

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS**

Everton Machado

**Desenvolvimento de algoritmos de detecção  
e correção de falha em sensores de  
temperatura de refrigeradores domésticos**

Florianópolis  
2019



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS**

Everton Machado

**Desenvolvimento de algoritmos de detecção e  
correção de falha em sensores de temperatura de  
refrigeradores domésticos**

Dissertação Submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas.

Orientador:

Alexandre Trofino Neto, Dr.

Coorientador:

Cláudio Melo, Dr.

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Machado, Everton

Desenvolvimento de algoritmos de detecção e correção de falha em sensores de temperatura de refrigeradores domésticos / Everton Machado ; orientador, Alexandre Trofino, coorientador, Cláudio Melo, 2019.

96 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia de Automação e Sistemas. 2. Detecção de falha. 3. Refrigeradores domésticos. 4. Falhas de offset. I. Trofino, Alexandre. II. Melo, Cláudio. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas. IV. Título.

Everton Machado

**Desenvolvimento de algoritmos de detecção e  
correção de falha em sensores de temperatura de  
refrigeradores domésticos**

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do Título de "Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas", e aprovada em sua forma final pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas

Florianópolis, 8 de março de 2019

---

Prof. Dr. Werner Kraus Junior  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Automação e Sistemas

---

Prof. Dr. Alexandre Trofino Neto  
Orientador

---

Prof. Dr. Cláudio Melo  
Coorientador

**Banca examinadora:**

---

Prof. Dr. Joaquim Manoel Gonçalves  
Instituto Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Felipe Gomes de Oliveira Cabral  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Marcelo de Lellis Costa de Oliveira  
Universidade Federal de Santa Catarina

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

Aos meus orientadores Alexandre Trofino, pelos conhecimentos transmitidos, e Cláudio Melo pelo exemplo de profissionalismo, dedicação a profissão e valiosa ajuda tanto no trabalho como na minha carreira profissional.

Ao engenheiro Alexsandro dos Santos Silveira, pela verdadeira amizade e pela ajuda fundamental durante todas as fases deste e de outros projetos nos quais trabalhamos juntos desde o início da minha jornada no POLO.

Ao Engenheiro Guilherme "Tchê" Senger, pelo profissionalismo e competência com qual me orientou nos primeiros projetos de pesquisa realizados no POLO em parceria com a Embraco Compressores.

Aos amigos Bruno Verardi, Guilherme Winck, Paulo Nishimoto, "Pedrinho" Brugmann, Felipe Félix, pelos incontáveis momentos de descontração e inúmeras reuniões de projeto no "Meu escritório".

Aos professores Joaquim Manoel Gonçalves, Marcelo de Lellis e Felipe Cabral, membros da banca examinadora, pelas valiosas contribuições a este trabalho.

À empresa Whirlpool S/A, em especial aos engenheiros Daniel Noronha Mass e Guilherme Massochin, pelo suporte técnico e discussões ao longo do trabalho, que contribuíram para que este projeto tivesse imediata aplicabilidade a nível industrial.





"Mesmo que já tenha feito uma longa caminhada, sempre haverá mais um caminho a percorrer"

Santo Agostinho



## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e implementação de algoritmos de detecção e correção de falhas de *offset* em sensores de temperatura de refrigeradores domésticos. Foram propostos dois algoritmos de detecção de falha, diferenciados na forma de avaliação do sensor de degelo. Adicionalmente, foram desenvolvidos dois sistemas de correção de falhas, o primeiro baseado em compensação de desvios através de equações matemáticas, e o segundo baseado em um sistema de controle alternativo que entra em operação em condições de falha do sensor. Foram empregados critérios de desempenho largamente usados em trabalhos de detecção de falha na literatura. Um dos algoritmos de detecção propostos obteve 86,5% de detecções corretas com nenhum falso positivo, detectando as falhas com maior potencial de provocar efeitos de perda de performance perceptíveis ao consumidor. Os sistemas de correção propostos também obtiveram bom resultados, levando o refrigerador a operar em condições de temperaturas de compartimento muito similares àquelas em que operava antes de entrar em modo de falha.

**Palavras-chave:** Detecção de falha, Refrigeradores domésticos, Falhas de offset



## ABSTRACT

This work presents the development and implementation of both detection and correction algorithms for *offset* faults in temperature sensors of household refrigerators. Two fault detection algorithms were proposed, differentiated in the evaluation of the defrost sensor. In addition, two fault correction systems were developed, the first one based on compensation of *offset* through mathematical equations and the second one based on an alternative control system that goes into operation under fault conditions of the sensor. Performance criteria widely used in fault detection state of art were employed for this research. One of the proposed detection algorithms obtained 86.5% of correct detections with no false positives, detecting faults with high potential to generate performance losses perceptible to the consumer. The proposed correction systems also performed well, making the refrigerator operate in conditions very similar to those in which it operated before entering failure mode.

**Keywords:** Fault detection, Household refrigerators, Offset faults



---

# Sumário

---

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Apresentação . . . . .	1
1.2	Objetivos . . . . .	4
1.3	Organização do documento . . . . .	4
1.4	Informações adicionais . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Considerações preliminares</b>	<b>7</b>
2.1	Sistemas de refrigeração . . . . .	7
2.2	Aparato experimental . . . . .	13
2.2.1	Sensor de temperatura . . . . .	15
2.2.2	Gerador de falha . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Algoritmo de detecção de falha</b>	<b>21</b>
3.1	Conceitos fundamentais em detecção e diagnóstico de falha	21
3.2	Algoritmo de detecção e diagnóstico . . . . .	22
3.3	Algoritmo de pré-processamento . . . . .	24
3.4	Inferência . . . . .	27
3.5	Algoritmo de avaliação do sensor de degelo . . . . .	28
3.5.1	Algoritmo empírico . . . . .	29
3.5.2	Algoritmo baseado em propriedades de mudança de fase . . . . .	30

---

3.6	Conclusões sobre algoritmos de detecção de falha . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Algoritmos de correção de falha</b>	<b>37</b>
4.1	Correção via software . . . . .	37
4.1.1	Alteração no RTR do compressor . . . . .	38
4.1.2	Falhas de alta magnitude . . . . .	39
4.1.3	Falhas de alta magnitude negativa . . . . .	40
4.2	Correção por <i>switching</i> de controladores . . . . .	40
4.2.1	Fundamentos teóricos sobre motores elétricos . . . . .	40
4.2.2	Sistema de controle baseado em inteligência computacional . . . . .	42
4.2.2.1	Extrator de características . . . . .	44
4.2.2.2	Controlador lógico fuzzy . . . . .	46
4.2.2.3	Contador . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Resultados e discussões</b>	<b>51</b>
5.1	Matriz de avaliação e métricas de desempenho . . . . .	51
5.2	Resultados do algoritmo de detecção de falha . . . . .	55
5.2.1	Algoritmo de detecção baseado em avaliação empírica do sensor de degelo . . . . .	55
5.2.2	Algoritmo baseado em propriedades físicas . . . . .	58
5.2.3	Comparativos entre os dois métodos . . . . .	59
5.3	Resultados do algoritmo de correção de falhas . . . . .	60
5.3.1	Algoritmo de correção via software . . . . .	60
5.3.2	Sistema de controle alternativo . . . . .	60
<b>6</b>	<b>Conclusões e Recomendações para Trabalhos Futuros</b>	<b>67</b>
6.1	Considerações Finais . . . . .	67
6.2	Recomendações para Trabalhos Futuros . . . . .	68



---

## Lista de Figuras

---

1.1	Sistema de controle manual - Adaptado de Franklin et al. (2019) . . . . .	1
1.2	Estrutura de detecção, diagnóstico e gerenciamento de falha - Adaptado de Isermann (2006) . . . . .	2
2.1	Ciclo de refrigeração por compressão mecânica de vapor - Schurt (2012). . . . .	8
2.2	Ciclo de refrigeração por compressão mecânica de vapor aplicado a um refrigerador doméstico Hermes (2006). . . . .	9
2.3	Trocadores de calor (a) Condensador e (b) Evaporador. . . . .	9
2.4	Distribuição do fluxo de ar dentro do refrigerador . . . . .	10
2.5	Sistema de controle Liga/Desliga original do Refrigerador . . . . .	10
2.6	Ciclo de liga-desliga de compressores . . . . .	11
2.7	Formação de geada nas aletas do evaporador. . . . .	12
2.8	Resistência do tipo distribuída Sette (2015). . . . .	12
2.9	Refrigerador Consul Facilite. . . . .	13
2.10	Esquemático do aparato experimental proposto. . . . .	14
2.11	Relé de estado sólido Eurotherm. . . . .	14
2.12	Sistemas supervisorio para implementação e testes dos algoritmos . . . . .	15
2.13	Termistor do tipo NTC. . . . .	16

2.14	Circuito de condicionamento de sinal dos termistores. . . .	16
2.15	Placa eletrônica com circuito de condicionamento de sinal.	16
2.16	Curva do sensor ajustada com a equação de Stainhart-hart.	17
2.17	Esquemático do sistemas gerador de falha. . . . .	18
2.18	Programação do gerador de falha em LabView . . . . .	19
2.19	Posicionamento dos sensores de temperatura dentro do refrigerador. . . . .	20
3.1	Rotinas presentes em um sistemas de detecção e diagnóstico de falhas - Adaptado de Gertler (1998) . . . . .	22
3.2	Comportamento típico de uma falha de <i>offset</i> . . . . .	22
3.3	Variação na diferença entre sensores de degelo e refrigerador - gap - após uma ocorrência de falha . . . . .	23
3.4	Temperatura interna real do refrigerador após falha. . . . .	24
3.5	Esquemático de detecção de falha no sistema de controle.	25
3.6	Esquemático do algoritmo de detecção de falha. . . . .	25
3.7	Vetor de avaliação de cinco posições. . . . .	26
3.8	Relação entre temperatura de degelo e tempo de compressor ligado. . . . .	29
3.9	Diagrama de mudança de estado físico da água. . . . .	30
3.10	Temperatura do sensor de degelo durante um processo de degelo. . . . .	31
3.11	Algoritmo para detecção do ponto de mudança de fase . .	32
3.12	Método de 3 pontos para avaliação do ponto de mudança de fase. . . . .	32
3.13	Detecção do ponto de mudança de fase. . . . .	33
3.14	Análise da sensibilidade ao ruído. . . . .	35
3.15	Comparação entre o algoritmo de detecção do ponto de mudança de fase usando dois ou três pontos. . . . .	35
3.16	Teste de 100 horas contínuas para avaliação do algoritmo de degelo. . . . .	36
4.1	Fator de correção incorporado à medição de temperatura. .	38
4.2	Variação na média do vetor de avaliação. . . . .	39
4.3	Efeito causado por um alto offset positivo. . . . .	39
4.4	Correlação entre carga térmica e corrente do compressor. .	40
4.5	Principais componentes de um compressor de refrigeração do tipo alternativo Couto (2006). . . . .	41

4.6	representação esquemática simplificada de um compressor alternativo - Adaptado de Couto (2006) . . . . .	41
4.7	Corrente de partida e corrente de regime em um compressor alternativo de velocidade fixa. . . . .	42
4.8	Relação entre corrente de partida e tempo de compressor ligado. . . . .	43
4.9	Delta de Corrente em relação à corrente de regime . . . . .	43
4.10	Controlador Lógico Fuzzy . . . . .	44
4.11	Comportamento típico em uma condição de partida de um compressor. . . . .	45
4.12	Determinação da corrente de regime. . . . .	45
4.13	Estrutura básica de um controlador fuzzy. . . . .	46
4.14	Função de pertinência triangular. . . . .	46
4.15	Funções pertinência para as variáveis de entrada (a) corrente de partida e (b) corrente de regime. . . . .	47
4.16	Funções pertinência para as variáveis de saída (a) Tempo base e (b) Tempo adicional . . . . .	47
4.17	Relação entre tempos de compressor ligado e desligado. . . . .	49
5.1	Posicionamento dos termopares no interior do refrigerador . . . . .	53
5.2	Ciclo completo de liga e desliga do compressor. . . . .	53
5.3	Resultados experimentais do algoritmo empírico. . . . .	55
5.4	Teste de detecção de falha de $-5^{\circ}\text{C}$ . . . . .	58
5.5	Teste de falha de $+5^{\circ}\text{C}$ em temperatura ambiente de $32^{\circ}\text{C}$ . . . . .	59
5.6	Resumo dos testes para o algoritmo baseado em propriedades físicas. . . . .	59
5.7	Comparação entre os dois métodos de detecção de falha propostos no trabalho. . . . .	60
5.8	Correção de falha de $-10^{\circ}\text{C}$ em temperatura ambiente $25^{\circ}\text{C}$ . . . . .	61
5.9	Correção de falha de offset de $-5^{\circ}\text{C}$ a $16^{\circ}\text{C}$ . . . . .	61
5.10	Correção de falha de offset de $+10^{\circ}\text{C}$ a $16^{\circ}\text{C}$ . . . . .	62
5.11	Teste de pulldown a $32^{\circ}\text{C}$ . . . . .	62
5.12	Teste de rejeição de perturbação a $32^{\circ}\text{C}$ . . . . .	63
5.13	Teste de pulldown a $25^{\circ}\text{C}$ . . . . .	64
5.14	Teste de rejeição de perturbação a $25^{\circ}\text{C}$ . . . . .	65



---

## Lista de Tabelas

---

2.1	Coefficientes ajustados para equação de Stainhart-Hart. . . . .	17
3.1	Valores de referência para o algoritmo . . . . .	27
4.1	Variáveis linguísticas para a corrente de regime (Delta). . . . .	47
4.2	Variáveis linguísticas para a corrente de regime (Delta), . . . . .	48
4.3	Variáveis linguísticas para Tempo base e tempo adicional . . . . .	48
5.1	Matriz de testes experimentais para avaliação do algoritmo de detecção de falha. . . . .	52
5.2	Crítérios de desempenho para os algoritmos de detecção de falha. . . . .	54
5.3	Matriz de testes experimentais para avaliação dos algoritmos de correção de falha. . . . .	55
5.4	Detalhamento dos resultados para 25°C. . . . .	56
5.5	Detalhamento dos resultados para 32°C. . . . .	57
5.6	Detalhamento dos resultados para 16°C. . . . .	57



# CAPÍTULO 1

---

## Introdução

---

### 1.1 Apresentação

O crescimento de sistemas de controle, em específico os sistemas de controle embarcados, trouxeram consigo a necessidade do monitoramento em tempo real do comportamento destes sistemas, tendo em vista que o controle de variáveis críticas de processo são feitas de forma automática. A Figura 1.1 é comumente apresentada nos livros didáticos de teoria de controle mostrando que o controle da variável de processo é feito pelo agente humano, Franklin et al. (2019).

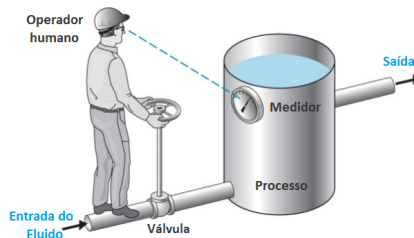


Figura 1.1: Sistema de controle manual - Adaptado de Franklin et al. (2019)

O que frequentemente é negligenciado, e não dado a devida importância nos cursos de sistemas de controle, é que o operador humano desempenha além do controle da variável, o papel de monitoramento da saúde do processo. Falhas em atuadores e sensores são rapidamente identificadas pelo operador e ações corretivas são tomadas para garantir a integridade do processo. Alguns tipos de falhas, como falhas de *offset* por exemplo, são em muitas situações compensadas pelo próprio operador de forma natural. Com a disseminação de sistemas de controle embarcados, essa problemática fica ainda mais evidente. Algoritmos que monitorem o funcionamento de sistemas devem ser uma parte essencial dos sistemas de controle. A Figura 1.2 mostra o esquemático de um sistema de controle com possíveis falhas (setas em vermelho) no processo, no sistema de medição e no sistema de atuação e uma estrutura para detecção, diagnóstico e gerenciamento de falhas Isermann (2006).

