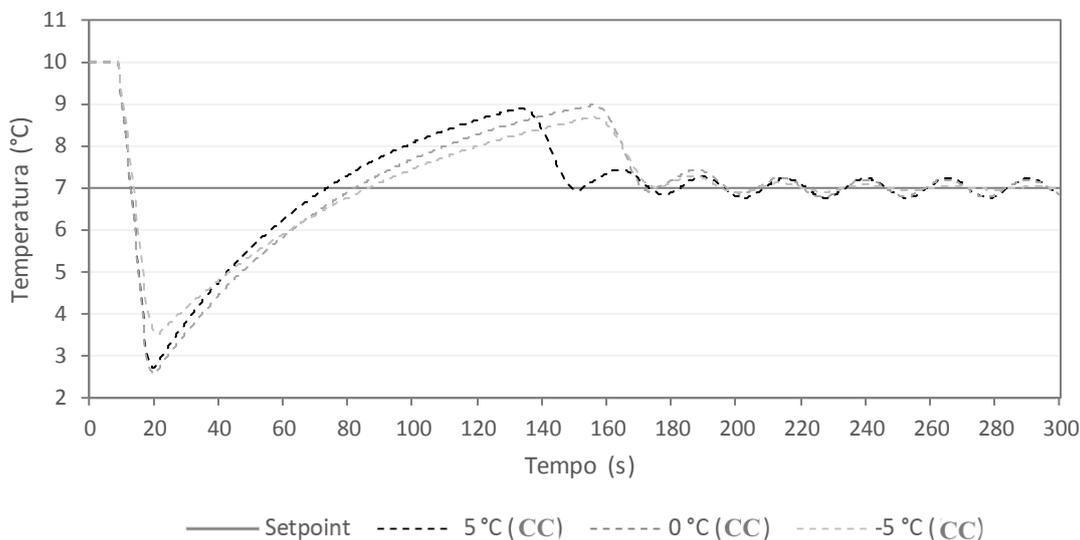


GRÁFICO 4.6 Controlador não adaptativo sintonizado através do método de Cohen Coon

O Controlador sintonizado através do método SIMC foi capaz de rastrear o setpoint com pequenas oscilações no início e um sobressinal de 8,29%. A temperatura desceu cerca de 0,5 °C até finalmente rastrear o setpoint com erro nulo como pode ser observado no GRA 4.7.

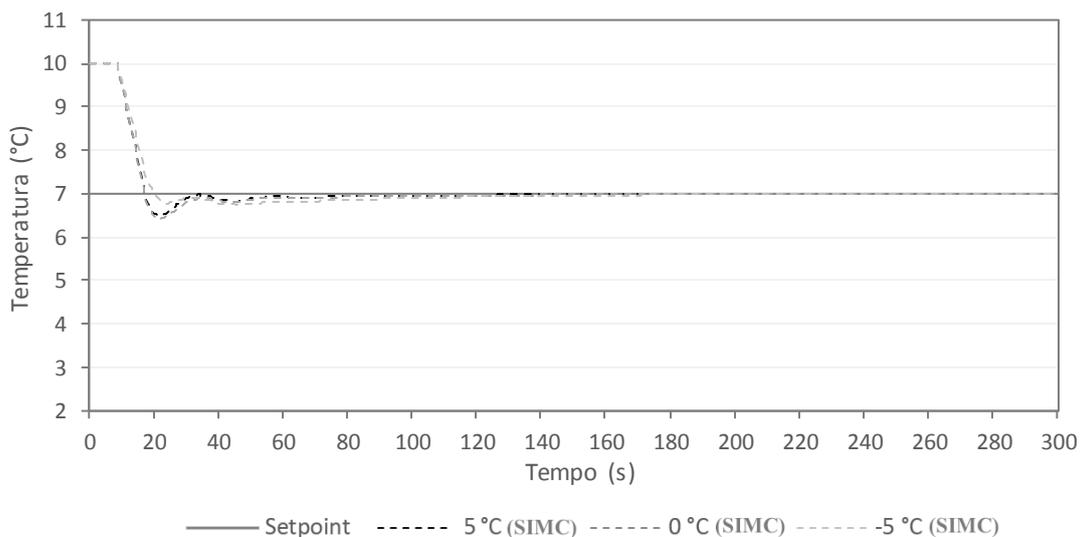


GRÁFICO 4.7 Controlador não adaptativo sintonizado pelo método SIMC

O controlador sintonizado pelo método ABC apresentou um sobressinal de 24,71%. O superaquecimento desceu até 5,38°C até finalmente subir e apresentar oscilações de aproximadamente 0,17 °C em torno do setpoint como pode ser observado no GRA 4.8.

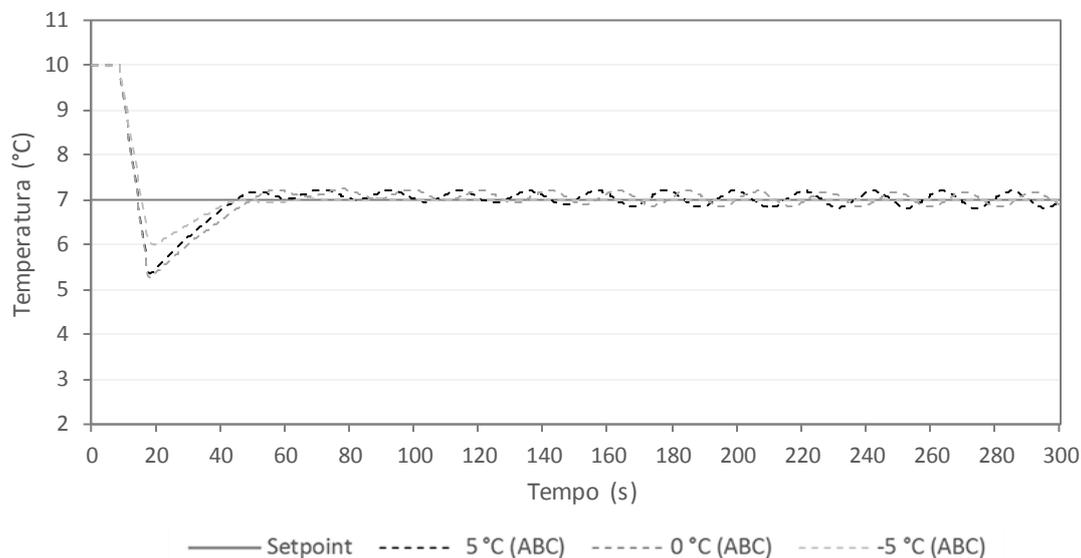


GRÁFICO 4.8 Controlador não adaptativo sintonizado pelo método ABC

Afim de avaliar o desempenho dos quatro controladores estudados foram analisados os índices MAE, IAE e RMSE. As TABs 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam esses índices para as temperaturas de evaporação de 5°C, 0°C e -5°C.

