

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS

Gustavo Ardigó de Souza

Estudo e Implementação de uma
Estratégia Inovativa para Controle de
Temperatura

Florianópolis

2019

Gustavo Ardigó de Souza

Estudo e Implementação de uma Estratégia Inovativa para Controle de Temperatura

Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a aprovação na disciplina **DAS 5511: Projeto de Fim de Curso** do curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação.
Orientador: Prof. Marcelo de Lellis Costa de Oliveira

Florianópolis
2019

Gustavo Ardigó de Souza

Estudo e Implementação de uma Estratégia Inovativa para Controle de Temperatura

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina DAS5511: Projeto de Fim de Curso e aprovada na sua forma final pelo Curso de Engenharia de Controle e Automação.

Florianópolis, 10 de dezembro de 2019

Banca Examinadora:

Christian J. L. Hermes

Orientador na Empresa
POLO

Marcelo de Lellis Costa de Oliveira

Orientador no Curso
Universidade Federal de Santa Catarina

Júlio Elias Normey Rico

Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Eduardo Marschall

Debatedor
Universidade Federal de Santa Catarina

Renato Kendy Murata

Debatedor
Universidade Federal de Santa Catarina

*Dedico este trabalho à minha família, Fábio,
Leila e Gabriel, grandes incentivadores du-
rante esta caminhada.*

Agradecimentos

À minha família, pela força e coragem durante toda esta longa caminhada, pois sem eles nada seria possível.

Aos meus amigos por todas as risadas, alegrias, tristezas e dores compartilhadas durante esse ciclo que se encerra. Em especial à minha amiga de todas as horas Gabriela Auth por sempre me incentivar independente da situação e por todos os conselhos ao longo dessa fase que se encerra.

Aos meus orientadores Prof. Alexandre Trofino, Prof. Marcelo De Lellis, Prof. Claudio Melo (*in memoriam*) e Prof. Christian Hermes por todos conhecimentos transmitidos.

À Whirlpool, e em especial ao engenheiro Everton, pelo envolvimento durante o projeto e ao POLO pela oportunidade de desenvolver o trabalho.

Ao engenheiro Aleksandro dos Santos Silveira pela ajuda fundamental durante todas as fases do projeto e por tonar palpáveis todos os assuntos difíceis sempre demonstrando alto conhecimento e segurança.

Aos colegas Bruno, Paulo, Pedro, Rebeca, Eduardo e aos demais colaboradores do POLO que contribuíram de alguma forma na execução do trabalho. Em especial ao colega de trabalho Felipe por todos os ensinamentos sobre refrigeração passados e ao colega Raul pela ajuda indispensável para conclusão do projeto.

*“Se A é o sucesso, então A é igual a X mais Y mais Z.
O trabalho é X; Y é o lazer; e Z é manter a boca fechada.”
(Albert Einstein)*

Resumo

Os refrigeradores de linha branca são produtos conhecidos por sua alta importância, eles tornaram-se indispensáveis para o dia-a-dia da população. Diante dessa necessidade, as empresas estão cada vez mais buscando reduzir o custo de fabricação e manutenção desses produtos sem alterar seus padrões de operação. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi desenvolver uma técnica inovadora de controle, capaz de regular a temperatura interna de um refrigerador doméstico, utilizando a corrente do compressor como variável de processo. Esse tipo de controle só pôde ser projetado porque a corrente do compressor é muito sensível à quantidade de carga térmica em sistemas de refrigeração. A estratégia foi aplicada em um produto doméstico de baixo custo com uma porta e um compressor de velocidade fixa. No total, 14 testes foram realizados para validar a lógica de controle, o aparelho foi testado em três temperaturas ambientes diferentes (16°C, 25°C e 32°C) e em três situações: *pull-down*, degelo e abertura da porta. Todos os experimentos foram realizados em uma câmara controlada que regula temperatura, umidade e velocidade do ar. O refrigerador também foi testado durante mudanças de temperatura ambiente, de 16°C para 25°C e de 25°C para 32°C. O algoritmo de controle foi composto por uma troca dinâmica de referência para um controlador PI, juntamente com um conjunto de suposições empíricas. Para todos os casos citados acima, a nova técnica de controle foi capaz de manter a temperatura do refrigerador em níveis muito semelhantes aos apresentados nos testes de *baseline* e, com esses resultados, o sensor de temperatura pode ser substituído por um sensor de corrente, com menor custo de produção e manutenção.

Palavras-chave: Refrigeração doméstica, sistemas de controle, LabVIEW, corrente.

Abstract

The white line refrigerators are products known for their high demand, they have become indispensable for the daily life of the population. In view of this need, companies are increasingly seeking to reduce the cost of manufacturing and maintenance of these products without changing their operation standards. With this in mind, the objective of this study was to develop an innovative control technique, capable of regulate the internal temperature of a household refrigerator using the compressor current as control variable. This type of control could only be designed because the compressor current is very sensitive to the amount of thermal load on refrigeration systems. The strategy was applied on a low-cost household product with single door and a single-speed compressor. Altogether 14 tests were performed to validate the control logic, the apparatus was tested in three different ambient temperatures (16°C, 25°C and 32°C) and in three situations, pulldown, defrost and door opening. All the experiments were executed in a controlled chamber that establishes temperature, humidity and air velocity. The refrigerator was also tested during ambient temperatures changes, from 16°C to 25°C and from 25°C to 32°C. The control algorithm was composed by a dynamic reference exchange for a PI controller along with a set of empirical assumptions. For all the cases cited above, the new control technique was able to maintain the fresh food temperature in levels very similar to the ones presented in baseline tests and with these results, the temperature sensor could be replaced by a current sensor, which have lower manufacturing and maintenance cost.

Keywords: Household refrigerating systems, control systems, LabVIEW, current.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Logo POLO.	25
Figura 2 – Refrigeradores para diferentes aplicações.	27
Figura 3 – Diferentes exemplos de refrigeradores domésticos.	28
Figura 4 – Exemplo de produto da Linha Branca.	29
Figura 5 – Componentes de um refrigerador.	30
Figura 6 – Principais componentes de um compressor alternativo.	32
Figura 7 – Representação esquemática simplificada de um compressor alternativo.	32
Figura 8 – Termostato mecânico modelo EA5-8-36U.	36
Figura 9 – Simulação de um sistema com controle ON/OFF.	36
Figura 10 – Refrigerador utilizado no projeto.	39
Figura 11 – Rack experimental utilizado.	40
Figura 12 – Sistema de aquisição com os respectivos módulos utilizados.	42
Figura 13 – Aba inicial do sistema supervisorio desenvolvido.	43
Figura 14 – Diagrama elétrico para medição de potência e acionamento do refrigerador.	44
Figura 15 – Relé de Estado Sólido da empresa Eurotherm modelo LR59793.	45
Figura 16 – Relé de Angulo de Fase da marca Contemp modelo AFC-1.	45
Figura 17 – Contatora da marca WEG modelo CW07-01E.	46
Figura 18 – Transdutor de Potência da marca Yokogawa.	46
Figura 19 – Termopar modificado utilizado para medição do ar.	47
Figura 20 – Distribuição interna de termopares.	48
Figura 21 – Detalhes da instrumentação do termopar no tubo.	49
Figura 22 – Câmara de teste.	50
Figura 23 – Teste de <i>baseline</i> realizado a 25°C de temperatura ambiente.	51
Figura 24 – Diagrama de blocos que explica o funcionamento do algoritmo de controle baseado na corrente do compressor.	52
Figura 25 – Curva da potência de um compressor durante seu ciclo de ligado mais desligado.	53
Figura 26 – Diagrama de blocos de todas as etapas do controlador utilizado.	56
Figura 27 – Diagrama de blocos do controlador PI implementado.	57
Figura 28 – Método caixa preta da resposta ao degrau de <i>RTR</i>	57
Figura 29 – Teste de <i>pulldown</i> a 25 °C e 50% umidade relativa mostrando a temperatura interna do refrigerador.	62
Figura 30 – Teste de <i>pulldown</i> a 25 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.	63
Figura 31 – Teste de Degelo a 25 °C e 50% umidade relativa mostrando a temperatura interna do refrigerador.	64

Figura 32 – Teste de degelo a 25 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.	64
Figura 33 – Teste de abertura de porta (30s) a 25 °C e 50% umidade relativa mostrando a temperatura interna do refrigerador.	65
Figura 34 – Teste de abertura de porta (30s) a 25 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.	66
Figura 35 – Teste de abertura de porta (2min) a 25 °C e 50% umidade relativa mostrando a temperatura interna do refrigerador.	67
Figura 36 – Teste de abertura de porta (2min) a 25 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.	67
Figura 37 – Teste observando a temperatura do refrigerador durante uma mudança de 16 °C e 50% umidade ambiente para 25 °C e 50% umidade ambiente.	68
Figura 38 – Teste observando as variáveis de controle durante uma mudança de 16 °C e 50% umidade ambiente para 25 °C e 50% umidade ambiente.	69
Figura 39 – Teste de <i>pull-down</i> a 16 °C e 50% umidade relativa mostrando a temperatura interna do refrigerador.	77
Figura 40 – Teste de <i>pull-down</i> a 16 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.	78
Figura 41 – Teste de Degelo a 16 °C e 50% umidade relativa mostrando a temperatura interna do refrigerador.	79
Figura 42 – Teste de degelo a 16 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.	79
Figura 43 – Teste de abertura de porta (30s) a 16 °C e 50% umidade relativa mostrando a temperatura interna do refrigerador.	80
Figura 44 – Teste de abertura de porta (30s) a 16 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.	81
Figura 45 – Teste de abertura de porta (2min) a 16 °C e 50% umidade relativa mostrando a temperatura interna do refrigerador.	82
Figura 46 – Teste de abertura de porta (2min) a 16 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.	82
Figura 47 – Teste de <i>pull-down</i> a 32 °C e 50% umidade relativa mostrando a temperatura interna do refrigerador.	83
Figura 48 – Teste de <i>pull-down</i> a 32 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.	84
Figura 49 – Teste de Degelo a 32 °C e 50% umidade relativa mostrando a temperatura interna do refrigerador.	85
Figura 50 – Teste de degelo a 32 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.	85

Figura 51 – Teste de abertura de porta (30s) a 32 °C e 50% umidade relativa mostrando a temperatura interna do refrigerador.	86
Figura 52 – Teste de abertura de porta (30s) a 32 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.	87
Figura 53 – Teste de abertura de porta (2min) a 32 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.	88
Figura 54 – Teste observando a temperatura do refrigerador durante uma mudança de 25 °C e 50% umidade ambiente para 32 °C e 50% umidade ambiente.	89
Figura 55 – Teste observando as variáveis de controle durante uma mudança de 25 °C e 50% umidade ambiente para 32 °C e 50% umidade ambiente.	90

Lista de tabelas

Tabela 1 – Especificações técnicas do produto utilizado.	40
Tabela 2 – Componentes do quadro elétrico.	44
Tabela 3 – Valores atingidos pelas correntes e períodos com o refrigerador em regime permanente.	54

Lista de abreviaturas e siglas

COP	Coeficiente de desempenho do compressor
PI	Proporcional-integral
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> – Modulação por largura de pulso
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i> - Linguagem de programação gráfica

Lista de símbolos

ΔT	Diferença de temperatura
W_c	Potência do compressor
T_{amb}	Temperatura ambiente
T_{gab}	Temperatura interna do gabinete refrigerado
RTR	<i>Runtime Ratio</i> - Razão de funcionamento do compressor
t_{on}	Intervalo de tempo em que o compressor fica ligado
t_{off}	Intervalo de tempo em que o compressor fica desligado
T_{per}	Período de um ciclo ligado-desligado

Sumário

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Objetivos	23
1.2	POLO	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1	Principais tipos de produtos em refrigeração	27
2.2	Ciclo de refrigeração mecânica de vapor	28
2.3	Compressor de velocidade fixa	31
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
3.1	Estratégias de controle	35
3.2	Otimização de controladores ON-OFF	37
3.3	Perspectivas de controle voltado a refrigeração	38
4	TRABALHO EXPERIMENTAL	39
4.1	Refrigerador	39
4.2	Aparato experimental	40
4.3	Instrumentação do refrigerador	47
4.4	Câmara de testes	49
5	PROJETO DE CONTROLADORES	51
5.1	Lógica padrão para controle de temperatura	51
5.2	Proposta de controle de temperatura baseado em corrente	52
5.2.1	<i>Setup</i>	53
5.2.2	Calculo de referência	54
5.2.3	Projeto do novo controlador	55
6	RESULTADOS DO CONTROLE POR CORRENTE	61
6.1	Condição ambiente: 25 °C e 50% umidade relativa	61
6.2	Mudança de condição ambiente: 16 °C e 50% umidade relativa para 25 °C e 50% umidade relativa	68
7	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	71
7.1	Conclusão do trabalho	71
7.2	Sugestões e perspectivas para trabalhos futuros	72

REFERÊNCIAS	73
APÊNDICES	75
APÊNDICE A – CONDIÇÃO AMBIENTE: 16 °C E 50% UMIDADE RELATIVA	77
APÊNDICE B – CONDIÇÃO AMBIENTE: 32 °C E 50% UMIDADE RELATIVA	83
APÊNDICE C – MUDANÇA DE CONDIÇÃO AMBIENTE: 25 °C E 50% UMIDADE RELATIVA PARA 32 °C E 50% UMIDADE RELATIVA	89

1 Introdução

Praticamente todas as residências e estabelecimentos possuem um refrigerador atualmente, o ruído emitido pelo compressor ao ligar já virou algo tão comum que as pessoas nem mais o notam. Esse tipo de produto tornou-se essencial para o dia-a-dia da população, porém a maioria das pessoas não reconhecem seu devido valor para conservação de alimentos, pois é algo que esteve em sua vida desde que nasceram.

Este trabalho busca descrever o passo a passo do projeto de uma lógica de controle inovativa para refrigeradores com compressores de velocidade fixa. Sendo esses passos compostos pelo planejamento e construção de uma bancada para suportar o sistema supervisor do sistema e toda parte de acionamento dos componentes elétricos, identificação da lógica de controle *baseline* do produto e construção e validação de um algoritmo PI com ação anti-windup para regular a temperatura interna do refrigerador.

Todas as atividades relacionadas a este projeto serão desenvolvidas dentro do laboratório POLO sob a supervisão da empresa Whirlpool com sede em Joinville.

Panorama geral e motivação do trabalho

O mercado de refrigeração atual pode ser separado em dois grandes grupos de produtos, os de alto custo e os de baixo custo. Esse conjunto de menor valor pode também ser chamado de linha branca, os principais produtos que esse segmento engloba são refrigeradores, freezers verticais e horizontais e condicionadores de ar. No Brasil, esta linha apresenta a característica de elevada demanda, pois tornaram-se essenciais no dia-a-dia da população. Visando essa necessidade, cada vez mais as empresas têm buscado a diminuição no custo de fabricação e manutenção desses produtos sem alterar o seu funcionamento. Com isso em mente, o presente projeto tem como objetivo a formulação de uma lógica de controle inovadora para temperatura, onde não será necessário a medição efetiva dessa grandeza. Estudos apontam que para esse tipo de controle a melhor variável de controle seria a corrente que passa pelo compressor.

1.1 Objetivos

Como objetivo geral do trabalho tem-se a concepção de uma lógica inovativa capaz de controlar a temperatura interna de um refrigerador utilizando como variável de controle apenas a corrente que passa pelo compressor do produto.

Objetivos específicos

Os objetivos específicos podem ser divididos em ordem cronológica entre os seguintes tópicos:

1. Instrumentação do produto;
2. Realizar testes em diferentes condições de funcionamento (ambiente) para caracterizar o comportamento do produto;
3. Realizar testes para levantamento de um modelo de primeira ordem;
4. Configuração de um controle PI inicial a partir do modelo obtidos;
5. Aprimoramento do controlador obtido;
6. Realizar testes do controlador em diferentes temperaturas ambiente, bem como durante a mudança dessa variável;
7. Comparar desempenho do controlador PI obtido ao final do projeto com a lógica de controle original do produto.

1.2 POLO

Inaugurado em 1982 por professores da área de Ciências Térmicas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, o POLO é um laboratório de referência mundial em pesquisa, desenvolvimento e inovação em Refrigeração e Termofísica (ver [Figura 1](#)). Ao longo de mais de três décadas o POLO estabeleceu uma tradição de excelência em projetos de pesquisa e desenvolvimento com o setor industrial, se tornando o maior laboratório da América Latina e um dos maiores do mundo no seu ramo de atuação.

Uma das metas do POLO é formar engenheiros altamente qualificados para o mercado de trabalho e conduzir pesquisas alinhadas com problemas reais da indústria de refrigeração, induzindo avanços científicos e tecnológicos de relevância econômica e social. A interação com o setor industrial fortalece o corpo técnico e aumenta a competitividade das empresas parceiras, tanto nacional como internacionalmente.

Em seus laboratórios, que totalizam $3000m^2$, são realizadas pesquisas básicas e aplicadas para aprimorar conceitos e melhorar o desempenho de componentes e sistemas de refrigeração, sejam eles domésticos, comerciais, automotivos ou aeronáuticos. As atividades são realizadas por um corpo técnico de excelência formado por professores, pesquisadores, engenheiros, técnicos e estudantes de doutorado, mestrado e de graduação.

Figura 1 – Logo POLO.



Fonte: Site Laboratórios POLO

Em 2009, o POLO se tornou um INCT (Instituto Nacional de Ciências e Tecnologia) e, em 2014, uma Unidade EMBRAPPII (Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial). Estes reconhecimentos demonstram a qualidade e a relevância das atividades realizadas no POLO e o compromisso do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC com o fortalecimento da interação com o setor industrial como forma de melhorar a qualificação de seus professores e alunos.

Organização do documento

O presente relatório está organizado da seguinte maneira:

O segundo capítulo é destinado a uma revisão dos conceitos básicos de refrigeração. São abordados também alguns aspectos técnicos, como os diferentes tipos de produtos que podem ser encontrados no mercado e à técnicas de controle voltadas para refrigeração.

O terceiro capítulo trata da revisão bibliográfica realizada durante o projeto, onde são abordados os mais diferentes temas que modularmente compõem o objetivo principal do projeto.

O quarto capítulo apresenta a descrição do aparato experimental, ou seja, sobre o refrigerador e seu sistema de acionamento e medição, bem como do programa supervisorio desenvolvido em LabVIEW. Também são detalhados os diferentes tipos de instrumentações utilizadas e o funcionamento da câmara refrigerada onde o produto foi testado.

O quinto capítulo traz o desenvolvimento da estratégia de controle proposta pelo autor. Um algoritmo de controle todo baseado na corrente do compressor que utiliza técnicas de controle PI com algumas suposições formuladas empiricamente.

O sexto capítulo mostra e analisa os resultados de controle obtidos. Nessa parte

são relatados os pontos positivos e negativos alcançados com essa estratégia de controle em alguns testes, sendo que o resto deles são apresentados nos apêndices do documento.

Por fim, as conclusões e as perspectivas de trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 7.

2 Fundamentação Teórica

A ação de manter a temperatura de uma substância abaixo da temperatura ambiente de forma controlada é denominada refrigeração [Dossat 2001]. Esse processo é amplamente utilizado em vários processos, como a refrigeração doméstica que é responsável principalmente pela conservação de alimentos e pelo condicionamento de ar para aumento do conforto térmico [Seaburg e Paterson 2003].

2.1 Principais tipos de produtos em refrigeração

O atual mercado de refrigeradores nacionais é composto por centenas de produtos com diferentes características, especificamente desenvolvidos para um tipo de aplicação, assim como pode ser visto na Figura 2. Existem produtos voltados a uso doméstico, que geralmente possuem componentes menores por não precisarem atingir temperaturas negativas extremas, esse tipo também apresenta um design mais bonito, uma vez que também servirá como decoração para o ambiente no qual se encontra. Por outro lado, existem aqueles voltados ao uso comercial, que por sua vez são equipados com peças mais robustas por precisarem operar continuamente em temperaturas muito baixas e possuem uma certa preocupação com seu consumo de energia.

Figura 2 – Refrigeradores para diferentes aplicações.



Fonte: ColdLab

Domésticos

Um refrigerador doméstico é um gabinete de metal com uma unidade de refrigeração hermeticamente fechada embutida. Dentro do gabinete, há uma câmara fria com prateleiras

para armazenar produtos. O isolamento térmico é colocado entre as paredes da câmara fria e o gabinete da geladeira. O ar na câmara fria é resfriado por meio de transferência de calor entre o ar e a superfície fria do evaporador. As condições de temperatura necessárias no refrigerador são fornecidas pela breve operação cíclica, da unidade de refrigeração, que é ligada normalmente por meio de um relé térmico. Os refrigeradores domésticos têm um volume de 20 a 800 litros. A seguir pode-se encontrar alguns dos tipos de refrigeradores exemplificados [Figura 3](#).

Figura 3 – Diferentes exemplos de refrigeradores domésticos.



Fonte: Consul

Linha Branca

Por sua vez, os refrigeradores domésticos podem ser divididos ainda entre os produtos da Linha Branca e os outros. Esse primeiro grupo, assim como o próprio nome já diz, são aparatos pintados de branco que possuem um baixo valor de mercado e por conta disso são produzidos e comercializados em larga escala.

2.2 Ciclo de refrigeração mecânica de vapor

A grande maioria dos refrigeradores existentes no mercado operam sobre o princípio da compressão mecânica do vapor. Estima-se que existam mais de 45 milhões de refrigeradores em operação no Brasil [[MACHADO 2015](#)], dos quais uma ínfima parcela não utiliza este princípio como modo de funcionamento.