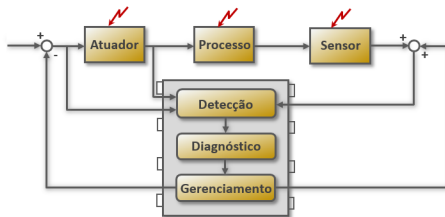


Figura 1.2: Estrutura de detecção, diagnóstico e gerenciamento de falha - Adaptado de Isermann (2006)

A estrutura apresentada na Figura 1.2, incorpora algoritmos de detecção de falha, onde são detectadas presença de anomalias no sistema de controle, algoritmos de diagnóstico, onde as falhas são localizadas e algoritmos de gerenciamento, onde são tratadas as falhas.

Setores industriais clássicos, como automobilístico e aviação, usam sistemas de diagnóstico e gerenciamento de falhas devido à alta severidade que falhas nesses sistemas podem ocasionar. Existem inúmeras linhas de pesquisa para detecção e diagnósticos de falha nestes setores, dentre elas podemos citar trabalhos desenvolvidos por Musgrave et al. (1997), Patton (1991), Rizzoni et al. (1993) e Kiencke et al. (1997).

Processos produtivos onde o sensoriamento é de difícil acesso, como poços de petróleo e mineração, usam algoritmos de detecção de falha



para monitoramento da saúde de sensores e atuadores e métodos de gerenciamento de falha para correção de desvios na medição, Boechat (2012). Correções automáticas em sensores são uma estratégia muito útil devido ao alto custo da troca desses componentes em campo.

Algoritmos de modelagem de falhas em sistemas de refrigeração por compressão mecânica de vapor foram estudados por Cheung and Braun (2012). O trabalho propõe modelos para vazamento de fluido refrigerante, restrições na linha de líquido e vazamento na válvula do compressor. Resultados dos modelos propostos foram comparados com situações reais de falha impostas ao sistema.

Existem diversos outros trabalhos com foco no mapeamento do comportamento de falhas típicas em sistemas de refrigeração, como Breuker et al. (1997), Shen (2006) e Rossi and Braun (1997). Esses trabalhos buscam o mapeamento de diversos modos de falha, de forma que detecções possam ser realizadas quando comportamentos similares forem observados.

Um sistema de inferência fuzzy foi avaliado por Kocyigit (2015) para detecção e diagnóstico de erros em sensores de sistemas de refrigeração. Um algoritmo baseado em redes neurais artificiais foi incorporado ao sistema para monitoramento das condições de funcionamento do sistema como um todo.

Support vector data description foi usado por Li et al. (2016), para desenvolver algoritmos de detecção de falha em diversos sensores de temperatura de um chiller do tipo parafuso. Os algoritmos focaram em desenvolver uma solução para detecção rápida do mal funcionamento dos sensores presentes no equipamento.

Com foco ainda em sistemas de refrigeração de grande porte, Yan et al. (2014) exploraram modelos baseados em redes neurais artificiais e inferência fuzzy para detecção de comportamentos anômalos em sistemas de refrigeração comerciais.

Han et al. (2011) avaliaram as melhores opções de sensoriamento para algoritmos de detecção e diagnóstico de falha em sistemas de refrigeração para uso em técnicas de aprendizado de máquina. O estudo direciona que custos adicionais de sensoriamento são justificados em sistemas de grande porte devido à possibilidade de previsão de falhas e a consequente manutenção antes que danos ocorram a componentes do sistema.

Apesar do grande número de trabalhos em sistemas de refrigeração, existe uma enorme carência de trabalhos de detecção e diagnósticos de falha em refrigeradores domésticos. Uma das razões para tal fenômeno, é o número limitado de sensores presentes nesses produtos. Grande parte dos algoritmos de detecção necessitam de um número razoável de sensores para que possam ser gerados modelos que correlacionem variáveis, e de alguma, que as estimem.

O presente trabalho busca desenvolver algoritmos que sejam capazes de diagnosticar comportamentos anômalos no refrigerador, com um número limitado de sensores. Além disso, o trabalho busca, após o diagnóstico dessas falhas, corrigi-las para que o refrigerador continue operando em um nível satisfatório de desempenho.

## 1.2 Objetivos

Os objetivos gerais do trabalho são desenvolver algoritmos de diagnóstico de falhas de *offset* em sensores de temperatura de refrigeradores domésticos e métodos de correção automática para garantir que o refrigerador continue operando de forma satisfatória, mesmo operando em modo de falha. Como objetivos específicos do trabalho destacam-se:

- ◇ Desenvolvimento de um aparato experimental para análise da influência de diferentes magnitudes de *offset* no desempenho de refrigeradores domésticos.
- ◇ Análise e desenvolvimento de um algoritmo de diagnóstico de falhas de *offset* em sensores de temperatura de um refrigerador doméstico.
- ◇ Desenvolvimento de um sistema de correção baseado em compensação de falha através de equações matemáticas empiricamente obtidas.
- ◇ Desenvolvimento um sistema de controle alternativo do tipo fuzzy baseado unicamente em medições de corrente do compressor para controle de temperatura.

## 1.3 Organização do documento

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

- ◇ Capítulo 2: Apresenta uma breve revisão teórica de sistemas de refrigeração. São abordados os componentes básicos de um ciclo de refrigeração e o funcionamento básico de um refrigerador doméstico. Neste capítulo o aparato experimental desenvolvido para a pesquisa é detalhado.
- ◇ Capítulo 3: O capítulo 3 aborda alguns conceitos fundamentais na área de detecção e diagnóstico de falha. O capítulo traz o desenvolvimento dos dois algoritmos de detecção de falha propostos. Ao final do capítulo é feita uma breve conclusão acerca dos métodos de detecção abordados.
- ◇ Capítulo 4: O capítulo 4 traz uma breve revisão bibliográfica de sistemas tolerantes a falha. Os dois métodos de correção são apresentados em detalhes. Ao final do capítulo, são feitas algumas considerações.
- ◇ Capítulo 5: Apresenta a definição dos critérios de desempenho tanto para os métodos de detecção quanto para os métodos de correção de falha. A matriz de testes experimentais é definida e são apresentados os testes de desempenho realizados para avaliação dos algoritmos.
- ◇ Capítulo 6: São feitas conclusões acerca do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## 1.4 Informações adicionais

Este trabalho foi realizado no Laboratório POLO - Instituto Nacional em Refrigeração e Termo-física, em parceria com a empresa Whirlpool S/A e Embrapii - Empresa Brasileira de pesquisa e inovação Industrial.



# CAPÍTULO 2

---

## Considerações preliminares

---

O presente capítulo introduz ao leitor conceitos básicos de sistemas de refrigeração, indispensáveis para o entendimento do trabalho. Além disso, são apresentados os principais componentes de um refrigerador doméstico e suas principais funcionalidades. A última seção do capítulo traz os detalhes do aparato experimental desenvolvido na pesquisa.

### 2.1 Sistemas de refrigeração

Refrigeração é um processo através do qual se mantém a temperatura de uma substância abaixo dos valores encontrados no meio ambiente, Dossat (2002). Dentre as suas aplicações encontra-se a produção e conservação de alimentos. A grande maioria dos refrigeradores existentes no mercado opera sob o princípio da compressão mecânica do vapor. Estima-se que existam mais de 45 milhões de refrigeradores em operação no Brasil, Gonçalves (2004), dos quais uma ínfima parcela não utiliza este princípio como modo de funcionamento. O princípio básico da compressão mecânica do vapor é a evaporação a baixas temperaturas de uma substância volátil denominada refrigerante combinada com a condensação deste fluido a alta pressão, Schurt (2012). A ideia de

unir o princípio de evaporação do fluido à baixa pressão e condensação a alta pressão foi proposto por Oliver Evans, porém concebido por Jacob Perkins. O ciclo proposto por Perkins, em 1834, possui quatro componentes principais: Evaporador, condensador, compressor e dispositivo de expansão, como ilustrado na Figura 2.1. O compressor é responsável por elevar a pressão do fluido refrigerante até a pressão de trabalho no condensador (ponto A) através da adição de trabalho em um processo que ocorre de forma isentrópica. Do ponto A ao ponto B o fluido refrigerante atravessa o condensador rejeitando para o ambiente o calor retirado do evaporador e proveniente do trabalho realizado pelo compressor. Do ponto B ao ponto C há uma redução na pressão e temperatura do fluido, provocado pelo dispositivo de expansão, tipicamente do tipo tubo capilar em refrigeradores domésticos. Com a redução de temperatura, o fluido atravessa o evaporador (ponto C ao ponto D) absorvendo calor do meio a ser refrigerado. Após atravessar o evaporador, o compressor suciona o fluido dando início a um novo ciclo.

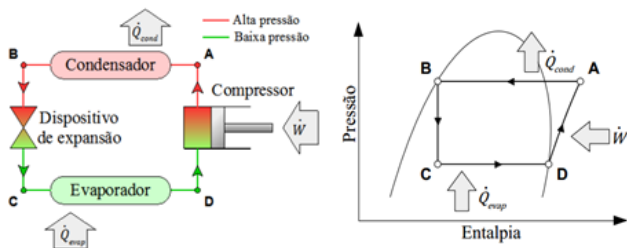


Figura 2.1: Ciclo de refrigeração por compressão mecânica de vapor - Schurt (2012).

Um refrigerador doméstico conta com dois trocadores de calor: O evaporador, onde o calor proveniente do meio é absorvido e ocorre o consequente abaixamento de temperatura do compartimento. E o condensador, feito de aço, onde é rejeitado o calor removido no evaporador e a energia proveniente do processo de compressão, por convecção natural, Hermes (2006). A Figura 2.2 apresenta um refrigerador onde é possível observar os componentes aliados aos pontos do ciclo de refrigeração ilustrados na Figura 2.1. As trocas de calor ocorrem basicamente

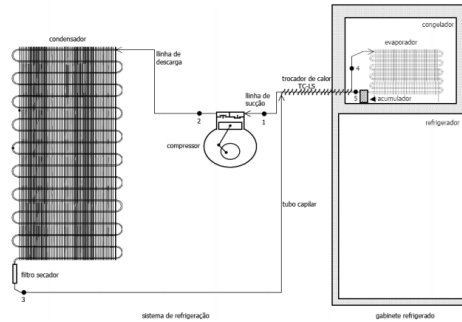


Figura 2.2: Ciclo de refrigeração por compressão mecânica de vapor aplicado a um refrigerador doméstico Hermes (2006).

nesses componentes e através das paredes do refrigerador. A Figura 2.3 apresenta os dois trocadores de calor presentes no refrigerador usado nesta pesquisa.

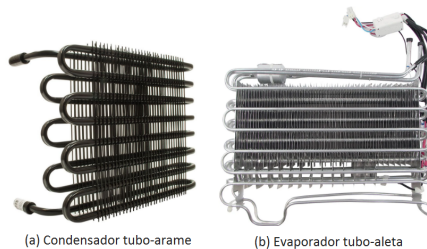


Figura 2.3: Trocadores de calor (a) Condensador e (b) Evaporador.

O ar é usado como fluido de trabalho para resfriar os alimentos no interior do refrigerador Waltrich (2008). O evaporador opera em níveis de temperatura da ordem de  $-23^{\circ}\text{C}$ . Um ventilador radial é usado para forçar a passagem do ar pelo evaporador, onde a sua temperatura é reduzida e insuflado para o compartimento do refrigerador reduzindo a temperatura dos compartimentos. A Figura 2.4 mostra o fluxo de ar dentro do refrigerador usado no presente trabalho.

O refrigerador possui um sistema de controle liga/desliga para regulação da temperatura interna dos compartimentos. A temperatura deve estar o mais próximo possível de  $5^{\circ}\text{C}$  no refrigerador e  $-18^{\circ}\text{C}$  no congelador Senger (2014). Temperaturas superiores a esses valores

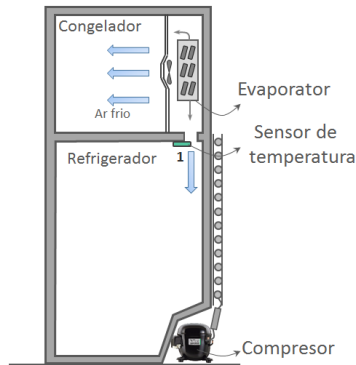


Figura 2.4: Distribuição do fluxo de ar dentro do refrigerador

podem levar os alimentos a má conservação. Temperaturas inferiores levam ao congelamento de alimentos frescos no compartimento do refrigerador, além de um consumo energético desnecessário. O sensor de temperatura é localizado na posição 1 da Figura 2.4, na saída do insuflamento de ar para o refrigerador. Esse sensor é usado para o controle da temperatura do compartimento. A grande maioria dos refrigeradores vendidos no Brasil opera com compressores de capacidade fixa. Para esse tipo de dispositivos, são usados controladores de tipo liga/desliga. A Figura 2.5 ilustra esse tipo de sistema de controle.

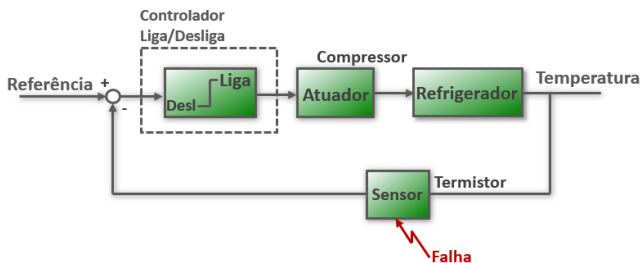


Figura 2.5: Sistema de controle Liga/Desliga original do Refrigerador

No refrigerador usado na pesquisa, a temperatura no sensor é controlada nos limites superior e inferior de  $-11,5^{\circ}\text{C}$  a  $-14,3^{\circ}\text{C}$  para que no



interior do refrigerador se tenha a temperatura de norma. Um conceito muito utilizado em refrigeração é o de RTR - *Run-time ratio* que mede a fração de funcionamento do compressor dentro de um ciclo completo de liga/desliga, conforme mostrado na Figura 2.6.

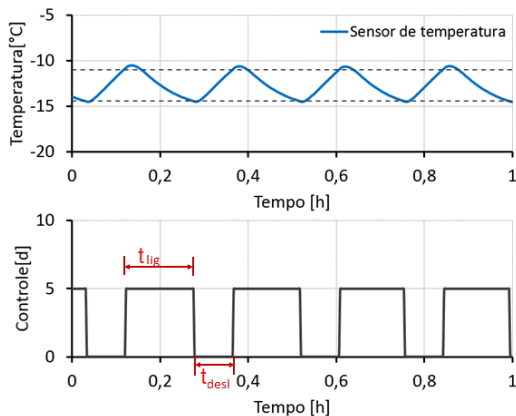


Figura 2.6: Ciclo de liga-desliga de compressores

A expressão para o cálculo do RTR é dada pela Equação (2.1).

$$RTR[\%] = \frac{t_{lig}}{t_{lig} + t_{desl}} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Em que  $t_{lig}$  é o tempo de compressor ligado e  $t_{desl}$  é o tempo de compressor desligado. A Figura 2.6 mostra essas variáveis dentro de um ciclo real de liga-desliga de um refrigerador. O RTR dá uma boa indicação da quantidade de carga térmica do produto, pois o compressor precisa ser mantido mais tempo ligado para que a carga térmica seja removida do refrigerador.

Com o funcionamento contínuo do sistema de refrigeração, ocorre um fenômeno indesejado que é a formação de geada no evaporador, mostrado na Figura 2.7. O acúmulo dessa camada de gelo prejudica a troca de calor no evaporador devido à baixa condutividade térmica da camada de geada e redução do fluxo de ar que passa pelo evaporador Londero (2012).

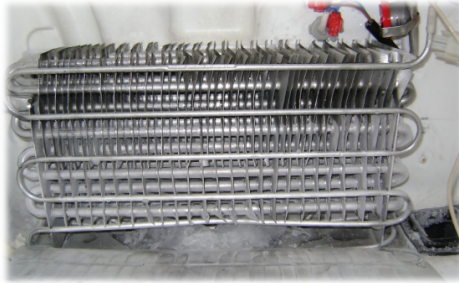


Figura 2.7: Formação de geada nas aletas do evaporador.