TABELA 4.4 Índices de desempenho para o controlador não adaptativo na temperatura de evaporação de 5°C

	MAE	RMSE	IAE
Ziegler e Nichols	3,48	1,09	196,61
Cohen e Coon	4,28	1,34	256,48
SIMC	0,51	0,60	50,43
ABC	1,64	0,59	87,10

TABELA 4.5 Índices de desempenho para o controlador não adaptativo na temperatura de evaporação de 0°C

	MAE	RMSE	IAE
Ziegler e Nichols	3,61	1,18	221,52
Cohen e Coon	4,42	1,46	291,37
SIMC	0,58	0,60	53,53
ABC	1,73	0,65	91,22

TABELA 4.6 Índices de desempenho para o controlador não adaptativo na temperatura de evaporação de -5°C

	MAE	RMSE	IAE
Ziegler e Nichols	2,79	1,00	174,08
Cohen e Coon	3,48	1,24	241,54
SIMC	0,26	0,61	59,34
ABC	1,00	0,61	52,50

Assim como para os controladores adaptativos, os controladores SIMC e ABC não adaptativos se destacaram em relação aos controladores de Ziegler e Nichols e Cohen Coon. É importante observar também que o controlador SIMC pareceu tolerar melhor as variações no modelo da planta. Dessa forma, foram realizados testes experimentais para os controladores ABC e SIMC tanto adaptativos quanto não adaptativos.

4.3 Resultados Experimentais

Foram realizados testes experimentais nas temperaturas de evaporação de -3°C , 3°C e 9°C . Inicialmente o superaquecimento era de 10°C e após o sistema entrar em regime estacionário, foi dado um degrau no setpoint para 7°C . Durante os testes a temperatura de condensação foi mantida em aproximadamente 50°C e a velocidade do compressor em 650 RPM.

4.3.1 O Controlador Adaptativo

O GRA 4.9 mostra a resposta do superaquecimento para a temperatura de evaporação de 9°C . É possível observar que o método SIMC inicialmente apresentou um aumento no superaquecimento após o degrau de setpoint, atingindo a temperatura de $10,25^{\circ}\text{C}$ por cerca de 54s e posteriormente a temperatura diminuiu lentamente, levando aproximadamente 334s para atingir o setpoint.

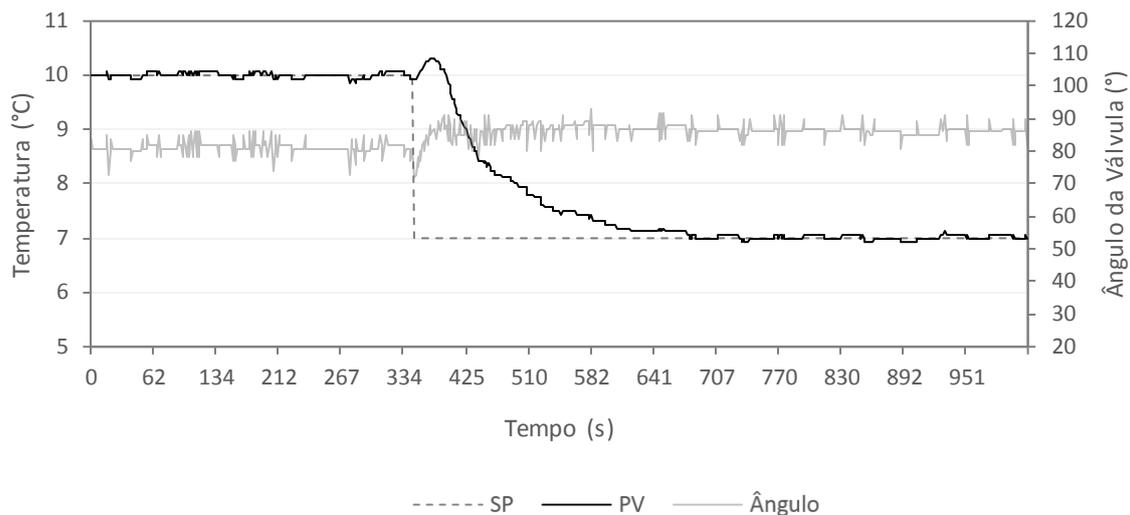


GRÁFICO 4.9 Controlador sintonizado pelo método SIMC e temperatura de evaporação de 9°C

A resposta do superaquecimento para o controlador ABC, GRA 4.10, não apresentou oscilações e nem sobressinal e a temperatura desceu rapidamente, por cerca de 215s, até atingir o valor de 7,25 °C. Posteriormente a temperatura decresceu lentamente, totalizando 298s até atingir o setpoint desejado.

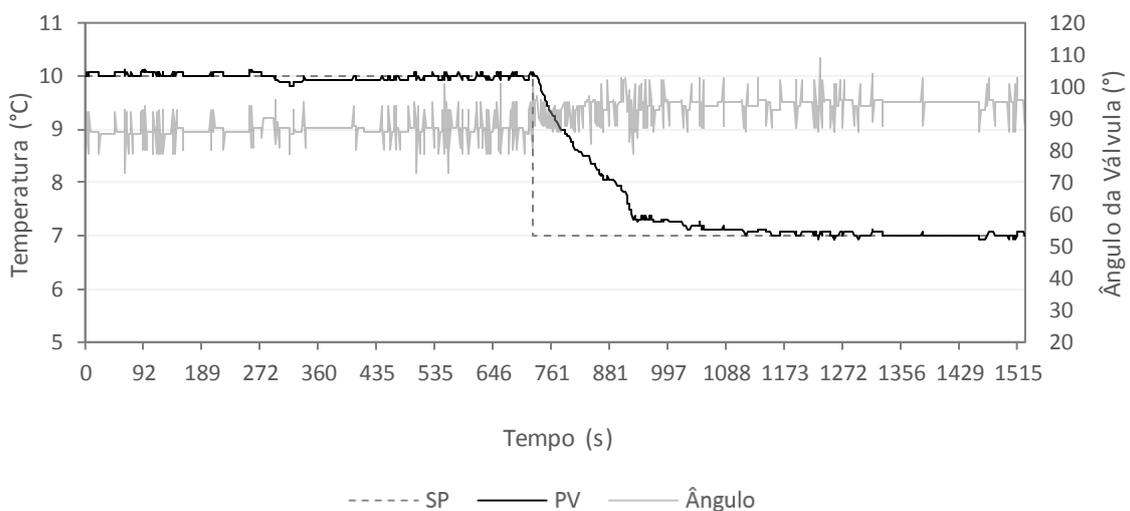


GRÁFICO 4.10 Controlador sintonizado pelo método ABC e temperatura de evaporação de 9°C

Para comparar os dois métodos, foram avaliados os índices de desempenho conforme a TAB 4.7. É possível verificar que para todos os índices avaliados o ABC se destacou.