A ideia de unir o princípio de evaporação do fluido a baixa pressão e condensação a alta pressão foi proposto por Oliver Evans, porém concebido por Jacob Perkins em 1834. Nesse ciclo, o vapor é comprimido, condensado, tendo posteriormente sua pressão diminuída de modo que o fluido possa evaporar a baixa pressão.

A primeira das etapas é quando esse gás agora entra no compressor, onde é comprimido tornando-se vapor superaquecido, logo em seguida ele é deslocando para o

Figura 4 – Exemplo de produto da Linha Branca.



Fonte: Consul

condensador, que tem como função liberar essa energia armazenada no líquido refrigerante para o meio externo. O fluido, ao liberar energia, sofre uma condensação e por fim entra no dispositivo de expansão, onde sofre uma expansão, reduzindo sua pressão e voltando ao evaporador sob baixa pressão, na forma de mistura de líquido mais vapor, e absorve energia do meio interno do refrigerador, passando assim para o estado de vapor, por fim o fluido retorna ao compressor para dar início a um novo ciclo [Stoecker 1958].

Componentes básicos

O ciclo discutido nessa seção do documento possui quatro componentes principais: compressor, dispositivo expansão, evaporador e condensador. Componentes estes que podem ser encontrados na [Figura 5](#).

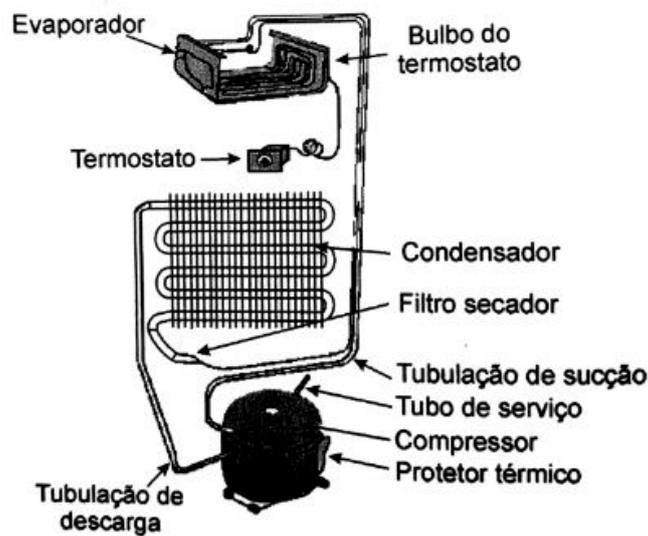
A seguir serão explicados, detalhadamente, cada componente e sua função dentro do ciclo de refrigeração mais difundido atualmente.

Compressor

A função do compressor é aumentar a pressão do fluido refrigerante, que aumenta a temperatura do mesmo, acima da temperatura do ar externo, para poder perder calor e se condensar. Nas pressões altas, o refrigerante se condensa também com temperaturas altas.

O compressor succiona o refrigerante na forma de vapor a baixa pressão e temperatura e o comprime aumentando a sua pressão e temperatura e também faz circular o

Figura 5 – Componentes de um refrigerador.



Fonte: [Silva 2003]

refrigerante através do circuito. A energia mecânica que o compressor usa para aumentar a pressão é convertida em energia de calor que aumenta a temperatura do vapor.

Os Compressores são construídos para bombear somente o vapor do refrigerante. Se permitir que entre refrigerante líquido no compressor, o mesmo pode quebrar as válvulas ou provocar uma diluição do óleo de lubrificação danificando os mancais.

Condensador

O vapor quente a alta pressão e temperatura é descarregado no condensador. O Condensador é um trocador de calor no qual o ar é recirculado. Como o calor é propagado de uma substância com maior temperatura a uma com menor temperatura, o calor latente absorvido pelo vapor no processo de evaporação mais o calor sensível absorvido pelo vapor no processo de compressão é transferido ao ar. Uma vez que o calor é removido do refrigerante, o mesmo se condensa e retorna ao estado líquido. O Condensador sub resfria o líquido antes de sair do mesmo e ir para o Dispositivo de Expansão.

Dispositivo de expansão

Os dispositivos de expansão têm duas funções importantes. Primeiramente o dispositivo mantém a diferença de pressão necessária entre o condensador e o evaporador. Esta queda de pressão diminui a temperatura e a pressão do refrigerante permitindo o mesmo absorver o calor do meio a ser resfriado. Desta maneira o calor pode ser transferido do ar para o refrigerante que se evapora.

Quando o líquido passa através do dispositivo de expansão, sua pressão é reduzida. Com esta pressão baixa, uma pequena porção de líquido se evapora imediatamente, esfriando a temperatura do líquido restante a temperatura de evaporação, sendo mais baixa que a temperatura do ar que se quer resfriar, fazendo que o calor seja retirado pela evaporação do líquido refrigerante no Evaporador.

Evaporador

O evaporador absorve o calor interno do sistema de refrigeração. Ele recebe líquido refrigerante, de baixa pressão, vindo do dispositivo de expansão. Através da absorção do calor do ar, vaporiza o refrigerante em seu interior. Existem muitos tipos de evaporadores, que são classificados conforme o método utilizado para controlar o refrigerante e sua interface com o meio a ser refrigerado (evaporadores de expansão seca, inundados, de tubo liso, do tipo tubo com aletas – estáticos e forçados –, Roll-Bond).

2.3 Compressor de velocidade fixa

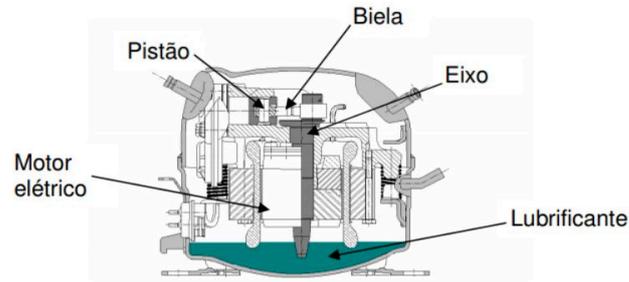
Compressores de velocidade fixa foram o primeiro tipo de compressores a serem desenvolvidos, eles também são a opção mais simples e barata que se pode encontrar no mercado atual. Do ponto de vista da eficiência, esses são os tipos menos eficientes, pois estão sempre funcionando a 100% da capacidade. Um compressor consome mais energia quando é acionado e, como essas unidades costumam usar mais capacidade do que o necessário, elas tendem a ligar e desligar com mais frequência do que os outros tipos que tendem a funcionar mais constantemente em capacidades mais baixas.

Esse tipo de máquina usualmente é fabricado de maneira independente a frequência da rede em que será ligado. Exemplificando, caso esse dispositivo seja conectado à uma rede que opera a 60Hz, o mesmo apresentará uma velocidade de 3600rpm.

Influência de carga térmica na corrente do compressor

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 6](#) apresenta os componentes principais de um compressor, dentre eles o motor elétrico.

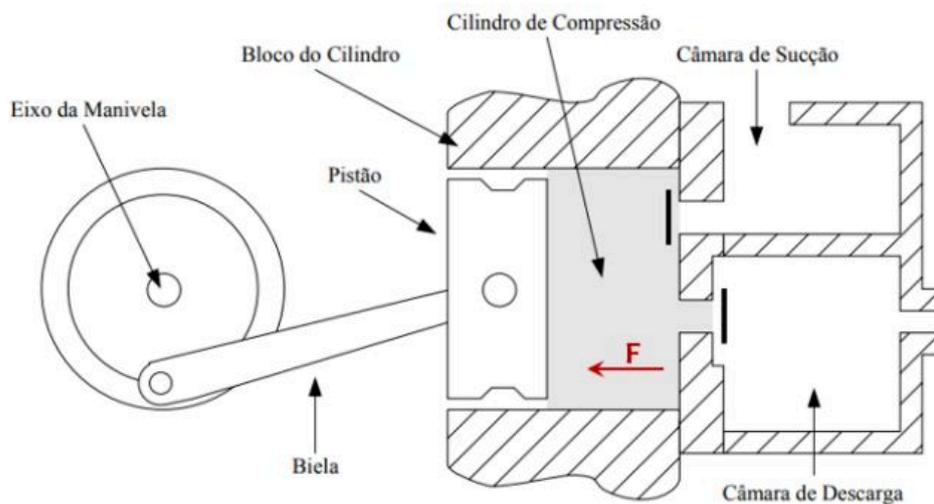
Figura 6 – Principais componentes de um compressor alternativo.



Fonte: [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, que se infiltra no fluido refrigerante através do evaporador e aumenta sua temperatura. Quanto maior a temperatura do fluido refrigerante, maior a sua pressão na linha. Esse fluido entra na câmara de compressão com uma pressão mais elevada, gerando assim um aumento da sua pressão interna e conseqüente um aumento de torque no eixo do motor. A Figura 7 mostra uma representação simplificada da câmara de compressão e do pistão do compressor.

Figura 7 – Representação esquemática simplificada de um compressor alternativo.



Fonte: [COUTO 2006]

A força \overleftarrow{F} indicada na Figura [Figura 7](#) 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.

Conceitos

Para melhor entendimento do documento a seguir serão apresentados algumas palavras muito comuns utilizadas no meio de pesquisas sobre refrigeração:

- Pulldown: Evento onde o refrigerador realiza o abaixamento da sua temperatura interna até uma temperatura limite, partindo da mesma condição que o ambiente;
- Carga Térmica: Toda energia que entra no volume de controle do seu refrigerador e leva ao aumento da sua temperatura interna;

3 Revisão bibliográfica

Para o presente trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica sistemática baseada na metodologia integrativa [BOTELHO, CUNHA e MACEDO 2011]. Esta torna-se a mais recomendada ao projeto pois possibilita ao pesquisador revisar rigorosamente e combinar estudos com diversas metodologias, por exemplo, delineamento experimental e não 0, e integrar os resultados. Tem o potencial de promover os estudos de revisão em diversas áreas do conhecimento, mantendo o rigor metodológico das revisões sistemáticas. O método de revisão integrativa permite a combinação de dados da literatura empírica e teórica que podem ser direcionados à definição de conceitos, identificação de lacunas nas áreas de estudos, revisão de teorias e análise metodológica dos estudos sobre um determinado tópico. A combinação de pesquisas com diferentes métodos combinados na revisão integrativa amplia as possibilidades de análise da literatura.

Durante o desenvolvimento do trabalho foram sendo compilados materiais conforme a demanda de conhecimento gerada. Iniciou-se com algumas estratégias de controle que podem ser encontradas em sistemas com compressores de velocidade fixa. Logo após foi feita uma pesquisa sobre otimização de controladores ON-OFF nessa área. E por fim, relatam-se algumas perspectivas de trabalhos de controle futuros voltados para a área de refrigeração.

3.1 Estratégias de controle

O método de controle mais difundido entre os refrigeradores atualmente se utiliza um termostato (Figura 8), que é um dispositivo dotado de um medidor de temperatura e um relé eletromecânico capaz de manter a temperatura dentro de uma faixa pré determinada. Essa lógica de controle atua ligando ou desligando o compressor assim que ela atinge os valores limites dessa faixa. Essa técnica é amplamente conhecida na literatura como controlador ON/OFF, esse controle tem como vantagem sua simplicidade, pois não depende de uma sintonia, precisa apenas dos limites superior e inferior da faixa na qual ele vai atuar. [VITOR 2016]

Esse tipo de controle no caso da refrigeração atua dentro de um intervalo. Ligando o compressor quando a temperatura atinge um limite superior, fazendo com que ela caia até o limite inferior, onde desliga o compressor, esperando-a retornar naturalmente até seu limite superior e assim sucessivamente. Contudo deve-se tomar cuidado na hora de regular esses limites, pois um compressor não consegue ligar e desligar em intervalos pequenos de tempo, porque é necessário que suas pressões internas estabilizem antes de ligá-lo novamente. Caso esse intervalo mínimo não seja respeitado danos sérios podem ser

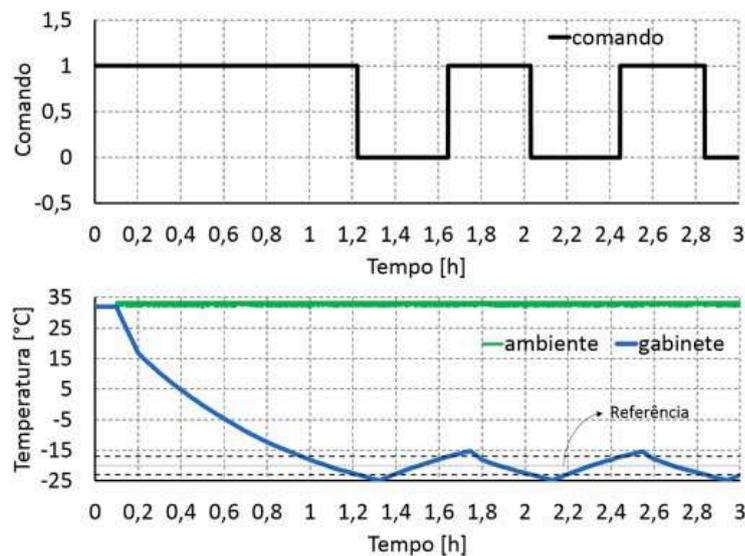
Figura 8 – Termostato mecânico modelo EA5-8-36U.



Fonte: ROBERTSHAW

inferidos ao compressor diminuindo assim sua durabilidade. A Figura 9 exemplifica o o funcionamento dessa lógica de controle recém explicada.

Figura 9 – Simulação de um sistema com controle ON/OFF.



Fonte: [WINCK 2018]

Run time ratio

O *Runtime Ratio* (RTR) permite avaliar quanto o compressor de um sistema de refrigeração que utiliza uma técnica de controle ON/OFF está trabalhando. A taxa é apresentada pela Equação (3.1). Valores muito próximos de 1 indicam que o compressor fica pouco tempo desligado (t_{off}), ou seja, alta demanda de capacidade térmica e maior consumo energético.

$$\text{RTR} = \frac{t_{on}}{t_{off} + t_{on}} \quad (3.1)$$

Estratégias de controle utilizadas

Segundo [FELICE, PIRODDI e LEVA 2009], o controle de temperatura em geladeiras e freezers domésticos geralmente é operado por meio de dispositivos de atuação ON/OFF simples, que limitam o desempenho e a flexibilidade de controle obtidos e determinam um comportamento não linear do sistema. O artigo descreve um esquema adaptativo que melhora as características das oscilações de temperatura induzidas, sem a necessidade de modificações no hardware de atuação, todos os testes foram realizados em um freezer comercial.

Já [LEVA, FELICE e PIRODDI 2009], descreve um esquema adaptativo para controle de temperatura em freezers domésticos equipados com sensores e atuadores ON/OFF low-end (baixo desempenho). O esquema é baseado em um filtro auxiliar introduzido no circuito do relé para alterar e melhorar as características do compressor. O filtro é ajustado de forma adaptável para lidar com a variabilidade e incerteza do sistema. Alguns testes em modelos de simulação detalhados de um equipamento comercial são relatados para validar a abordagem e mostrar sua eficácia em relação aos requisitos de preservação de alimentos e consumo de energia.

3.2 Otimização de controladores ON-OFF

[SAFFAR e A.A.T. 2016] apresenta um estudo sobre o método de controle mais comum encontrado em refrigeradores domésticos. Em seguida o autor discute uma otimização da faixa de temperatura em uma geladeira doméstica, a fim de tornar o consumo de energia o mais baixo possível, mantendo uma determinada temperatura máxima que não pode ser excedida para manter os alimentos adequadamente preservados. O refrigerador foi modelado como um sistema de primeira ordem mais atraso de tempo. Um teste de relé histórico foi utilizado para estimar os parâmetros do sistema. O modelo do sistema foi empregado para desenvolver relações matemáticas para definir a amplitude da temperatura dentro do refrigerador, dada a temperatura máxima, a fim de minimizar o consumo total de energia. Os resultados encontrados pelo autor foram satisfatórios. O modelo obtido calculou 9,4°C como a amplitude ideal de temperatura para o refrigerador vazio. Com essa amplitude, o refrigerador vazio consumiu menos energia quando comparado a outras amplitudes testadas.

Uma segunda abordagem para a otimização de controladores ON/OFF foi apresentada por [A. et al. 2012], nela o autor comenta sobre o problema dos controladores

desse tipo voltados a produtos de refrigeração com módulos termoelétricos. Quando a temperatura interna atinge o setpoint mais baixo e os módulos termoelétricos são desligados, uma quantidade de calor armazenada no trocador de calor na extremidade quente dos módulos volta para o refrigerador. Esse efeito aumenta significativamente o consumo de energia elétrica da geladeira. Este trabalho estuda experimentalmente a influência de diferentes sistemas de controle de temperatura no consumo de energia elétrica e coeficiente de desempenho de um refrigerador termoelétrico: um controlador ON/OFF, um controlador PID e um novo sistema operacional com base em tensões ociosas. Este último fornece tensão mínimas aos módulos quando a temperatura interna atinge o ponto de ajuste mais baixo, em vez de desligá-los, impedindo que o calor volte. Um protótipo foi construído para comparar esses sistemas operacionais. Os resultados provam que o controlador com base baixas tensões reduz o consumo de energia elétrica da geladeira em 32% e aumenta o coeficiente de desempenho em 64%, comparado com o controlador ON/OFF.

3.3 Perspectivas de controle voltado a refrigeração

De acordo com [BANSAL, VINEYARD e ABDELAZIZ 2011] os próximos desafios e riscos da indústria de refrigeração serão na redução do consumo de energia, demandas e emissões de gases dos produtos. O artigo foca principalmente no grande potencial que esses produtos podem atingir no consumo de energia através da utilização de novas tecnologias que estão sendo desenvolvidas. Algumas dessas tecnologias além de reduzir tal consumo também terão o papel de impactar na eficiência energética, custo e complexidade dos refrigeradores. Porém o autor comenta ainda sobre os desafios relacionados a cada uma das tecnologias citadas. Para ele, o maior desafio será o alto custo inicial para as empresas. Uma maneira de regular esta questão e promover a introdução de novas tecnologias, segundo Bansal, é “nivelar” o campo de atuação de todos os fabricantes, estabelecer padrões mínimos de desempenho energético que não sejam proibitivos em termos de custos, e promoção de produtos eficientes em termos energéticos através de incentivos a fabricantes e consumidores.

4 Trabalho experimental

Nesse capítulo será abordado tudo referente ao aparato experimental utilizado durante o projeto. Desde a descrição do refrigerador, até a bancada de aquisição e controle do mesmo e o sistema supervisorio desenvolvido em LabVIEW especialmente para o projeto.

4.1 Refrigerador

O produto utilizado é um dos refrigeradores mais comuns e simples comercializados pela empresa Consul nos dias de hoje (ver [Figura 10](#)). Tem como código de modelo CRB39ABBNA, é classificado como *single – door*, ou seja possui apenas uma porta para abertura. No entanto, internamente ele possui uma divisão para um congelador na sua parte superior. Esse artigo ainda vem com um sistema *frost free*, que evita o acúmulo de gelo nas paredes internas do congelador. O produto utiliza o ciclo de compressão mecânica do vapor descrito na Seção 2, com o R600a como fluido refrigerante.

Figura 10 – Refrigerador utilizado no projeto.



Fonte: Consul

O refrigerador possui ventilação natural de ar apenas no evaporador (com potência de 5 W) e tubo capilar como dispositivo de expansão. O sistema possui processo de degelo

automático, o controle de temperatura interna, originalmente instalado, é do tipo por histerese, sendo controlada com base em um termistor encontrado na divisão entre o freezer e compartimento do *fresh food*, a faixa a temperatura de operação está entre $-9,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-15,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Todos os dados técnicos dele podem ser encontrados na tabela [Tabela 1](#).

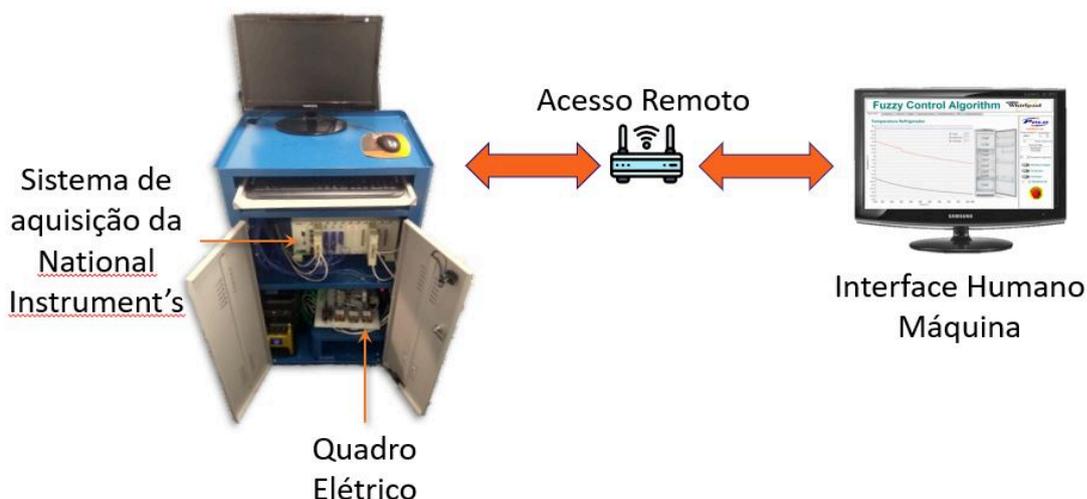
Tabela 1 – Especificações técnicas do produto utilizado.

