

Renata Cristina Sette

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS PARA QUANTIFICAR GEADA EM  
EVAPORADORES DE REFRIGERADORES *FROST-FREE***

Dissertação submetida ao Programa de Pós-  
Graduação da Universidade Federal de  
Santa Catarina para a obtenção do Grau de  
Mestre em Engenharia Mecânica.  
Orientador: Prof. Dr. Saulo Güths.

Florianópolis  
2015

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

Sette, Renata Cristina  
AVALIAÇÃO DE MÉTODOS PARA QUANTIFICAR GEADA EM  
EVAPORADORES DE REFRIGERADORES FROST-FREE / Renata  
Cristina Sette ; orientador, Saulo Gúths - Florianópolis,  
SC, 2015.  
207 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Evaporador no-frost. 3.  
Degelo . 4. Evolução de temperaturas. 5. Geada. I. Gúths,  
Saulo. II. Universidade Federal de Santa Catarina.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

**Essa folha já está impressa**



## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e familiares pelo suporte e encorajamento constantes e regados de amor.

Aos Dalmazos e Simões pelo “sistema da família”.

Ao meu namorado e toda sua família pela acolhida e incentivos oferecidos.

Aos colaboradores e amigos do Labmetro, em especial à equipe LIAE, pela assistência, paciência, sugestões, revisões etc. E, também, pela forma como tudo isso foi conduzido, repleto de amizade e companheirismo.

A todos os professores por compartilharem seus conhecimentos, em especial Carlos Alberto Flesch, pela oportunidade, e Saulo Güths, pela orientação dedicada e compreensiva.

À Universidade Federal de Santa Catarina (USFC) e seu Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC) pela estrutura e suporte proporcionados ao trabalho.

À Whirlpool S/A – Unidade Embraco Compressores e Soluções de Refrigeração e seus colaboradores pela parceria, em especial a João Paulo Rossetto, pela prontidão em assessorar e sua disponibilidade durante o desenvolvimento do projeto.

Aos meus amigos pelas colaborações nas mais diversas formas e por tornarem a caminhada agradável.

Enfim, minha gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.



## RESUMO

Em evaporadores *no-frost* o acúmulo de geada é inevitável. Por degenerar a capacidade de refrigeração do sistema, degelos periódicos são necessários. Esse processo normalmente ocorre através do acionamento de um resistor elétrico e tem impacto negativo para o sistema, pois aumenta a carga térmica e causa variação da temperatura no refrigerador. Portanto, em um refrigerador é normalmente desejada a ocorrência de degelo somente quando necessário, para manter a eficiência do sistema de refrigeração. Entretanto, o atual controle desse processo permite que degelos desnecessários ocorram, não atuando de forma inteligente. Em vista disso, este trabalho tem por objetivo estudar possibilidades de identificação da quantidade de geada presente nos evaporadores para que o degelo possa ser controlado pela demanda. Para isso, investigaram-se experimentalmente diversas possibilidades. Deu-se enfoque às possibilidades que não exigem inserção e utilização de mais transdutores nos refrigeradores. Para os ensaios, construiu-se bancada própria e um refrigerador de modelo comum foi adaptado permitindo a visualização do processo. Testaram-se soluções baseadas na perda de carga do escoamento de ar sobre o evaporador, na eficiência da troca térmica do evaporador e também na evolução das temperaturas do evaporador e suas consequências, tais como a variação de resistência elétrica do resistor de degelo e a do enrolamento do motor do ventilador. Alguns transdutores capacitivos, indutivos e ópticos também foram avaliados. Os melhores resultados foram obtidos nas soluções baseadas na evolução de temperaturas. Um transdutor de fluxo de calor instalado permitiu analisar a influência da geada. Os resultados mostraram a degradação do coeficiente de transferência de calor devido à presença da geada, porém de maneira insuficiente para indicar a quantidade de geada. A possibilidade baseada na análise da dinâmica de variação das temperaturas frente à perturbação do sistema foi validada. Porém, o conceito encontrou obstáculo para diferenciar quantidades menores de geada depositada. Ao final deste trabalho não foi possível encontrar um método eficiente para o presente problema.

**Palavras-chave:** evaporador *no-frost*. Geada. Sensores. Degelo. Evolução de temperaturas.



## ABSTRACT

In no-frost evaporator, frost accumulation is unavoidable. Since this accretion depletes the cooling capacity of the refrigeration system, defrosts must be periodically carried out. This process is usually made by electrical heaters but it has a negative impact for the system because it increases the thermal load, and also causes temperature variation in the refrigerator. For this reason, in a refrigerator, it is normally desirable to defrost only as necessary to maintain an efficient cooling system. However, the current control of this process allows unnecessary defrosts, and not intelligent actions. Therefore, the present work aims to study possibilities to identify amount of frost accumulated in evaporators, so that process of melting can be controlled by demand. Because of this, some solutions were experimentally investigated. The main focus were the possibilities that do not require insertion and use of more transducers in refrigerators. In order to test, an experimental apparatus was assembled; a common model of refrigerator was adapted allowing the visualization of the process. Solutions based on the pressure loss of the airflow over the evaporator, the heat exchange efficiency of the evaporator; and the evolution of evaporator temperatures and its consequences, such as the variation of the electrical resistance of the heater and the fan motor winding, were tested. Some sensors, based in capacitive, inductive and optical principle, were also evaluated. The best results were obtained in solutions based on the temperature development. A heat flow transducer installed in coil allowed analysis of the frost. The results showed the degradation of heat transfer coefficient due to the presence of frost, but insufficiently to indicate the amount of frost. The option based on the analysis of the dynamics of temperatures variation by a system disturb was validated. However, the concept encountered an obstacle in real operation condition of refrigerator. At the end of this work was not possible to find an efficient method to this problem.