TABELA 4.7 Índices de desempenho na temperatura de evaporação de 9°C

	MAE	RMSE	IAE
SIMC	3,31	0,91	236,06
ABC	1,37	0,85	234,34
Melhora %	58,61	6,59	0,72

O teste realizado na temperatura de evaporação de 3°C mostrou que a resposta do superaquecimento utilizando-se o controlador SIMC, GRA 4.11, não apresentou oscilações e foi capaz de rastrear o novo setpoint de 7°C em 275 s.

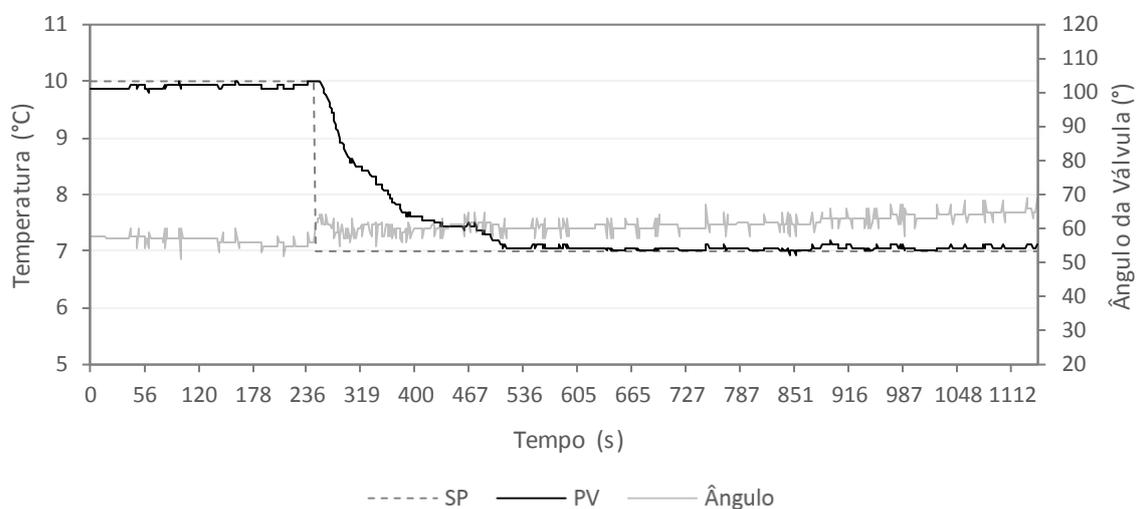


GRÁFICO 4.11 Controlador sintonizado pelo método SIMC e temperatura de evaporação de 3°C

A resposta do superaquecimento utilizando-se o controlador ABC, GRA 4.12, apresentou uma descida rápida de aproximadamente 35s até a temperatura de $8,06^{\circ}\text{C}$, depois a temperatura desce mais lentamente até rastrear o setpoint desejado de 7°C com um total de 296s.

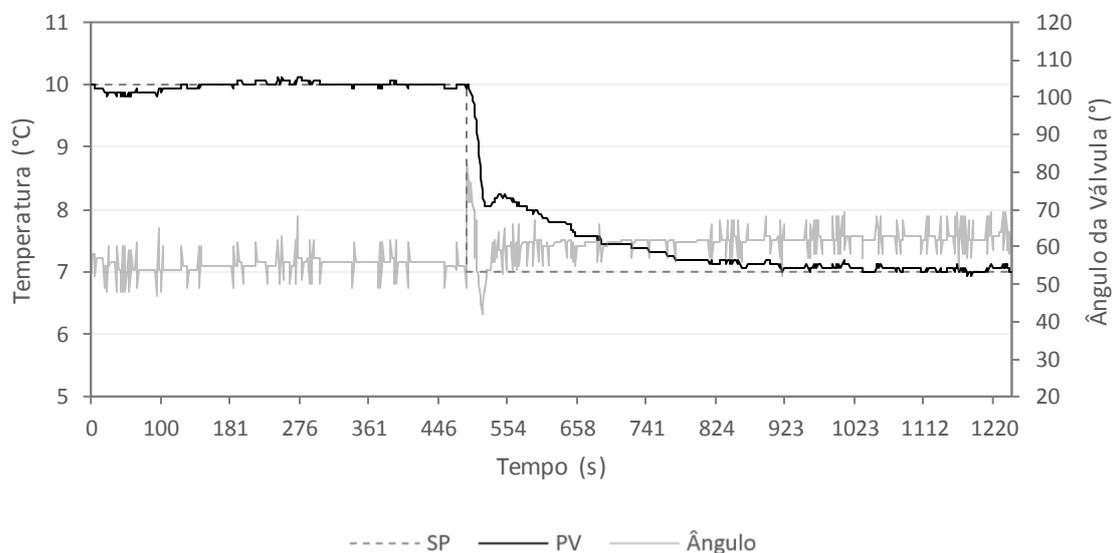


GRÁFICO 4.12 Controlador sintonizado pelo método ABC e temperatura de evaporação de 3°C

É possível observar na TAB 4.8 que o controlador ABC, assim como no teste para a temperatura de evaporação de 9°C se destacou nos índices de desempenho avaliados.

TABELA 4.8 Índices de desempenho na temperatura de evaporação de 3°C

	MAE	RMSE	IAE
SIMC	1,31	0,71	207,24
ABC	1,18	0,60	196,04
Melhora %	9,92	15,49	5,40

O teste realizado com a temperatura de evaporação de -3°C mostrou que a resposta do superaquecimento para o controlador SIMC, GRA 4.13, desceu até uma temperatura de 6,37 °C e posteriormente subiu até 7,52 °C antes de rastrear o setpoint. O sistema apresentou uma pequena oscilação que durou aproximadamente 65s e o setpoint foi rastreado com um tempo total de aproximadamente 313s. É possível observar ainda que durante a queda no valor do superaquecimento ocorreu uma saturação da abertura válvula em 30°, que foi definido como valor mínimo afim e evitar danos ao evaporador.