Capacidade Total	342 L
Dimensões	69,1 cm x 61,6 cm x 170 cm
Peso Líquido	53 kg
Tensão	220 V

4.2 Aparato experimental

Para que seja possível tratar e adquirir todos os dados relativos aos testes feitos com o produto, utilizou-se uma bancada experimental (ver [Figura 11](#)) formado por um computador, um sistema de aquisição e um quadro elétrico para acionamento dos atuadores. Esse tipo de montagem permite uma versatilidade caso mudanças sejam necessárias durante o desenvolvimento do projeto. Todo esse equipamento descrito também se comunica remotamente com qualquer computador ligado a internet, permitindo o acompanhamento de testes sem a necessidade de estar pessoalmente no local

Figura 11 – Rack experimental utilizado.



Fonte: Autor

Bancada Experimental

Esse subsistema modular de controle e aquisição de dados é composto por três partes essenciais: um computador desktop, um sistema de aquisição e envio de dados e um quadro elétrico. O desktop é um PC padrão, único ponto que vale ressaltar é a presença de portas USB 3.0 necessárias para realizar a comunicação entre o computador e o sistema de aquisição (DAQ). O dispositivo de controle e aquisição de dados é um equipamento da marca National, modelo AFC352185. A opção de utilização deste modelo e marca é devido a compatibilidade com o sistema de aquisição e controle. Sendo os dois da mesma empresa todas as interfaces de comunicação já estão prontas e pré operantes. Por último, tem-se o quadro elétrico, que recebe os sinais de acionamento do sistema de aquisição (0-5V) e transformá-los em sinais para ligar as cargas do refrigerador (0-220V), tudo isso é feito utilizando relés de ângulo de fase. O mesmo quadro também mede a potência consumida pelos atuadores do produto através de transdutores de potência, e transmite essa informação para a DAQ.

Aquisição de dados

Para o sistema de aquisição optou-se pela DAQ SCXI-1001 (ver [Figura 12](#)), também da National Instruments, que possui 12 slots para módulos e foi escolhida pela compatibilidade com o supervisor e por suprir o número de dados necessários. A DAQ é composta por um módulo SCXI-1600 que escaneia até 352 canais e comunica com o desktop pela conexão USB, três módulos SCXI-1112 com 8 canais para conexão de termopares (o módulo possui incerteza de $\pm 1^\circ\text{C}$ para o tipo de termopares utilizados na instrumentação), um módulo SCXI-1100 com 32 entradas analógicas (com faixa de operação de $\pm 10\text{V}$ e precisão de 0.0015%), em que é acoplado um módulo SCXI-1303 que possui os bornes para a conexão do cabeamento de sinal que é utilizado para obter as tensões providas pelos Transdutores de potência. E um módulo SCXI-1124 com 6 conversores digitais/analógicos com faixa de operação de $\pm 10\text{V}$ com precisão de $\pm 0.1\%$ para corrente e 0.05% para saídas de tensão, acoplado com um módulo SCXI-1325 que possui os conectores referentes aos 6 canais de saída, estes módulos são utilizados para o acionamento dos relés de estado sólido e o relé de ângulo de fase.

Programa supervisor

O desenvolvimento do *software* que realiza a aquisição, controle, supervisão e comando do sistema foi implementado em linguagem LabVIEW. Assim, a inteligência das lógicas de controle e a comunicação do computador produto advém do *software* desenvolvido. A escolha da linguagem foi adotada pela facilidade de prototipagem e pela utilização de equipamentos da National Instruments.

Figura 12 – Sistema de aquisição com os respectivos módulos utilizados.



Fonte: Autor

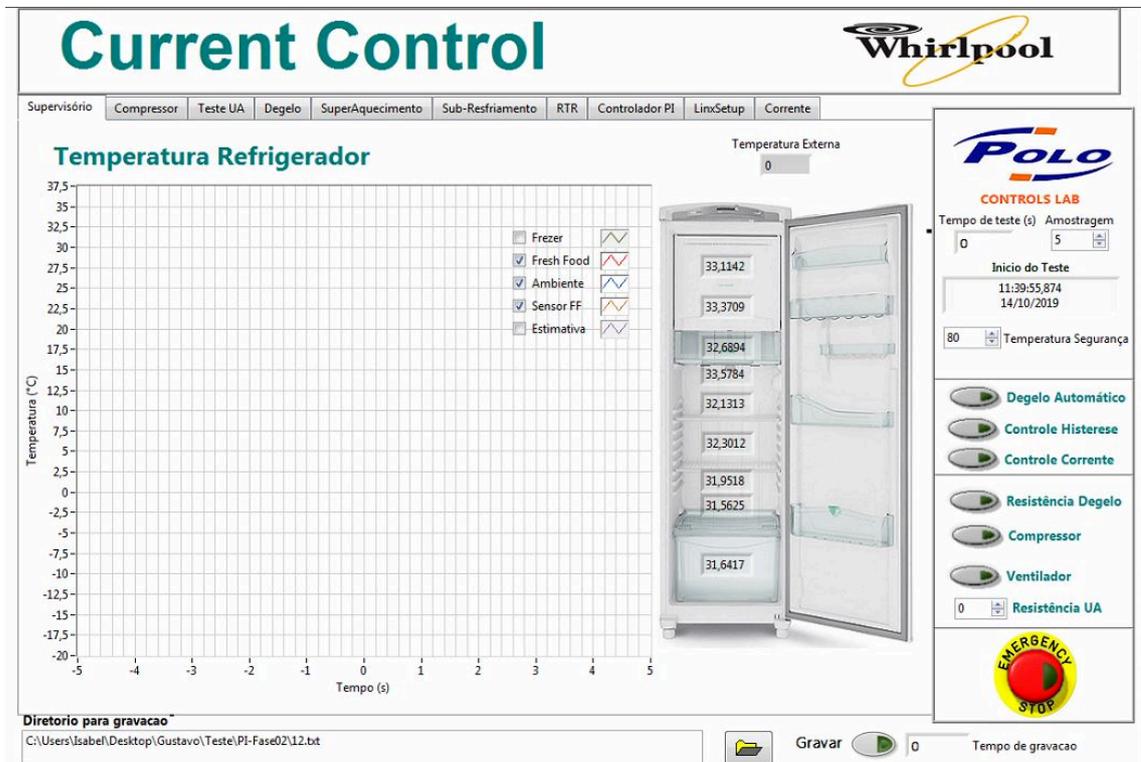
A aquisição dos sensores e o acionamento dos atuadores foram feitos através do sistema de aquisição e comando da National Instruments com o chassi SCXI 1001 já descrito. O sistema supervisor foi desenvolvido de forma modular (utilizando VIs e sub-VIs) para que possíveis modificações não ocupem muito tempo de desenvolvimento.

A Figura [Figura 13](#) mostra a página inicial do *software* desenvolvido para supervisão geral dos testes. Nela é possível observar as temperaturas internas e a ambiente obtidas dos termopares. Além disso, o acionamento de cada uma dos atuadores separadamente também pode ser feita nessa aba, e caso o usuário prefira ele pode ligar métodos de controle automáticos, como "Controle por Histerese", "Controle por Estimativa" ou "Degelo Automático". O primeiro método é responsável por simular a lógica de controle original do produto, onde ele irá ciclar sua temperatura interna dentro de uma banda de histerese pré determinada. O segundo é a nova estratégia de controle desenvolvida nesse projeto, que regula a temperatura interna utilizando a corrente do compressor como variável de controle. Já o "Degelo Automático" tem a função de ser um contador e realizar um degelo a cada período também previamente estipulado.

A gravação dos dados obtidos ao longo de um teste foi essencial para o desenvolvimento do projeto, por isso o foi implementado no software essa capacidade de escrever em um arquivo de texto todos os dados obtidos através do DAQ. Além disso, como fator de segurança pode-se definir uma temperatura de segurança para não danificar o produto e

ao atingir a temperatura especificada a geração do sinal é cortada.

Figura 13 – Aba inicial do sistema supervisorio desenvolvido.



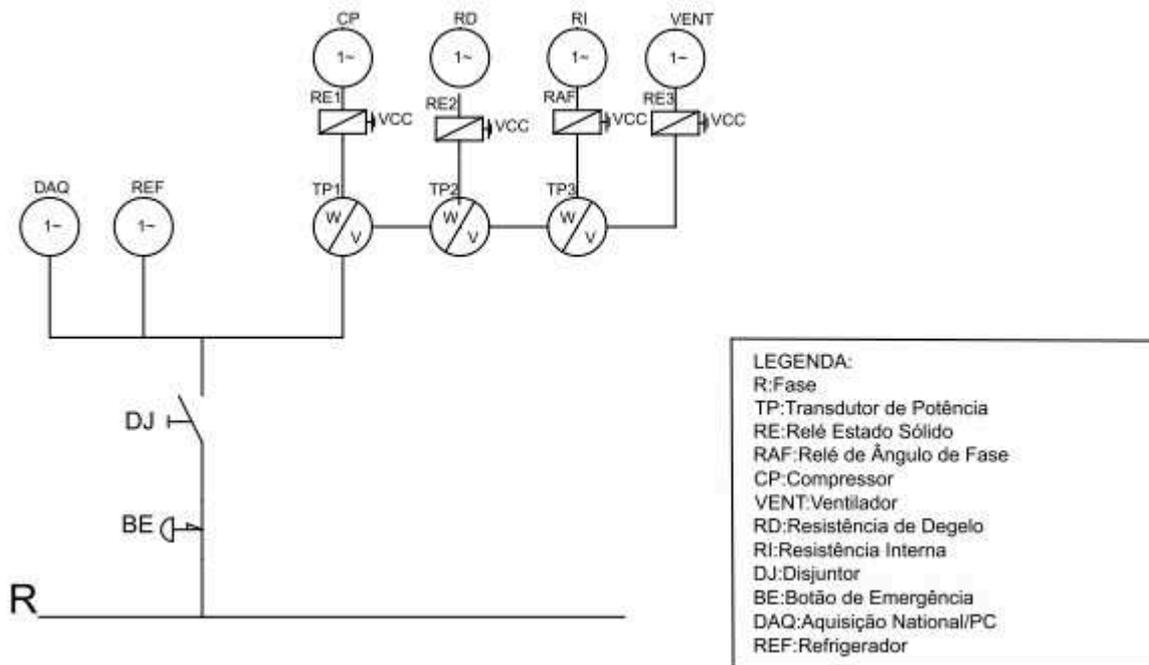
Fonte: Autor

Quadro elétrico

O quadro elétrico foi projetado para alimentar as partes integrantes do rack (PC e DAQ), acionar e ler as potências das cargas do produto. Uma representação da montagem do quadro elétrico do rack de aquisição de dados é apresentada na [Figura 14](#), no formato de diagrama unifilar. Nela, pode-se entender o funcionamento de que o rack é alimentado com Fase, Neutro e Terra. O cabo da fase é interrompido por um botão de emergência e um disjuntor. Em seguida a alimentação é ramificada e passa a ser controlada pelo Sistema de Aquisição através dos relés e nos circuitos onde há transdutores a potência é medida gerando o sinal lido pela DAQ.

A seguir será listado a quantidade de componentes utilizados no quadro elétrico (ver [Tabela 2](#)).

Figura 14 – Diagrama elétrico para medição de potência e acionamento do refrigerador.



Fonte: Autor

Tabela 2 – Componentes do quadro elétrico.

Equipamento	Fabricante	Modelo	Especificações	Quantidade
DAQ	National Instruments	SCX1-1001	12SCXI slots	1
Relé de Estado Sólido	Eurotherm	LR59793	25A 24 A 330VAC 4 A 32VDC	3
Relé de Ângulo de Fase	Contemp	AFC-1	40A 200 A 250VAC	1
Contatora	WEG	CW07 01E	7A 200V	1
Transdutor de Potência	Yokogawa	2375A10	0-1000W 0-5VDC linear output	1

Cada componente utilizado para acionar ou medir a potência dos atuadores do refrigerador possui sua determinada característica de funcionamento, assim como especificado a seguir:

- Relé de Estado Sólido: Para que seja possível acionar as cargas ou contatores com o sinal provido pelos módulos da DAQ são utilizados 3 relés de estado sólido (ver [Figura 15](#)) da empresa Eurotherm modelo LR59793 com capacidade para 25A e 24 a 330VAC, com acionamento com tensões entre 4 a 32VDC.

Figura 15 – Relé de Estado Sólido da empresa Eurotherm modelo LR59793.



Fonte: Eurotherm

- Relé de Ângulo de Fase: Para controlar a potência dissipada pelas resistências utilizou-se um relé de ângulo de fase (ver [Figura 16](#)) da marca Contemp modelo AFC-1 com capacidade para 40A e 200 a 250VAC e controle através de corrente com valor máximo de 20mA.

Figura 16 – Relé de Angulo de Fase da marca Contemp modelo AFC-1.



Fonte: Contemp

- Contatora: O acionamento do produto foi realizado com um contator (ver [Figura 17](#)) acionado por um dos relés de estado sólido. O modelo utilizado foi o CW07-01E da

WEG com capacidade para 7A em 220V e acionamento também de 200V, crucial para o acionamento de cargas indutivas, como o compressor.

Figura 17 – Contatora da marca WEG modelo CW07-01E.



Fonte: WEG

- Transdutor de Potência: As potências foram obtidas por 3 transdutores (ver [Figura 18](#)) da Japonesa Yokogawa, sendo os três com precisão de 0.5%. Dentre os três, dois com faixa de medição de 0 a 1000W e saída linear de 0 a 5VDC e um com faixa de medição de 0 a 200W também com saída linear de 0 a 5VDC.

Figura 18 – Transdutor de Potência da marca Yokogawa.



Fonte: Yokogawa

4.3 Instrumentação do refrigerador

A instrumentação do produto pode ser dividida em duas partes. A primeira responsável por adquirir a temperatura de todos os pontos importantes do refrigerador, e a segunda responsável por adquirir a potência, variável a partir da qual será calculada a corrente do compressor.

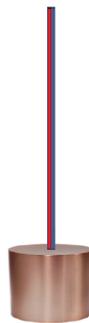
Instrumentação de Temperatura

Para a medição de temperatura alguns cuidados precisam ser tomados. Existem dois tipos de medições dessa grandeza aplicadas sobre o refrigerador trabalhado. A primeira é utilizada para medições de temperaturas de ar e a segunda para medições de temperaturas superficiais, em geral para as tubulações do circuito de refrigeração.

Instrumentação do Ar

Para esse tipo de medição ser realizada, é necessário a confecção de um termopar modificado. É anexada à ponta do termopar uma massa de cobre (ver [Figura 19](#)). Esta possui formato cilíndrico e altura e diâmetro padronizados de 11mm. O objetivo é que essa massa conceda ao termopar uma inércia térmica, evitando que sua medição mude abruptamente.

Figura 19 – Termopar modificado utilizado para medição do ar.



Fonte: Autor

Para realizar-se todas as medições de ar necessárias, foram utilizados 11 termopares conforme descrito acima. Eles podem ser divididos em três grandes grupos. O primeiro responsável pela medição da temperatura ambiente onde encontram-se 3 termopares ao redor do produto. O segundo conjunto de 2 sensores foi instalado no freezer do produto para obtenção da sua temperatura média. O terceiro, e principal grupo formado por 6 termopares foi alocado no compartimento do *fresh food* do refrigerador. Toda a distribuição interna dos termopares descrito acima pode ser vista na [Figura 20](#).

Figura 20 – Distribuição interna de termopares.



Fonte: Autor

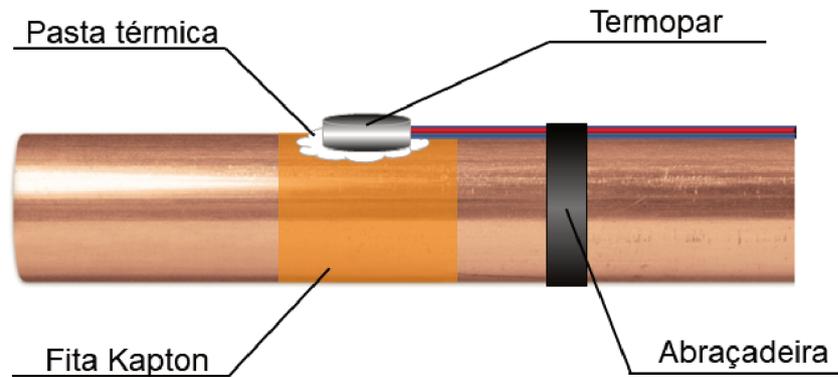
Instrumentações Superficiais

Os termopares responsáveis por medir a temperatura do fluido refrigerante ao longo da tubulação do sistema precisam ser instalados de maneira diferente, para que se consiga uma medição mais limpa, minimizando a presença de ruídos e incertezas.

Primeiramente o tubo é lixado para remover impurezas que podem formar uma resistência de contato entre o tubo e a instrumentação. Em seguida, é colocada uma fita kapton, com o cuidado de apenas aplicar uma volta sobre o tubo, para que esta não aja como isolante térmico. A funcionalidade da fita é evitar que o termopar, que é um condutor elétrico, seja caminho para fugas de corrente do sistema, prejudicando assim o sinal lido no sensor. Em seguida, para aumentar a condutividade e área de contato, é aplicada sobre o tubo uma camada de pasta térmica. Por fim, o termopar é colocado sobre a pasta térmica e isolado. Seu formato é circunferencial com o objetivo de aumentar a área de contato. O

isolamento é realizado por fita isolante. Cada um dos processos necessários para a correta instalação desse sensor sobre as tubulações pode ser vistas na [Figura 21](#).

Figura 21 – Detalhes da instrumentação do termopar no tubo.



Fonte: Autor

Instrumentação de Corrente

Para mensurar a corrente que o compressor do refrigerador consome primeiro foi medido a potência ativa do mesmo, utilizando o transdutor de potência Yokogawa descrito nesse capítulo. Aplicando a fórmula para cálculo de potência $P = V * i$, como sabemos a potência e que o refrigerador está sendo alimentado com uma tensão de 220V-60Hz da rede, pode-se calcular a corrente do compressor. Nos próximos capítulos, sempre que se falar sobre a corrente do compressor, estará se referindo a esta corrente, calculada a partir da potência do compressor.

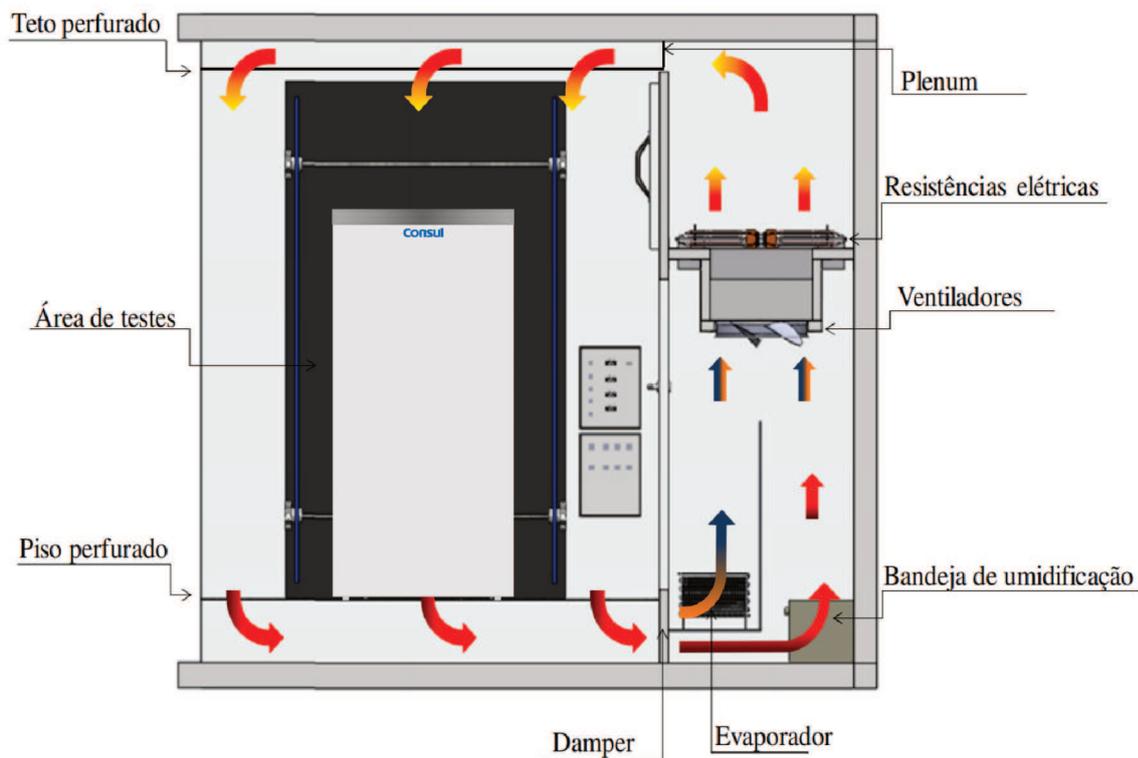
4.4 Câmara de testes

Todos os teste que serão discutidos nesse documento foram realizados em uma câmara de teste, capaz de controlar a temperatura ambiente na faixa de 15 °C a 60 °C. A umidade relativa do ambiente de teste também é controlada em uma faixa de 30% a 95% , com uma incerteza inferior a $\pm 5\%$.