**Keywords:** No-frost evaporator. Frost. Sensors. Defrost. Temperatures development.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de ar no interior de refrigeradores convencional e <i>frost-free</i> .....	29
Figura 2 - Capa de separação do evaporador.....	30
Figura 3 - Exemplo de evaporador tubo aletado.....	33
Figura 4 - Exemplos de trocadores de calor .....	34
Figura 5 - Visão geral do conjunto evaporador, ventilador e resistor de degelo .....	36
Figura 6 - Diagrama de fases da água.....	37
Figura 7 - Diferentes formas de cristal de geada .....	39
Figura 8 - Perfil típico de geada acumulada no evaporador .....	39
Figura 9 - Ice*Meister™ Model 9734: conjunto e detalhe do transdutor...	47
Figura 10 - Ilustração de dois dispositivos de detecção de gelo comerciais	48
Figura 11 - Classificação dos resistores elétricos de degelo.....	57
Figura 12 - Resistor elétrico tubular em alumínio .....	57
Figura 13 - Corte transversal no resistor de degelo .....	59
Figura 14 - Escoamento em feixe de tubos alternados .....	62
Figura 15 - Corte de transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial...	67
Figura 16 - Vista aberta de transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial .....	68
Figura 17 - Transdutores de temperatura presentes no refrigerador .....	72
Figura 18 - Etapas de abertura da janela no refrigerador.....	73
Figura 19 - Janela de visualização .....	74
Figura 20 - Visão geral da abertura traseira do refrigerador.....	74
Figura 21 - Resultado das alterações para coleta de água proveniente do degelo .....	75
Figura 22 - Dispositivo para prover umidade .....	76
Figura 23 - Fio de termopar tipo T, duplex isolado, fabricante Omega.....	77
Figura 24 - Junção dos termopares .....	78
Figura 25 - Instrumentação do refrigerador.....	79
Figura 26 - Esquema de fixação dos termopares no evaporador .....	79
Figura 27 - Fluxímetro aderido à superfície do evaporador.....	81
Figura 28 - Evolução das temperaturas do evaporador com refrigerador funcionando por 54 h em condição normal de operação .....	84
Figura 29 - Esquema de degelo em funcionamento normal do refrigerador: intervalos e massas de água coletadas .....	85
Figura 30 - Comportamento do refrigerador em 160 h sem ocorrência de degelo .....	86
Figura 31 - Condição inicial do evaporador ( $t = 0$ ) .....	87
Figura 32 - Condição do evaporador após 1 h de funcionamento .....	88

Figura 33 - Condição do evaporador após 2 h de funcionamento.....	88
Figura 34 - Condição do evaporador após 4 h de funcionamento.....	89
Figura 35 - Massa de geada acumulada no evaporador em 24 h.....	90
Figura 36 - Possibilidades de solução .....	91
Figura 37 - Bloqueio do escoamento de ar sobre o evaporador simulando a obstrução causada pela geada em situação extrema.....	94
Figura 38 - Ventilador axial propulsor.....	95
Figura 39 - Ilustração de um capacitor de placas planas.....	96
Figura 40 - Sensor capacitivo de placas planas utilizado no ensaio.....	97
Figura 41 - Sensor indutivo testado .....	98
Figura 42 - Sensor óptico testado.....	99
Figura 43 - Teste do sensor óptico .....	100
Figura 44 - Esquema do evaporador como sistema de análise.....	101
Figura 45 - Resistência ao fluxo de calor em ensaio de 160 h sem degelo.....	104
Figura 46 - Coeficiente "h" para ensaio de 160 h sem degelo .....	105
Figura 47 - Resistência ao fluxo de calor em ensaio de 24 h sem degelo ..	106
Figura 48 - Coeficiente "h" para ensaio de 24 h sem degelo .....	107
Figura 49 - Temperaturas em ensaio de 160 h sem degelo .....	108
Figura 50 - Fluxo de calor medido com fluxímetro em ensaio de 160 h sem degelo.....	109
Figura 51 - Resistência à transferência de calor em ensaio de 160 h sem degelo.....	110
Figura 52 - Coeficiente de transferência de calor a partir do fluxo de calor para ensaio de 160 h sem degelo.....	110
Figura 53 - Temperaturas em ensaio de 24 h sem degelo .....	111
Figura 54 - Fluxo de calor medido com fluxímetro em ensaio de 24 h sem degelo.....	112
Figura 55 - Resistência à transferência de calor em ensaio de 24 h sem degelo .....	112
Figura 56 - Resistência à transferência de calor em ensaio de 160 h sem degelo.....	114
Figura 57 - Sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor ..	116
Figura 58 - Resistência ôhmica do resistor de degelo montado no refrigerador .....	120
Figura 59 - Resistência ôhmica do resistor de degelo extra 1 em banho térmico .....	122
Figura 60 - Resistência ôhmica do resistor de degelo extra 3 em banho térmico .....	123
Figura 61 - Resistência ôhmica de segmento de elemento resistivo do resistor de degelo em banho térmico .....	124
Figura 62 - Coeficiente de variação da resistência com temperatura do	