Para evitar que a capacidade de remoção de calor do evaporador seja reduzida a níveis inaceitáveis, existe o processo de degelo, feito periodicamente, através do acionamento de uma resistência elétrica para derretimento da camada de geada do evaporador. O modelo de refrigerador usado neste trabalho usa uma resistência do tipo distribuída, que fica em contato com o evaporador, Figura 2.8, para que o calor gerado pela resistência seja transferido por condução para todo o evaporador.



Figura 2.8: Resistência do tipo distribuída Sette (2015).

O refrigerador usado neste trabalho opera basicamente com as duas funções básicas listadas anteriormente: (i) O controle de temperatura do compartimento, para que a temperatura seja mantida em valores de norma e (ii) o processo periódico de degelo, para que a camada de geada depositada no evaporador é removida, não penalizando o desempenho do produto.

## 2.2 Aparato experimental

O aparato experimental desenvolvido conta com um refrigerador Consul Facilite com capacidade de 300 litros composto de um compartimento refrigerado e um congelador. O refrigerador é do tipo *frost free*, dotado de um compressor de velocidade fixa.



Figura 2.9: Refrigerador Consul Facilite.

O refrigerador em sua configuração original possui uma placa eletrônica onde são feitos os acionamentos do compressor e da resistência de degelo e leitura de sensores de temperatura. Além disso, no sistema embarcado estão implementados o controle liga/desliga, a lógica para o processo de degelo e outras rotinas essenciais ao funcionamento do refrigerador. O aparato experimental proposto neste trabalho, apresentado na Figura 2.10, mantém a lógica de degelo original do fabricante feita pela própria placa eletrônica e reproduz externamente a malha de controle de temperatura, que compreende o sensor de temperatura, o circuito de condicionamento do sensor, a lógica de controle e o *drive* de acionamento do compressor.

O acionamento do compressor é feito através de relés de estado sólido, Figura 2.11, da fabricante Eurotherm, acionados por tensão na faixa de 4 a 36V. Esse componente permite que o acionamento do compressor seja feito pelo sistema de aquisição de dados, comandado pelos algoritmos propostos no trabalho.

A temperatura interna do refrigerador é controlada através de um controlador do tipo liga/desliga, Figura 2.5, implementado em labView.

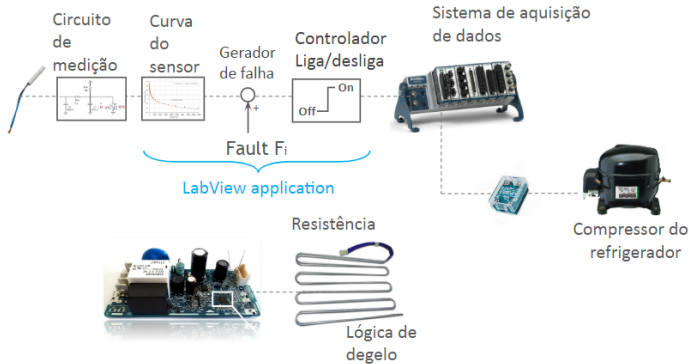


Figura 2.10: Esquemático do aparato experimental proposto.



Figura 2.11: Relé de estado sólido Eurotherm.

Os limites inferior e superior do controlador foram ajustados de forma a reproduzir o comportamento original do produto. O controlador é apresentado em sua forma de implementação computacional no Algoritmo 1.

Um sistema de aquisição da fabricante *National instruments* foi usado para aquisição de dados e implementação dos algoritmos desenvolvidos. O sistema conta com um chassi SCXI 1001 com módulos específicos de entrada e saída de tensão, relé e leitura de termopares. Foi desenvolvido um sistema supervisorio em LabView para aquisição de dados e implementação dos métodos propostos de detecção de falha. A Figura 2.12 mostra a tela inicial do sistema supervisorio desenvolvido.

**Algoritmo 1** Controlador liga/desliga

- 1:  $T_s \leftarrow$  Leitura de temperatura()
- 2: **procedure** Gerador de Falha( $T_k$ )
- 3:     **Retorna**  $T_s^f$
- 4: **Fim procedure**
- 5: **Se**  $T_s^f \geq L_{superior} \vee (T_s^f \geq L_{inferior} \wedge Comp == \text{ligado})$  **Então**
- 6:      $Comp \leftarrow$  ligado
- 7: **Senão**
- 8:      $Comp \leftarrow$  desligado
- 9: **Fim Se**

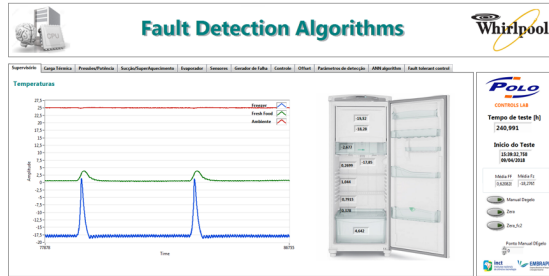


Figura 2.12: Sistemas supervisorío para implementação e testes dos algoritmos

### 2.2.1 Sensor de temperatura

Os sensores de temperatura usados no refrigerador são termistores do tipo NTC, Figura 2.13. Nesse tipo de sensor existe uma alta variação da resistência de acordo com a variação de temperatura, possuindo uma larga aplicabilidade industrial devido a seu baixo custo e tamanho Camarano (1993), além do baixo custo associado ao circuito de condicionamento de sinal.

O refrigerador possui dois sensores de temperatura: Um localizado no evaporador, denominado sensor de degelo, que é responsável por finalizar o processo de degelo. O outro é localizado no compartimento do refrigerador, conforme mencionado anteriormente, sendo responsável pelo controle de temperatura do produto. O circuito de condicionamento de sinal é formado por um divisor resistivo acompanhado de



Figura 2.13: Termistor do tipo NTC.

filtros passa-baixa, Figura 2.14.

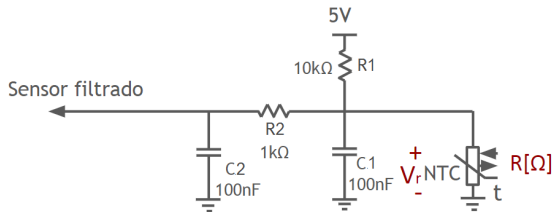


Figura 2.14: Circuito de condicionamento de sinal dos termistores.

A Figura 2.15 mostra a placa eletrônica confeccionada para leitura dos sensores.

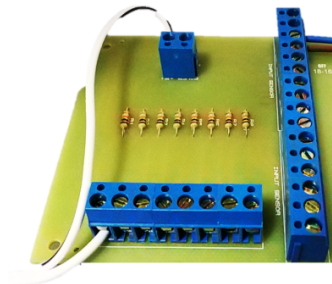


Figura 2.15: Placa eletrônica com circuito de condicionamento de sinal.

Os sensores foram desconectados da placa eletrônica do refrigerador, e conectados ao circuito desenvolvido. Este circuito é alimentado com

uma saída de tensão contínua de  $5V$ , do próprio sistema de aquisição de dados. Através do módulo de leitura de tensão, é medido o valor da queda de tensão no termistor. A relação entre a queda de tensão e a resistência do NTC é dada pela Equação (2.2).

$$R_t = V_r \frac{R_1 + R_2}{V} \quad (2.2)$$

Sendo  $V_r$  a queda de tensão medida no termistor,  $V = 5$  é a alimentação do circuito de condicionamento de sinal e  $R_{1,2}$  dois resistores de  $10K\Omega$ .

A curva do sensor, apresentada na Figura 2.16, que relaciona resistência e temperatura foi ajustada usando a equação de Stainhart-hart, Equação (2.3).

$$T^{-1} = A + B \ln R_t + C \ln R_t^3 \quad (2.3)$$

Os valores do coeficientes ajustados são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Coeficientes ajustados para equação de Stainhart-Hart.

Coeficiente	Valor numérico
A	0,9857
B	0,5687
C	0,009587

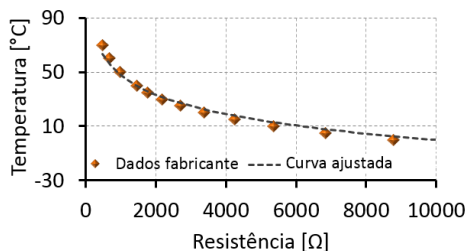


Figura 2.16: Curva do sensor ajustada com a equação de Stainhart-hart.

## 2.2.2 Gerador de falha

Uma rotina computacional foi desenvolvida para contaminar a medição de temperatura gerando falhas de *offset* conhecidas. O objetivo desta rotina é gerar diferentes valores de *offset*. A Figura 2.17 apresenta o esquemático do gerador de falhas.

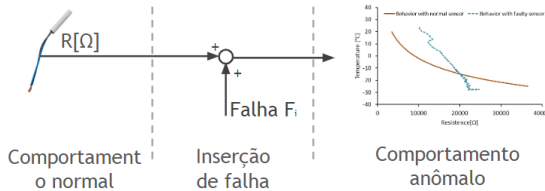


Figura 2.17: Esquemático do sistemas gerador de falha.

O gerador de falha foi implementado no mesmo ambiente computacional onde o controlador liga/desliga foi reproduzido. Desta forma, o controlador pode receber o sinal de temperatura contaminado por um falha conhecida, gerando comportamentos anômalos reais através de uma falha emulada no sensor.

O gerador de falha possui módulos específicos para geração de diferentes tipos de falha, como *drift*, comportamentos anômalos aleatórios e *offset*. Como o número de falhas encontrados em campo são em sua maioria de *offset*, o trabalho focará em algoritmos de detecção de anomalias para esse tipo de falha. A Figura 2.18 apresenta a programação do gerador de falha em LabView, com seus diversos módulos específicos para geração de cada tipo de falha.



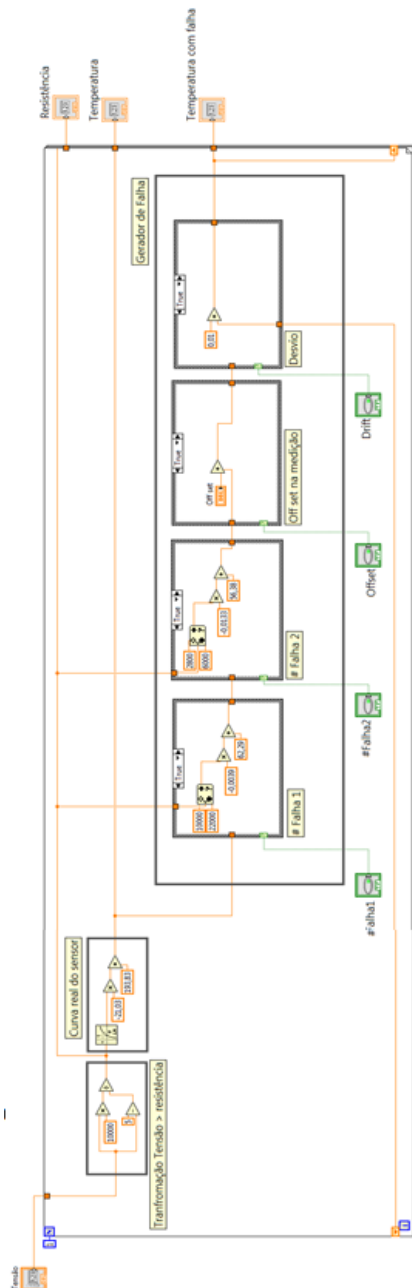


Figura 2.18: Programação do gerador de falha em LabView



Figura 2.19: Posicionamento dos sensores de temperatura dentro do refrigerador.

---

## Algoritmo de detecção de falha

---

Existe uma enorme carência de trabalhos com foco em detecção e diagnóstico de falha em refrigeradores domésticos. Esse número é reduzido a praticamente zero quando se trata de aplicações em refrigeradores domésticos com um número limitado de sensores, como é o caso do presente trabalho. Este capítulo apresenta inicialmente conceitos de detecção e diagnóstico de falha em sistemas de controle, que auxiliarão o leitor no entendimento do trabalho. A seguir são apresentados os algoritmos desenvolvidos e ao final do capítulo são feitas algumas considerações.

### **3.1 Conceitos fundamentais em detecção e diagnóstico de falha**

Uma falha é definida como um desvio do comportamento normal de uma planta ou sua instrumentação, Gertler (1998). Algoritmos de detecção e diagnóstico de falha são compostos pelas seguintes rotinas detalhadas abaixo e ilustradas na Figura 3.1:

- ◇ Detecção de falha: Percepção de alguma anomalia no sistema.

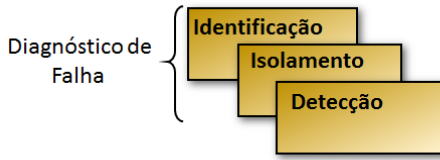


Figura 3.1: Rotinas presentes em um sistemas de detecção e diagnóstico de falhas - Adaptado de Gertler (1998)

- ◇ Isolamento de falha: Onde é determinado a localização exata do componente com falha.
- ◇ Identificação: Determinação na magnitude da falha

Existem basicamente duas grandes subdivisões de sistemas de detecção de falha: Os sistemas baseados em modelo e os livres de modelo, na qual este trabalho encontra-se inserido.

## 3.2 Algoritmo de detecção e diagnóstico

Falhas de *offset*, ilustradas na Figura 3.2, são definidas como desvios constantes ao longo do tempo, entre o valor medido e o valor correto de um sensor.

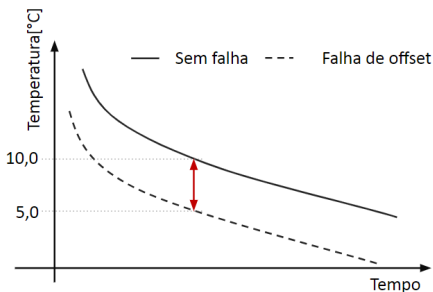


Figura 3.2: Comportamento típico de uma falha de *offset*

O refrigerador usado na pesquisa possui 2 sensores de temperatura. Um deles afeta diretamente o desempenho do produto, por estar

presente na malha de controle de temperatura. Baseado em testes preliminares, o monitoramento da diferença entre os dois sensores pode ser usado para detecção de falha de offset no sensor do refrigerador. A Figura 3.3 mostra um teste preliminar onde uma falha de offset de magnitude  $-10^{\circ}\text{C}$  é introduzida no sensor do refrigerador.

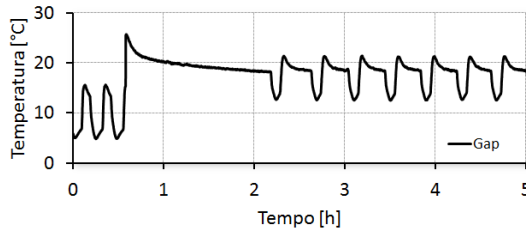


Figura 3.3: Variação na diferença entre sensores de degelo e refrigerador - gap - após uma ocorrência de falha

A Figura 3.3 apresenta o gráfico da diferença entre o sensor de degelo e o sensor do refrigerador, Equação (3.1), definido aqui como *gap*. É possível observar que há uma variação de quase mesma magnitude que a falha inserida, se considerarmos um valor médio. Esse fenômeno ocorre basicamente devido ao alto aumento no *run time* do compressor e consequentemente a redução da temperatura de evaporação. Esse *run time* pode ser comparado ao PWM nos sistemas eletrônicos. O tempo de compressor ligado aumentou de 6 minutos antes da falha, para 26 minutos após a falha. Para exemplificar, pense que antes a temperatura no sensor deveria chegar em torno de  $-14^{\circ}\text{C}$  para que o compressor fosse desligado, com uma falha de offset (neste caso positiva) o compressor desliga quando o sensor atinge  $-24^{\circ}\text{C}$ , o que provoca uma extrema mudança no ponto de operação do refrigerador. Aqui é importante deixar claro que o trabalho considera como abrupta a origem do *offset* no sensor. É importante ressaltar que essas falhas são vistas pelo sistema de controle como perturbações, e que após um transitório são rejeitadas. O sistema de controle sempre vai levar o valor medido de uma determinada variável para seu valor de referência, se o valor da leitura não corresponde ao valor correto da variável, haverá um erro causado pelo falha no sensor. Os sistemas de controle convencionais não possuem mecanismos de monitoramento, sendo impossível que o sistema

de controle perceba essas variações. A Figura 3.4 mostra o perfil de temperatura interna do refrigerador após a falha de offset do exemplo acima.