Para controlar as condições de temperatura e umidade, a câmara possui um sistema de refrigeração (compressor, condensador, dispositivo de expansão e um evaporador), um sistema de circulação de ar (ventiladores e *dampers*), um sistema de aquecimento constituído por um banco de resistores elétricos e uma bandeja de umidificação (resistência elétrica submersa em um reservatório com água). A temperatura do ar no interior da câmara é a média das leituras de temperatura de quatro termopares localizados na parte superior da

câmara, próximos ao forro falso, enquanto a umidade relativa é medida através de um sensor posicionado no centro geométrico do forro. Um esquema da câmara pode ser observado na Figura 22 [RESENDE, HERMES e MELO 2010]. A temperatura do ar é controlada por um controlador do tipo PID, capaz de variar continuamente a corrente enviada aos resistores elétricos, de acordo com o sinal lido por um conjunto de termopares, e por um sistema de resfriamento que opera continuamente. A umidade relativa também é controlada por um controlador do tipo PID que recebe o sinal enviado por uma sonda capacitiva e atua sobre os resistores do sistema de umidificação. De acordo com recomendações da norma ISO15502 (2005), a velocidade do ar dentro da câmara não deve exceder de $0,25 \text{ m}^2/\text{s}$.

Figura 22 – Câmara de teste.



Fonte: Thiessen, 2015

5 Projeto de controladores

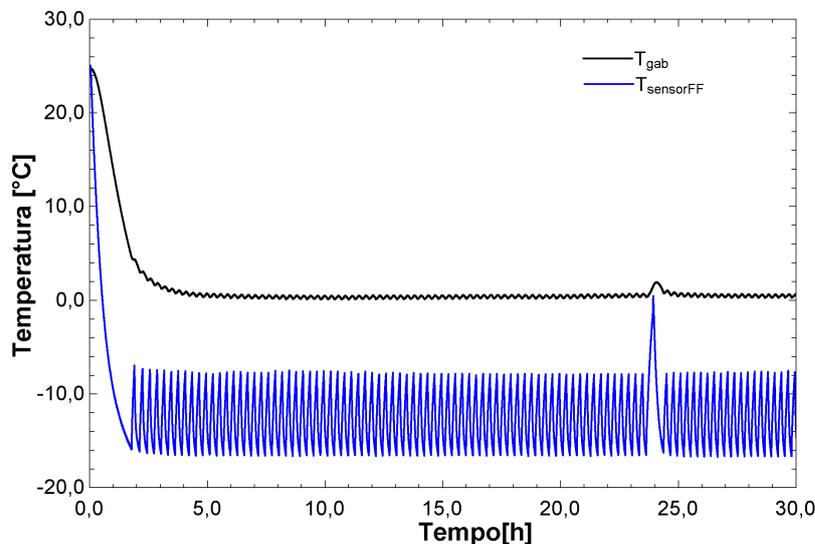
5.1 Lógica padrão para controle de temperatura

A lógica *baseline* desenvolvida e adotada pela fabricante do refrigerador foi estudada em [MACHADO 2018]. Essa lógica utiliza a temperatura do ar que circula entre os compartimentos do freezer e do *fresh food*, ligando e desligando o compressor de velocidade fixa quando essa grandeza atinge os limites de $-9,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-15,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Com isso, o produto consegue regular sua temperatura interna dentro das temperaturas de normas adotadas pelos domésticos.

Por outro lado, o algoritmo de degelo original do produto não pode ser identificado com base nos testes de *baseline* realizados. A empresa apenas informa que usa como referência para degelo tempo de funcionamento e aberturas de porta. Por causa disso, em todos os testes realizados os degelos foram programados para acontecerem em períodos igualmente espaçados. Apenas o que se sabe sobre esse evento, é que nele as resistências do evaporador são ligadas até o sensor ali localizado medir uma temperatura de 5°C .

A Figura 23 mostra o funcionamento do produto na temperatura ambiente de 25°C , sendo a variável T_{gab} responsável por mostrar a temperatura média do gabinete do refrigerador e $T_{sensorFF}$ por mostrar a temperatura do sensor citado no primeiro parágrafo desse capítulo, que fica na troca de ar entre freezer e *fresh food*.

Figura 23 – Teste de *baseline* realizado a 25°C de temperatura ambiente.



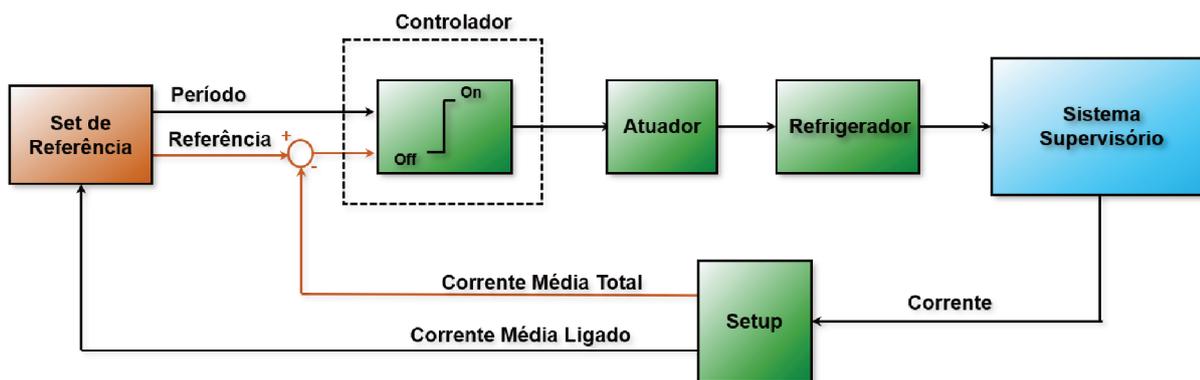
Fonte: do Autor

5.2 Proposta de controle de temperatura baseado em corrente

Contudo, o controle de temperatura original do produto depende exclusivamente de um sensor. Conforme constatado em [MACHADO 2018], devido às bruscas variações de temperatura que esse equipamento sofre, não é raro o mesmo apresentar erros de medição, tanto sistemáticos quanto aleatórios, prejudicando assim o desempenho do controlador.

Ainda em [MACHADO 2018], foi levantada a ideia de um controlador capaz de regular a temperatura do refrigerador através da corrente do compressor. Com isso em mente, após a análise de várias estratégias de controle chegou-se a uma que apresentou resultados satisfatórios. Ela pode ser desenhada conforme o diagrama de blocos encontrado na Figura 24.

Figura 24 – Diagrama de blocos que explica o funcionamento do algoritmo de controle baseado na corrente do compressor.



Fonte: do Autor

Começando pelo bloco azul, representando o Sistema de Aquisição (DAQ), nele a cada iteração do sistema supervisório são medidas todas as variáveis importantes para o projeto. Contudo, como apenas a corrente do compressor importa para a explicação da estratégia de controle, essa é a única grandeza transmitida adiante. Uma vez que ela chega ao bloco chamado "Setup" calculam-se duas correntes médias, a "Corrente Média Total", que é a variável de controle utilizada na estratégia (a partir da qual determina-se o erro que será posteriormente informado ao controlador), e a "Corrente Média Ligado", uma segunda informação que serve para setar alguns parâmetros de referência utilizados no cálculo da ação de controle do próximo ciclo do refrigerador. Uma vez que o "Set de Referência" recebeu a "Corrente Média Ligado" do bloco anterior, ele pode determinar quais os novos valores de referência que serão informados ao controlador. Por fim, com todos os dados em mãos, o controlador pode calcular a nova ação de controle que será

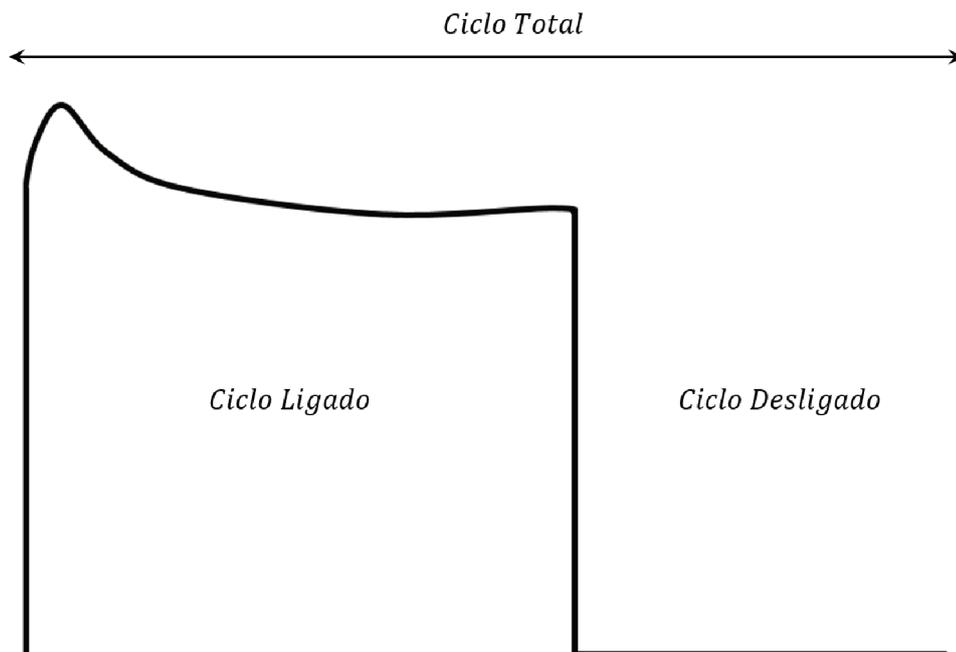
aplicada no atuador (representado pelo compressor do produto), que por sua vez regulará a temperatura interna do refrigerador.

Destaca-se que como o algoritmo descrito utiliza valores médios de corrente, uma nova ação de controle é calculada apenas após um certo período (pré-determinado pelo bloco "Set de Referência"), pois existe a necessidade de finalização de um ciclo do compressor para cálculo dessas variáveis. Todos os detalhes dos três blocos principais da lógica de controle serão discutidos abaixo.

5.2.1 Setup

Diferente de atuadores comuns, o compressor de um refrigerador não foi feito para operar continuamente por longos períodos, portanto existe a necessidade de acioná-lo por ciclos. Para entender o conceito de ciclo pode-se observar a [Figura 25](#), ela representa a curva de potência de um compressor durante um ciclo total, sendo esse composto pela sua parte ligado mais desligado.

Figura 25 – Curva da potência de um compressor durante seu ciclo de ligado mais desligado.



Fonte: do Autor

O primeiro bloco da estrutura de controle é responsável pelo pré-processamento da corrente do compressor. Ele armazenará essa grandeza a cada iteração do software supervisor e aguardará eventos específicos para calcular duas correntes médias distintas.

No primeiro momento o algoritmo irá aguardar o desligamento do atuador, sinalizando o fim do ciclo de ligado, e calculará um valor médio utilizando todas as leituras

de corrente do compressor feitas até o momento. Ele chamará esse valor de "CorrenteMediaLigado", pois justamente ele representa a média de todas as leituras de corrente do compressor enquanto estava ligado.

A segunda variável só será calculada quando o ciclo atual do refrigerador acabar, portanto tanto o ciclo de ligado quanto desligado terão sido finalizados. Assim, o algoritmo pode calcular um novo valor médio, agora utilizando todas as leituras feitas durante um ciclo total do compressor, essa variável será nomeada "CorrenteMediaTotal".

O funcionamento do bloco descrito acima pode ser encontrado no *Algorithm 1*.

Algorithm 1 Calculo de Correntes Médias

```

1: function CORRENTESMÉDIAS(corrente, comp)
2:   while comp do
3:      $i = i + 1$ 
4:      $arrayCorrente[i] \leftarrow corrente$ 
5:   end while
6:    $correnteMediaLigado \leftarrow media(arrayCorrente[])$ 
7:   while cicloNaoAcabou do
8:      $i = i + 1$ 
9:      $arrayCorrente[i] \leftarrow corrente$ 
10:  end while
11:   $correnteMediaTotal \leftarrow media(arrayCorrente[])$ 
12: end function

```

5.2.2 Calculo de referência

Analisando os testes de *baseline* feitos, foram notados padrões nas duas correntes médias, citadas na subseção anterior, e no período do ciclo do compressor de acordo com a temperatura externa em que o refrigerador se encontra. A [Tabela 3](#) mostra quais são esses valores encontrados quando o produto estava regulando a temperatura em regime permanente e em diferentes temperaturas ambiente, sem a introdução de qualquer tipo de perturbação.

Temperatura	Corrente Média Ligado	Corrente Média Total	Período
16°C	0,34 A	0,12 A	0,24 h
25°C	0,36 A	0,21 A	0,31 h
32°C	0,38 A	0,28 A	0,37 h

Tabela 3 – Valores atingidos pelas correntes e períodos com o refrigerador em regime permanente.

Com a corrente média do ciclo de ligado devidamente calculada no bloco anterior, pode-se quantificar a partir dela quais serão a referência da variável de processo e o período do próximo ciclo do compressor. Para isso, esse valor de corrente deve ser passado ao "Set

de referência". Nesse bloco uma comparação será feita para determinar em que patamar está essa corrente média. Essa comparação é feita com base numa escala dividida em três partes, sendo cada seção representada pelos valores obtidos nos testes de *baseline* a 16°C , 25°C e 32°C com alguns ajustes após testes experimentais.

Para uma corrente média do ciclo de ligado superior a 0.376A o algoritmo identifica que o produto está numa temperatura ambiente de 32°C e atribui a referência da corrente média total o valor de 0.31A e ao período do próximo ciclo 0.73h. Já para uma corrente média do ciclo de ligado entre 0.376A e 0.355A o controlador pensa estar numa temperatura ambiente de 25°C e atribui a referência da corrente média total o valor de 0.22A e ao período do próximo ciclo 0.30h. Por último, caso esse valor de corrente seja menor que 0.355 a estratégia de controle pensa estar com o refrigerador em um ambiente de 16°C e atribui a referência da corrente média total o valor de 0.13A e ao período do próximo ciclo 0.24h (ver *Algorithm 2*).

Algorithm 2 Calculo de Referências

```

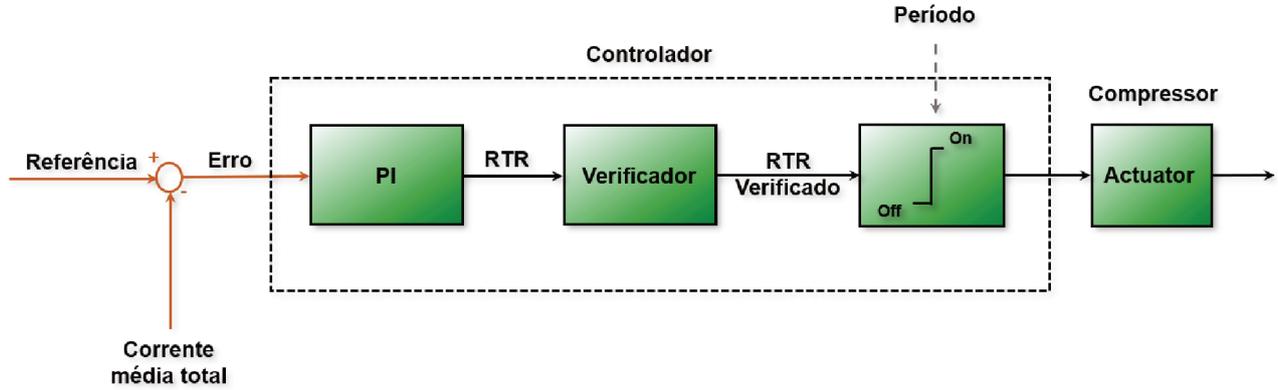
function SETREFERENCIA(correnteMediaLigado)
2:   if correnteMediaLigado > 0,376 then
      refCorrenteMediaTotal = 0,31
4:   periodo = 0,73
      end if
6:   if 0.376 > correnteMediaLigado > 0,355 then
      refCorrenteMediaTotal = 0,22
8:   periodo = 0,30
      end if
10:  if correnteMediaLigado < 0,355 then
      refCorrenteMediaTotal = 0,13
12:  periodo = 0,24
      end if
14: end function

```

5.2.3 Projeto do novo controlador

Como o controlador desenvolvido foi implementado de maneira modular (ver [Figura 26](#)) e possui mais características que um controlador PI normal, cada uma das partes que o compõem serão explicadas individualmente.

Figura 26 – Diagrama de blocos de todas as etapas do controlador utilizado.



Fonte: do Autor

Controlador PI

Após receber o valor atual e de referência da corrente média total do ciclo, o controlador calcula um erro associado a essa grandeza. Esse valor será usado como entrada para o primeiro bloco do controlador (ver Figura 26), onde foi implementado um controle do tipo PI, que tem como saída o valor de *Run Time Ratio* (*RTR*) do próximo ciclo do produto.

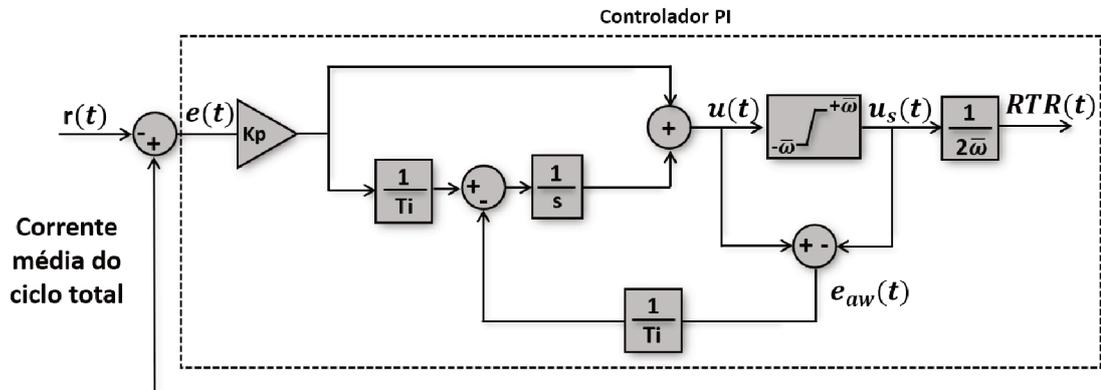
O sinal de *RTR* que é enviado pela estrutura do controlador PI com anti-windup da ação integral (lei de controle da Equação (5.1)) causado pela saturação do sinal u é mostrado pelo diagrama de blocos da Figura 27. A relação apresentada em (5.2) mostra que o sinal resultante da saturação (u_s) é normalizado por $\bar{\omega}$, o resultado é o sinal *RTR*.

Sabendo-se que $\frac{1}{s} \cong \frac{T_s z^{-1}}{1-z^{-1}}$ (com $T_s = 5$ s), a lei de controle escrita em equação recursiva para implementação em LabVIEW é apresentada em (5.1).

$$u(i) = u(i-1) + K_p e(i) + K_p \left(-1 + \frac{T_s}{T_i} \right) e(i-1) - \frac{T_s}{T_i} e_{aw}(i-1) \quad (5.1)$$

$$\begin{cases} e(i) = y_m(i) - r(i) \\ e_{aw}(i) = u(i) - u_s(i) \\ u_s(i) = \text{sat}(u) \Big|_{-\bar{\omega}}^{+\bar{\omega}} \\ RTR(i) = \frac{u_s(i)}{2\bar{\omega}} \quad 0 \leq RTR(i) \leq 1 \end{cases} \quad (5.2)$$

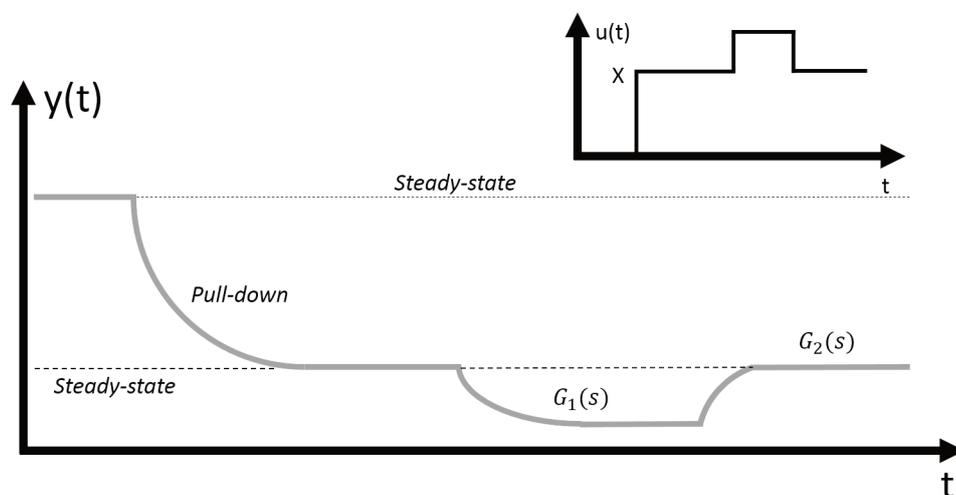
Figura 27 – Diagrama de blocos do controlador PI implementado.



Fonte: do Autor

O ajuste dos parâmetros do controlador para a regulação da temperatura é relativo aos ganhos do controlador PI. Para o ajuste destes ganhos, é necessário aplicar algum método de sintonização e/ou identificação de modelo para o sistema. O primeiro método (mais empírico possível) é conhecido na literatura como *guess and check* ou *Good Gain method*, sendo necessário estimular o sistema em malha fechada gradativamente até conseguir boa estabilidade.