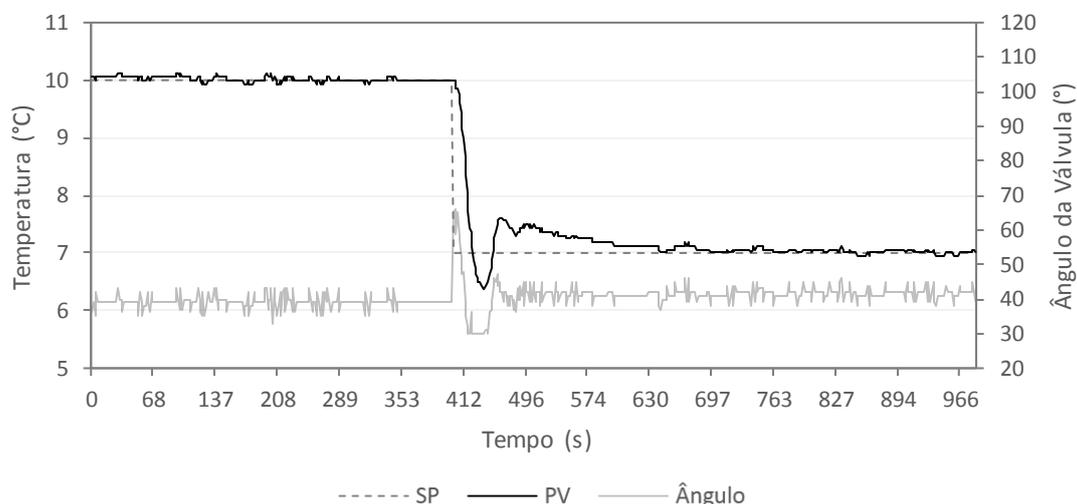


GRÁFICO 4.13 Controlador sintonizado pelo método SIMC e temperatura de evaporação -3°C

A resposta do sistema ao controlador sintonizado pelo método ABC, GRA 4.14, o superaquecimento desceu até uma temperatura de 6,31 °C e posteriormente subiu até 7,31 °C antes de rastrear o setpoint. O sistema apresentou uma pequena oscilação que durou aproximadamente 61s e o setpoint foi rastreado com um tempo total de aproximadamente 308s. Assim como para o controlador SIMC, nesse teste também é possível verificar um período de saturação da abertura da válvula até que o superaquecimento começasse a aumentar novamente.

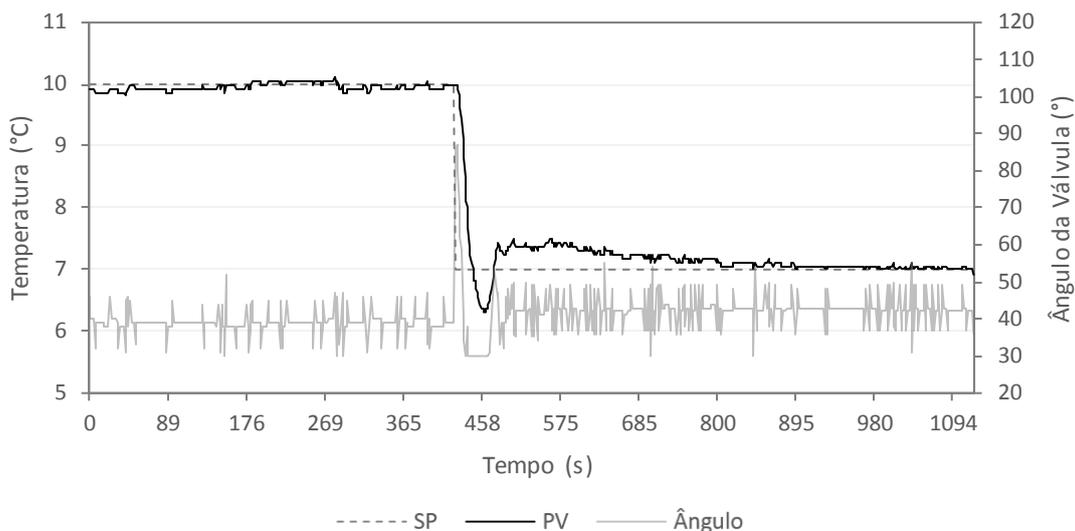


GRÁFICO 4.14 Controlador sintonizado pelo método ABC e temperatura de evaporação -3°C

É possível observar na TAB 4.9 que para esse teste, o método SIMC se destacou tanto para o RMSE quanto para o IAE.

TABELA 4.9 Índices de desempenho na temperatura de evaporação de -3°C

	MAE	RMSE	IAE
SIMC	0,63	0,40	86,40
ABC	0,63	0,42	110,26
Melhora %	-	-4,76	-22,00

Avaliando os resultados experimentais para o controlador adaptativo é possível verificar que tanto o controlador SIMC, quanto o ABC foram capazes de rastrear o setpoint, para os testes nas temperaturas de evaporação de 9°C e 3°C o método ABC se destacou nos índices de desempenho avaliados, já no teste com a temperatura de evaporação de -3°C o controlador SIMC superou o ABC.

4.3.2 O Controlador Não Adaptativo

Para o controlador não adaptativo, foram realizados testes em temperaturas de evaporação de -3°C e 3° e utilizados os ganhos do controlador sintonizados para a temperaturas de evaporação de 10°C . Os ganhos não foram alterados conforme a temperatura de evaporação varia. Assim como nos testes anteriores, o superaquecimento inicial era de 10°C e após o sistema entrar em regime estacionário, foi dado um degrau no setpoint para 7°C .

No primeiro teste realizado foi considerando uma temperatura de evaporação de 3°C . No GRA 4.15 é possível observar que o superaquecimento desceu até

aproximadamente $6,18^{\circ}\text{C}$, durante esse período ocorreu saturação da abertura da válvula em 30°C . Pode-se verificar também um sobressinal de $11,71\%$ e pequenas oscilações até atingir o setpoint após 150s .

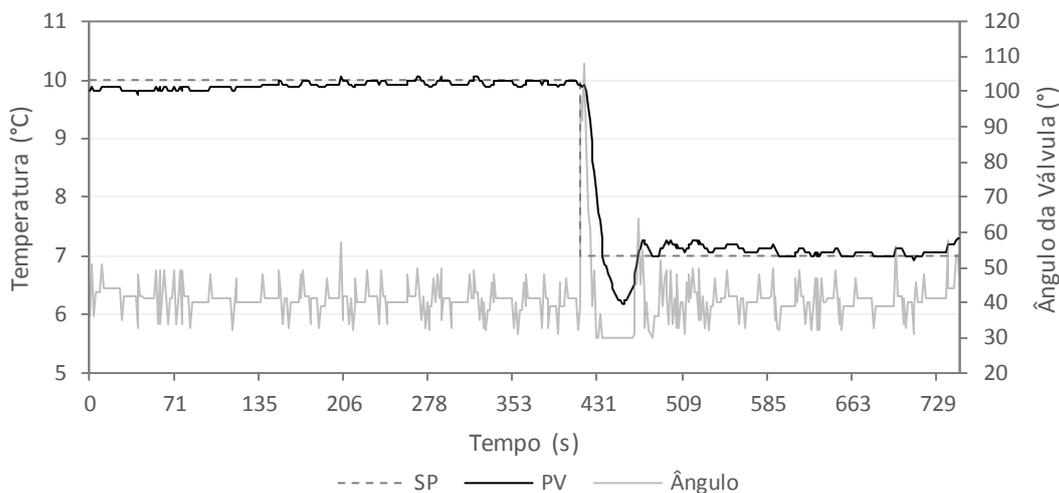


GRÁFICO 4.15 Controlador não adaptativo sintonizado pelo método SIMC e temperatura de evaporação 3°C

A resposta do sistema ao controlador não adaptativo sintonizado pelo método ABC, GRA 4.16, o superaquecimento apresentou um sobressinal de $10,71\%$ e rastreou o setpoint sem oscilações em 164s .