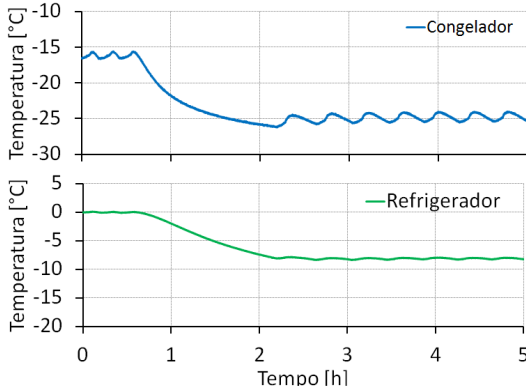


Figura 3.4: Temperatura interna real do refrigerador após falha.

A Figura 3.4 mostra o impacto da falha de offset nas temperaturas internas do refrigerador. Falhas dessa natureza onde a temperatura do refrigerador atinge patamares próximos a  $-10^{\circ}\text{C}$  provocam o congelamento de alimentos frescos no refrigerador, além do significativo aumento do consumo energético. A Figura 3.5 apresenta o esquemático da malha de controle do refrigerador onde o algoritmo de detecção de falha é incorporado.

A Figura 3.6 apresenta a estrutura do algoritmo de detecção de falha proposto. Ela conta com um algoritmo de pré-processamento, onde a os dados dos sensores são tratados e organizados, e um algoritmo de inferência, que avalia a ocorrência de falha.

As subseções seguintes abordam em detalhes cada uma das sub-rotinas presentes no algoritmo de detecção e de falha proposto.

### 3.3 Algoritmo de pré-processamento

O algoritmo de pré-processamento é responsável por processar e organizar a informação para ser usada pelo sistema de inferência. A principal

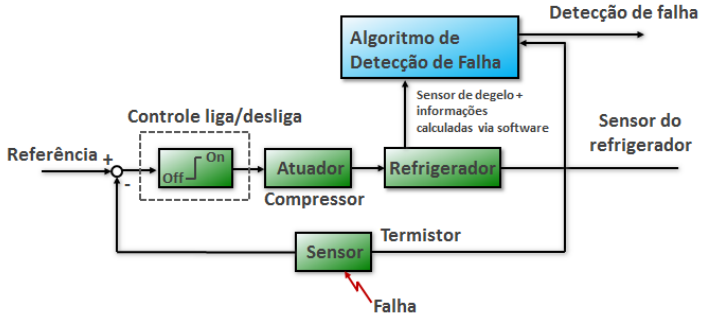


Figura 3.5: Esquemático de detecção de falha no sistema de controle.

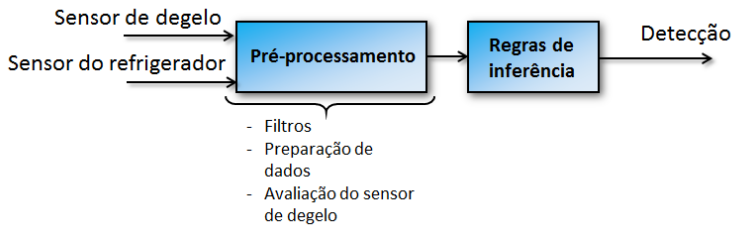


Figura 3.6: Esquemático do algoritmo de detecção de falha.

regra para avaliação de condições de mal funcionamento usa a diferença entre os sensores de degelo e refrigerador para fazer a detecção. Condições de bom funcionamento possuem uma condição padrão que é alterada quando uma falha ocorre. Como definido anteriormente,  $gap$  é a diferença entre os dois sensores de temperatura do produto:

$$Gap = T_{sf} - T_{df} \quad (3.1)$$

onde  $T_{sf}$  é a temperatura filtrada do sensor do refrigerador e  $T_{df}$  é a temperatura filtrada do sensor de degelo. O algoritmo de pré-processamento calcula o valor de  $gap$  para as 30 primeiras amostras durante o ciclo de liga do compressor. O algoritmo roda com um período de amostragem de 10 segundos.

$$\overline{Gap} = \frac{\sum_{i=1}^n Gap_i}{n} \quad (3.2)$$

Essas 30 amostras são as mais significativas para avaliar ocorrências de anomalias, porque o compressor parte de um condição de alta carga térmica. Quando compressor é desligado, o algoritmo carrega o valor de  $\overline{gap}$  em um vetor de dados de 5 posições, chamado vetor de avaliação. Foi escolhido um vetor de 5 posições a fim de conferir maior confiabilidade ao algoritmo.

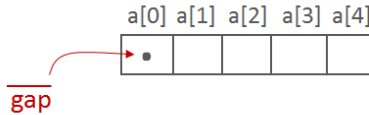


Figura 3.7: Vetor de avaliação de cinco posições.

Um algoritmo adicional monitora RTR's de cada ciclo liga/desliga, a fim de carregar o vetor de avaliação somente em condições de RTR estabilizados, ou seja, ausência de perturbações. Média do vetor de avaliação e desvio padrão, Montgomery et al. (2009), Equações (3.3) e (3.4), são calculados para avaliação dentro do algoritmo de inferência.

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n Array_i}{n} \quad (3.3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (array_i - \overline{array})^2}{n - 1}} \quad (3.4)$$

O desvio padrão é usado para que só aconteça inferência quando o vetor de avaliação tiver com uma baixa variação entre seus elementos, indicando que nenhuma causa especial atuou no conjunto de amostras



do vetor, prejudicando a avaliação de falhas.

### 3.4 Inferência

Como parte fundamental de todo sistema de detecção de falha, o método de inferência é responsável por decidir se um comportamento específico do refrigerador é classificado como falha, Thomas (2002). O algoritmo de inferência adotado neste trabalho, é baseado em um conjunto de regras experimentalmente observadas que sugerem a ocorrência de anomalias.

A principal regra para decidir sobre a presença ou não de um comportamento anômalo compara a média do vetor de avaliação, calculado no algoritmo de pré-processamento, com um valor padrão obtido em uma condição normal de operação do refrigerador (sem falha). A Tabela 3.1 mostra os valores de referência adotados no trabalho.

Tabela 3.1: Valores de referência para o algoritmo

Média vetor [°C]	Limite [°C]	Desvio padrão
13.7	4.0	0.5

Sempre que a média avaliada em tempo real do vetor de avaliação estiver fora dos limites  $13,7 \pm 4,0$  o sistema de detecção irá detectar a presença de uma anomalia.

Adicionalmente à verificação do vetor de avaliação, o algoritmo de inferência conta com algumas regras de avaliação adicionais. A avaliação de limites é a forma mais simples de verificação de falha em sensores, Isermann (2006), e é incorporada no algoritmo de inferência proposto através da Equação 3.5:

$$-40^{\circ}\text{C} \leq T_{sf} \leq 70^{\circ}\text{C} \quad (3.5)$$

Falhas de offset que forcem o compressor a não ligar são tratadas de maneira especial no algoritmo, monitorando o valor de gap e a variação desse número ao longo do tempo. O Algoritmo 2 apresenta o detalhes do sistema de inferência implementado.

**Algoritmo 2** Algoritmo de Inferência

---

```

1: procedure INFERENCE( $t_{lig}, t_{desl}, \bar{v}, sd$ )
2:   Se  $|(\bar{v} - 13, 7)| > 4.0$  and  $sd < 0.5$  Então      ▷ 13.7 é o valor
   médio padrão do vetor e 4.0 é a banda limite.
3:      $falha \leftarrow 1$ 
4:   Senão Se  $t_{desl} > 40$  min Então
5:      $falha \leftarrow 1$ 
6:   Senão Se  $T_{sf} > 70^\circ\text{C}$  or  $T_{sf} < -40^\circ\text{C}$  Então
7:      $falha \leftarrow 1$ 
8:   Senão Se Avalia  $gap(k), gap(k - 1)$  e  $gap(k - 2)$  Então
9:      $falha \leftarrow 1$ 
10:  Senão
11:     $falha \leftarrow 0$ 
12:  Fim Se
13:  retorna  $falha$       ▷ Retorna a condição do sensor
14: Fim procedure

```

---

Onde  $t_{desl}$  é o tempo de compressor desligado,  $t_{lig}$  o tempo de compressor ligado,  $\bar{v}$  a média do vetor de avaliação e  $sd$  o desvio padrão do vetor de avaliação.

### 3.5 Algoritmo de avaliação do sensor de degelo

Os dois sensores presentes no refrigerador possuem a mesma probabilidade de serem afetados por algum tipo de falha. São em geral, de um mesmo fabricante, mesmo princípio construtivo e muito provavelmente, até de mesmos lotes de produção. Uma falha no sensor do refrigerador afeta diretamente o desempenho do produto, pois ele está presente na malha de controle de temperatura. Falhas no sensor de degelo afetam menos o desempenho do produto, pois o processo de degelo vai ser influenciado por essa falha, e além disso, porque o papel que ele desempenha é de finalizar o processo degelo, se forem definidos degelos com duração fixa, haverá perda de desempenho, porém o refrigerador consegue operar adequadamente sem grande prejuízo ao consumidor. Estando presente no algoritmo de detecção de falha, o sensor de degelo deve ser avaliado de alguma forma, para que falhas nesse sensor, não gerem falsos diagnósticos. O presente trabalho propõe dois métodos de avaliação: O primeiro, empírico, que usa uma correlação matemática

obtida experimentalmente em condições controladas, e a segunda, baseada em propriedades físicas da água. As subseções seguintes detalham ambos os métodos.

### 3.5.1 Algoritmo empírico

Foi estabelecido uma relação empírica entre tempo de compressor ligado ( $t_{lig}$ ) e temperatura do sensor de degelo. A Figura 3.8 mostra a curva relacionando essas duas grandezas.

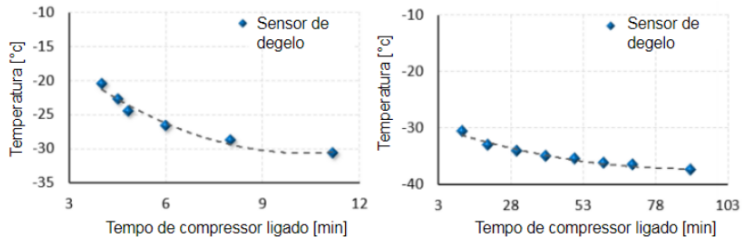


Figura 3.8: Relação entre temperatura de degelo e tempo de compressor ligado.

Essa curva foi obtida a uma temperatura ambiente controlada de 25°C gerando diferentes tempos de compressor ligado.

A forma que o algoritmo foi desenhado facilita a não geração de falsos positivos. Em outras palavras, quando o compressor é desligado, é feita uma avaliação entre a temperatura real medida no sensor de degelo e a temperatura predita pela função empírica. Quando o erro entre essas temperaturas for maior que um determinado limite, o valor de *gap* não é carregado no vetor de avaliação. Mas, não são gerados diagnósticos com relação ao bom funcionamento do sensor de degelo. As Equações (3.6) e (3.7) apresentam as correlações obtidas.

$$\hat{T}_{sd} = 0.172x^2 - 3.80x - 9.70 \quad \text{to } x \in [3, 11] \quad (3.6)$$

$$\hat{T}_{sd} = 0.0021x^2 - 0.25x - 28.4 \quad \text{to } x \in ]11, 100] \quad (3.7)$$

Onde  $x$  é o tempo de compressor ligado em minutos, do ciclo no qual pretende-se avaliar o sensor de degelo. Para a avaliação do sensor de degelo foi determinada uma tolerância de  $2,5^\circ\text{C}$ , ou seja, no momento da avaliação, a diferença entre valor medido e valor predito deve ser menor que  $2,5^\circ\text{C}$ , caso contrário, o valor de  $\overline{gap}$  não é carregado no vetor de avaliação.

### 3.5.2 Algoritmo baseado em propriedades de mudança de fase

Em uma substância pura, a temperatura permanece constante durante todo o processo de mudança de fase, ou seja, toda a energia fornecida pela substância é usada unicamente para mudança de fase e não há elevação ou redução de temperatura da substância. A Figura 3.9 mostra um diagrama de mudança de fase para a água pura. Nele pode ser observado a região de temperatura constante (em torno de  $0^\circ\text{C}$ ), onde toda a energia é usada para mudança de fase da substância.

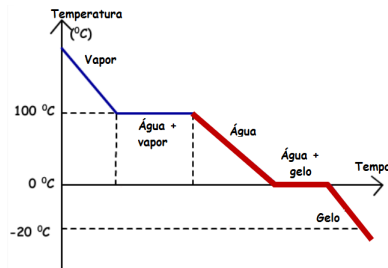


Figura 3.9: Diagrama de mudança de estado físico da água.

O processo de degelo, como mencionado no Capítulo 2, nada mais é do que a remoção de uma camada de geada depositada na superfície do evaporador. Ao fim deste processo, o que resta são porções de água líquida sobre toda a superfície do trocador de calor, inclusive em cima do sensor de degelo.

Quando o compressor voltar a operar, essa água residual do evapo-

rador passará por um processo de solidificação, tendo um período de temperatura constante durante o processo de mudança de fase (de água para gelo). Essa propriedade pode ser usada para avaliação da saúde do sensor de degelo, dado que esse fenômeno ocorre sempre em uma mesma temperatura, não dependendo da temperatura ambiente ao qual o refrigerador está exposto, ao contrário do método apresentado anteriormente. A Figura 3.10 apresenta a temperatura no sensor durante um processo de degelo. Note que é possível observar um comportamento bem similar à curva padrão de mudança de fase da água.

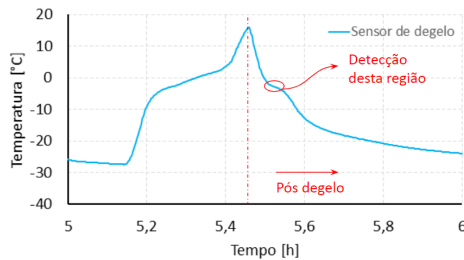


Figura 3.10: Temperatura do sensor de degelo durante um processo de degelo.

Após o término de cada processo de degelo executado no refrigerador, o algoritmo de avaliação de degelo inicia o monitoramento da taxa de variação da temperatura medida no sensor de degelo. Quando há mudança de direção da derivada, o algoritmo salva o ponto encontrado ( $T_{mf}$ ) definido aqui como ponto de mudança de fase. O valor encontrado é comparado com um valor padrão sem falha. A Figura 3.11 apresenta as etapas do algoritmo proposto.

O objetivo do algoritmo é detectar a região onde a derivada é nula, ou quase nula. É importante ressaltar que sensores com defeito irão apresentar desvios nessa região. Para avaliação da mudança de direção da derivada, foi usado um método que monitora as últimas três derivadas filtradas do sensor de degelo, detectando variação na direção. A figura 3.12 ilustra esse método.

O ponto de mudança de fase é detectado quando ocorre a seguinte desigualdade e quando os valores estão próximos a zero:

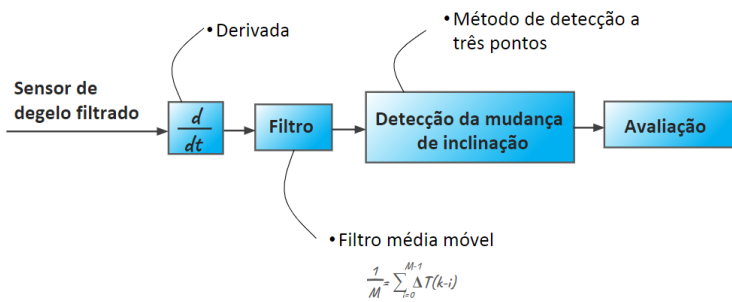


Figura 3.11: Algoritmo para detecção do ponto de mudança de fase

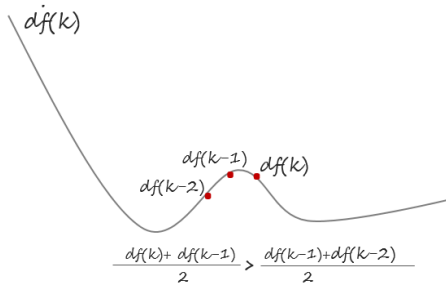


Figura 3.12: Método de 3 pontos para avaliação do ponto de mudança de fase.

$$\frac{d_f(k) + d_f(k-1)}{2} < \frac{d_f(k-1) + d_f(k-2)}{2} \quad (3.8)$$

A Figura 3.13 mostra um resultado experimental onde o ponto de mudança de fase é detectado. O algoritmo de detecção do ponto de mudança de fase trabalha também com um período de amostragem de 10 segundos.