Um outro método muito conhecido na literatura é o método da caixa preta utilizando a resposta ao degrau de RTR aplicado ao sistema para então analisar a variável do processo. Assim, o sistema é estimulado e mantido com um $DC = DC_0$ e depois é variado para $DC = DC_0 + \delta DC$ (degrau), logo após o sistema volta a ter $DC = DC_0$, como mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Método caixa preta da resposta ao degrau de RTR

Fonte: Autor

Para o presente projeto a primeira tentativa foi utilizar o método da *black box*. Foi realizado um teste a 25°C onde a ação de controle era mantida fixa, e posteriormente foi variada tanto para cima quanto para baixo. Durante esse teste foi observado como a variável de processo (corrente média total) se comportava e a partir da função de transferência obtida tentou-se sintonizar um controlador PI. Porém o resultado dessa sintonia não foi minimamente satisfatório quando testado experimentalmente tanto a 25°C quanto nas outras temperaturas. Após uma análise desses testes chegou-se a conclusão de que não é possível utilizar esse método, pois o comportamento do sistema varia dependendo da temperatura ambiente em que o produto se encontra e das perturbações no sistema (situações de *pulldown*, degelo e abertura de portas).

Partiu-se então para uma sintonia do controlador de acordo com o primeiro método apresentado (conhecido como *Good Gain method*). Para isso, colocou-se o sistema operando em malha fechada e foi-se ajustando os ganhos até que os resultados de tempo de resposta do sistema se mostraram satisfatórios para todas as situações de teste possíveis.

Verificador

A fim de acelerar 2 situações onde o sistema é submetido a altas perturbações térmicas como *pulldown* e degelo foi projetado um sistema verificador com algumas hipóteses. Ele analisa o sistema e identifica se alguma dessas duas situações acontecem. O *pulldown* é facilmente identificado por uma flag indicando que o produto não ligou desde que foi energizado. O degelo também consegue-se identificar pois tem-se a informação de quando a resistência de degelo foi acionada.

Caso algum desses eventos ocorra, o "Verificador" descarta a ação de controle calculada pelo controlador PI e impõem sobre o sistema um *RTR* e Período do próximo ciclo fixo e tabelado, quantificado experimentalmente (Ver *Algorithm 3*). Após esse primeiro ciclo com essa ação de controle forçada, o PI é acionado e a corrente começa a ser controlada por ele.

Para uma situação de *pulldown* o Verificador impõem sobre o sistema uma ação de controle com $RTR = 1$ e Período = 0,73. Já quando um degelo é identificado, tem-se que a primeira ação de controle depois desse evento depende da corrente média do ciclo de ligado calculada antes dele acontecer. Dependendo do patamar dessa corrente (igual ao encontrado no *Algorithm 2*) tem-se um *RTR* e períodos distintos para cada situação.

Controle ON/OFF

O último bloco do controlador é responsável por quantificar o tempo que o atuador ficará ligado e desligado, a partir da ação de controle (*RTR* já verificado) e do período do próximo ciclo (informado pelo bloco "Set de Referência"). No entanto, existem alguns

Algorithm 3 Verificador

```

function VERIFICA(pulldown, degelo)
  if pulldown then
3:   RTR = 1,0
      periodo = 0,73
  end if
6:   if degelo then
      if Ambiente == 16°C then
          RTR = 0,5
9:       periodo = 0,24
      end if
      if Ambiente == 25°C then
12:      RTR = 0,7
          periodo = 0,30
      end if
      if Ambiente == 32°C then
15:      RTR = 0,9
          periodo = 0,73
18:      end if
      end if
  end function

```

cuidados que devem ser tomados nesse cálculo para respeitar a taxa de amostragem (T_s) do software supervisor e não danificar o compressor.

A fim de se obter o tempo de ligado (T_{on}) do atuador durante o próximo ciclo, multiplica-se o valor de RTR pelo Período (ver [Equação 5.3](#)). Já para calcular o tempo de desligado (T_{off}) subtrai-se o Período do T_{on} (ver [Equação 5.4](#)).

$$T_{on} = RTR * Período \quad (5.3)$$

$$T_{off} = Período - T_{on} \quad (5.4)$$

Contudo, esses tempos obtidos ainda não podem ser utilizados, deve-se primeiro se certificar que eles respeitam a taxa de amostragem do software supervisor para que não ocorra nenhum conflito interno no algoritmo. Para isso faz-se uma divisão dos tempos T_{on} e T_{off} pela taxa T_s (comumente utilizada como 5 segundos durante todo projeto). Caso uma dessas divisões tenha restos diferentes de 0, o algoritmo arredonda para cima T_{on} transformando-o no próximo múltiplo de T_s , e arredonda para baixo T_{off} modificando seu valor para um múltiplo de T_s .

Uma vez que os tempos de ligado e desligado do compressor estão dentro dos padrões estabelecidos, tem-se uma última verificação com a única finalidade de auxiliar o compressor a respeitar seu intervalo de desligado necessário para que possa religar¹.

Para finalizar a análise dos tempos é necessário verificar se o T_{off} respeita o tempo mínimo que o compressor necessita ficar desligado para poder religar sem danificá-lo. Para tanto, implementou-se um algoritmo que executa essa verificação.

No entanto, observou-se nos testes experimentais que deixar o atuador desligado por 200s a uma temperatura de 32°C ambiente dificulta a regulação da sua temperatura interna. Pois nessa situação há uma grande quantidade de carga térmica externa sobre o sistema em forma de perturbação. Com isso em mente o código de verificação do tempo T_{off} utilizado pode ser visto abaixo.

Algorithm 4 Verifica Tempo de Desligado

```

function VERIFICAToff( $T_{off}, T_{on}, CorrenteMediaLigado$ )
  if  $T_{off} < 200$  then
3:   if  $CorrenteMediaLigado > 0.376$  then
       $T_{on} = T_{on} + T_{off}$ 
       $T_{off} = 0$ 
6:   else
       $T_{on} = T_{on} - (200 - T_{off})$ 
       $T_{off} = 200$ 
9:   end if
  end if
end function

```

¹ Tempo necessário para que as pressões de alta e baixa no compressor se equalizem.

6 Resultados do controle por corrente

O objetivo deste capítulo é realizar uma análise da lógica de controle proposta no [Capítulo 5](#), com isso pretende-se avaliar a obtenção de ganhos de desempenho e/ou bons indicadores que possibilitem a continuação dos estudos iniciados.

As características desejadas para um regulador de temperatura mais eficiente são a rejeição de perturbação de forma suficientemente rápida, um controle de temperatura com oscilações de amplitudes baixas e o menor tempo de *pull-down* possível. Todos os testes foram realizados com o sistema descarregado, ou seja, sem qualquer tipo de produto dentro (dinâmica diferente para o sistema carregado, acarretando em diferentes resultados).

A perturbação no sistema pode ser feita de duas formas distintas. Pode-se abrir a porta do refrigerador por 30 segundos ou 2 minutos, assim haverá uma troca de calor entre o ambiente externo e a parte de dentro do produto já refrigerado, que terá sua temperatura aumentada. Outra forma de perturbação é feita induzindo o refrigerador a fazer um degelo (ação necessária para não acumular gelo no seu compartimento de freezer), acionando as resistências térmicas diretamente sobre o evaporador do refrigerador e assim também aumentando a temperatura interna do produto como um todo, mas principalmente do compartimento do freezer.

Neste Capítulo serão apresentados os testes realizados a 25°C e o teste com a mudança da temperatura ambiente de 16°C para 25°C . Os testes realizados a 16°C e 32°C , bem como a mudança de temperatura ambiente de 25°C para 32°C podem ser encontrados nos apêndices desse documento.

6.1 Condição ambiente: 25 °C e 50% umidade relativa

Pull-down

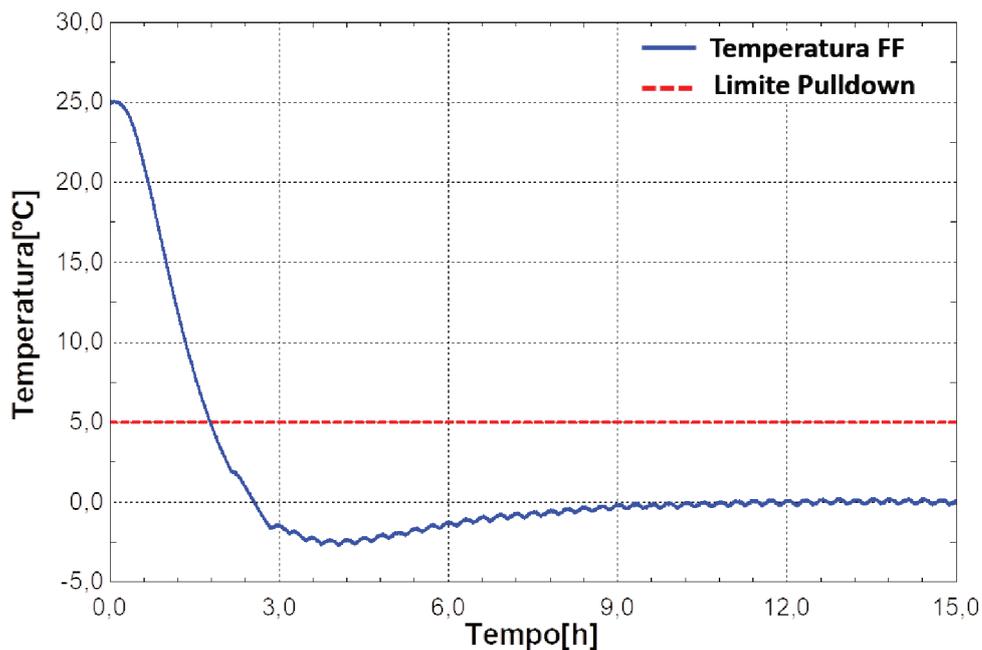
A [Figura 29](#) mostra o teste de *pull-down* realizado para a condição ambiente descrita. Pode-se observar que o refrigerador consegue fazer o abaixamento da sua temperatura interna até o limite de 5°C em 2 horas e sem problemas ¹. Após atingir essa marca o produto fica aproximadamente 5 horas com a temperatura negativa, porém em patamares aceitáveis que não são prejudiciais para a conservação de alimentos. Por fim o sistema consegue estabilizar sua temperatura interna próximo de 0°C .

Na figura [Figura 30](#) pode ser observado o comportamento do controlador durante a situação de *pull-down*. Assim como descrito no [Capítulo 5](#), o controle começa com uma ação

¹ Para testes de *pull-down* essa é a temperatura mínima que o refrigerador tem que atingir para considerar que esse evento foi realizado

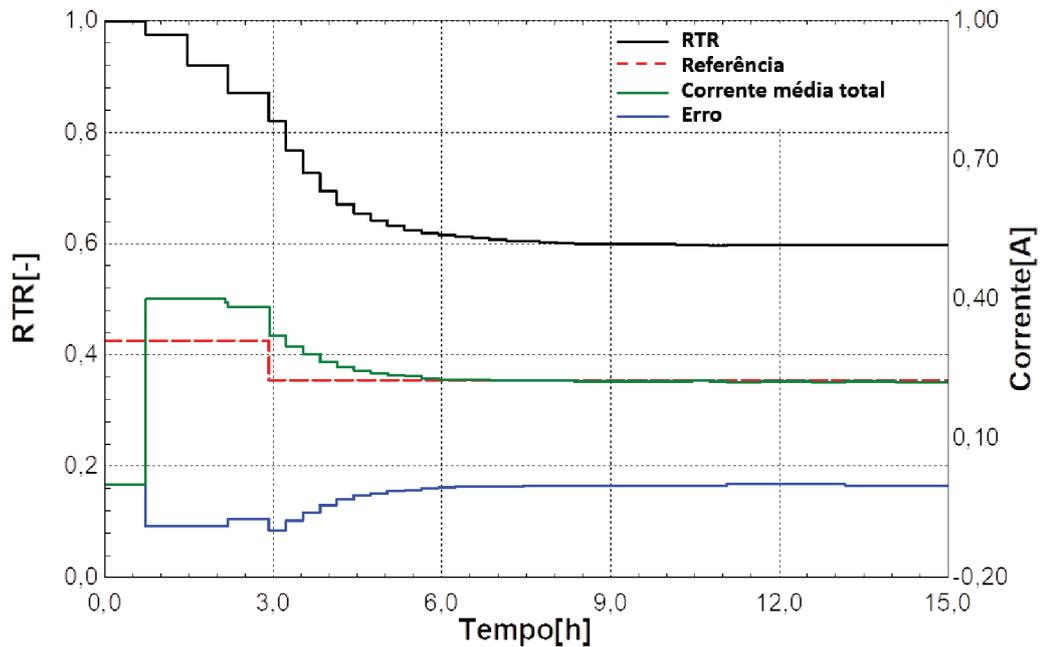
máxima sobre o atuador ($RTR = 1,0$), após esse ciclo a ação PI é acionada e começa a regular a corrente média total do compressor. Consegue-se notar a referência do controlador se alterando, começando em um valor alto (utilizado para condições de 32°C), e passando para um valor intermediário (utilizado para condições de 25°C), a medida que a carga térmica inicial do refrigerador é rejeitada, tal troca pode ser vista no instante de teste 3 horas, onde a linha pontilhada vermelha sofre uma queda em formato de degrau. Vale observar que o erro final obtido na variável de processo é nulo, fato já esperado pois o controlador conta com uma ação Integral e Anti-windup.

Figura 29 – Teste de *pulldown* a 25°C e 50% umidade relativa mostrando a temperatura interna do refrigerador.



Fonte: do Autor

Figura 30 – Teste de *pull-down* a 25 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.



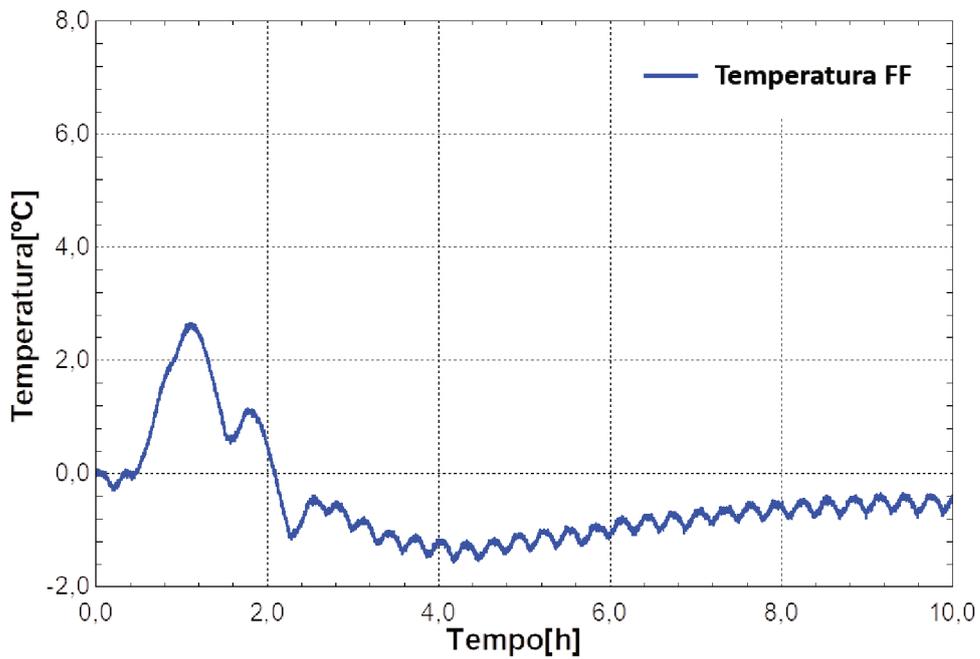
Fonte: do Autor

Degelo

Na [Figura 31](#) é possível observar um degelo. Esse evento aumenta a temperatura do compartimento de *fresh food* do refrigerador até próximo de 3°C . Após, é imposto sobre o sistema uma ação de controle fixa (conforme descrito no [Capítulo 5](#)). Depois desse primeiro ciclo com *RTR* fixo, o controlador é ligado, e como a corrente do compressor subiu juntamente com a corrente média do ciclo de ligado, o controle impõem ações mais bruscas para rejeitar essa perturbação o mais rápido possível. Uma vez que grande parte dessa carga térmica injetada no sistema é rejeitada, abaixando novamente a corrente do compressor para patamares próximos aos encontrados antes desse evento, o refrigerador volta para sua referência original e continua a regular a temperatura mais uma vez próximo de 0°C .

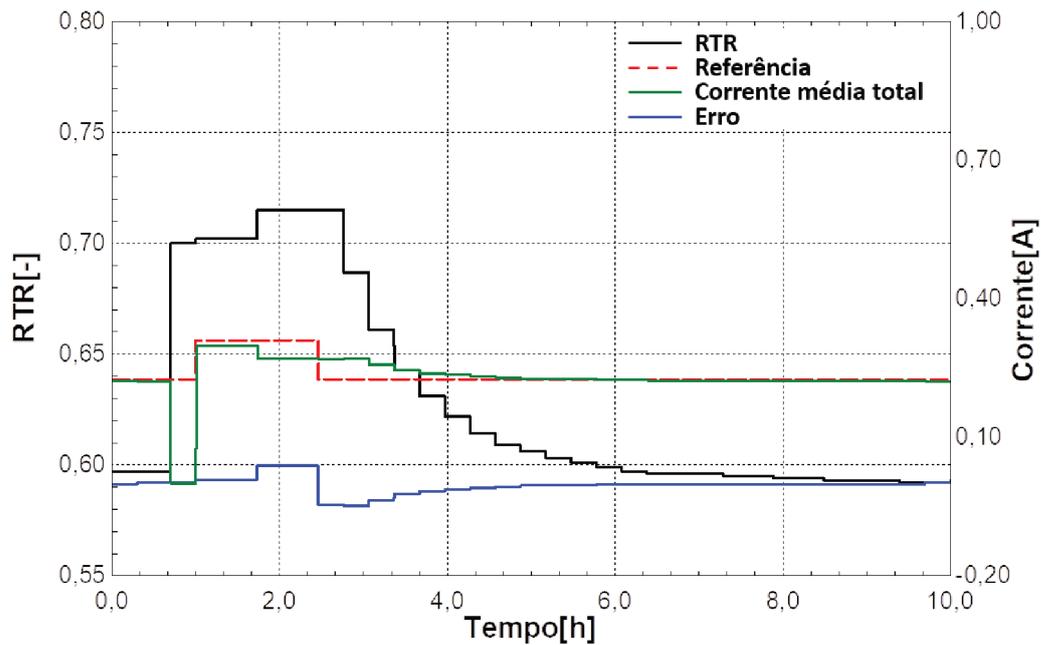
Todas as características de troca de referência citadas no parágrafo acima podem ser vistas na [Figura 32](#), que mostra as variáveis do controlador. Logo após o degelo é imposto um *RTR* fixo de 0,70 para rejeitar esse evento. Depois desse ciclo com ação fixa o controlador PI é ligado, porém como a corrente do compressor aumentou devido a carga térmica que o degelo impôs sobre o sistema, pode ser observado uma troca de referência no instante 1 hora de teste. Após exatamente 2 ciclos nessa nova referência, com a temperatura do refrigerador já regulada, o algoritmo volta para sua antiga referência onde permanece até que um novo evento ocorra.

Figura 31 – Teste de Degelo a 25 °C e 50% umidade relativa mostrando a temperatura interna do refrigerador.



Fonte: do Autor

Figura 32 – Teste de degelo a 25 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.