constantan .....	126
Figura 63 - Módulo da impedância do resistor de degelo para frequências de 40 Hz a 100 MHz.....	131
Figura 64 - Módulo da impedância do resistor de degelo na frequência de ressonância.....	133
Figura 65 - Resistência do enrolamento do ventilador .....	135
Figura 66 - Variação da resistência do enrolamento e equivalente em temperatura.....	136
Figura 67 - Tubo do evaporador com fluxímetro aderido.....	137
Figura 68 - Circuito térmico equivalente do sistema para situação sem geada .....	137
Figura 69 - Tubo do evaporador com fluxímetro e camada de geada.....	139
Figura 70 - Circuito térmico equivalente do sistema para situação com geada .....	139
Figura 71 - Resistências térmicas em relação ao raio crítico .....	141
Figura 72 - Variação de temperatura teórica do evaporador para diferentes quantidades de geada em relação ao tempo de acionamento do resistor de degelo .....	142
Figura 73 - Relação entre massa de geada no evaporador e variação de temperatura.....	144
Figura 74 - Taxa de variação da temperatura.....	145
Figura 75 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T2 (tubo, saída) com e sem geada.....	146
Figura 76 - Taxa de variação da temperatura em T2 (tubo, saída) .....	147
Figura 77 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T3 (tubo, meio) com e sem geada.....	147
Figura 78 - Taxa de variação da temperatura em T3 (tubo, meio).....	148
Figura 79 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T9 (resistor, inferior central) com e sem geada .....	148
Figura 80 - Taxa de variação da temperatura em T9 (resistor, inferior central) .....	149
Figura 81 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T3 (tubo, meio) em experimentos de 4 h e 12 h ....	151
Figura 82 - Taxa de variação da temperatura em T3 (tubo, meio) em 4 h e 12 h.....	152
Figura 83 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T9 (resistor, inferior central) em experimentos de 4 h e 12 h.....	152
Figura 84 - Taxa de variação da temperatura em T9 (resistor, inferior central) em 4 h e 12 h.....	153
Figura 85 - Geometria do evaporador.....	175

Figura 86 - Evaporador em estudo com resistor de degelo em destaque ..	177
Figura 87 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T1 (tubo, entrada) com e sem geada .....	179
Figura 88 - Taxa de variação da temperatura em T1 (tubo, entrada) .....	180
Figura 89 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T4 (resistor, meio central) com e sem geada.....	180
Figura 90 - Taxa de variação da temperatura em T4 (resistor, meio central) .....	181
Figura 91 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T5 (resistor, inferior lateral) com e sem geada.....	181
Figura 92 - Taxa de variação da temperatura em T5 (resistor, inferior lateral) .....	182
Figura 93 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T6 (ar, saída para congelador) com e sem geada ...	182
Figura 94 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T7 (ar, entrada do refrigerador) com e sem geada .	183
Figura 95 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T8 (ar, saída para refrigerador) com e sem geada ..	183
Figura 96 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T11 (ar, entrada do congelador) com e sem geada.	184
Figura 97 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T12 (ar, centro do refrigerador) com e sem geada .	184
Figura 98 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T13 (ar, refrigerador inferior) com e sem geada ....	185
Figura 99 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T1 (tubo, início) em experimentos de 4 h e 12 h....	187
Figura 100 - Taxa de variação da temperatura em T1 (tubo, início) em 4 h e 12 h .....	188
Figura 101 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T2 (tubo, saída) em experimentos de 4 h e 12 h	188
Figura 102 - Taxa de variação da temperatura em T2 (tubo, saída) em 4 h e 12 h .....	189
Figura 103 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T4 (resistor, meio central) em experimentos de 4 h e 12 h.....	189
Figura 104 - Taxa de variação da temperatura em T4 (resistor, meio central) em 4 h e 12 h.....	190
Figura 105 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T5 (resistor, inferior lateral) em experimentos de 4 h e 12 h.....	190
Figura 106 - Taxa de variação da temperatura em T4 (resistor, inferior lateral	