A Figura 3.14 mostra simulações com algoritmo de detecção do ponto, com níveis crescentes de ruído. O primeiro quadro conta com uma amplitude de  $0,5^\circ\text{C}$ . A amplitude foi incrementada em  $0,5^\circ\text{C}$  em cada quadro subsequente.

O uso de três pontos para avaliar a mudança da direção da derivada,

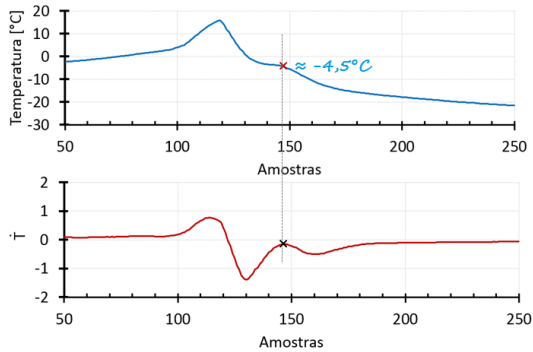


Figura 3.13: Detecção do ponto de mudança de fase.

também foi estudado. A Figura 3.15 mostra um comparativo entre o uso de 3 amostras e a comparação simples com dois pontos ( $df_k > df_{k-1}$ ). O uso de três pontos para avaliação torna o método muito mais robusto ao ruído.

A confiabilidade do método proposto foi avaliada em um teste de longa duração, onde deixou-se o refrigerador operando por 100 horas de forma contínua e foram monitorados os pontos de mudança de fase detectados pelo algoritmo, em 10 degelos. A Figura 3.16 apresenta o teste funcionamento contínuo do refrigerador durante 100 horas, onde todos os pontos de degelo foram detectados corretamente.

O algoritmo 3 mostra a estrutura do sistema de detecção de falha proposto.

### 3.6 Conclusões sobre algoritmos de detecção de falha

O presente capítulo apresentou o desenvolvimento de duas estratégias para detecção de falha, diferenciadas pela forma de avaliar o sensor de degelo. A abordagem empírica, de menor custo computacional e abordagem baseada em propriedades físicas, que tende a ser mais confiável, porém com a penalização de um maior custo computacional e complexidade do algoritmo.

**Algoritmo 3** Algoritmo de pré processamento

---

```

1: procedure PRÉ PROCESSAMENTO( $t_{lig}, T_{df}, T_{sf}, door\_status, compressor\_status$ )
2:    $\alpha \leftarrow compressor\_status(k) - compressor\_status(k - 1)$ 
3:   Se  $status\_compressor = on$  Então
4:      $i \leftarrow i + 1$ 
5:      $rtr \leftarrow (i * 10) / 60$  ▷ Calcula o RTR do compressor
6:     Se  $i < 30$  Então
7:        $gap \leftarrow T_{sf} - T_{df}$ 
8:        $sum \leftarrow sum + gap$ 
9:        $avg \leftarrow sum / i$ 
10:    Senão Se  $status\_door = on$  Então
11:       $flag \leftarrow 1$ 
12:    Fim Se
13:    Senão Se  $compressor\_status = off$  and  $flag = 0$  and  $\alpha = 5$ 
14:    Então
15:      procedure AVALIAÇÃO SENSOR DEGELO( $t_{lig}$ ) ▷ Rotina de
16:      return  $df\_status$ 
17:      Fim procedure
18:      procedure INSERT INTO ARRAY( $\overline{gap}, df\_status$ ) ▷
19:      Procedure for inserting the  $\overline{Gap}$  in the array and calculates the
20:      average and standard deviation of the elements
21:      return  $\bar{v}, sd$ 
22:      Fim procedure
23:       $sum \leftarrow 0$ 
24:       $i \leftarrow 0$ 
25:       $flag \leftarrow 0$ 
26:       $avg \leftarrow 0$ 
27:    Senão Se  $compressor\_status = off$  and  $flag = 1$  and  $\alpha = 5$ 
28:    Então
29:       $sum \leftarrow 0$ 
30:       $i \leftarrow 0$ 
31:       $flag \leftarrow 0$ 
32:       $avg \leftarrow 0$ 
33:    Fim Se
34:    return  $\bar{v}, sd, rtr, t_{on}, time_{off}$  ▷ Return the fault status
35:  Fim procedure

```

---



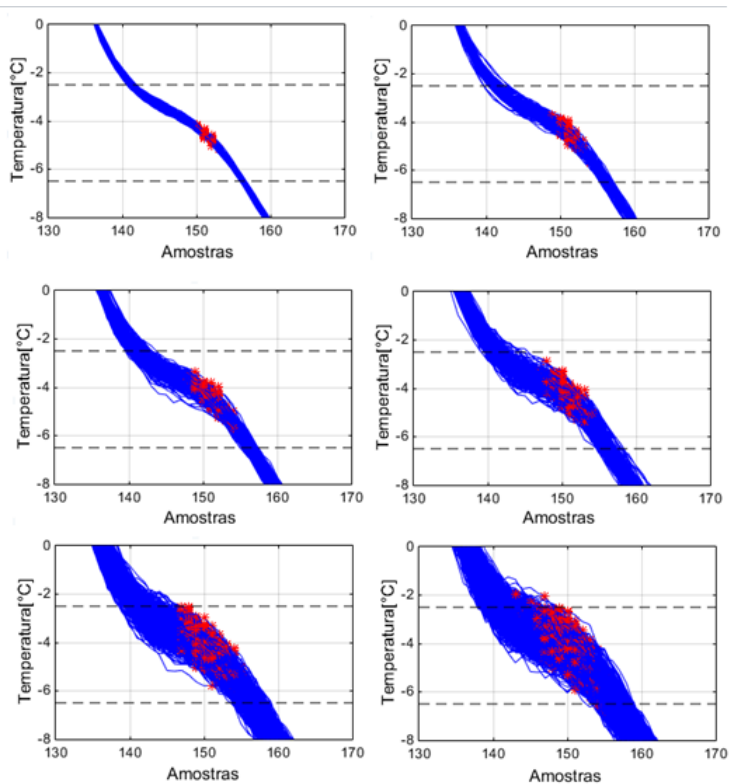


Figura 3.14: Análise da sensibilidade ao ruído.

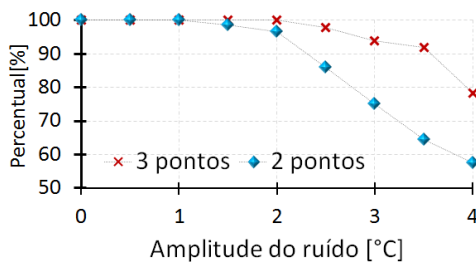


Figura 3.15: Comparação entre o algoritmo de detecção do ponto de mudança de fase usando dois ou três pontos.

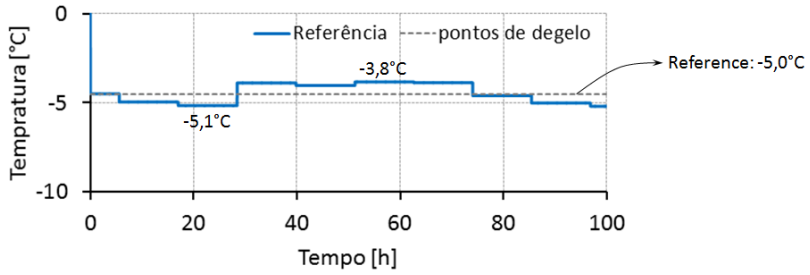


Figura 3.16: Teste de 100 horas contínuas para avaliação do algoritmo de degelo.

---

## Algoritmos de correção de falha

---

Este capítulo apresenta os dois métodos implementados para correção das falhas de *offset* encontradas no sensor de temperatura do refrigerador. O primeiro deles, chamado de correção via software, usa equações e relações empíricas para compensar as falhas. O segundo método é baseado no escalonamento de controladores, onde uma detecção de falha leva o refrigerador a trocar seu sistema de controle original por um controlador alternativo que não usa o sensor danificado em sua malha de controle. Detalhes do desenvolvimento e implementação de ambos os sistemas são apresentados neste capítulo.

### 4.1 Correção via software

O primeiro método de correção proposto é baseado na compensação do *offset* presente no sensor através da soma de um fator de correção à medição de temperatura feita pelo sensor. A Figura 4.1 ilustra essa forma de correção.

A temperatura corrigida ( $T_c$ ) é composta pela temperatura efetivamente medida ( $T_m$ ) adicionado um fator de correção ( $fc$ ). A temperatura medida pode ou não estar sob influência de uma falha.

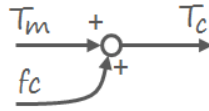


Figura 4.1: Fator de correção incorporado à medição de temperatura.

$$T_c = \underbrace{T_{real} + offset}_{T_m} + fc \quad (4.1)$$

A Equação (4.1) representa o valor de temperatura corrigido que é usado pelo controlador para acionamento do compressor. É importante ressaltar que para a condição descrita pela Equação (4.2) há uma completa compensação da falha, pois o valor do fator de correção é igual a falha de offset observada no sensor:

$$fc = -offset \quad (4.2)$$

Como o valor de *offset* não é conhecido, ele precisa ser estimado para que o fator de correção possa ser incorporado à equação do sensor. Existem basicamente 3 situações distintas onde as correções são aplicadas. As subseções seguintes tratam cada uma dessas correções.

#### 4.1.1 Alteração no RTR do compressor

São falhas de offset de magnitude intermediária que alteram a razão de funcionamento do compressor devido ao *offset*. Esse tipo de falha é detectada pela variação no vetor de avaliação. A Figura 4.2 ilustra esse ponto.

A correção da falha, quando a mesma é detectada pelo desvio no vetor de avaliação é feita através da Equação (4.3).

$$fc = 13,7 - \gamma \quad (4.3)$$

Em que  $\gamma$  é o valor médio do vetor de avaliação no exato momento da detecção da falha.

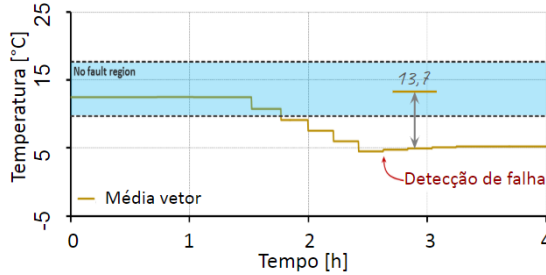


Figura 4.2: Variação na média do vetor de avaliação.

#### 4.1.2 Falhas de alta magnitude

São falhas que provocam o não desligamento do compressor, como ilustrado na Figura 4.3. Por serem positivas e de alta magnitude, o valor medido no sensor do refrigerador nunca alcança o limite inferior definido, e assim, nunca desliga. Por não gerarem ciclos de liga-desliga no compressor, não há carregamento dos valores de  $\overline{gap}$  no vetor de avaliação, e consequentemente, não é possível identificar a presença de falha através deste recurso.

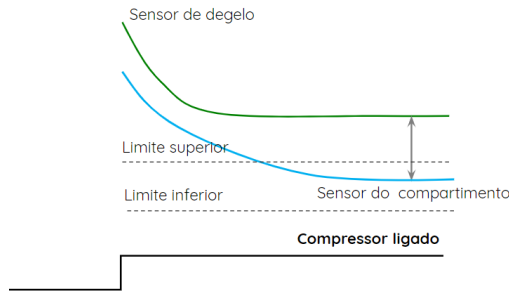


Figura 4.3: Efeito causado por um alto offset positivo.

$$fc = \lambda - T_{df} - T_{rf} \quad (4.4)$$

O valor de  $\lambda$  foi obtido a  $25^{\circ}\text{C}$  em uma condição normal de funcionamento, forçando o compressor a manter-se ligado.

### 4.1.3 Falhas de alta magnitude negativa

Esse tipo de falha forçará o compressor a manter-se desligado, pois o valor lido estará bem abaixo do limite inferior do religamento do compressor. Após detectada essa falha, o algoritmo de correção mantém o compressor ligado e corrige a falha usando o método apresentado na subseção 4.1.2.

## 4.2 Correção por *switching* de controladores

Uma segunda abordagem proposta para lidar com condições de falha encontradas no sensor é um sistema de controle alternativo que não usa o sensor de temperatura para manter as temperaturas dos compartimentos em condições de norma. Testes preliminares, apresentados na Figura 4.4 mostram que existe uma forte correlação entre carga térmica e corrente drenada pelo compressor. Desta forma, é possível usar essa variável para controle.

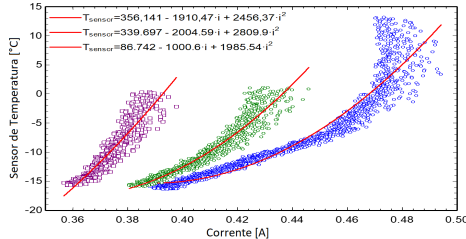


Figura 4.4: Correlação entre carga térmica e corrente do compressor.

### 4.2.1 Fundamentos teóricos sobre motores elétricos

Motores elétricos são os grandes propulsores do alto desenvolvimento tecnológico dos últimos anos. Além de dominar o ambiente industrial, este componente está presente em diversos equipamentos como máquinas de lavar roupa, aspiradores de pó, ventiladores, dentre outros. Os compressores usados em refrigeradores são equipamentos que também usam motores elétricos para transformação de energia elétrica em energia mecânica. Esses motores são responsáveis pelo deslocamento do

pistão e o consequente bombeamento do fluido refrigerante no interior do circuito de refrigeração. A Figura 4.5 apresenta os componentes principais de um compressor, dentre eles o motor elétrico.

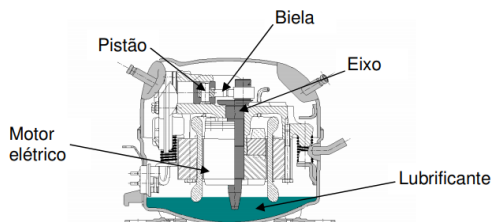


Figura 4.5: Principais componentes de um compressor de refrigeração do tipo alternativo Couto (2006).

Quanto maior a carga em um eixo de um motor elétrico, maior será a corrente elétrica drenada por ele, devido a teoria do campo girante, a fim de manter a rotação constante do motor. No caso específico de compressores de refrigeração, essa carga é provocada pela carga térmica do produto, gerando aumento na pressão interna da câmara de compressão e o consequente aumento de torque no eixo do motor. A Figura 4.6 mostra uma representação simplificada da câmara de compressão e do pistão do compressor.

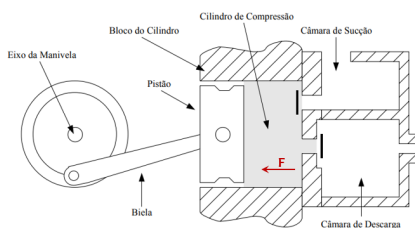


Figura 4.6: representação esquemática simplificada de um compressor alternativo - Adaptado de Couto (2006)

A força  $\vec{F}$  indicada na Figura 4.6 representa o aumento da força contrária ao movimento do pistão, causado pelo aumento das pressões de sucção e descarga, relacionado diretamente ao nível de carga térmica do produto.

Como mostrado anteriormente na Figura 4.4, existe uma forte relação entre variação de temperatura ambiente, e temperaturas pós degelo, onde se encontram duas fontes de variações de carga térmica. O objetivo é encontrar uma relação entre carga térmica do produto e corrente elétrica, de modo que as temperaturas internas dos compartimentos possam ser controladas de forma indireta, somente através da medição dos níveis de corrente do compressor.