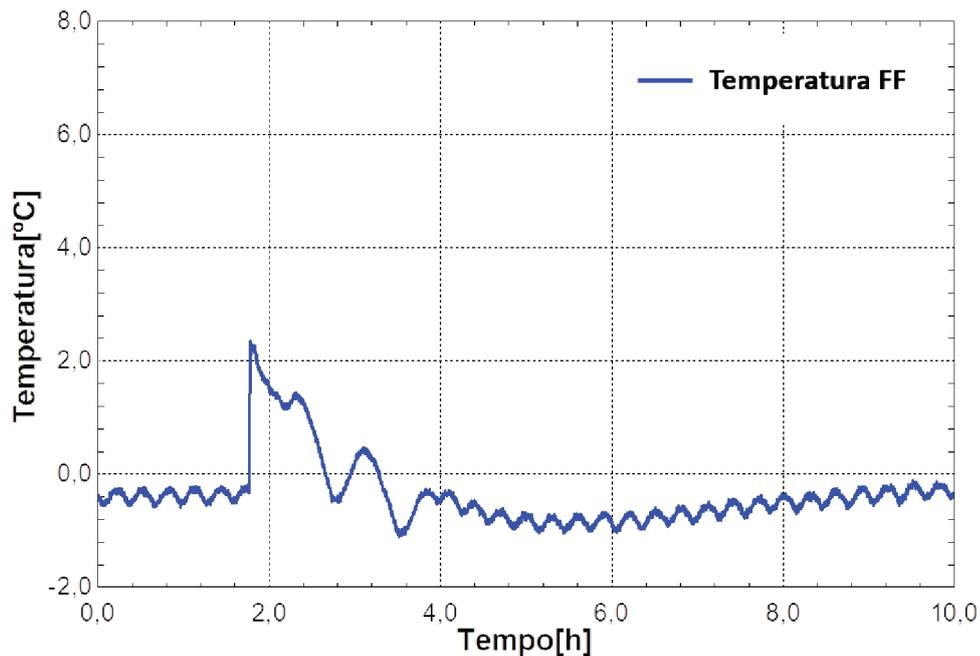


Fonte: do Autor

Abertura de porta

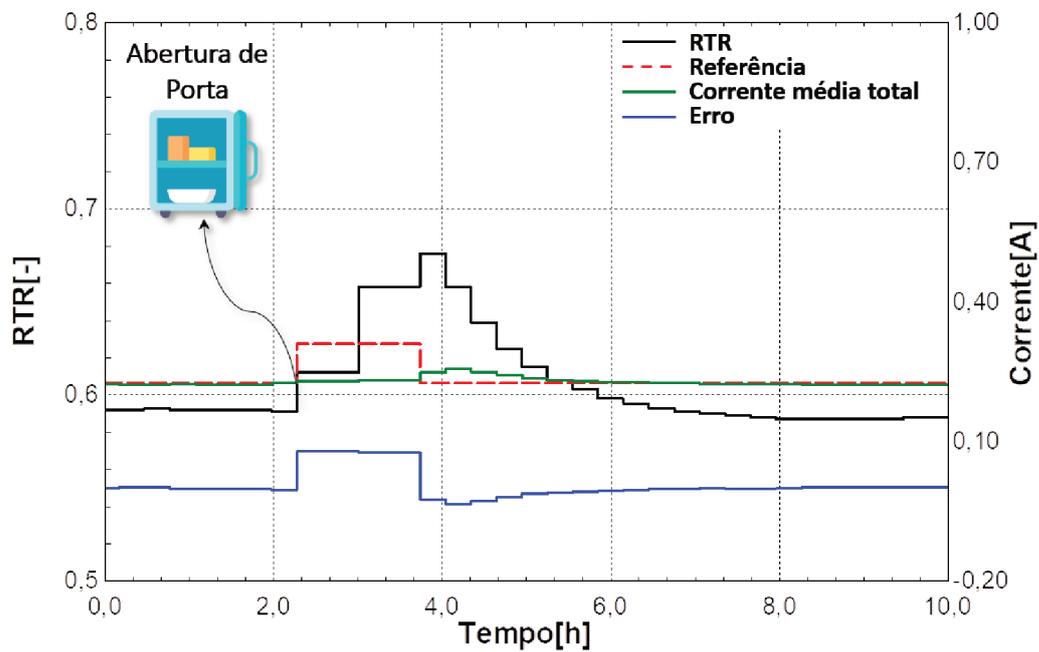
Na abertura de porta de 30 segundos feita a 25°C ambiente (ver [Figura 33](#)) pode-se observar uma variação na temperatura interna do refrigerador elevada. Fato que leva o sistema a trocar a referência, pois essa carga térmica eleva a corrente do compressor, que por sua vez aumenta seu valor médio do ciclo de ligado. O sistema passa 2 ciclos nessa referência maior para que essa perturbação possa ser rejeitada mais rapidamente. Em contra partida, o sistema torna-se mais oscilatório. Após essa rejeição a temperatura do produto volta a estabilizar próximo ao seu valor original onde permanece até que uma próxima perturbação seja inserida. Todas as características de troca de referência comentadas acima podem ser vistas na [Figura 34](#).

Figura 33 – Teste de abertura de porta (30s) a 25 °C e 50% umidade relativa mostrando a temperatura interna do refrigerador.



Fonte: do Autor

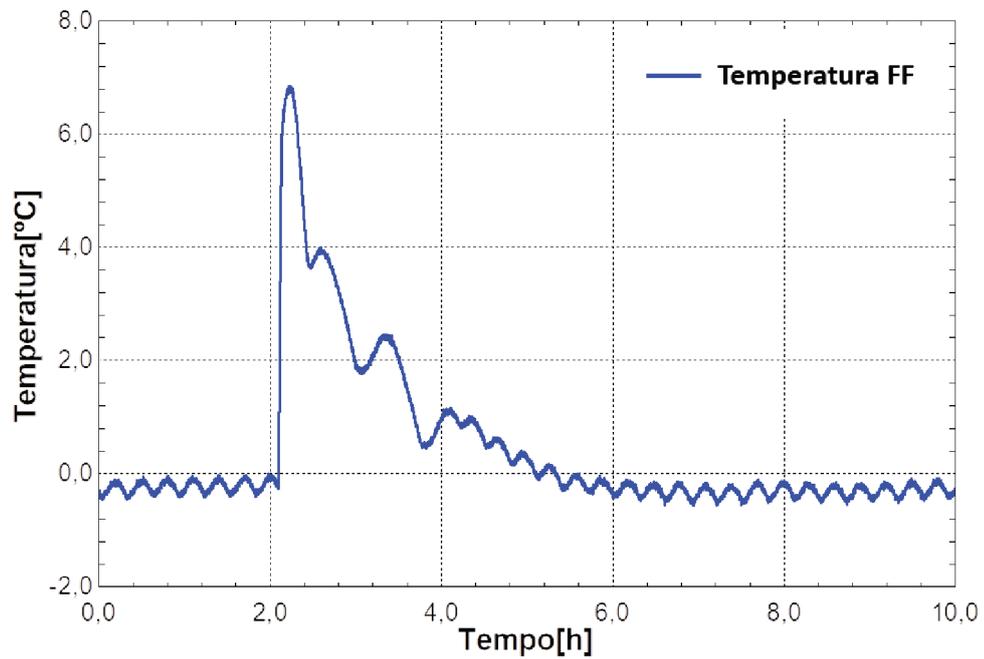
Figura 34 – Teste de abertura de porta (30s) a 25 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.



Fonte: do Autor

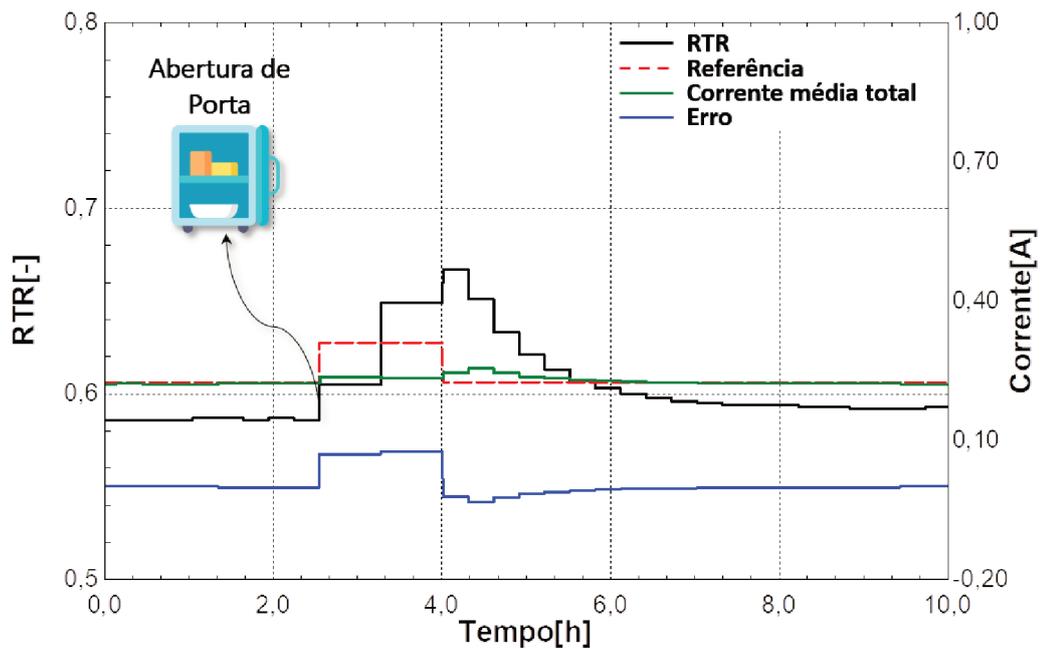
Para uma abertura com 2 minutos de duração é relatado uma variação na temperatura interna do produto alta (ver Figura 35). Esse evento faz a referência do controlador ser alterada para um valor superior a fim de rejeitar rapidamente essa carga térmica que foi injetada no sistema. Por fim, a temperatura é regulada no mesmo patamar em que se encontrava antes da perturbação no sistema. Todas as trocas de referência podem ser observadas na Figura 36.

Figura 35 – Teste de abertura de porta (2min) a 25 °C e 50% umidade relativa mostrando a temperatura interna do refrigerador.



Fonte: do Autor

Figura 36 – Teste de abertura de porta (2min) a 25 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.



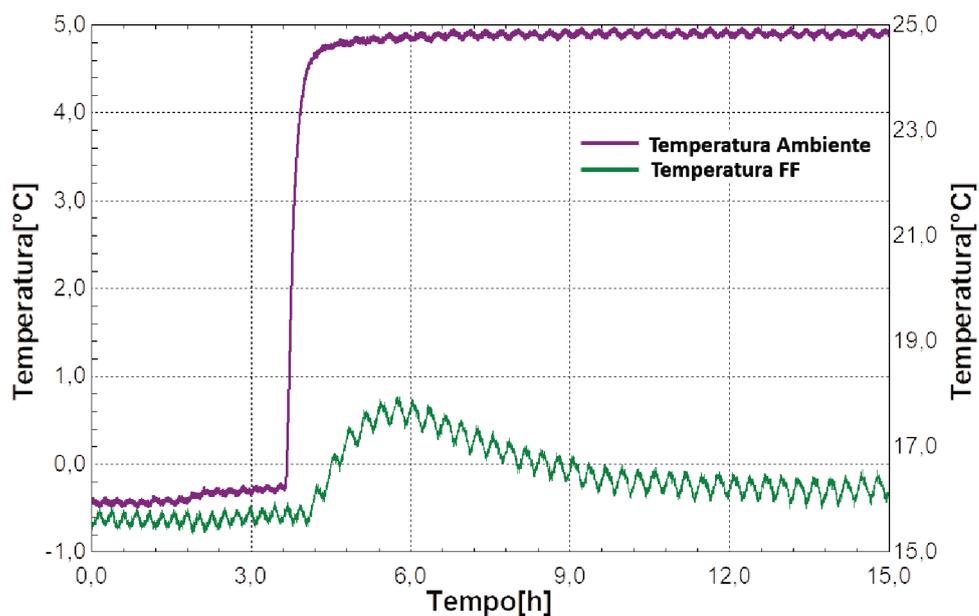
Fonte: do Autor

6.2 Mudança de condição ambiente: 16 °C e 50% umidade relativa para 25 °C e 50% umidade relativa

A [Figura 37](#) mostra uma mudança na temperatura ambiente, teste necessário para validação da lógica de controle, pois no dia-a-dia o produto irá operar sobre variação do ambiente em que se encontra. Durante a mudança, realizada em torno de 4 horas de teste, pode-se observar que apesar da temperatura externa variar 9°C, a temperatura interna atinge um máximo perto de 1°C e depois volta a ser regulada no patamar próximo ao qual se encontrava antes desse evento.

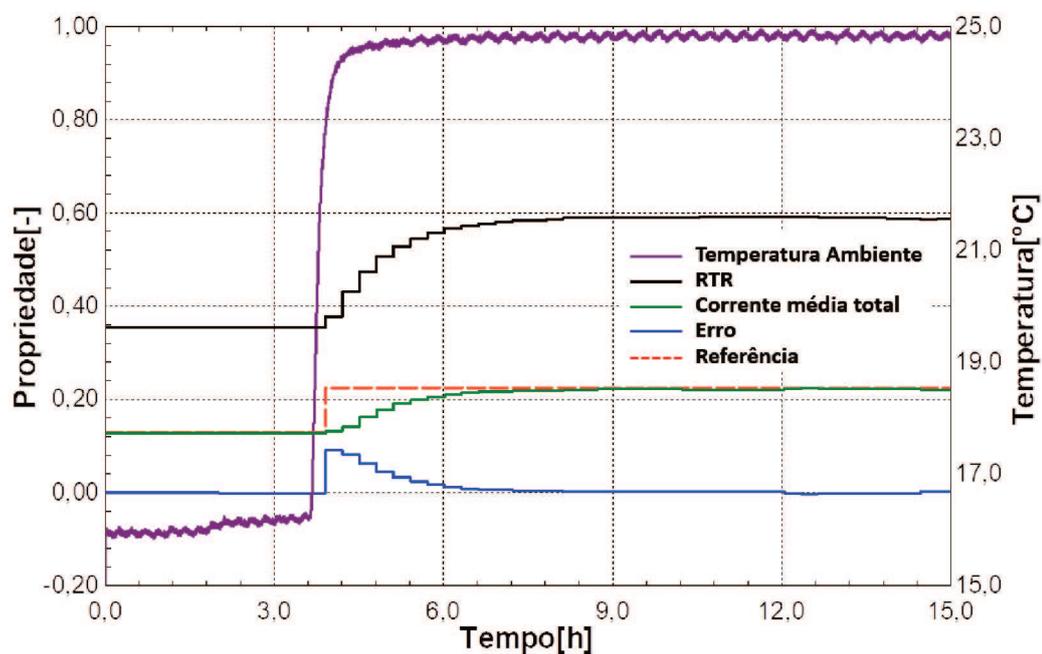
O controlador consegue acompanhar a mudança rápida de temperatura ambiente facilmente. Isso pode ser observado na [Figura 38](#), onde logo após essa mudança, o controlador identifica uma variação na corrente do compressor e assim muda sua referência para um valor superior, a fim de regular sua temperatura interna sem causar grandes variações.

Figura 37 – Teste observando a temperatura do refrigerador durante uma mudança de 16 °C e 50% umidade ambiente para 25 °C e 50% umidade ambiente.



Fonte: do Autor

Figura 38 – Teste observando as variáveis de controle durante uma mudança de 16 °C e 50% umidade ambiente para 25 °C e 50% umidade ambiente.



Fonte: do Autor

7 Conclusões e Perspectivas

No capítulo a seguir serão sintetizados e analisados os resultados obtidos durante o projeto, bem como algumas perspectivas de trabalhos futuros sobre controles de temperatura para refrigeradores domésticos baseados na corrente de compressores de velocidade fixa.

7.1 Conclusão do trabalho

O objetivo geral do trabalho foi propor um método para regulação da temperatura interna de um refrigerador doméstico onde não precisa-se ser feita a medição dessa grandeza. Para tanto, escolheu-se a corrente do compressor e um controlador PI modificado com algumas proposições empíricas. De maneira geral, o objetivo principal do trabalho foi alcançado, pois em todos os testes realizados a temperatura do produto trabalhado foi regulada próximo a 0°C .

Durante todas as situações de *pulldown* apresentadas no Capítulo 6 o produto foi capaz de realizar o abaixamento de temperatura rapidamente, apenas com uma ressalva para o teste realizado a 32°C , onde o refrigerador desliga seu atuador apenas uma vez antes de atingir o valor limite de 5°C . Portanto, de maneira geral pode-se dizer que independente da temperatura externa na qual o produto se encontra, ele será capaz de realizar seu *pulldown* sem problemas e com eficiência praticamente máxima.

Analisando as situações de degelo é possível notar que o desempenho para rejeição dessa perturbação não é ótimo, porém funciona de maneira satisfatória. Na situação de 16°C ambiente esse evento pode ser rejeitado de maneira mais rápida com uma pequena modificação no "Verificador" que compõem o controlador. Já nos testes realizados a 25°C tem-se uma recuperação pós degelo muito eficaz, pois em pouco tempo o refrigerador volta a oscilar na temperatura em que estava antes. Para finalizar, no teste de degelo realizado a 32°C foi observado uma ação mais agressiva de recuperação do que o necessário, portanto pode-se pensar em diminuir um pouco essa agressividade mexendo novamente nos parâmetros do "Verificador".

Analisando os testes feitos com aberturas de portas pode-se concluir que de maneira geral esses eventos foram rejeitados sem dificuldades. Nos experimentos realizados a 16°C , após a aberturas de porta, não foi tomada nenhuma ação drástica de controle, no entanto, isso aconteceu pois a amplitude da variação de temperatura causada por esse evento foi praticamente irrelevante para o sistema, não sendo capaz de alterar a corrente do compressor. Já para as aberturas feitas a 25°C , como a variação da temperatura interna

do produto foi maior, pode ser visto uma reação do controlador e uma mudança na referência de corrente para rejeitar esse evento o mais rápido possível, por isso, nessa situação ambiente o desempenho da estratégia de controle foi considerado ótimo. Por fim, nos testes realizados a 32°C foi observado um desempenho não satisfatório, mas isso aconteceu por causa do aspecto construtivo da estratégia de controle, a qual previa referências de corrente para no máximo 32°C ambiente sem perturbações.

7.2 Sugestões e perspectivas para trabalhos futuros

O presente trabalho mostrou a facticidade de um regulador de temperatura baseado na corrente de um compressor de velocidade fixa. No entanto, como foi uma primeira abordagem e por não possuir outras referências na literatura que já tenham desenvolvido esse tipo de controlador, algumas lacunas foram deixadas. Principalmente a parte de rejeição de perturbações e em específico, aberturas de porta a 32°C ambiente.

Propõem-se para trabalhos futuros a tentativa de obtenção de um modelo capaz de fornecer com precisão a corrente do compressor, e partir de uma análise do modelo propor uma nova estratégia de controle que pode ser tanto baseada na apresentada nesse projeto como em pode ser baseada em métodos mais analíticos, como lógicas de controle Fuzzy.

Referências

- A., M. et al. Reduction in the electric power consumption of a thermoelectric refrigerator by experimental optimization of the temperature controller. *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, 2012. Citado na página 37.
- BANSAL, P.; VINEYARD, E.; ABDELAZIZ, O. Advances in household appliances - a review. *ELSEVIER*, 2011. Citado na página 38.
- BOTELHO, L.; CUNHA, C.; MACEDO, M. O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais. *Gestão E Sociedade*, 2011. Citado na página 35.
- COUTO, P. R. C. *ANÁLISE DE MANCAIS RADIAIS HIDRODINÂMICOS COM APLICAÇÃO EM COMPRESSORES HERMÉTICOS DE REFRIGERAÇÃO*. 2006. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina. Citado na página 32.
- DOSSAT, R. *Principles of refrigeration*. [S.l.]: Pearson, 2001. ISBN 9780471035503. Citado na página 27.
- FELICE, M. d.; PIRODDI, L.; LEVA, A. Adaptive temperature control of a household refrigerator. *American Control Conference*, 2009. Citado na página 37.
- LEVA, A.; FELICE, M. d.; PIRODDI, L. Adaptive relay-based control of household freezers with on-off actuators. *ELSEVIER*, 2009. Citado na página 37.
- MACHADO, E. *Estudo de Estratégias de Controle para Refrigeradores Domésticos com Compressores Lineares*. 2015. TCC (Graduação), Curso de Engenharia de Controle e Automação, CTC, UFSC. Citado na página 28.
- MACHADO, E. *Desenvolvimento de algoritmos de detecção e correção de falha em sensores de temperatura de refrigeradores domésticos*. 2018. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 52.
- RESENDE, F.; HERMES, C.; MELO, C. Um método alternativo para determinar o consumo de energia de refrigeradores domésticos. *VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA*, 2010. Citado na página 50.
- SAFFAR, U.; A.A.T., M. Optimized on-off controller for energy saving in a household refrigerator. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue, EUA*, 2016. Citado na página 37.
- SEABURG, C.; PATERSON, S. *The Ice King: Frederic Tudor and His Circle*. [S.l.]: Massachusetts Historical Society, 2003. (Maritime Series). ISBN 9780939510801. Citado na página 27.
- SILVA, J. da. *Introdução à tecnologia da refrigeração e da climatização*. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2003. Citado na página 30.
- STOECKER, W. *Refrigeration and Air Conditioning*. [S.l.]: McGraw-Hill Companies, 1958. (Mac Graw Hill series in mechanical engineering). ISBN 9780070616158. Citado na página 29.

VITOR, M. F. *Desenvolvimento de uma lógica de degelo adaptativa para um refrigerador comercial leve*. 2016. TCC (Graduação), Curso de Engenharia de Controle e Automação, CTC, UFSC. Citado na página 35.

WINCK, E. *Estudo e Implementação de uma Estratégias Inovativa para Controle de Temperatura*. 2018. TCC (Graduação), Curso de Engenharia de Controle e Automação, CTC, UFSC. Citado na página 36.

Apêndices

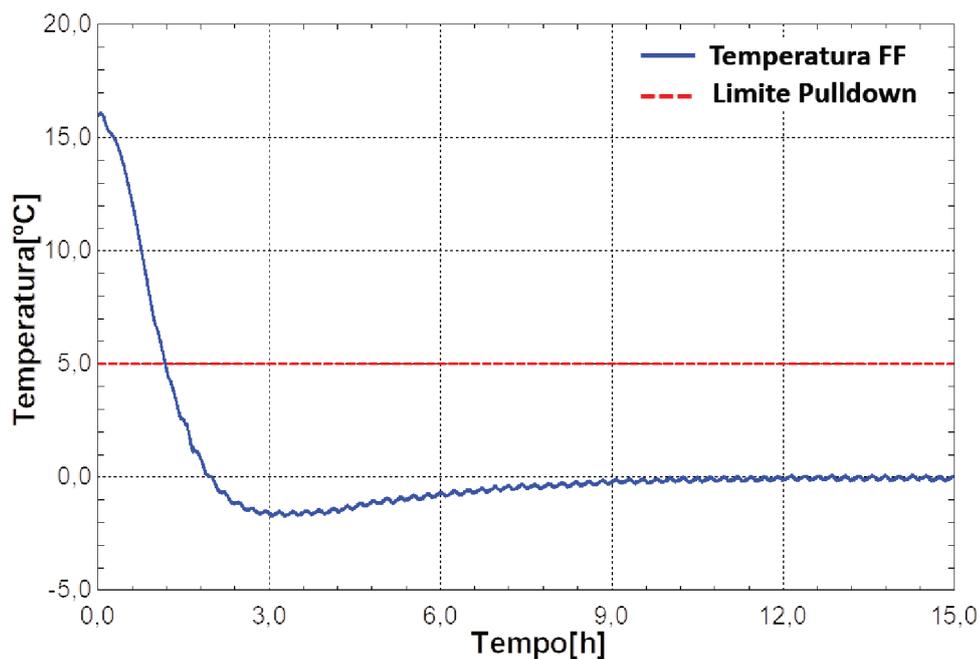
APÊNDICE A – Condição ambiente: 16 °C e 50% umidade relativa

Pull-down

A Figura [Figura 39](#) mostra o teste de *pull-down* para a condição ambiente mencionada mostrou que o sistema consegue fazer o abaixamento de temperatura até a faixa de 5°C rapidamente, sem problemas e sem eventualmente desligar o atuador, característica desejada pelo fabricante visto que esse comportamento garante atingir a temperatura limite no menor tempo possível. Por fim a temperatura interna do refrigerador fica por algumas horas levemente negativa e começa a oscilar próximo de 0°C , ideal para conservação do alimento.