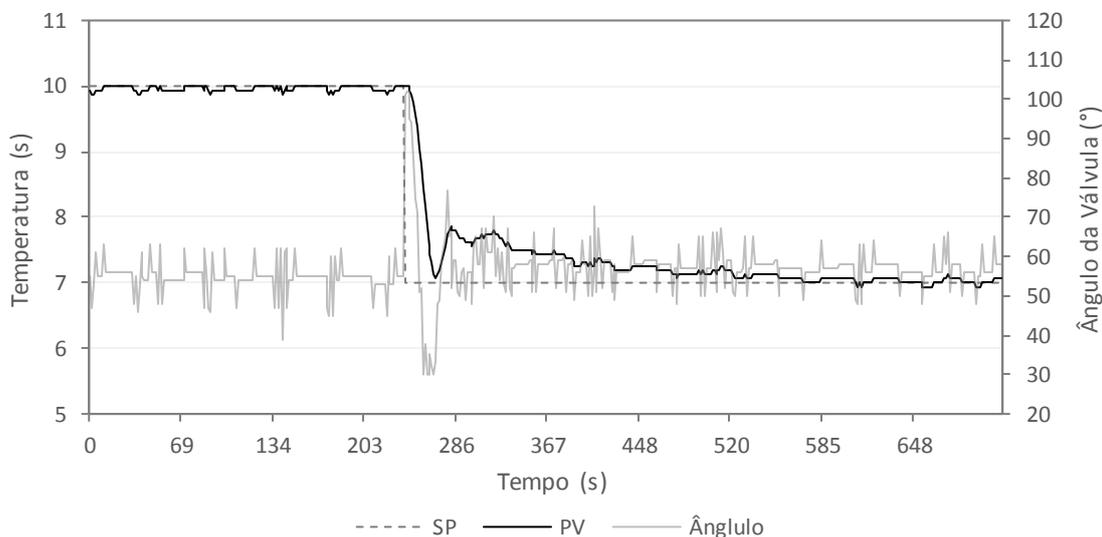


GRÁFICO 4.16 Controlador não adaptativo sintonizado pelo método ABC e temperatura de evaporação 3°C

O segundo teste com controladores não adaptativos foi realizado com uma temperatura de evaporação de -3°C . É possível observar no GRA 4.17 que para o controlador SIMC o superaquecimento desceu até $5,81^{\circ}\text{C}$ com saturação da abertura da

válvula em 30°C, e posteriormente o superaquecimento subiu até rastrear o setpoint levando aproximadamente 89s.

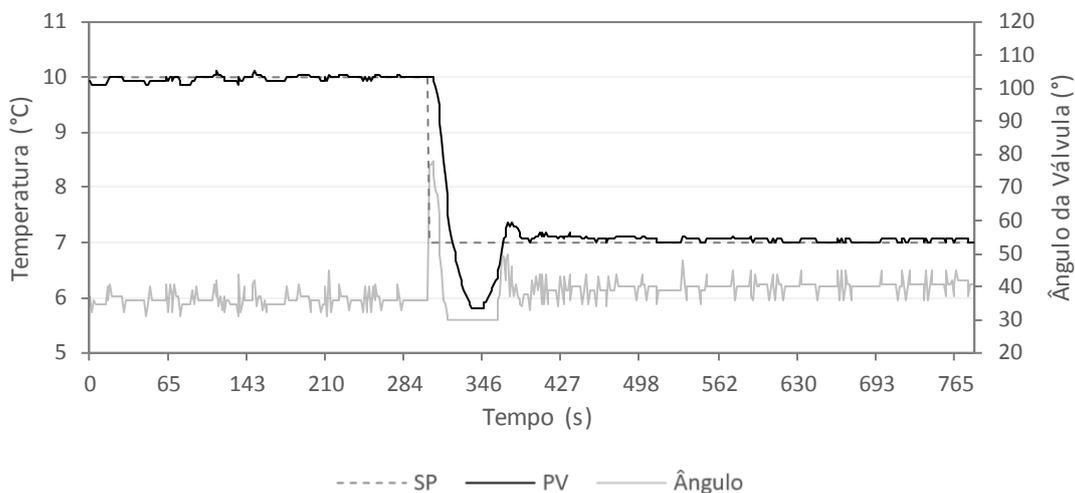


GRÁFICO 4.17 Controlador não adaptativo sintonizado pelo método SIMC e temperatura de evaporação -3°C

O GRA 4.19 representa a resposta do superaquecimento ao controlador ABC. O superaquecimento desceu até 6,68°C e posteriormente apresentou um sobressinal de 7,14% até rastrear o setpoint após 215s.

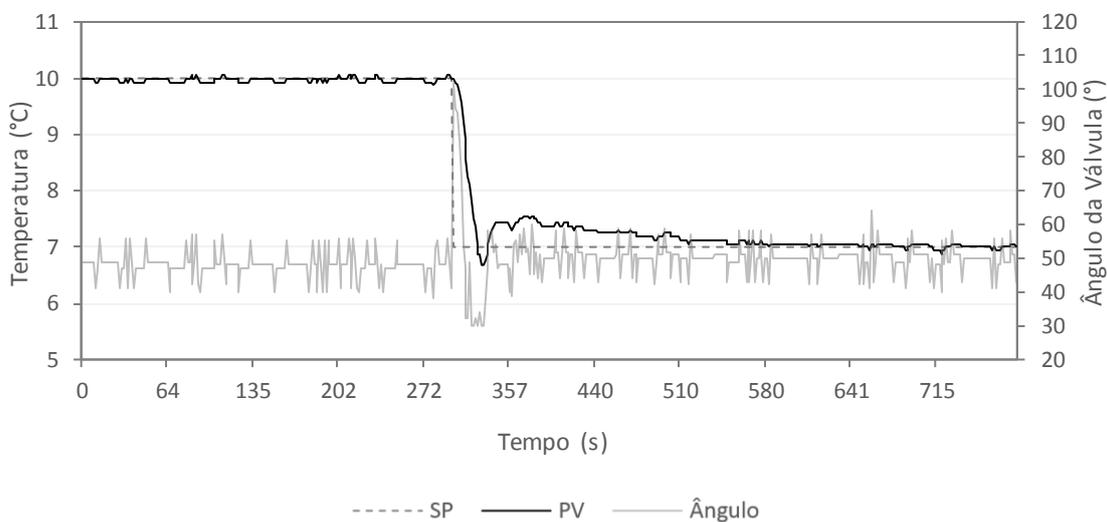


GRÁFICO 4.18 Controlador não adaptativo sintonizado pelo método ABC e temperatura de evaporação -3°C

4.3.3 Comparação Entre os Controladores Adaptativo e Não Adaptativo

Os testes teóricos mostraram que os controladores adaptativos apresentaram os melhores índices de desempenho em relação aos não adaptativos. Nos resultados experimentais, os controladores não adaptativos apresentaram bons resultados quando comparados com os adaptativos.