#### 4.2.2 Sistema de controle baseado em inteligência computacional

Resultados preliminares mostram que a partir da medição da corrente do compressor podem ser extraídas duas características importantes. A corrente de partida do compressor e a corrente de regime. A Figura 4.7 mostra vários de ciclos de liga/desliga do compressor onde a corrente é medida.

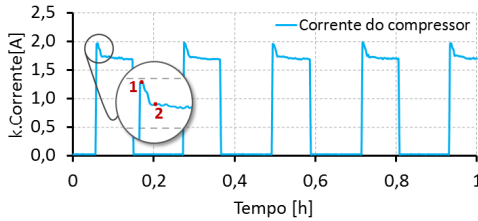


Figura 4.7: Corrente de partida e corrente de regime em um compressor alternativo de velocidade fixa.

O ponto 1 da Figura 4.7 é definido nesta pesquisa como corrente de partida, sendo o valor de pico da curva de corrente logo após a partida do compressor. O ponto 2 é chamado corrente de regime, sendo o nível de corrente estabilizada após o transitório inicial de corrente. A corrente de partida é função direta da carga térmica do refrigerador. Ela é usada para inferir quanto tempo o compressor deve ser mantido acionado para a completa rejeição de carga térmica.

A corrente de regime, é usada para o monitoramento em tempo real de variações de carga térmica. A Figura 4.9 mostra uma abertura de porta feita no refrigerador. Note que a linha preta é o valor identificado de corrente de regime e a linha cinza a corrente em tempo real. Aberturas de porta e perturbações de qualquer natureza fazem com que a



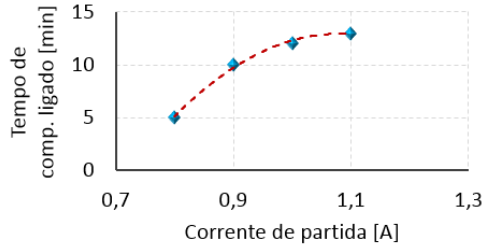


Figura 4.8: Relação entre corrente de partida e tempo de compressor ligado.

corrente desvie de seu valor de regime obtido no início do ciclo. Tempos adicionais são incorporados ao tempo total de compressor ligado quando desvios são observados entre a corrente de regime e a corrente medida em tempo real.

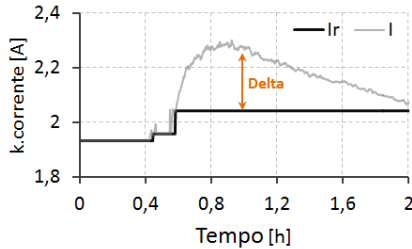


Figura 4.9: Delta de Corrente em relação à corrente de regime

A Figura 4.10 apresenta o esquemático do sistema de controle proposto.

O sistema de controle proposto neste trabalho usa informações de corrente (corrente de regime e corrente de partida) do compressor para gerar os tempos em que este deve ser mantido ligado. O sistema conta com um algoritmo chamado extrator de características, que a partir da medição em tempo real da corrente do compressor extrai a corrente de partida e regime. O sistema de controle fuzzy, define a partir dessas variáveis os tempos onde o compressor deve ser mantido ligado para total rejeição de carga térmica. Um contador implementado, garante que esses tempos sejam cumpridos.

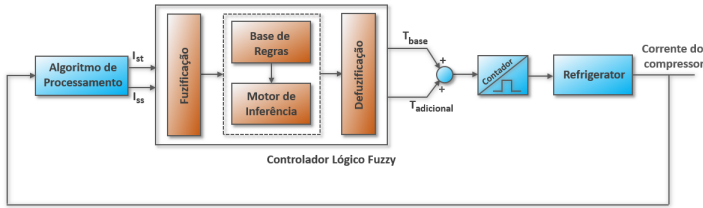


Figura 4.10: Controlador Lógico Fuzzy

As subsecções seguintes detalham o sistema de controle proposto em cada um de seus elementos.

#### 4.2.2.1 Extrator de características

Um filtro do tipo média móvel foi implementado para atenuar o ruído encontrado na medição de corrente. Como o algoritmo deve encontrar o máximo valor de corrente durante a partida do compressor, pequenos ruídos podem levar a aquisições incorretas, tornando a filtragem indispensável. O tempo de amostragem do sinal foi mantido o mesmo usado durante todo o trabalho (10 segundos).

$$I_f(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} I(k-i) \quad (4.5)$$

O algoritmo de extração de características é responsável por extrair da medição de corrente informações como corrente de partida ( $I_p$ ) e corrente de regime ( $I_r$ ), usados pelo controlador fuzzy para gerar duas bases de tempo independentes que serão somadas gerando o tempo total de referência para que o compressor seja mantido ligado.

A determinação do ponto máximo de corrente atingido na partida do compressor é feita através da comparação entre as últimas 3 amostras de corrente filtrada do compressor. A Figura 4.11 mostra o comportamento típico da corrente do compressor em uma condição de partida.

A condição para determinação do ponto máximo da curva de corrente é dada pela desigualdade (4.6), quando  $\alpha$  for maior que  $\beta$ . O uso das três últimas amostras torna a determinação menos influenciável pelo ruído de medição.

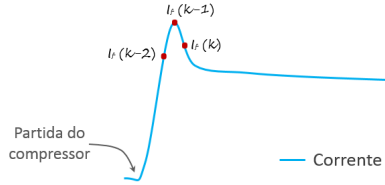


Figura 4.11: Comportamento típico em uma condição de partida de um compressor.

$$\underbrace{\frac{I_f(k) + I_f(k-1)}{2}}_{\alpha} < \underbrace{\frac{I_f(k-1) + I_f(k-2)}{2}}_{\beta} \quad (4.6)$$

A corrente de Regime é o patamar de corrente estabilizada atingido pelo compressor após o pico de partida. Para determinação desta variável monitora-se a variância, Equação (4.1), de um conjunto de amostras de corrente. Quando a variância entrar dentro de patamar definido, a corrente de regime é determinada. A Figura 4.12 ilustra o método.

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (4.7)$$

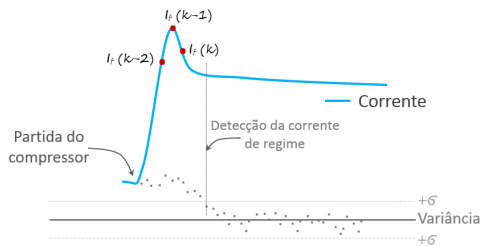


Figura 4.12: Determinação da corrente de regime.

O algoritmo de processamento usa uma *flag* para habilitar a detecção da corrente de partida e de regime, a fim de que essas variáveis sejam extraídas somente uma vez por ciclo. O Algoritmo 4 apresenta a lógica em pseudocódigo.

### 4.2.2.2 Controlador lógico fuzzy

Controladores fuzzy compreendem basicamente um processo de fuzzificação onde os valores numéricos obtidos de sensores são transformados em variáveis linguísticas. Uma base de conhecimento onde as variáveis linguísticas são relacionadas e uma etapa de defuzzificação onde as variáveis linguísticas de saída são transformadas em valores numéricos para serem aplicados aos atuadores do processo. A Figura 4.13 mostra o esquemático de um controlador fuzzy com seus elementos básicos.

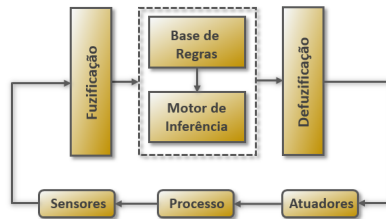


Figura 4.13: Estrutura básica de um controlador fuzzy.

O sistema fuzzy proposto usa funções de pertinência triangulares, Figura 4.14. por serem de fácil implementação em um posterior sistema embarcado do refrigerador e demandarem pouca capacidade de processamento.

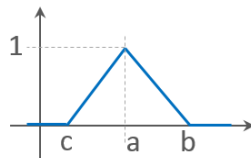


Figura 4.14: Função de pertinência triangular.

Foram definidas duas funções de pertinência para as variáveis de entrada conforme apresentado na Figura 4.15. Em termos da variável corrente de regime, foi criada uma variável derivada chamada Delta, que é quão longe a medição de corrente medida em tempo real está da corrente de regime definida.

Da mesma forma, foram definidas funções de pertinência para as

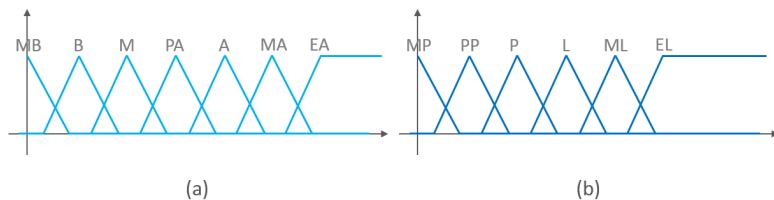


Figura 4.15: Funções pertinência para as variáveis de entrada (a) corrente de partida e (b) corrente de regime.

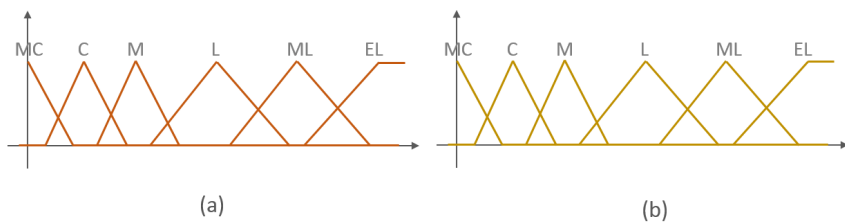


Figura 4.16: Funções pertinência para as variáveis de saída (a) Tempo base e (b) Tempo adicional

Tabela 4.1: Variáveis linguísticas para a corrente de regime (Delta).

Sigla	Variável linguística
MB	Muito Baixo
B	Baixo
M	Médio
PA	Pouco Alto
A	Alto
MA	Muito Alto
EA	Extremamente Alto

variáveis de saída apresentadas na Figura 4.16.

Para a composição dos conjuntos fuzzy foi usada a norma  $t$ , ou normas triangulares. As variáveis linguísticas para a variável de saída

Tabela 4.2: Variáveis linguísticas para a corrente de regime (Delta),

Sigla	Variável linguística
MP	Muito próximo
PP	Pouco próximo
P	Próximo
L	Longe
ML	Muito longe
EL	Extremamente longe

foram definidas como:

Tabela 4.3: Variáveis linguísticas para Tempo base e tempo adicional

Sigla	Variável linguística
MC	Muito Curto
C	Curto
M	Médio
L	Longo
ML	Muito Longo
EL	Extremamente Longo

### 4.2.2.3 Contador

O contador é responsável por gerar o sinal de controle para o compressor levando em consideração os tempos fornecidos pelo controlador fuzzy. A rotina computacional desenvolvida conta os tempos de compressor ligado e desligado e compara com os valores definidos pelo controlador fuzzy.

O tempo que o compressor deve ser mantido desligado é obtido com base no tempo total fornecido.

$$t_{desl}(t_{lig}) = \begin{cases} 7,5 & \text{se } t_{lig} \text{ menor que } 5 \\ -0,94 \ln(t_{lig}) + 8,37 & \text{se } t_{lig} \in [5 \ 120] \\ 4 & \text{se } t_{lig} \text{ maior que } 120 \end{cases}$$

Em que  $t_{lig}$  é o tempo de compressor ligado do ciclo anterior. A função descrita acima foi obtida experimentalmente usando resultados do refrigerador operando com seu controle original por temperatura. A Figura 4.17 mostra os valores experimentais e a curva ajustada através do critério de minimização do erro quadrático.

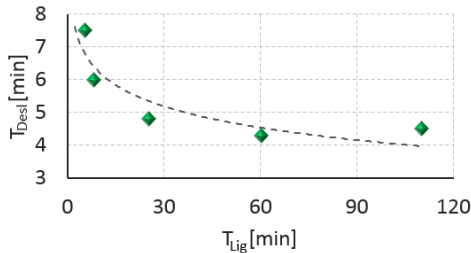


Figura 4.17: Relação entre tempos de compressor ligado e desligado.

O método de defuzzificação centro de gravidade foi usado para transformar as variáveis linguísticas em valores reais.

$$u = \frac{\sum_{j=0}^N u_j \mu_{out}(u_j)}{\sum_{j=0}^N \mu_{out}(u_j)} \quad (4.8)$$

Em que  $\mu_{out}(u_i)$  é área da função pertinência modificada pelo resultado da inferência fuzzy, e  $u_i$  é a posição do centróide da função pertinência original, indicado pela letra  $a$  da Figura 4.14.

O grau de pertinência para uma função do tipo triangular é dado pela Equação (4.9).

$$\mu(x) = \max \left( \min \left( \frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right) \quad (4.9)$$

**Algoritmo 4** Algoritmo de extração de características

---

```

1:  $I(k) \leftarrow \text{Leitura de corrente}()$ 
2:  $I_f(k) \leftarrow \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} I(k-i)$  ▷ Filtragem da corrente
3: Se Compressor == desligado Então
4:    $flag \leftarrow 1$ 
5: Senão Se Compressor == ligado e  $flag == 1$  Então
6:    $\alpha \leftarrow \frac{I_f(k) + I_f(k-1)}{2}$ 
7:    $\beta \leftarrow \frac{I_f(k-1) + I_f(k-2)}{2}$ 
8:    $\sigma^2 \leftarrow \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}$ 
9:   Se  $\alpha \geq \beta$  Então
10:     $I_{st} \leftarrow I_f(k)$ 
11:   Fim Se
12:   Se  $\sigma^2 \leq \text{Tolerância}$  Então
13:     $I_{ss} \leftarrow I_f(k)$ 
14:     $flag \leftarrow 0$ 
15:   Fim Se
16: Fim Se

```

---

Em termos de tempo de processamento, o algoritmo de extração obteve tempo de execução muito rápida, testado em *labview*. A tolerância para a variância foi definida experimentalmente levando em consideração diversas condições de temperatura ambiente.

Sumarizando, De acordo com o Delta de corrente, são definidos os tempos adicionais de compressor ligado, segundo as regras fuzzy definidas. A cada período de amostragem, o tempo adicional é incrementado de acordo com o delta entre corrente de regime e corrente medida. Existe uma zona morta de 10% onde até esse valor, o tempo adicional de compressor ligado não é incrementado. Da mesma forma, O tempo base é definido através da corrente de partida. Esses tempos definem o tempo total que o compressor deve permanecer ligado para total rejeição de carga térmica.



---

## Resultados e discussões

---

O presente capítulo apresenta um conjunto de experimentos para avaliação de performance dos algoritmos propostos. São definidos também as métricas de desempenho para comparação dos métodos de detecção e diagnóstico de falha desenvolvidos.

### 5.1 Matriz de avaliação e métricas de desempenho

Os algoritmos de detecção de falha propostos foram avaliados injetando falhas de offset nos sensores de degelo e de temperatura do compartimento, segundo a Tabela 5.1.

Os valores de *offset* para o sensor de degelo foram escolhidos pequenos suficiente para potencialmente gerar falsos diagnósticos no algoritmo. Note que os valores foram escolhidos próximos aos valores de banda escolhidos para determinar a ocorrência ou não de falha, ao passo que, falhas na detecção do bom funcionamento do sensor de degelo, tenham potencial de gerar falsas inferências por parte do algoritmo.

Os valores de falha no sensor do refrigerador, foram escolhidos pequeno o suficiente para gerar um nível de degradação de desempenho

Tabela 5.1: Matriz de testes experimentais para avaliação do algoritmo de detecção de falha.

Teste	Degelo	Sensor	Resultado Esperado
1,2	$\pm 3^{\circ}\text{C}$	$0^{\circ}\text{C}$	Sem Falha
3,4	$\pm 6^{\circ}\text{C}$	$0^{\circ}\text{C}$	Sem Falha
5,6	$0^{\circ}\text{C}$	$\pm 5^{\circ}\text{C}$	Falha
7,8	$0^{\circ}\text{C}$	$\pm 10^{\circ}\text{C}$	Falha
9,10	$0^{\circ}\text{C}$	$\pm 70^{\circ}\text{C}$	Falha

que seja perceptível ao consumidor (que é o caso de falhas da ordem de  $5^{\circ}\text{C}$ ), falhas medianas e falhas de alta magnitude.