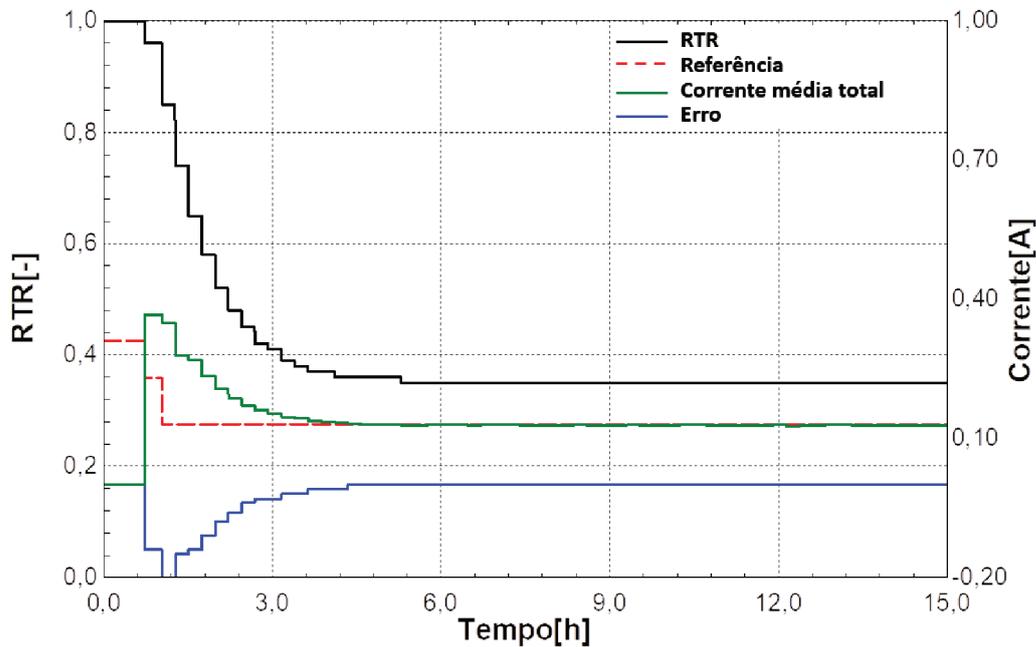
Novamente agora na [Figura 40](#) pode-se ver a característica descrita no Capítulo 5, onde a valor de *RTR* para o início de operação do produto é máximo. Depois de um ciclo operando com essa ação de controle o PI é ligado e começa a controlar a corrente média total do compressor, a partir desse momento essa valor tende a referência desejada com erro nulo.

Figura 39 – Teste de *pull-down* a 16 °C e 50% umidade relativa mostrando a temperatura interna do refrigerador.



Fonte: do Autor

Figura 40 – Teste de *pull-down* a 16 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.



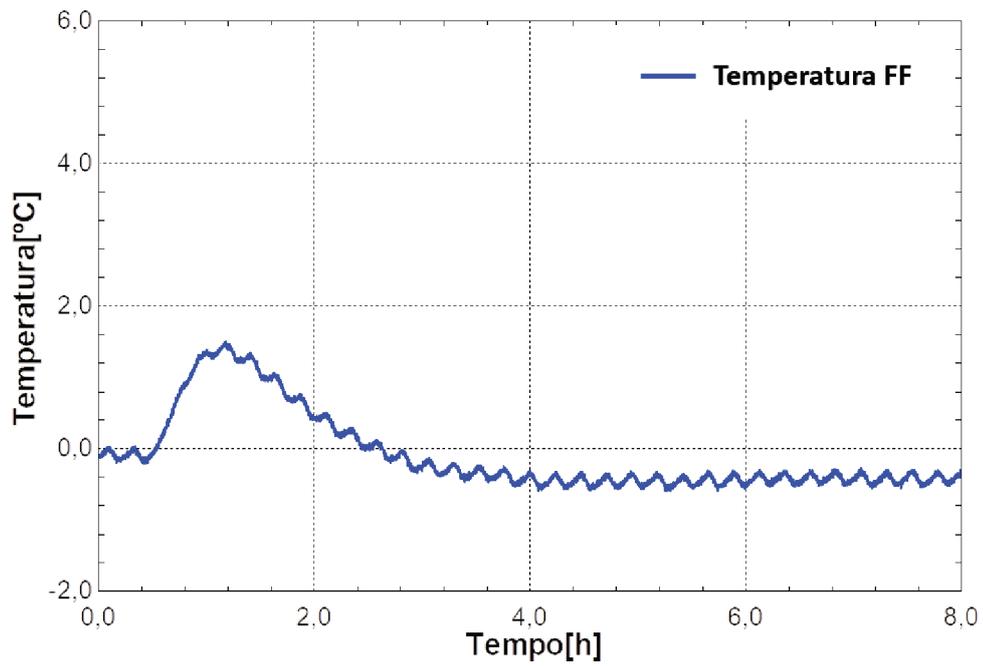
Fonte: do Autor

Degelo

A Figura 41 mostra o teste de degelo, para a condição ambiente mencionada, e mostrou que o sistema consegue rejeitar essa perturbação sem problemas e sem tomar drásticas ações de controle. Voltando a regular a temperatura do produto no regime permanente em patamares bem próximos aos apresentados no teste de *pull-down*.

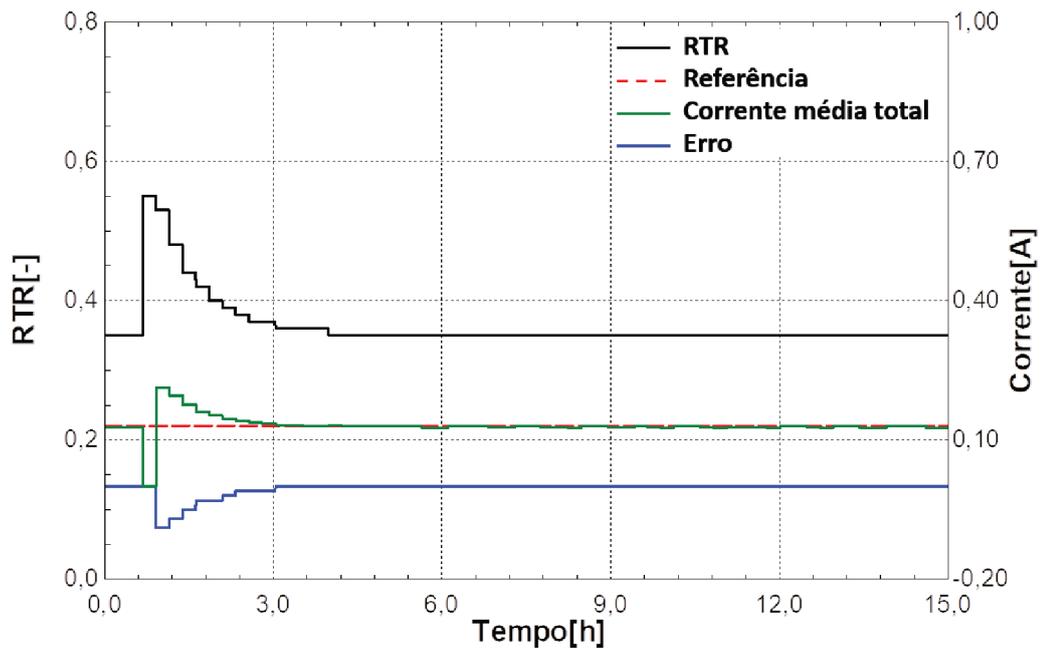
Já na Figura 42 pode-ser ver a característica do controlador de setar uma ação de controle (*RTR*) fixa após um degelo. Depois esse primeiro ciclo com *RTR* fixo, a ação PI é ligada e volta a controlar a corrente média total do compressor, que por consequência regula a temperatura do refrigerador.

Figura 41 – Teste de Degelo a 16 °C e 50% umidade relativa mostrando a temperatura interna do refrigerador.



Fonte: do Autor

Figura 42 – Teste de degelo a 16 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.



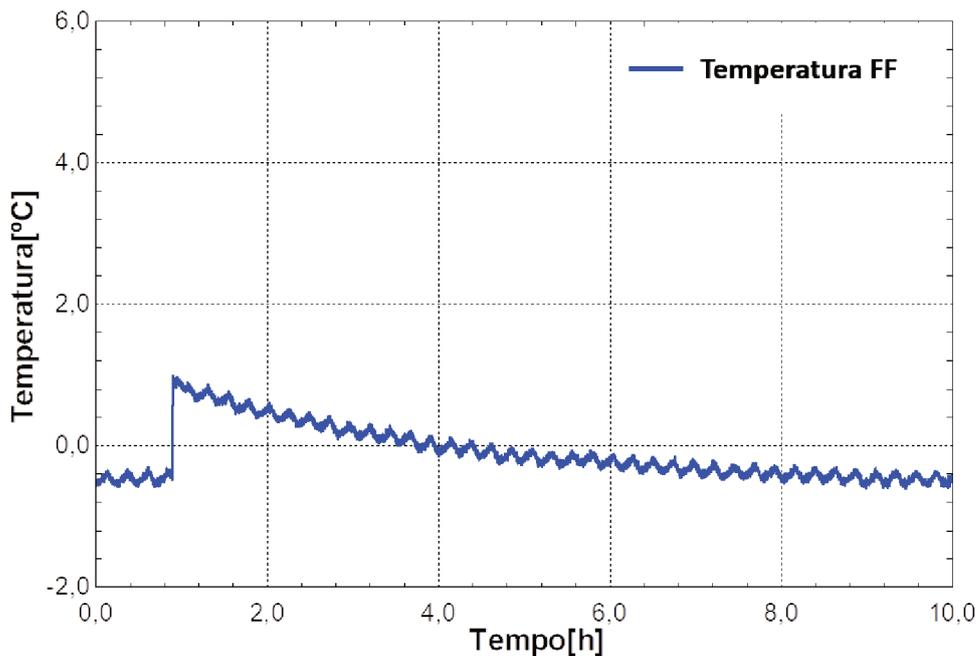
Fonte: do Autor

Abertura de Porta

A primeira abertura de porta pode ser vista na [Figura 43](#), onde mesmo após esse evento, a temperatura do refrigerador não sofre grandes alterações. Isso se deve porque o ambiente em que o produto se encontrava estava a 16°C .

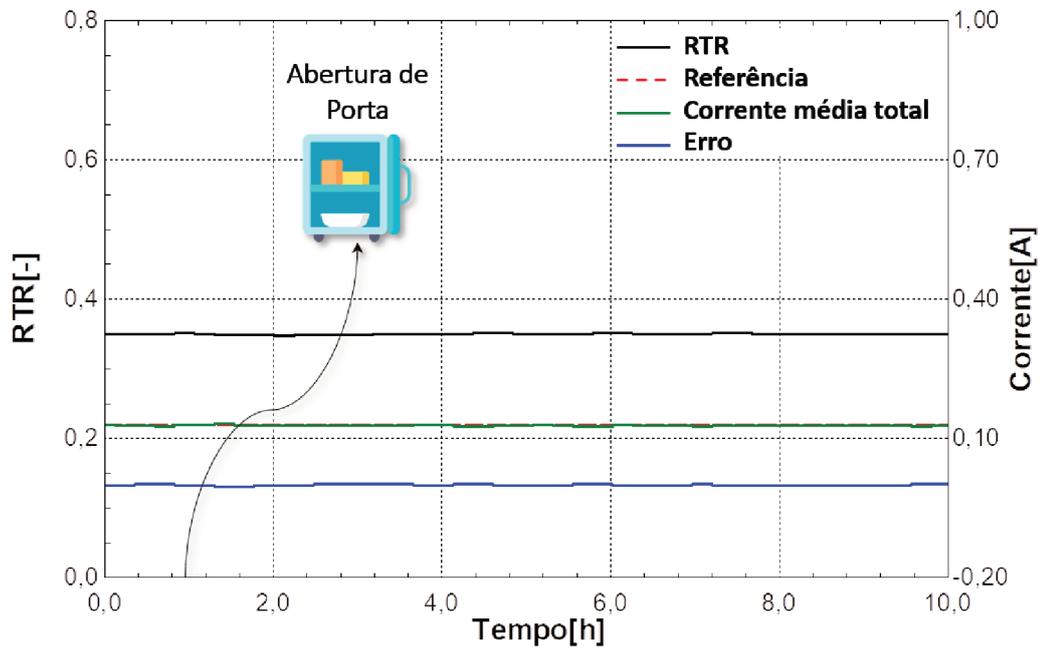
A variação de temperatura durante uma abertura de porta é pequena, não chegando nem a 2°C de amplitude. Essa variação não é suficientemente alta para modificar a corrente que o compressor consome, por isso, a estratégia de controle implementada não consegue (nem deve) perceber essa perturbação (ver [Figura 44](#)). Ela é praticamente ignorada pelo sistema que continua operando normalmente como se nada tivesse acontecido.

Figura 43 – Teste de abertura de porta (30s) a 16 °C e 50% umidade relativa mostrando a temperatura interna do refrigerador.



Fonte: do Autor

Figura 44 – Teste de abertura de porta (30s) a 16 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.

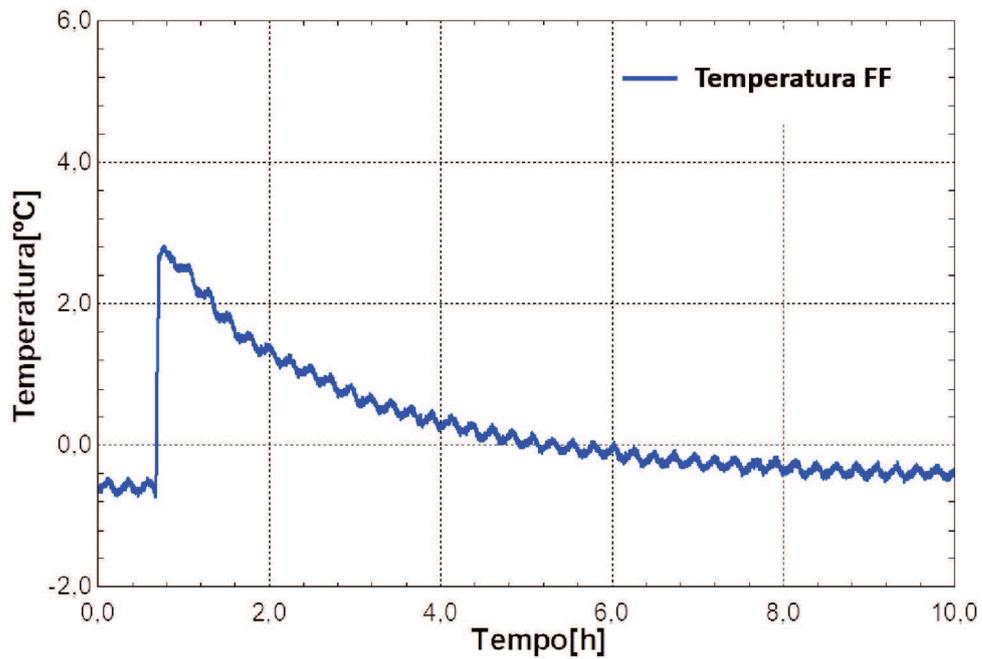


Fonte: do Autor

A Figura 45 mostra a variação de temperatura interna do refrigerador quando é realizado uma abertura de porta com duração de 2 minutos. Novamente pode-se observar que ela não sofre grande variação, com uma amplitude de aproximadamente 2,5°C e voltando a ser regulada na mesma faixa que estava antes desse evento.

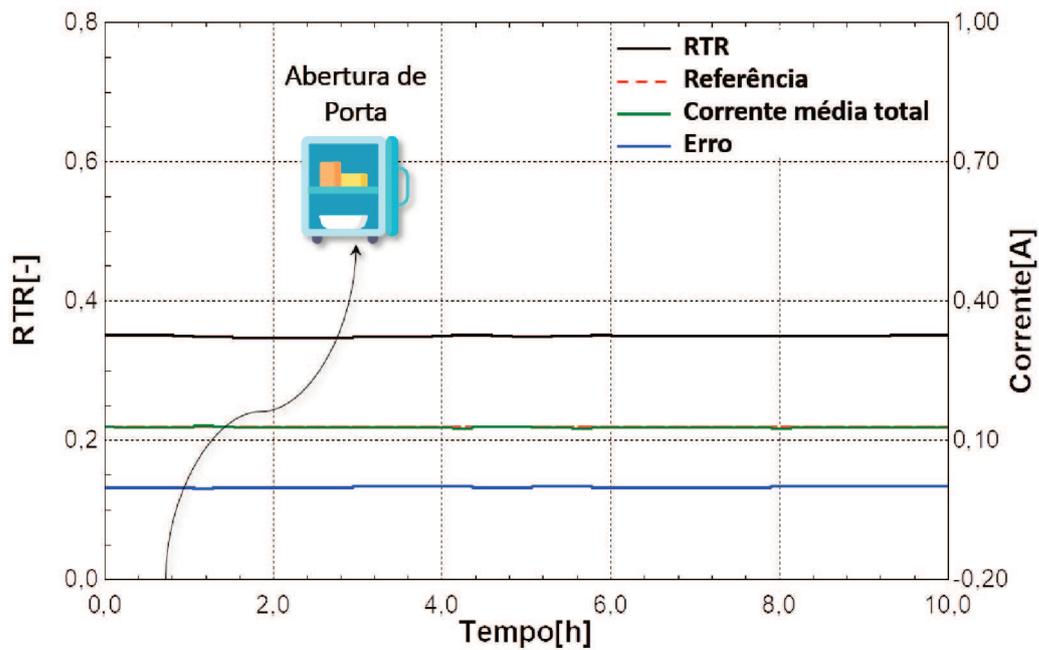
Mais uma vez, essa variação de temperatura não consegue afetar a corrente do compressor (ver Figura 46), por isso, outra vez não tem-se uma mudança brusca na ação de controle. Essa abertura de porta é praticamente ignorada pelo sistema que continua operando normalmente como se nada tivesse acontecido.

Figura 45 – Teste de abertura de porta (2min) a 16 °C e 50% umidade relativa mostrando a temperatura interna do refrigerador.



Fonte: do Autor

Figura 46 – Teste de abertura de porta (2min) a 16 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.



Fonte: do Autor

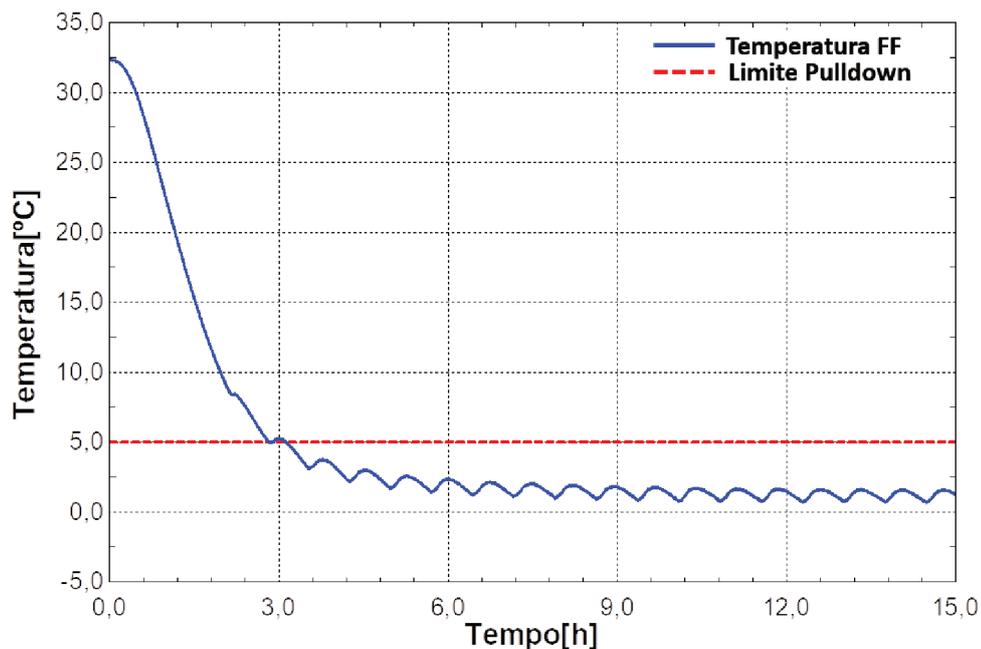
APÊNDICE B – Condição ambiente: 32 °C e 50% umidade relativa

Pull-down

Na [Figura 47](#) pode ser observado uma situação de *pull-down* com 32°C de ambiente. Durante o abaixamento da temperatura até o limite de 5°C o compressor é desligado apenas uma vez, devido ao controlador utilizado. Esse desligamento não é o cenário ideal desejado, porém ele acontece apenas uma vez e somente nessa temperatura ambiente. Após atingir esse valor limite, a temperatura do refrigerador tende a oscilar em valores próximos aos relatados nos outros testes, próximo de 0°C .