em 4 h e 12 h.....	191
Figura 107 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T6 (ar, saída para congelador) em experimentos de 4 h e 12 h .....	191
Figura 108 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T7 (ar, entrada refrigerador) em experimentos de 4 h e 12 h .....	192
Figura 109 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T8 (ar, saída para refrigerador) em experimentos de 4 h e 12 h .....	192
Figura 110 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T11 (ar, entrada congelador) em experimentos de 4 h e 12 h .....	193
Figura 111 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T12 (ar, centro refrigerador) em experimentos de 4 h e 12 h .....	193
Figura 112 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T13 (ar, refrigerador inferior) em experimentos de 4 h e 12 h .....	194
Figura 113 - Disposição de termopares no resistor de degelo .....	195
Figura 114 - Temperatura ao longo do resistor de degelo .....	196
Figura 115 - Interior do resistor de degelo em seus terminais: elemento resistivo (enrolamento) e dois fios de cobre em contato.....	196
Figura 116 - Resistência à transferência de calor em funcionamento normal .....	199
Figura 117 - Resistência à transferência de calor em ensaio de funcionamento normal calculada através do fluxo de calor .....	201

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Constantes C e m para correlação de Zukauskas .....	63
Quadro 2 - Fator de correção C2 da correlação de Zukauskas para $N_L < 20$	63
Quadro 3 - Nomenclatura dos termopares: número, local e posição de fixação.....	80
Quadro 4 - Metais majoritários presentes em amostra do elemento resistivo do resistor de degelo .....	125
Quadro 5 - Quantidade de aletas em cada fileira do evaporador.....	175



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
A	Área de superfície	[m <sup>2</sup> ]
A <sub>i</sub>	Área da superfície interna	[m <sup>2</sup> ]
A <sub>m</sub>	Área da superfície circunferencial média	[m <sup>2</sup> ]
A <sub>o</sub>	Área da superfície externa	[m <sup>2</sup> ]
A <sub>T</sub>	Área da seção transversal	[m <sup>2</sup> ]
C	Capacitância	[F]
c	Constante obtida na calibração do fluxímetro	[(W/m <sup>2</sup> )/V]
c <sub>p</sub>	Calor específico à pressão constante	[J/kg°C]
D	Diâmetro do tubo	[m]
d	Distância	[m]
Dif	Difusividade do vapor de água no ar	[mm <sup>2</sup> /s]
E <sub>geada</sub>	Porosidade da geada	Adimensional
e	Espessura da parede do tubo	[m]
f	Frequência	[Hz]
h	Coefficiente convectivo	[W/m <sup>2</sup> K]
h <sub>ar,e</sub>	Entalpia do ar na entrada	[J]
h <sub>ar,s</sub>	Entalpia do ar na saída	[J]
h <sub>e</sub>	Coefficiente convectivo externo	[W/m <sup>2</sup> K]
h <sub>i</sub>	Coefficiente convectivo interno	[W/m <sup>2</sup> K]
h <sub>sl</sub>	Calor latente de fusão	[J/kg]
$\vec{I}$	Corrente elétrica	[A]
<i>i</i>	Unidade imaginária	Adimensional
k	Condutividade térmica	[W/mK]
l	Comprimento	[m]
L	Espessura da camada de geada	[m]
<i>L</i>	Indutância	[H]
LMTD	Diferença de temperatura média logarítmica	[°C]
m	Massa	[kg]
$\dot{m}$	Vazão mássica	[kg/s]
N	Número de espiras	Adimensional

$N_L$	Número de fileiras de tubo na direção longitudinal do escoamento	Adimensional
$P$	Potência elétrica	[W]
$p$	Pressão	[Pa]
$P_{hid}$	Potência hidráulica	[W]
$Pr$	Número de Prandtl	Adimensional
$Pr_s$	Número de Prandtl avaliado na temperatura da superfície	Adimensional
$Q$	Quantidade de calor	[J]
$q$	Taxa de transferência de calor	[W]
$q''$	Fluxo de calor	[W/m <sup>2</sup> ]
$R$	Resistência elétrica (ou ôhmica)	[Ω]
$R''_{total}$	Resistência ao fluxo de calor	[m <sup>2</sup> K/W]
$Re_{D,máx}$	Número de Reynolds na direção de velocidade máxima	Adimensional
$R_{cond}$	Resistência térmica para a condução	[K/W]
$R_{conv}$	Resistência térmica para a convecção	[K/W]
$R_{total}$	Resistência térmica	[K/W]
$r_{geada}$	Raio da camada de geada	[m]
$r_{tubo}$	Raio do tubo	[m]
$t$	Tempo	[s]
$T_{ar,e}$	Temperatura do ar na entrada	[°C]
$T_{ar,s}$	Temperatura do ar na saída	[°C]
$T_{f1}$	Temperatura da superfície interna do fluxímetro	[°C]
$T_{f2}$	Temperatura da superfície externa do fluxímetro	[°C]
$T_g$	Temperatura na superfície da geada	[°C]
$T_s$	Temperatura do substrato	[°C]
$T_{sup}$	Temperatura da superfície	[°C]
$T_{t1}$	Temperatura da superfície interna do tubo	[°C]
$T_{t2}$	Temperatura da superfície externa do tubo	[°C]
$T_{\infty ar}$	Temperatura do ar	[°C]
$T_{\infty ref}$	Temperaturas do fluido	[°C]
$U$	Coefficiente global de troca de calor	[W/m <sup>2</sup> K]