As TABs 4.10 e 4.11 apresentam a comparação entre os controladores SIMC adaptativo e não adaptativo para as temperaturas de evaporação de 3°C e -3°C. É possível observar que em ambas as situações o controlador não adaptativo apresentou melhores índices. Já para a temperatura de evaporação de -3°C, o controlador adaptativo apresentou os melhores índices de desempenho com exceção do IAE que mesmo superior está bem próximo, com um aumento de 5,21%.

TABELA 4.10 Índices de desempenho do SIMC e temperatura de evaporação de 3°C

	MAE	RMSE	IAE
SIMC Adaptativo	1,31	0,71	207,24
SIMC Não Adaptativo	0,82	0,39	64,01
Melhora %	-37,40	-45,07	-69,11

TABELA 4.11 Índices de desempenho do SIMC e temperatura de evaporação de -3°C

	MAE	RMSE	IAE
SIMC Adaptativo	0,63	0,40	86,4
SIMC Não Adaptativo	1,19	0,42	81,9
Melhora %	47,06	4,76	-5,21

As TABs 4.12 e 4.13 apresentam a comparação entre os controladores ABC adaptativo e não adaptativo para as temperaturas de evaporação de 3°C e -3°C. É possível observar que em ambas as situações o controlador não adaptativo se destacou, apesar dos valores encontrados para a temperatura de evaporação de -3°C serem próximos.

TABELA 4.12 Índices de desempenho do ABC e temperatura de evaporação de 3°C

	MAE	RMSE	IAE
ABC Adaptativo	1,18	0,60	196,04
ABC Não Adaptativo	0,75	0,49	100,05
Melhora %	-36,44	-18,33	-48,96

TABELA 4.13 Índices de desempenho do ABC e temperatura de evaporação de -3°C

	MAE	RMSE	IAE
ABC Adaptativo	0,63	0,42	110,26
ABC Não Adaptativo	0,50	0,38	81,11
Melhora %	-20,63	-9,52	-26,44

De uma forma geral o controlador não adaptativo se sobressaiu em relação ao adaptativo. O esperado era que o adaptativo fosse melhor, entretanto, devido a proximidade dos pontos testados não foi possível verificar este aspecto.

É possível perceber que a medida que se afasta do ponto de operação para o qual o sistema foi sintonizado, 10°C , os valores alcançados com os dois controladores (adaptativo e não adaptativo) se aproximaram nas duas técnicas de sintonia avaliadas, isso fica evidente nas TABs 4.12 e 4.13 em que a medida que se afasta do ponto de operação os valores encontrados para os índices de desempenho se aproximam. É esperado que para pontos de operação mais distantes daquele considerado na sintonia o controle adaptativo apresente resultados melhores, isso pode ser observado nas TABs 4.10 e 4.11 em que o controlador SIMC Adaptativo superou o não adaptativo nos índices MAE e RMSE e ainda apresentou um valor próximo de IAE com uma diferença de -5,21%.

4.4 Conclusões Parciais

As simulações dos controladores adaptativos mostraram que a resposta do superaquecimento para o controlador ABC foi boa em todos os testes uma vez que foi possível rastrear o setpoint com um baixo sobressinal e poucas oscilações. Nas simulações do controlador não adaptativo, o método SIMC se destacou, levando aproximadamente 150 segundos para efetivamente rastrear o setpoint com pouco sobressinal e sem oscilações. Nos testes experimentais dos controladores adaptativos é possível verificar que tanto o controlador SIMC quanto o ABC foram capazes de rastrear o setpoint e o controlador ABC se destacou em 2 dos três testes realizados.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta a sintonia de um controlador PID adaptativo que regula a abertura e fechamento de uma válvula de expansão eletrônica, para controlar assim o superaquecimento. Os ganhos do controlador foram obtidos utilizando-se os algoritmos ABC, Zigler-Nichols, Cohen-Coon e SIMC para cada ponto de operação. Esses ganhos foram ajustados dependendo da temperatura de evaporação.

A eficiência do controlador foi avaliada através de simulações computacionais para todos os métodos e através de testes experimentais em uma comparação entre o controlador adaptativo ABC e o SIMC, que apresentaram os melhores resultados teóricos.

As simulações dos controladores adaptativos mostraram que a resposta do superaquecimento para o controlador ABC foi boa em todos os testes uma vez que foi possível rastrear o setpoint com um baixo sobressinal e poucas oscilações. Quando comparado com os métodos Zigler-Nichols, Cohen-Coon e SIMC adaptativos, foi possível observar que os valores do IAE e RMSE encontrados para o método ABC foram menores e a ação de controle apresentou uma resposta mais rápida e um menor sobressinal.

Nas simulações do controlador não adaptativo, o método SIMC se destacou, levando aproximadamente 150 segundos para efetivamente rastrear o setpoint com pouco sobressinal e sem oscilações. Já o algoritmo ABC, apesar de rastrear o setpoint, apresentou leves oscilações de 0,17 °C em torno no setpoint. Os métodos de Zigler-Nichols e Cohen-Coon apresentaram um maior sobressinal e um comportamento oscilatório até que o setpoint fosse efetivamente rastreado, o que aconteceu aos 145 segundos para Zigler-Nichols e 140 para Cohen-Coon.

Nos testes experimentais dos controladores adaptativos é possível verificar que tanto o controlador SIMC quanto o ABC foram capazes de rastrear o setpoint. O controlador ABC se destacou em 2 dos três testes realizados, apresentando uma melhora no MAE, RMSE e IAE. Já no teste com a temperatura de evaporação de -3°C o controlador SIMC superou o ABC.

Comparando-se os controladores adaptativos e os não adaptativos, os resultados teóricos mostraram que os controladores adaptativos superavam os não adaptativos em todos os índices avaliados, sendo o ABC e SIMC os melhores. Nos testes experimentais, o resultado esperado era de que o controlador adaptativo apresentasse melhores resultados, entretanto o observado foi que os controladores não adaptativos SIMC e ABC se destacaram. É possível perceber que a medida que se afasta do ponto de operação para o qual o sistema foi sintonizado, 10°C, os valores alcançados com os dois controladores (adaptativo e não adaptativo) se aproximaram nas duas técnicas de sintonia avaliadas. É esperado que para pontos de operação mais distantes daquele considerado na sintonia o controle adaptativo apresente resultados melhores. Um indício disso pode ser verificado quando observamos que o controlador SIMC Adaptativo superou o não adaptativo nos índices MAE e RMSE e ainda apresentou um valor próximo de IAE com uma diferença de -5,21%, conforme as TABs 4.10 e 4.11. Para o ABC, é possível verificar nas TABs 4.12 e 4.13 em que a medida que se afasta do ponto de operação os valores encontrados para os índices de desempenho se aproximam.