O resultado das detecção é classificado em:

- ◇ **Detecções corretas:** o algoritmo detecta uma falha existente no sensor do refrigerador.
- ◇ **Falsos Positivos:** o algoritmo aponta que o sistema opera em modo de falha sem nenhuma falha no sistema. Nesta classificação, entra possíveis detecções de falha ocasionadas por falhas geradas no sensor de degelo.
- ◇ **Falsos Negativos:** ocorre quando o algoritmo não consegue detectar uma falha instaurada no sistema.

É importante ressaltar que, particularmente no contexto desse trabalho, falsos positivos são mais prejudiciais, pois geram ações corretivas em um sistema que opera sem falhas.

A métrica para comparação de desempenho entre os dois métodos de gerenciamento de falha usa a média das temperaturas dos compartimentos, pois o objetivo de algoritmos de correção de falha é levar o refrigerador a operar em uma condição mais próxima possível daquela que ele operaria sem falha.

As temperaturas médias do refrigerador e do congelador são definidas como a média aritmética das temperaturas dos termopares em seus respectivos compartimentos, Equações (5.1) e (5.2). A distribuição dos termopares no interior do refrigerador é apresentada na Figura 5.1.



Figura 5.1: Posicionamento dos termopares no interior do refrigerador

$$T_C = \frac{T_{P1} + T_{P2}}{2} \quad (5.1)$$

$$T_R = \frac{T_{P3} + T_{P4} + T_{P5}}{3} \quad (5.2)$$

A comparação entre os métodos de correção é feita através das temperaturas médias de cada compartimento, antes da falha e depois da possível correção. As médias são tomadas em um ciclo completo de liga e desliga, Figura 5.2, de acordo com as Equações (5.3) e (5.4).

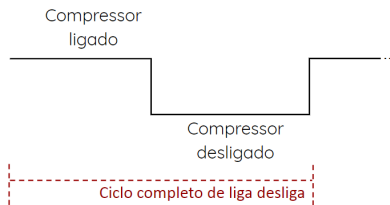


Figura 5.2: Ciclo completo de liga e desliga do compressor.

$$\bar{T}_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_C)_i \quad (5.3)$$

$$\overline{T_r} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_R)_i \quad (5.4)$$

O erro entre valor médio de temperatura do compartimento antes da falha e depois da correção é dado pelas Equações (5.5) e (5.6):

$$E[\%] = \frac{\overline{T_c} - \overline{T_c}'}{\overline{T_c}'} .100 \quad (5.5)$$

$$E[\%] = \frac{\overline{T_r} - \overline{T_r}'}{\overline{T_r}'} .100 \quad (5.6)$$

Em que  $T'_c$  e  $T'_r$  é o valor da média da temperatura do congelador e do refrigerador após a recuperação da falha. Além disso, são considerados como critérios de avaliação: (i) tempo de recuperação e (ii) tempo de rejeição de abertura de porta (30 segundos e 2 minutos), para efeitos comparativos entre os métodos de correção avaliados nesse trabalho. A Tabela 5.2 sumariza os critérios de desempenho para os métodos propostos.

Tabela 5.2: Critérios de desempenho para os algoritmos de detecção de falha.

Algoritmo	Critério de desempenho
Detecção	Número de falsos positivos, Número de falsos Negativos Detecções Corretas
Correção	$E_r[\%]$ $E_c[\%]$ $t_{pd}[min]$ $t_{rd}[min]$

Para os algoritmos de correção de falha, serão avaliadas falhas de *offset* no sensor do refrigerador, conforme apresentado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Matriz de testes experimentais para avaliação dos algoritmos de correção de falha.

Teste	Falha no sensor do refrigerador
1,2	$\pm 5^{\circ}\text{C}$
3,4	$\pm 10^{\circ}\text{C}$
5,6	$\pm 70^{\circ}\text{C}$

## 5.2 Resultados do algoritmo de detecção de falha

A seguir, os resultados obtidos para os métodos de detecção propostos são apresentados e discutidos.

### 5.2.1 Algoritmo de detecção baseado em avaliação empírica do sensor de degelo

A Figura 5.3 mostra o resumo dos resultados experimentais obtidos para o algoritmo empírico. Apesar do número alto de detecções corretas, o algoritmo obteve 6,7% de falsos positivos, algo indesejado se tratando de um algoritmo para um sistema embarcado.

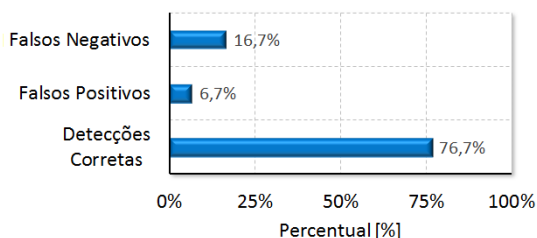


Figura 5.3: Resultados experimentais do algoritmo empírico.

Os testes realizados em temperatura ambiente de  $25^{\circ}\text{C}$  foram os que obtiveram os melhores resultados. Isso se dá basicamente devido ao fato que a curva do sensor de degelo foi obtida a esta temperatura, bem como o valor central definido para o vetor de avaliação.

Tabela 5.4: Detalhamento dos resultados para 25°C .

Teste	Degelo	Sensor	Resultado Esperado	Resultado
1	+3°C	0°C	Sem Falha	<b>Sem Falha</b>
2	-3°C	0°C	Sem Falha	<b>Sem Falha</b>
3	+6°C	0°C	Sem Falha	<b>Sem Falha</b>
4	-6°C	0°C	Sem Falha	<b>Sem Falha</b>
5	0°C	+5°C	Falha	<b>Falha</b>
6	0°C	-5°C	Falha	<b>Falha</b>
7	0°C	+10°C	Falha	<b>Falha</b>
8	0°C	-10°C	Falha	<b>Falha</b>
9	0°C	+70°C	Falha	<b>Falha</b>
10	0°C	-70°C	Falha	<b>Falha</b>

Os testes realizados em temperatura ambiente de 32°C , Tabela 5.5, mostram que em algumas situações o algoritmo é levado a erros de detecção. Nesses conjuntos de testes um *offset* no sensor de degelo foi apontado como falha. Além disso, o algoritmo não conseguiu inferir a presença de falha em dois casos. Isso ocorreu basicamente porque nessas duas condições específicas, a diferença entre sensor de degelo medido e predito ficaram fora da tolerância definida. Desta forma os valores de  $\overline{gap}$  não foram carregados no vetor de avaliação, impossibilitando a detecção dessas falhas.

Os mesmos problemas foram encontrados em testes na temperatura ambiente de 16°C, Tabela 5.6. Nesses testes um número ainda maior de falsos negativos foi observado, onde as falhas de +5°C, -5°C e +10°C não foram detectadas, além de outro falso positivo observado no teste 1.

A Figura 5.4 mostra um teste onde uma falha de -5°C é detectada. É possível observar a variação no valor da média do vetor de dados, a medida que os valores de  $\overline{gap}$  são carregados no vetor. A falha é de-

Tabela 5.5: Detalhamento dos resultados para 32°C .

Teste	Degelo	Sensor	Resultado Esperado	Resultado
1	+3°C	0°C	Sem Falha	<b>Sem Falha</b>
2	-3°C	0°C	Sem Falha	<b>Sem Falha</b>
3	+6°C	0°C	Sem Falha	<b>Sem Falha</b>
4	-6°C	0°C	Sem Falha	<b>Falha</b>
5	0°C	+5°C	Falha	<b>Falha</b>
6	0°C	-5°C	Falha	<b>Sem Falha</b>
7	0°C	+10°C	Falha	<b>Falha</b>
8	0°C	-10°C	Falha	<b>Sem Falha</b>
9	0°C	+70°C	Falha	<b>Falha</b>
10	0°C	-70°C	Falha	<b>Falha</b>

Tabela 5.6: Detalhamento dos resultados para 16°C .

Teste	Degelo	Sensor	Resultado Esperado	Resultado
1	+3°C	0°C	Sem Falha	<b>Falha</b>
2	-3°C	0°C	Sem Falha	<b>Sem Falha</b>
3	+6°C	0°C	Sem Falha	<b>Sem Falha</b>
4	-6°C	0°C	Sem Falha	<b>Sem Falha</b>
5	0°C	+5°C	Falha	<b>Sem Falha</b>
6	0°C	-5°C	Falha	<b>Sem Falha</b>
7	0°C	+10°C	Falha	<b>Sem Falha</b>
8	0°C	-10°C	Falha	<b>Falha</b>
9	0°C	+70°C	Falha	<b>Falha</b>
10	0°C	-70°C	Falha	<b>Falha</b>

tectada quando o desvio padrão dos elementos do vetor alcança valores abaixo de um limite, e a média do vetor de avaliação sai de uma região definida para ausência de falha.

Na Figura 5.5 pode ser observado um teste onde não foi detectado a presença de falha (falso negativo). Note que o vetor de avaliação

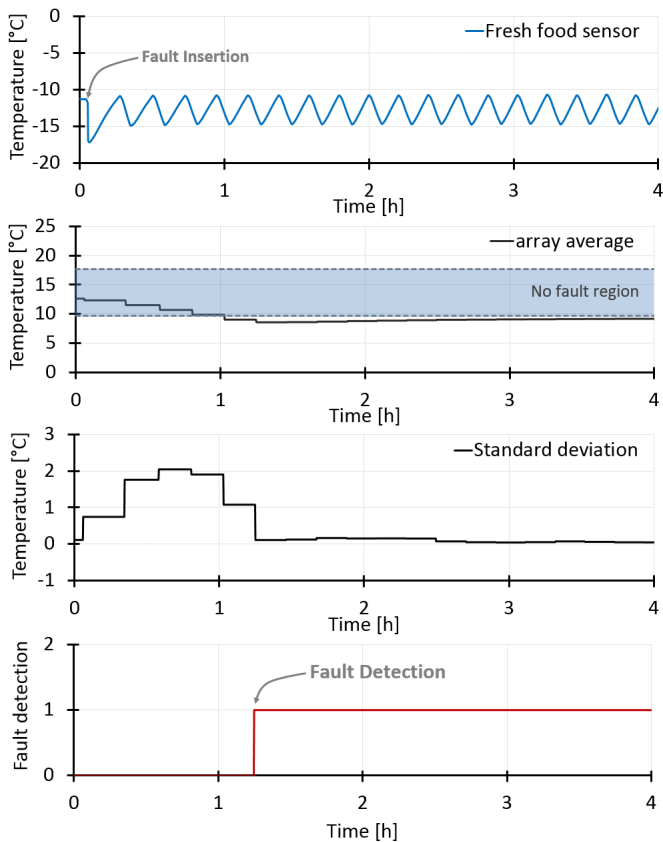


Figura 5.4: Teste de detecção de falha de  $-5^{\circ}\text{C}$ .

permanece constante, pois a predição do valor do sensor de degelo não foi adequada, assim os valores de  $\overline{gap}$  não foram carregados no vetor de avaliação, impossibilitando a detecção da falha.

### 5.2.2 Algoritmo baseado em propriedades físicas

O algoritmo que usa uma avaliação mais complexa no sensor de degelo, obteve uma melhora significativa de desempenho. O algoritmo apresentou 86,7% de detecções corretas e nenhum falso positivo. Figura 5.6 resume os resultados dos testes em termos dos critérios de desempenho definidos. Somente 3 falhas não foram detectadas pelo novo algoritmo



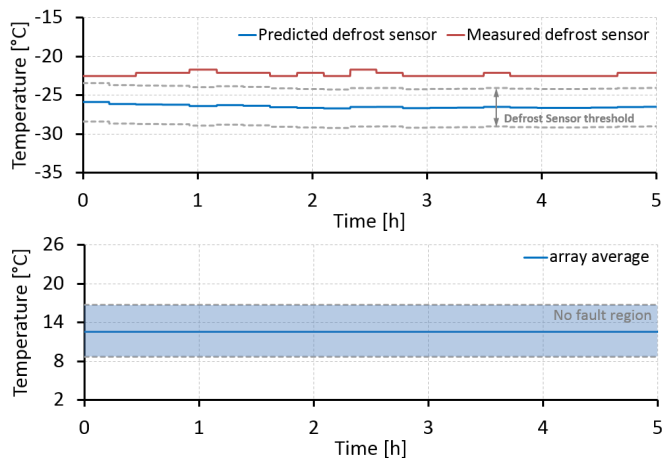


Figura 5.5: Teste de falha de  $+5^{\circ}\text{C}$  em temperatura ambiente de  $32^{\circ}\text{C}$ .

proposto.

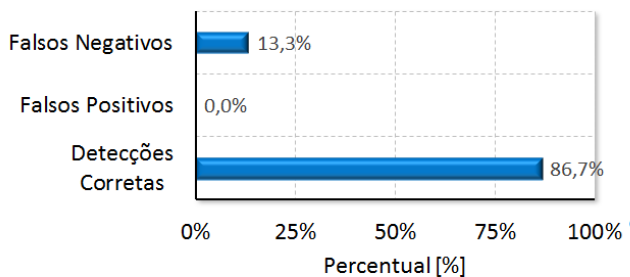


Figura 5.6: Resumo dos testes para o algoritmo baseado em propriedades físicas.

### 5.2.3 Comparativos entre os dois métodos

A figura 5.7 mostra o comparativo entre os algoritmos do ponto de vista dos critérios de desempenho definidos.

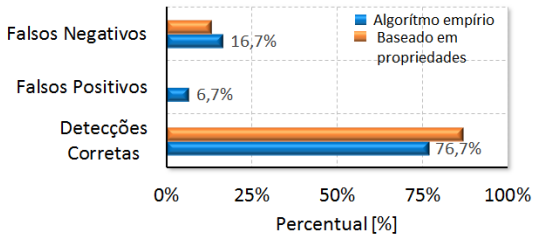


Figura 5.7: Comparação entre os dois métodos de detecção de falha propostos no trabalho.

### 5.3 Resultados do algoritmo de correção de falhas

As duas próximas subseções apresentam os resultados obtidos com os dois sistemas de correção de falha desenvolvidos. Ao final, os dois métodos são comparados através dos critérios de desempenho definidos no início deste capítulo.

#### 5.3.1 Algoritmo de correção via software

A Figura 5.8 apresenta um teste de correção de falha de  $-10^{\circ}\text{C}$  a uma temperatura ambiente de  $25^{\circ}\text{C}$ . Após a correção atuar no sistema, as temperaturas médias dos compartimentos do refrigerador voltam para patamares muito similares aos observados antes da ocorrência de falha.

A Figura 5.9 mostra uma correção de falha de um *offset* de magnitude  $-5^{\circ}\text{C}$  em uma temperatura ambiente de  $16^{\circ}\text{C}$ . Neste teste em específico o erro de correção foi da ordem de 3%.

Para condições de não desligamento do compressor, o sistema de correção também obteve bons resultados. A Figura 5.10 mostra um teste onde uma falha de  $+10^{\circ}\text{C}$  é detectada e corrigida.

#### 5.3.2 Sistema de controle alternativo

A figura 5.11 mostra um teste de pulldown em uma temperatura de  $32^{\circ}\text{C}$ .