$\vec{V}$	Tensão	[V]
X	Reatância	[ $\Omega$ ]
$X_C$	Reatância capacitiva	[ $\Omega$ ]
$X_L$	Reatância indutiva	[ $\Omega$ ]
$\vec{Z}$	Impedância elétrica	[ $\Omega$ ]
$\forall$	Vazão volumétrica	[m <sup>3</sup> /s]
$\alpha$	Coefficiente de temperatura da resistência	[°C <sup>-1</sup> ]
$\epsilon$	Permissividade do meio	[F/m]
$\phi_e$	Eficiência das aletas	Adimensional
$\mu$	Permeabilidade magnética do meio	[H/m]
$\rho_{\text{geada}}$	Densidade da geada	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{gelo}}$	Densidade do gelo	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{vapor}}$	Densidade do vapor de água	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho$	Resistividade elétrica	[ $\Omega$ /m]
$\omega$	Frequência angular	[rad/s]
$\tau$	Tortuosidade	Adimensional

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CI	Circuito Integrado
DAQ	<i>Data acquisition</i>
EFA	Evaporador de Fluxo Acelerado
GPIB	<i>General Purpose Interface Bus</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LABMETRO	Laboratório de Metrologia e Automatização
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LIAE	Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaios
LMPT	Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas
LXI	<i>LAN Extensions for Instrumentation</i>
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
PCI	<i>Peripheral Component Interconnect</i>
PID	Proporcional-Integral-Diferencial
POSMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PXI	<i>PCI Extensions for Instrumentation</i>
TCR	<i>Temperature Coefficient of Resistance</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VXI	<i>VMEbus Extensions for Instrumentation</i>



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO .....	25
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO.....	27
1.2.1. <i>Objetivo geral</i> .....	27
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	27
1.3. ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO.....	27
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	28
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>29</b>
2.1. REFRIGERADORES <i>FROST-FREE</i> .....	29
2.2. EVAPORADORES <i>NO-FROST</i> .....	32
2.3. FORMAÇÃO DE GEADA NO EVAPORADOR.....	36
2.3.1. <i>Propriedades termofísicas da geada</i> .....	41
2.3.2. <i>Detecção de geada</i> .....	44
2.4. DEGELO DO EVAPORADOR .....	49
2.5. RESISTORES DE DEGELO.....	56
2.6. TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	60
2.6.1. <i>Coefficiente de transferência de calor por convecção</i> .....	61
2.6.2. <i>Capacidade do evaporador</i> .....	64
2.7. SISTEMAS DE MEDIÇÃO .....	66
2.7.1. <i>Transdutor de fluxo de calor</i> .....	66
2.7.2. <i>Tensão</i> .....	69
<b>3. BANCADA DE ENSAIOS .....</b>	<b>71</b>
3.1. REFRIGERADOR E ADAPTAÇÕES .....	71
3.2. PRODUÇÃO DE GEADA .....	76
3.3. MEDIÇÃO DE TEMPERATURA .....	77
3.4. MEDIÇÃO DE FLUXO DE CALOR .....	80
3.5. OUTRAS MEDIÇÕES E CONTROLE DO SISTEMA.....	82
3.6. AVALIAÇÃO DA BANCADA .....	83
3.6.1. <i>Funcionamento normal do refrigerador</i> .....	83
3.6.2. <i>Operação sem ocorrência de degelo</i> .....	85
3.6.3. <i>Acúmulo de geada</i> .....	89
<b>4. FUNDAMENTAÇÃO E ANÁLISE DE SOLUÇÕES .....</b>	<b>91</b>
4.1. PERDA DE CARGA NO ESCOAMENTO ATRAVÉS DA POTÊNCIA DO VENTILADOR.....	92
4.2. SENSORES DIVERSOS .....	95
4.2.1. <i>Capacitivo</i> .....	95
4.2.2. <i>Indutivo</i> .....	97
4.2.3. <i>Óptico</i> .....	99
4.3. DETECÇÃO DE GEADA PELA ANÁLISE DE	

TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO EVAPORADOR .....	101
4.3.1. <i>Eficiência do trocador</i> .....	101
4.3.2. <i>Fluxo de calor</i> .....	107
4.3.3. <i>Comparações</i> .....	113
4.4. EVOLUÇÃO DE TEMPERATURAS DO EVAPORADOR...	115
4.4.1. <i>Pressão do fluido refrigerante</i> .....	116
4.4.2. <i>Resistência ôhmica do resistor de degelo</i> .....	118
4.4.3. <i>Impedância do resistor de degelo</i> .....	127
4.4.4. <i>Resistência elétrica do ventilador</i> .....	134
4.4.5. <i>Medição direta de temperatura</i> .....	136
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>155</b>
5.1. CONCLUSÕES .....	155
5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	156
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>159</b>
<b>APÊNDICE I.....</b>	<b>175</b>
<b>APÊNDICE II.....</b>	<b>177</b>
<b>APÊNDICE III.....</b>	<b>179</b>
<b>APÊNDICE IV .....</b>	<b>187</b>
<b>APÊNDICE V.....</b>	<b>195</b>
<b>APÊNDICE VI.....</b>	<b>199</b>
<b>APÊNDICE VII.....</b>	<b>201</b>
<b>ANEXO I .....</b>	<b>203</b>
<b>ANEXO II.....</b>	<b>205</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Há muitas décadas o refrigerador é o principal eletrodoméstico presente nas residências. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, no ano de 2011, 95,7% dos domicílios brasileiros possuíam refrigeradores, correspondendo a um total de 58,69 milhões de produtos (INSTITUTO...2012). Um tipo de refrigerador que merece destaque, por representar a maior parte dos modelos produzidos atualmente, é o *frost-free*<sup>1</sup>.