Dessa forma, o controlador ABC adaptativo proposto atende ao objetivo de controlar o superaquecimento da planta de refrigeração e mostrou-se uma alternativa com boa performance quando comparado com controladores clássicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABACHIZADEH, M.; YAZDI, M. R. H.; YOUSEFI-KOMA A.; 2010, Optimal Tuning of PID Controllers Using Artificial Bee Colony Algorithm. In IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics.

ABBASS, H.A., 2001, Marriage in honey-bee optimization (MBO): A haplometrosis polygynous swarming approach. Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation, pp. 207–214.

ALEGRIAS, J. G. P.; Análise de desempenho do tubo capilar num sistema de refrigeração de pequeno porte, com variação da velocidade do compressor. Dissertação de Mestrado. Programa de pós graduação em Engenharia Mecânica – UFU, 2009.

ALEGRIAS, J. G. P.; BANDARRA FILHO, E. P.; MENDONÇA, O. S. H., 2010, Efeito das dimensões do tubo capilar como elemento de expansão num sistema de refrigeração doméstico. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande, Paraíba.

APREA, C., MASTRULLO, R., 2002, Experimental Evaluation of Electronic and Thermostatic Expansion Valves Performances using R22 and R407C, Applied Thermal Engineering 22, pp. 205-218.

ÅSTRÖM, K. J., & HÄGGLUND, T., 1995. PID controllers: Theory, design and tuning (2nd ed.). Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America.

AZEEM M.F.; SAAD A.M., 2004, Modified Queen Bee Evolution Based Genetic Algorithm for Tuning of Scaling Factors of Fuzzy Knowledge Base Controller. IEEE INDICON 2004 Proceedings of the India Annual Conference, pp. 299–303.

BAHAMISH, H.A.A.; ABDULLAH, R.; SALAM, R.A., 2008, Protein Conformational Search Using Bees Algorithm. Proceedings of the 2th Asia International Conference on Modelling & Simulation, pp. 911–916.

BATISTA, L. C. F.; FERNANDES, G. Q.; JESUS, G. A. R.; MAIA, A. A. T. 2015. Comparative Study of PID Controller Tuning Techniques for First Order Plus Dead Time Systems. In 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering, Rio de Janeiro, Brazil.

- BAYKASOGLU, A.; ÖZBAKIR, L.; TAPKAN, P., 2007, Artificial Bee Colony Algorithm and Its Application to Generalized Assignment Problem. In: Swarm Intelligence: Focus on Ant and Particle Swarm Optimization, F.T.S. Chan and M.K. Tiwari (Eds.), Itech Education and Publishing, Vienna, Austria, pp. 113–144.
- BEGHI, A., L. CECCHINATO, AND M. RAMPAZZO. 2011. On line, auto tuning control of electronic expansion valves. *International Journal of Refrigeration* 34, pp 1151–61.
- BENNETT, S., 1984. “Nicholas Minorsky and the automatic steering of ships”. *IEEE Control Systems Magazine*, 4(4), 10- 15.
- BENNETT, S., 1996. “A brief history of automatic control”. *IEEE Control Systems Magazine*, 17-25.
- BENNETT, S., 2001. “The past of pid controllers”. *Annual Reviews in Control*, 25, 43-53.
- BHAGADE, A. S.; PURANIK, P. V. 2012. Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm for Vehicle Routing Optimization Problem. In *International Journal of Soft Computing and Engineering* 2.
- BONABEAU, E.; DORIGO, M.; THERAULAZ, G. 1999. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*, New York: Oxford University Press.
- BORJA, J. A. T. 2006. *Automação e Controle Inteligente on-line de Sistemas de Refrigeração Utilizando Redes Neurais Artificiais*. Doctoral Thesis presented to the post-graduation program in Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia, Minas Gerais, Brazil.
- CAMPOS, M. C. M. M.; TEIXEIRA, H. C. G. 2006, *Controles típicos de equipamentos e processos industriais*. São Paulo: Blücher.
- CARMO, M. J.; GOMES, F. J., 2006, Diagnóstico de controladores PID e performance de malhas industriais em ambiente multifuncional integrado. *Anais: CLCA XII Latin American Congress on Automatic Control*. Salvador: UFBA.
- CARMO, M. J., 2006, *Ambiente Educacional Multifuncional Integrado Para Sintonia e Avaliação do Desempenho de Malhas Industriais de Controle*. Universidade Federal de Juiz de Fora.

- COELHO, A. A. R.; ALMEIDA, O. M.; COELHO, L. S. Controlador nebuloso PID auto-ajustável com especificação de margem de fase e de ganho: implementação e análise de um processo não linear de luminosidade. Anais: XIII – Congresso Brasileiro de Automática. Florianópolis, 2000.
- COHEN, G. H.; COON, G. A. Theoretical considerations of retarded control. ASME Transactions, Vol. 75, p. 827–834, 1953.
- COSTA, F. N., 2014, Análise comparativa da válvula de expansão eletrônica e do tubo capilar em sistemas de refrigeração. Universidade Federal de Campinas.
- CHOI, J.; KIM, Y. 2004. Influence of the expansion device on the performance of a heat pump using R407C under a range of charging conditions. In International Journal of Refrigeration 27.
- DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A., 1991, Positive feedback as a search strategy. Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy, Technical Report TR 91-016.
- DORIGO, M.; STUTZLE, T. 2004. Ant Colony Optimization, MIT, Cambridge.
- DOSSAT, R. J. Princípios de Refrigeração, McGraw-Hill, 1991.
- FABRIS, G.; JESUS, G. A. R.; GALVEZ, J. M.; MACHADO, L., 2006, Desenvolvimento de um Modelo Semi-Empírico de uma Válvula de Expansão Termostática de um Sistema de Refrigeração. Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering – ENCIT, Curitiba, Brasil.
- FATHIAN, M.; AMIRI, B., 2008, A honeybee-mating approach for cluster analysis. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 38, No. 7–8, pp. 809–821.
- GHISI, E., GOSCH, S. and LAMBERTS, R.; Electricity end-uses in the residential sector of Brazil. Energy Policy, v. 35, n. 8, p. 4107-4120, 2007.
- HUSSAIN, K. M., ZEPHERIN, R. A., KUMAR, M. S., & KUMAR, S. G., 2014. “Comparison of PID Controller Tuning Methods with Genetic Algorithm for FOPTD System”. Int. Journal of Engineering Research and Applications, 4(2), 308-314.

INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P.; BERGMAN, T. Fundamentos de transferência de calor e massa. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

KAR, A. K., 2016, Bio inspired computing –A review of algorithms and scope of applications. *Expert Systems With Applications* 59, pp 20 - 32.

LAZZARIN, R. AND NORO, M., 2008, Experimental Comparison of Electronic and Thermostatic Expansion Valves Performances in an Air Conditioning Plant, *International Journal of Refrigeration* 31, pp. 113-118.