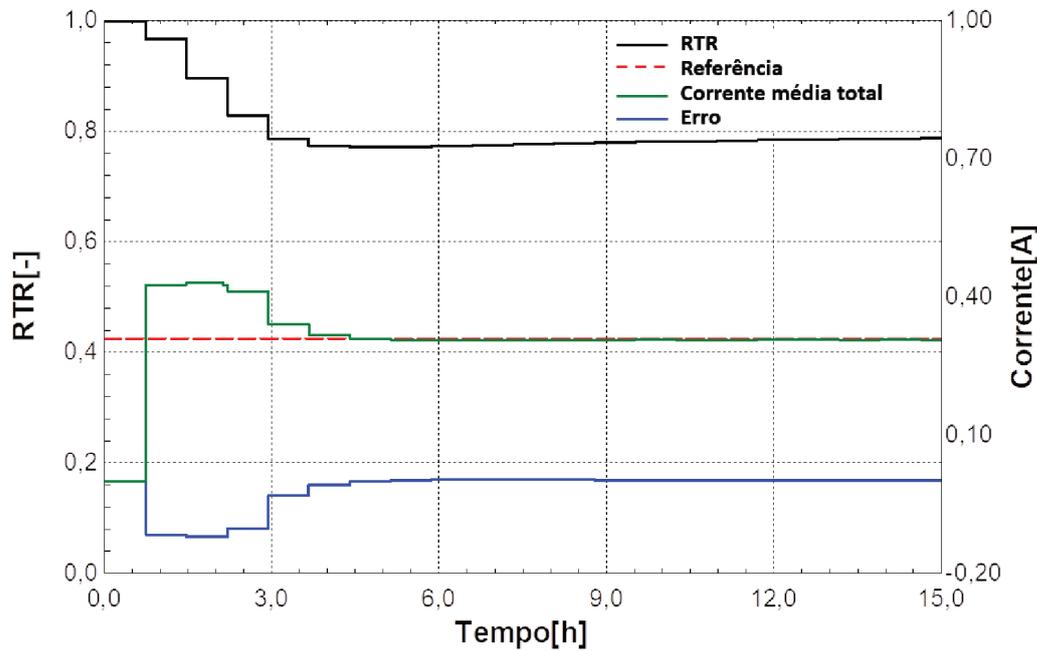
Novamente, pode-se ver que o controlador começa com uma ação de controle máxima em uma situação de *pull-down* (ver [Figura 48](#)). Após esse primeiro ciclo liga-se a ação PI que controla a corrente média total do compressor, regulando assim a temperatura do refrigerador.

Figura 47 – Teste de *pull-down* a 32 °C e 50% umidade relativa mostrando a temperatura interna do refrigerador.



Fonte: do Autor

Figura 48 – Teste de *pull-down* a 32 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.



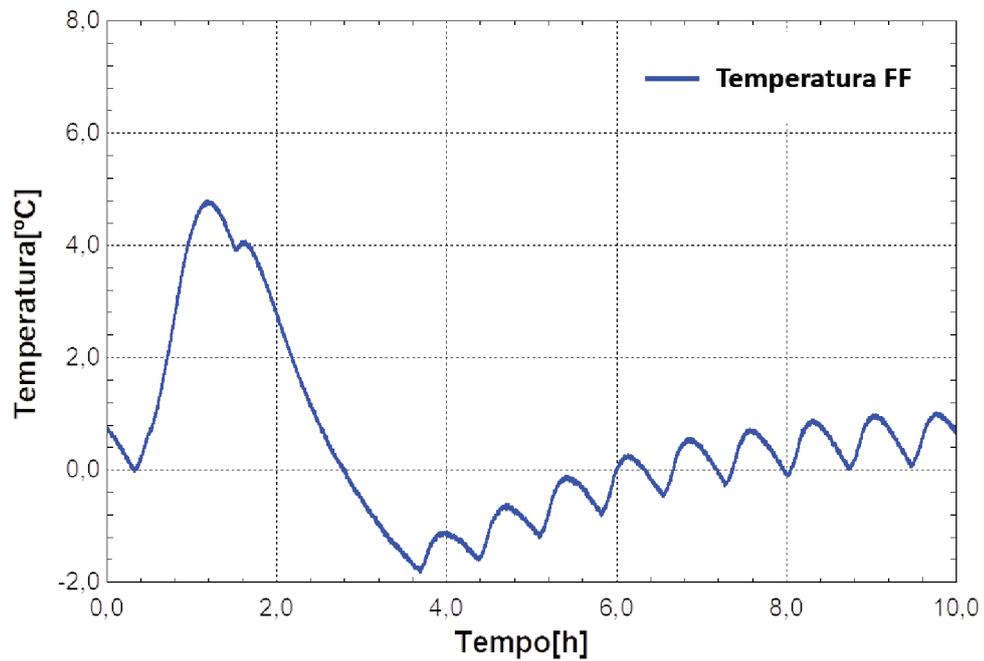
Fonte: do Autor

Degelo

Na Figura 49 é possível observar um degelo. Esse evento aumenta a temperatura do refrigerador até próximo de 5°C, logo após isso é imposto sobre o sistema uma ação de controle fixa (conforme descrito no Capítulo 5). Depois desse primeiro ciclo com *RTR* fixo, o controlador PI é religado. Uma vez que essa carga térmica injetada no sistema é rejeitada, o refrigerador volta a regular a temperatura no mesmo patamar em que estava antes desse degelo.

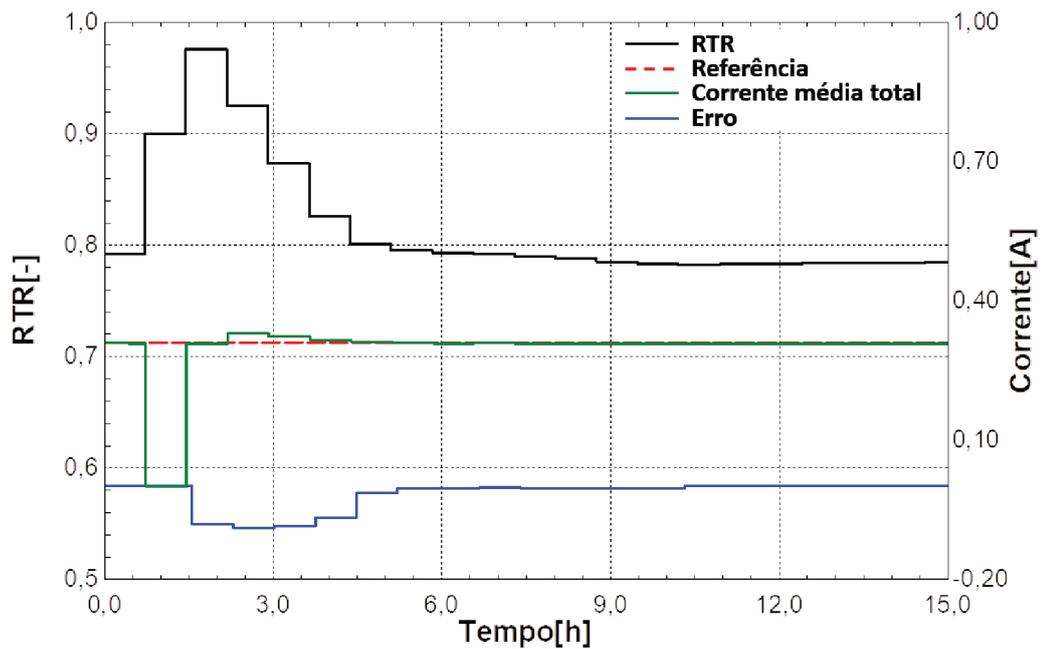
Todas as características do degelo descritas acima podem ser observadas na Figura 50. Onde logo após o degelo tem-se um *RTR* imposto sobre o sistema de 0,9. Depois disso, através do controle PI a variável de processo tende ao erro nulo.

Figura 49 – Teste de Degelo a 32 °C e 50% umidade relativa mostrando a temperatura interna do refrigerador.



Fonte: do Autor

Figura 50 – Teste de degelo a 32 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.



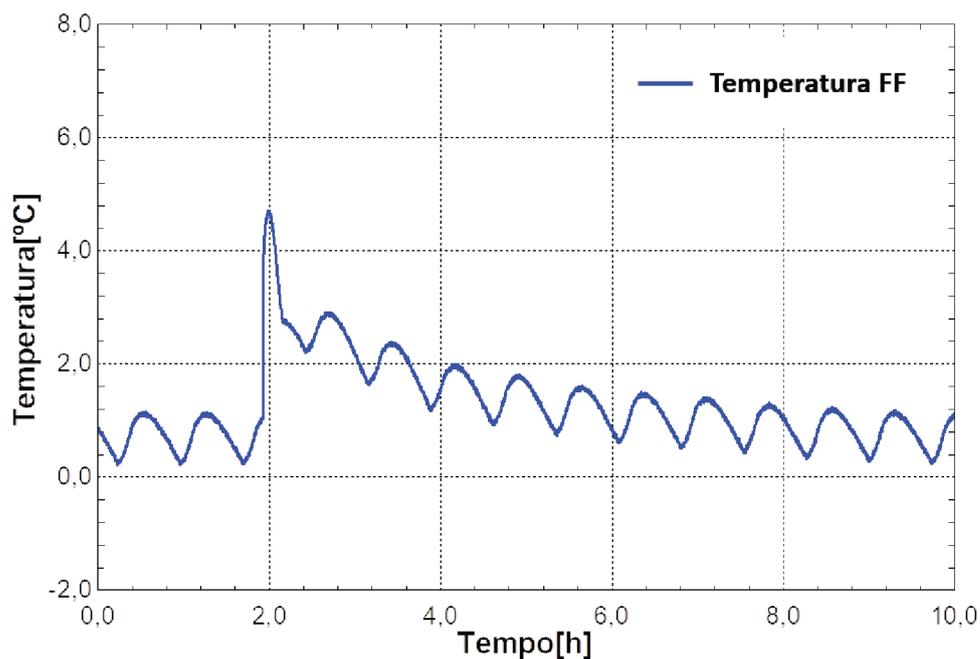
Fonte: do Autor

Abertura de Porta

A [Figura 51](#) mostra uma elevação na temperatura do refrigerador de quase 4°C , porém nenhuma ação de controle drástica é tomada. Isso acontece pois o bloco "Set de Referência" explicado no [Capítulo 5](#) não possui nenhuma referência acima da corrente encontrada nos testes de *baseline* feitos a 32°C. Por isso, essa carga térmica injetada no sistema é rejeitada apenas com a ação de controle gerada a partir do controlador PI.

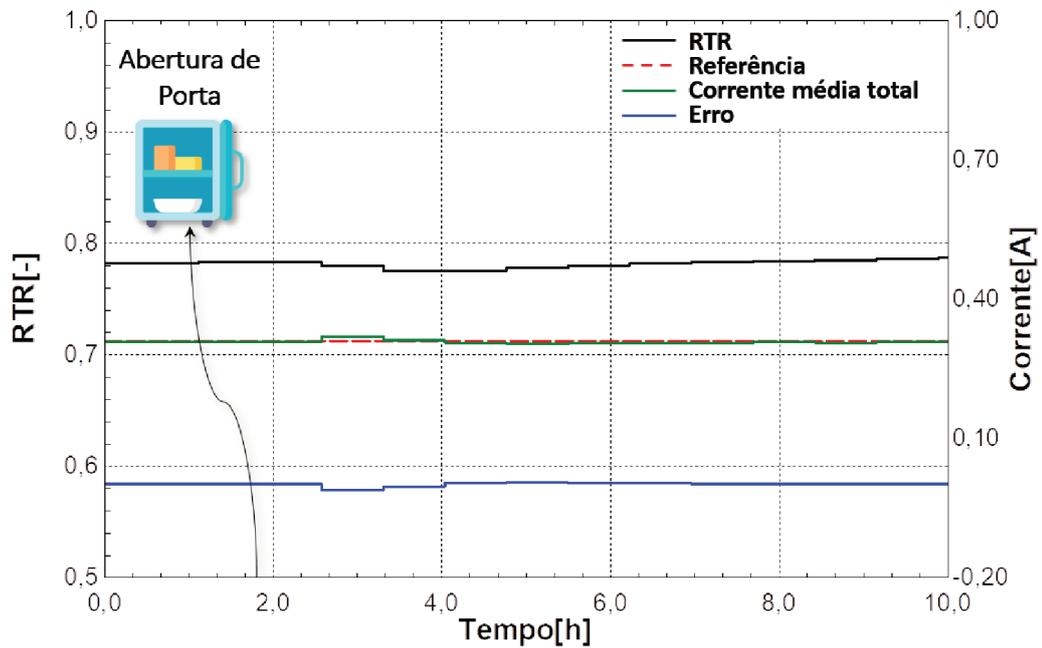
Como não se tem uma mudança de referência após a perturbação gerada sobre o sistema, não são tomadas drásticas ações de controle para rejeitá-la (ver [Figura 52](#)).

Figura 51 – Teste de abertura de porta (30s) a 32 °C e 50% umidade relativa mostrando a temperatura interna do refrigerador.



Fonte: do Autor

Figura 52 – Teste de abertura de porta (30s) a 32 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.

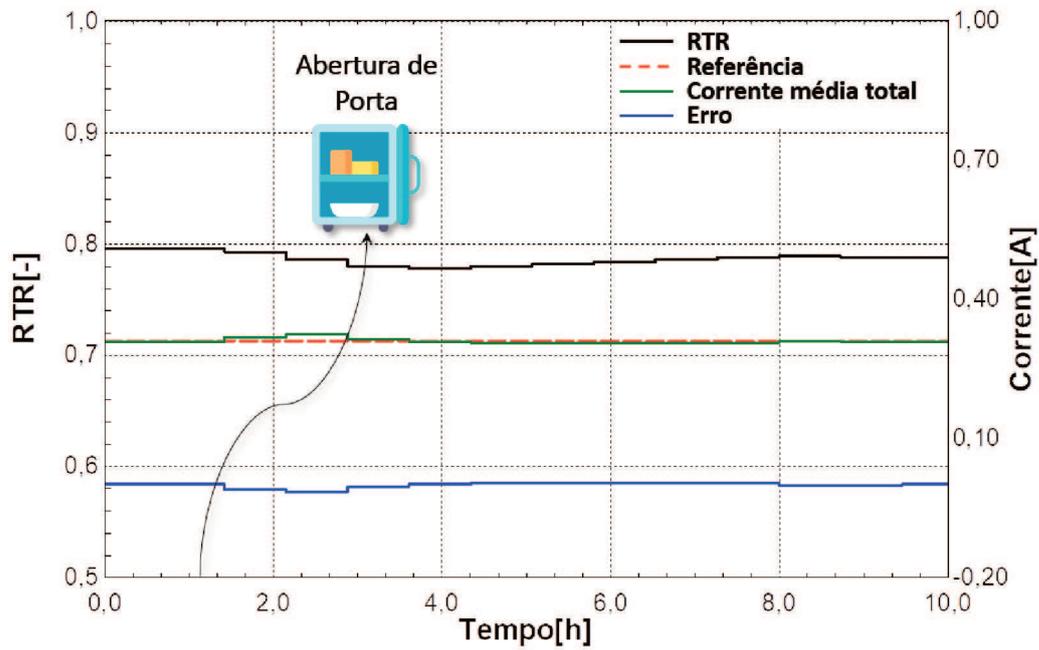


Fonte: do Autor

Na ?? pode-se observar a maior variação de temperatura registrada por uma abertura de porta, quase 9°C de amplitude. No entanto, novamente nenhuma ação de controle drástica é tomada para rejeitar essa perturbação. O que faz essa carga térmica injetada no sistema ser rejeitada apenas com a ação de controle gerada a partir do controlador PI.

Mais uma vez, pode ser observado que não tem-se essa mudança de referência após a perturbação gerada sobre o sistema, e por isso, também não são tomadas drásticas ações de controle para rejeita-la (ver [Figura 53](#)).

Figura 53 – Teste de abertura de porta (2min) a 32 °C e 50% umidade relativa mostrando comportamento do controlador.



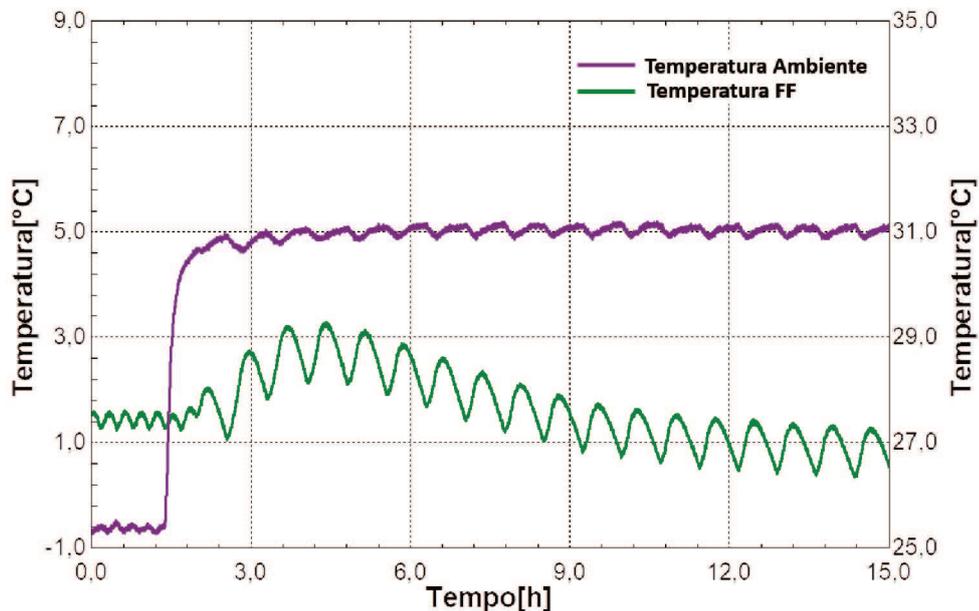
Fonte: do Autor

APÊNDICE C – Mudança de Condição ambiente: 25 °C e 50% umidade relativa para 32 °C e 50% umidade relativa

A [Figura 54](#) mostra uma mudança na temperatura ambiente. Durante ela, realizada em torno de 1,5 horas de teste, pode-se observar que apesar da temperatura externa variar 9°C , a temperatura interna atinge um máximo perto de 3°C e depois volta a ser regulada no patamar próximo ao qual se encontrava antes desse evento.

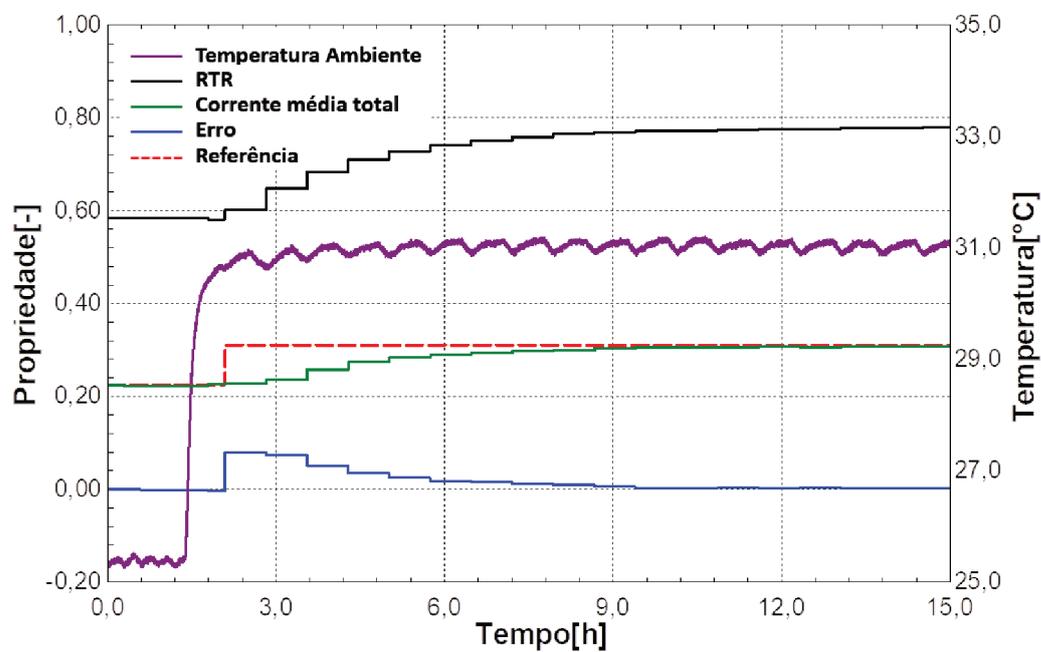
O controlador consegue acompanhar a mudança rápida de temperatura ambiente facilmente. Isso pode ser observado na [Figura 55](#), onde logo após essa mudança, o controlador identifica uma variação na corrente do compressor e assim muda sua referência para um valor superior, a fim de regular sua temperatura interna sem causar grandes variações.

Figura 54 – Teste observando a temperatura do refrigerador durante uma mudança de 25 °C e 50% umidade ambiente para 32 °C e 50% umidade ambiente.



Fonte: do Autor

Figura 55 – Teste observando as variáveis de controle durante uma mudança de 25 °C e 50% umidade ambiente para 32 °C e 50% umidade ambiente.



Fonte: do Autor