Neste modelo a formação de geada<sup>2</sup> nas superfícies do evaporador é inevitável. Esse acúmulo é inicialmente favorável, pois aumenta, temporariamente, o coeficiente de transferência de calor (STOECKER, 1957 *apud* ÖZKAN; ÖZIL, 2006). Porém, à medida que ocorre aumento dessa camada, o efeito isolante se torna predominante em relação ao aumento do coeficiente de transferência de calor, incluindo também a restrição da circulação de ar. Assim, como resultado, há queda na capacidade de refrigeração do sistema, o que afeta diretamente seu desempenho (CHEN et al, 2012).

Por conta disso, a camada de geada depositada no trocador de calor necessita ser removida periodicamente, tornando o degelo indispensável. Esse processo, contudo, impõe perdas no desempenho do sistema e está diretamente relacionado ao seu consumo global de energia (GOSNEY, 1982).

Em refrigeradores *frost-free* o ciclo de degelo acontece de forma automática, normalmente seguindo uma combinação *timer-termostato*<sup>3</sup> (GUPTA et al, 2006). Aplicando essa forma de controle no processo, onde o parâmetro utilizado não é a quantidade de geada, eventuais degelos desnecessários ocorrem, bem como ciclos de degelo não são realizados quando necessários. Esse comportamento ocorre porque, além do sistema estar submetido à cargas térmicas variáveis, a formação e o depósito de geada

---

<sup>1</sup> Também denominado *no-frost*. Neste documento o termo *frost-free* será empregado como característica do refrigerador, enquanto *no-frost* dirá respeito ao evaporador, como é feito nos principais trabalhos da área.

<sup>2</sup> Neste trabalho, o termo “geada” refere-se ao resultado do processo de dessublimação do vapor de água que se encontra a uma pressão parcial inferior à pressão de saturação da água na temperatura do ponto triplo (ÇENGEL; BOLES, 2006).

<sup>3</sup> Sistema de controle onde o início do degelo é comandado por intervalos fixos de tempo através de um temporizador e seu término pela informação de temperatura provida de um sensor.

na superfície do evaporador não são determinados somente em função do tempo, mas também da temperatura da superfície, do ângulo de contato, da temperatura do ar, entre outros parâmetros (HUANG et al, 2010).

Segundo XIAO et al (2009), não há tecnologia adequada para detecção de níveis de geada, e, por conta disso, ocorre o descrito anteriormente: degelos em momentos indesejados. Esses afetam, por exemplo, o consumo elétrico do refrigerador e até a conservação dos alimentos nele armazenados.

As técnicas atuais de controle do processo de degelo não se baseiam na detecção da presença de geada, mas em apenas um ou dois dos parâmetros<sup>4</sup> que afetam sua formação, o que se apresenta como uma estratégia pouco eficiente, já que a formação de geada é um processo transiente de transferência de calor e massa envolvendo variações espaciais e temporais que depende de diversas grandezas (XIAO et al, 2009).

O conhecimento da quantidade de geada presente em um refrigerador em tempo real pode ajudar a criar um sistema mais eficiente de degelo, bem como de todo o processo de refrigeração (AVILES et al, 2003). Monitorar a quantidade de geada pode ser extremamente útil para minimizar os seus efeitos na eficiência do evaporador. Pussoli (2010) enfatiza que entre os componentes de um sistema de refrigeração, o evaporador tem papel importante no desempenho do sistema, visto que está diretamente ligado à taxa de transferência de calor do compartimento que deve ser resfriado. Por sua importância, ganhos na eficiência desse componente tendem a melhorar o sistema como um todo, inclusive proporcionando maior tempo de funcionamento sem ocorrência de degelo, o que representa melhor aproveitamento energético.

Alguns trabalhos já foram realizados no intuito de identificar a presença de geada no evaporador, como os estudos de Xiao et al (2009), Chen (2012) e Long-Hao et al (2012). Entretanto, a maioria deles tem foco no desenvolvimento de tecnologias específicas para experimentos ou de transdutores. Contudo, a inserção de um novo transdutor no sistema implica desafios de implementação, manutenção e também gera custos devido ao novo componente, o que se reflete diretamente no valor total do refrigerador. Para que o sistema seja comercialmente atrativo e viável de ser empregado em refrigeradores domésticos ele deve ser robusto, de baixo custo, e deve evitar, preferencialmente, a necessidade de inserção de mais transdutores no produto e suas implicações.