LEIVISKÄ, K.; JOENSUU, I., 2006, Chemotaxis for controller tuning. *Proceedings of the 2nd Annual Symposium of the Nature-inspired Smart Information Systems (Ni-SIS)*.

LUCIC, P.; TEODOROVIC, D., 2001. Bee System: Modeling Combinatorial Optimization Transportation Engineering Problems by Swarm Intelligence. *Preprints of the TRISTAN IV Triennial Symposium on Transportation Analysis*, pp. 441–445.

MAIA, A. A. T.; HORTA-GUTIERREZ, J. C.; KOURY, R. N.N.; MACHADO, L. 2014, Superheating control using an adaptive PID controller. In *HVAC&R Research* 20.

MAIA, A. A. T.; SILVA, M.A.; KOURY, R.N.N.; MACHADO, L. 2010. Control of an electronic expansion valve using an adaptive PID Controller. *Proceedings of International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, Purdue, IN, July 12–15*.

MAIA, F. B.; CARRARO, L. O.; FERREIRA, M. S.; CARMO, M. J., 2011, Auditoria da identificação e controle de malhas que operem com atraso de transporte utilizando índices não intrusivos. *Anais: XIV – Encontro de modelagem Computacional, II– Encontro de Ciência e Tecnologia de Materiais*. Nova Friburgo: IPRJ, UERJ.

MARCINICHEN, J. B.; MELO, C.; STÄHELIN, R., 2004, Análise Comparativa Entre um Tubo Capilar e uma Válvula de Expansão Eletrônica num Sistema Doméstico de Refrigeração. *Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering – ENCIT, Rio de Janeiro, Brasil*.

MILLONAS, M. M. (1994). Swarms, phase transitions, and collective intelligence. In C.G. Langton (Ed.), *Artificial Life III*, pp. 417–445. Reading, MA: Addison-Wesley.

PAREEK, S.; KISHNANI, M.; GUPTA, R.; Application of Artificial Bee Colony Optimization For Optimal PID Tuning. *IEEE International Conference on Advances in Engineering & Technology Research*, 2014.

PARK, C.; LEE, H.; HWANG, Y.; RADERMACHER, R. 2015. Recent advances in vapor compression cycle technologies. In international journal of refrigeration 60.

PHAM, D.T.; KOÇ, E.; GHANBARZADEH, A.; OTRI, S., 2006a, Optimisation of the Weights of Multi-Layered Perceptions Using the Bees Algorithm. Proceedings of 5th International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems, Sakarya, Turkey, pp. 38–46.

PHAM, D.T.; SOROKA, A.J.; GHANBARZADEH, A.; KOÇ, E.; OTRI, S.; PACKIANATHER M., 2006b, Optimising Neural Networks for Identification of Wood Defects Using the Bees Algorithm. IEEE International Conference on Industrial Informatics, Vol. 8, pp. 1346–1351.

PHAM, D.T.; OTRI, S.; GHANBARZADEH, A.; KOÇ, E., 2006c, Application of the Bees Algorithm to the Training of Learning Vector Quantisation Networks for Control Chart Pattern Recognition. ICTTA'06 Information and Communication Technologies, pp. 1624–1629.

PHAM, D.T.; AFIFY, A.; KOÇ, E., 2007, Manufacturing cell formation using the bees algorithm. Proceedings of the Innovative Production Machines and Systems Virtual Conference.

PORTO, M. P.; PEDRO, T.C. H.; MACHADO, L.; KOURY, R. N. N.; BANDARRA FILHO, P. E.; COIMBRA, C. F. M., 2015, Optimized heat transfer correlations for pure and blended refrigerants. International Journal of Heat and Mass Transfer. v 85, pp 577-584.

PÖTTKER, G., 2006, Análise do efeito combinado de compressores e expansores de ação variável sobre o desempenho de sistemas de refrigeração. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

QIN, L.D.; JIANG, Q.Y.; ZOU, Z.Y.; CAO, Y.J., 2004, A Queen-Bee Evolution Based on Genetic Algorithm for Economic Power Dispatch. UPEC 2004 39th International Universities Power Engineering Conference, pp. 453–456.

RIVERA, D. E.; MORARI, M.; SKOGESTAD, S. 1986. Internal Model Control 4. PID Controller Design, In Ind. Eng.Chem. Process Des. Dev., 252-265.

- SERAPIÃO, A. B. S. 2009. Fundamentos de Otimização por Inteligência de Enxames: Uma Visão Geral. In Revista Controle & Automação 20.
- ŠEŠUM-ČAVIĆ, V.; KÜHN, E.; KANEV, D., 2016. Bio-inspired search algorithms for unstructured P2P overlay networks. *Swarmand Evolutionary Computation* 29, pp 73 – 93.
- SHANG, Y.; WU, A.; FANG, X.; 2015, A study on the modeling of the minimal stable superheat for a variable speed refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 59.
- SKOGESTAD, S., 2003. Simple analytic rules for model reduction and PID Controller tuning. In *Journal of Process Control* 13, 291-309.
- STOECKER, W. F., JONES, J.W., 1985, *Refrigeração e Ar Condicionado*, Makron Books do Brasil Editora, São Paulo, 481p.
- SUCUPIRA, I. R., Métodos Heurísticos Genéricos: Metaheurísticas e Hiper-Heurísticas, Monografia, Departamento de Ciência da Computação, Universidade de São Paulo, 2004.
- SUNG, H.J.; 2003, Queen-Bee Evolution for Genetic Algorithms. *Electronic Letters*, Vol. 39, No. 6, pp. 575–576.
- TASSOU, S. A., AI-NIZARI, H. O., 1993. Investigation of the effects of thermostatic and electronic expansion valves on the steady-state an transient performance of commercial chillers. *International Journal of Refrigeration* 16.
- TASSOU, S. A., AI-NIZARI, H. O., 1993. Effect of Refrigerant Flow Control on the Thermodynamic Performances of Reciprocating Chillers. *Applied Energy*, 45.
- TIBO, G. A. M.: Projeto e montagem de um banco de testes de máquinas frigoríficas. Trabalho de graduação, Curso de Engenharia Mecânica da UFMG, 64 p, 1999.
- WARWICK, K. 1996, *An introduction to control systems*. 2 ed. World Scientific, 36--2p.

TRABALHOS PUBLICADOS

PANOEIRO, N. M.; KOURY, R. N. N.; MACHADO, L.; MAIA, A. A. T.; 2016a, Development of an Adaptive PID Controller for Superheating Control Employing Artificial Bee Colony. In 16th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue. West Lafayette, USA.

PANOEIRO, N. M.; KOURY, R. N. N.; MACHADO, L.; MAIA, A. A. T.; FERREIRA, R. P. M., 2016b, Comparação entre Métodos Clássicos e o Algoritmo da Colônia Artificial de Abelhas na Sintonia de um Controlador PID Adaptativo. XXXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering – CILAMCE, Brasília, Brasil.