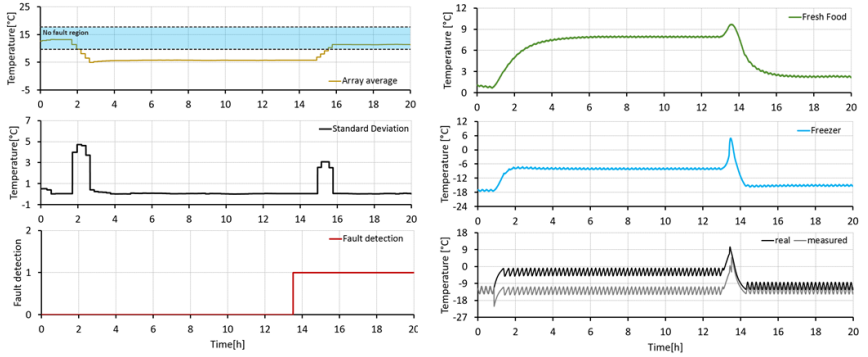


Figura 5.8: Correção de falha de  $-10^{\circ}\text{C}$  em temperatura ambiente  $25^{\circ}\text{C}$

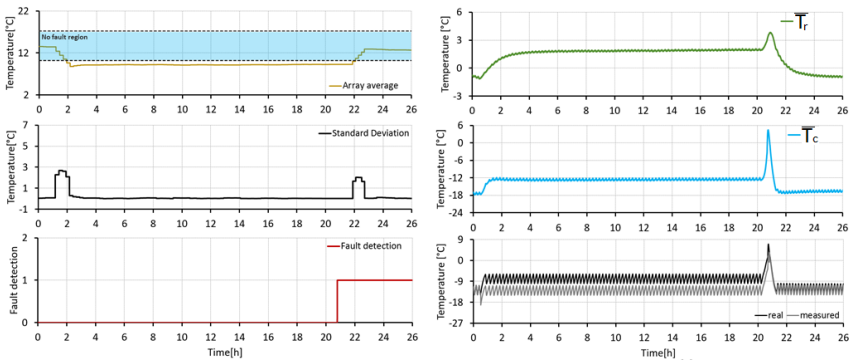


Figura 5.9: Correção de falha de offset de  $-5^{\circ}\text{C}$  a  $16^{\circ}\text{C}$ .

Note que em regime permanente, a temperatura dos compartimentos alcança os valores de norma. Durante o pull down é possível observar alguns desligamentos indesejáveis durante o abaixamento da temperatura, porém isso não prejudica a performance, pois o tempo foi bem similar ao pulldown operando com o controle de temperatura original. Na Figura 5.12, são apresentados resultados de rejeição de perturbação. É possível observar um degelo e duas aberturas de porta (uma de 30 segundos e outra de 2 minutos). O sistema de controle rejeita as perturbações.

O teste de pulldown a  $25^{\circ}\text{C}$ , Fig. 5.13 de temperatura ambiente

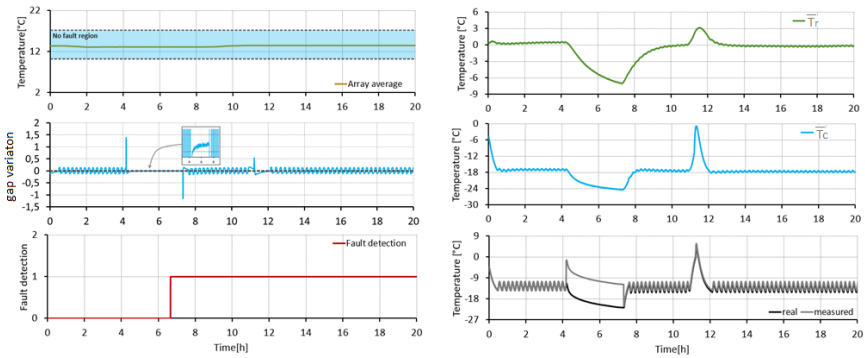


Figura 5.10: Correção de falha de offset de  $+10^{\circ}\text{C}$  a  $16^{\circ}\text{C}$  .

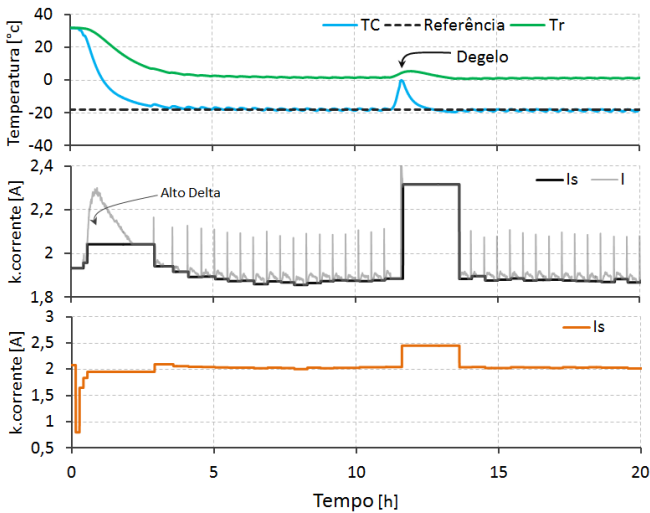


Figura 5.11: Teste de pulldown a  $32^{\circ}\text{C}$ .

apresenta um número maior de desligamentos indesejáveis de compressor durante o período de abaixamento da temperatura, o que penalizou um pouco mais o tempo de pulldown.

Para teste de rejeição de perturbação houve uma maior perda de desempenho em relação à performance original do produto, devido a um maior número de desligamentos indesejáveis, embora o sistema de con-

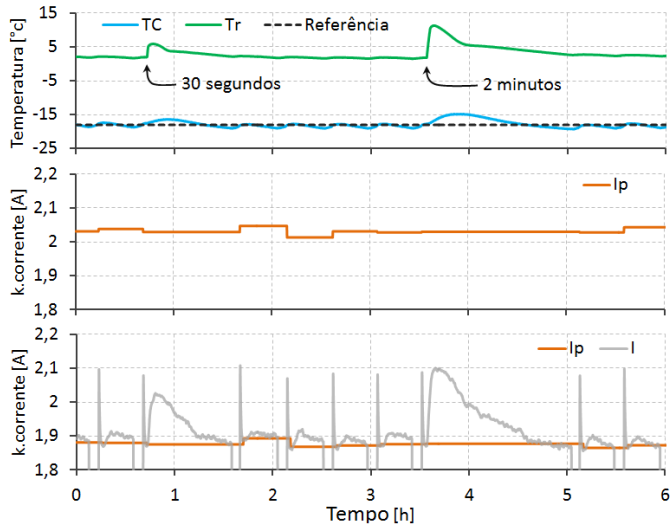


Figura 5.12: Teste de rejeição de perturbação a 32°C .

trole proposto alcance os valores de referência em regime permanente, Fig 5.13.

Em temperaturas ambientes reduzidas, 16°C por exemplo, foram obtidos os piores resultados, ainda assim o refrigerador operou em regime permanente com um erro percentual de aproximadamente + 1,7K. Os tempos de recuperação de temperatura em condições de aberturas de porta também ficaram prejudicados em comparação a resultados *baseline* do produto.

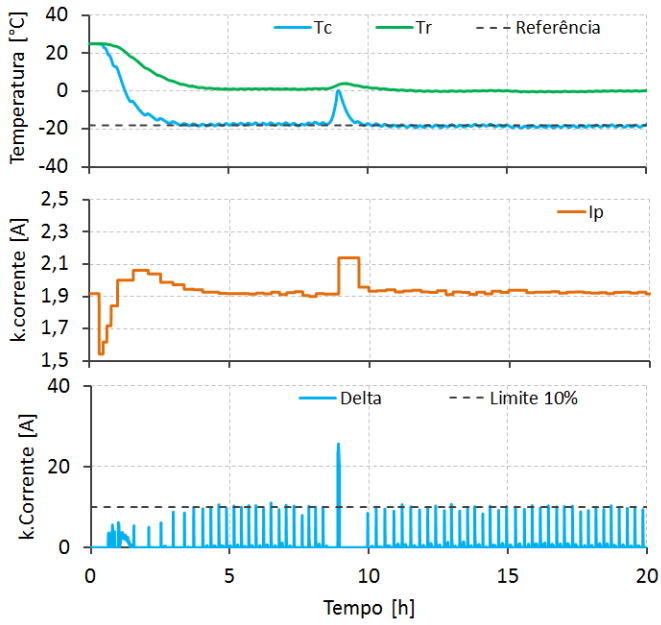


Figura 5.13: Teste de pulldown a 25°C

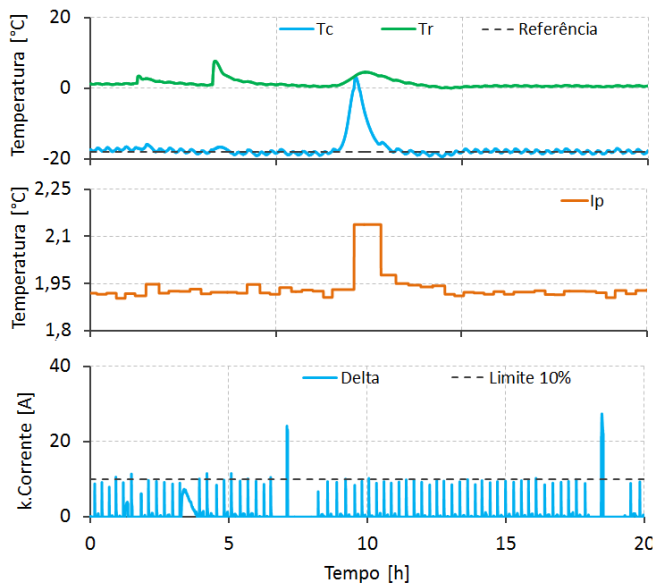


Figura 5.14: Teste de rejeição de perturbação a 25°C





---

## Conclusões e Recomendações para Trabalhos Futuros

---

Este capítulo apresenta as considerações finais acerca do trabalho e expõe algumas sugestões de trabalhos futuros.

### 6.1 Considerações Finais

No presente trabalho, buscou-se desenvolver métodos de detecção e correção de falha para *offsets* em sensores de temperatura de um refrigerador do tipo *single door*. Os dois algoritmos de detecção propostos se diferem apenas pela forma na qual o sensor de degelo é avaliado, um por uma equação empírica e outro usando propriedades físicas de mudança de fase da água. O último apresentou melhores resultados pelo fato de ter uma base física e não sofrer influência de temperaturas externas durante o processo de avaliação. Este algoritmo apresentou 86,7% de detecções corretas em falhas induzidas no sensor contra 76,7% obtido com o primeiro método. Outro fator importante a ser considerado foi a ausência de falsos positivos com o método baseado em propriedades físicas. Se tratando de um sistema embarcado, é algo extremamente desejável, evitando assim o gerenciamento corretivo de uma falha ine-

xistente. O tempo de detecção deste algoritmo também foi penalizado, devido ao mesmo necessitar de dois processos de degelo consecutivos para aferir a detecção. Esse problema pode ser contornado, antecipando o degelo em uma sinalização de falha por parte do algoritmo, porém no trabalho não teve-se acesso à lógica de degelo, o que impossibilitou tal ação. O algoritmo com avaliação de degelo através de uma função empírica, gerou 16,7% de falsos positivos, o que geraria correções indevidas em um percentual relativamente alto de falhas. Com relação aos métodos de correção propostos, o primeiro é baseado em correção através de equações matemáticas que atuam após o processo de detecção. Esse método visa compensar os desvios no sensor através de um fator de compensação incorporado à medição do sensor. Os algoritmos para tal, possuem um baixo custo computacional e apresentaram resultados satisfatórios nos testes de desempenho propostos. A grande maioria das correções ficaram com erro abaixo de 3%. Correções com erro maiores foram observados em falhas positivas que aumentam o *run time* do compressor. O controle alternativo baseado na medição de corrente do compressor possui um maior custo de implementação, pois usa um sensor de corrente adicional ao produto e embora tenha resultados de desempenho piores, possui um alto potencial de aplicação, pois seria uma ação corretiva independente da natureza da falha, diferentemente do método baseado em compensação de falha, que pode gerar compensações erradas para outros tipos de falhas, como *drifts* por exemplo.

## 6.2 Recomendações para Trabalhos Futuros

Objetivando ampliar os conhecimentos adquiridos com o trabalho são sugeridos os seguintes trabalhos futuros:

- ◇ Recomenda-se avaliar a performance dos algoritmos de detecção de falha desenvolvidos frente a outros tipos de falha como desvios, etc.
- ◇ Melhorar o controle fuzzy proposto em condições onde ele obteve o pior desempenho, como condições de carga térmica reduzida e desligamentos desnecessários durante condições de *pulldown*.
- ◇ Avaliar outras possíveis técnicas de aprendizagem de máquina para inferência de sistemas de controle.

- ◇ Avaliar o controle por corrente do ponto de vista de robustez.



---

## References

---

- Boechat, A. A. (2012). *Algoritmos para a detecção de drifting em sensores de fundo de poço*. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa catarina.
- Breuker, M. et al. (1997). Evaluation of a statistical, rule-based detection and diagnosis method for vapor compression air conditioners. *Master's thesis, School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette. IN.*
- Camarano, D. d. M. (1993). *Procedimentos aplicáveis à garantia da qualidade metrológica dos resultados na termometria automatizada com termopar e sensores resistivos*. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa catarina.
- Cheung, H. and Braun, J. E. (2012). Inverse modeling to simulate fault impacts for vapor compression equipment part 2: System modeling and validation.
- Couto, P. R. C. (2006). *Análise de mancais radiais hidrodinâmicos com aplicação em compressores herméticos de refrigeração*. Tese de doutorado - Universidade Federal de Santa catarina.
- Franklin, G. F., Powell, J. D., and Emami-Naeini, A. (2019). Feedback control of dynamic systems.

- Gertler, J. (1998). Fault detection and diagnosis in engineering systems. *CRC, Virginia, USA.*
- Gonçalves, J. (2004). *Desenvolvimento e Aplicação de uma Metodologia de Análise Térmica de Refrigeradores.* Tese de doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina.
- Han, H., Gu, B., Wang, T., and Li, Z. (2011). Important sensors for chiller fault detection and diagnosis (fdd) from the perspective of feature selection and machine learning. *International Journal of Refrigeration*, 34(2):586–599.
- Hermes, C. J. L. (2006). *Uma metodologia para a simulação transiente de refrigeradores domésticos.* Tese de doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina.
- Isermann, R. (2006). *Fault-diagnosis systems: an introduction from fault detection to fault tolerance.* Springer Science & Business Media.
- Kiencke, U., Berger, T., and Neumann, K. (1997). Diagnosis of automotive systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 30(18):751–758.
- Kocuyigit, N. (2015). Fault and sensor error diagnostic strategies for a vapor compression refrigeration system by using fuzzy inference systems and artificial neural network. *International Journal of Refrigeration*, 50:69–79.
- Li, G., Hu, Y., Chen, H., Li, H., Hu, M., Guo, Y., Shi, S., and Hu, W. (2016). A sensor fault detection and diagnosis strategy for screw chiller system using support vector data description-based d-statistic and dv-contribution plots. *Energy and Buildings*, 133:230–245.
- Londero, D. L. (2012). *Análise da formação de gelo e geada e seu efeito no desempenho termo-hidráulico de evaporadores do tipo tubo aletado.* Tese de doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina.
- Montgomery, D. C., Runger, G. C., and Hubele, N. F. (2009). *Engineering statistics.* John Wiley & Sons.
- Musgrave, J. L., Guo, T.-H., Wong, E., and Duyar, A. (1997). Real-time accommodation of actuator faults on a reusable rocket engine. *IEEE transactions on control systems technology*, 5(1):100–109.

- Patton, R. (1991). Fault detection and diagnosis in aerospace systems using analytical redundancy. *Computing & Control Engineering Journal*, 2(3):127–136.
- Rizzoni, G., Soliman, A., and Passino, K. (1993). A survey of automotive diagnostic equipment and procedures. Technical report, SAE Technical Paper.
- Rossi, T. M. and Braun, J. E. (1997). A statistical, rule-based fault detection and diagnostic method for vapor compression air conditioners. *Hvac&R Research*, 3(1):19–37.
- Schurt, L. C. (2012). *Modelagem matemática e controle multivariável de sistemas de refrigeração por compressão mecânica de vapor*. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa catarina.
- Senger, G. d. A. (2014). *Estudo e desenvolvimento de estratégias de controle para um sistema de refrigeração de duplo-evaporador*. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa catarina.
- Sette, R. C. (2015). *Avaliação de métodos para quantificar geada em evaporadores de refrigeradores frost-free*. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa catarina.
- Shen, B. (2006). Improvement and validation of unitary air conditioner and heat pump simulation models at off-design conditions.
- Waltrich, P. J. (2008). *Análise e otimização de evaporadores de fluxo acelerado aplicados a refrigeração doméstica*. Tese de doutorado - Universidade Federal de Santa catarina.
- Yan, K., Shen, W., Mulumba, T., and Afshari, A. (2014). Arx model based fault detection and diagnosis for chillers using support vector machines. *Energy and Buildings*, 81:287–295.