O Laboratório de Instrumentação e Automação de Ensaio (LIAE<sup>5</sup>) possui parceria com uma empresa fabricante de compressores de refrigeração

---

<sup>4</sup> Normalmente os parâmetros utilizados são tempo e temperatura.

<sup>5</sup> Setor do Laboratório de Metrologia e Automação – LABMETRO, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.

e, mais recentemente, com um fabricante de eletrodomésticos. O LIAE atua em diversas linhas de pesquisa que têm como objetivo a geração e aprimoramento de recursos de medição e automatização e no apoio à garantia da qualidade e desenvolvimento de produtos inovadores em refrigeração. Um dos projetos dessa parceria é onde esta dissertação se insere.

Nesse contexto, abordagens promissoras são estudadas com o objetivo de desenvolver um método para quantificação de geada presente em evaporadores de refrigeradores *frost-free*. Pretende-se, inicialmente, desenvolver um método que não necessite mais transdutores que os já existentes os refrigeradores para medição. Pretende-se encontrar um método eficiente e comercialmente viável de mensurar essa informação que futuramente possa ser empregado para monitoramento da formação e controle do processo de degelo.

## 1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

### 1.2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é explorar de forma teórico-experimental mecanismos para estimar a quantidade de geada presente em evaporadores de refrigeradores do tipo *frost-free*.

### 1.2.2. Objetivos específicos

A fim de que o objetivo geral proposto neste trabalho seja atingido listam-se alguns objetivos específicos:

- a. analisar a formação de geada no evaporador de um refrigerador doméstico;
- b. propor métodos de quantificar a geada formada no evaporador;
- c. avaliar diferentes sensores para detecção de geada;
- d. analisar experimentalmente os métodos propostos e os sensores;

## 1.3. ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO

O desenvolvimento desta dissertação ocorreu com a execução das seguintes atividades:

- pesquisar transdutores de gelo existentes;
- suscitar conceitos possíveis para estimar a quantidade de geada;

- escolher um refrigerador, adaptá-lo e instrumentá-lo para testes;
- desenvolver programa para aquisição de dados dos ensaios;
- experimentar os métodos propostos;
- analisar os resultados obtidos.

#### 1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para melhor descrição das atividades e compreensão do trabalho desenvolvido, este documento está dividido em capítulos.

O capítulo 1 contextualiza a problemática em que este trabalho se insere, apresenta os objetivos e estratégias de solução propostos para ele e delinea a estrutura do documento.

O capítulo 2 traz a revisão bibliográfica dos principais assuntos tratados neste trabalho, tais como refrigerador *frost-free*, evaporador *no-frost*, formação da geada e transferência de calor. É feito detalhamento do processo de degelo, estudo dos resistores de degelo existentes e apresenta-se breve revisão da literatura acerca dos temas expostos.

O capítulo 4 dedica-se ao produto escolhido para estudo e à bancada montada para desenvolvimento de ensaios. São apresentadas as adaptações feitas no refrigerador, os instrumentos utilizados e as etapas de sua instrumentação. Diversas ilustrações demonstram os resultados das modificações e as condições normais de operação do refrigerador, bem como seu comportamento sem ocorrência de degelos.

No capítulo 5 são apresentados os métodos suscitados como alternativas para quantificar a geada depositada em evaporadores juntamente com avaliação teórico-experimental de cada uma das possibilidades. Quatro grupos de alternativas são explorados: evolução das temperaturas do evaporador frente à perturbação do sistema; perda de carga do escoamento; eficiência do trocador; e utilização de transdutores. Ao final de cada possibilidade é feita breve conclusão do método.

O capítulo 6 contém as considerações finais do trabalho bem como sugestões e recomendações para trabalhos futuros.

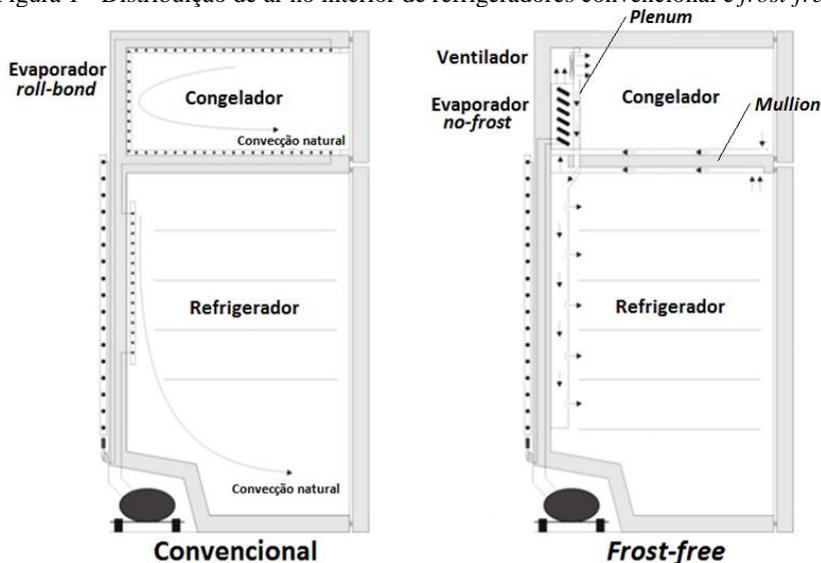
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. REFRIGERADORES *FROST-FREE*

Há muitas décadas o refrigerador é o principal eletrodoméstico presente nas residências, constituindo parte essencial da vida moderna. Um tipo de refrigerador que merece destaque é o *frost-free*, que representa 40% dos aparelhos comercializados atualmente (PUSSOLI, 2010). Surgidos no final da década de 1960 e bastante difundidos atualmente, esses refrigeradores são sistemas nos quais a formação de geada deve ocorrer apenas no evaporador, e não nas demais superfícies, tais como nas paredes internas dos compartimentos (KNABBEN, 2010). As principais diferenças entre os refrigeradores convencionais e os *frost-free* são associadas ao tipo de evaporador empregado e à forma com que a circulação de ar ocorre em seu interior (BARBOSA et al, 2010).

A figura 1 apresenta cortes laterais em um refrigerador convencional (esquerda) e em um tipo *frost-free* (direita), e ilustra a distribuição de ar no interior desses sistemas.

Figura 1 - Distribuição de ar no interior de refrigeradores convencional e *frost-free*



Fonte: Adaptada de Pussoli (2010).

Nos refrigeradores convencionais são utilizados evaporadores tubo placa, também chamados *roll-bond*, e a circulação de ar nos compartimentos

se dá por convecção natural (WALTRICH, 2008).

Um refrigerador *frost-free* é caracterizado pelo emprego de evaporadores tubo aletados, com movimentação forçada de ar e processo de degelo automático (KNABBEN, 2010). Nesses sistemas o evaporador não fica diretamente em contato com os compartimentos de refrigeração, localizando-se atrás de uma capa de duas partes (capa frontal de plástico e capa traseira de EPS<sup>6</sup>, que formam interiormente o *plenum*, detalhadas na figura 2).

Figura 2 - Capa de separação do evaporador



**Legenda:** Esquerda: parte traseira em isopor;

Direita: parte frontal em plástico;

Detalhe: *damper* de regulagem;

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Na entrada do evaporador as duas correntes de ar se misturam: uma provinda do congelador, mais fria e seca, e outra do refrigerador, mais quente e úmida. As correntes de ar que extraem calor dos alimentos e arredores entram no evaporador através dos dutos de retorno situados no *mullion* (parte divisória) e fluem, induzidas pelo ventilador axial, sobre o evaporador no sentido ascendente, onde o ar é resfriado e desumidificado. O ar frio é então insuflado no *plenum*<sup>7</sup> e distribuído entre os compartimentos superior e inferior. A distribuição do ar entre essas duas câmaras é regulada por um

<sup>6</sup> EPS: sigla internacional do Poliestireno Expandido, conhecido popularmente como "Isopor" (marca registrada da empresa Knauf Isopor Ltda).

<sup>7</sup> O *plenum* tem função de uniformizar o escoamento.

*dampers*<sup>8</sup> (GUPTA et al,2006).

Refrigeradores são objetos de estudo há muitas décadas. Inúmeras pesquisas teóricas e experimentais podem ser encontradas com facilidade na literatura. Devido à recente preocupação mundial com a questão energética, os trabalhos contemplando estritamente refrigeradores *frost-free* estão, em sua maioria, relacionados ao consumo de energia desses eletrodomésticos.

Nesse âmbito, Liu et al (2004) compararam o efeito da abertura de porta no consumo de energia e temperatura nos compartimentos em um refrigerador VCC<sup>9</sup> com um de frequência fixa. Mais tarde, Gupta et al (2007) colaboraram no desenvolvimento de um modelo termofluido em CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para um refrigerador doméstico com o intuito de prever campos de temperatura e velocidade do ar em ambos os compartimentos do refrigerador. O estudo contemplou ainda experimentos para validar previsões do modelo e bons resultados foram obtidos.

Lacerda et al (2005) investigaram experimentalmente o escoamento de ar no interior do congelador de um refrigerador, dado que o consumo de energia de um refrigerador residencial está intimamente relacionado à distribuição de temperaturas e esta, por sua vez, depende do escoamento de ar. O estudo mostra mudanças significativas na distribuição do escoamento interno quando são reduzidas as temperaturas.

Hermes et al (2013) propuseram um método complementar para teste de consumo de energia em refrigeradores domésticos baseado na avaliação do refrigerador em regime permanente. Essa abordagem propõe ser mais rápida e ainda permitir o cálculo de parâmetros importantes no projeto de um refrigerador. Dados experimentais da pesquisa mostram que os resultados encontrados são 12 vezes mais rápidos e seguem a mesma tendência dos obtidos nos testes padronizados, porém não predizem exatamente esses resultados.

Mitishita et al (2013) contribuíram para o avanço de uma metodologia de otimização termoeconômica de refrigeradores, que leva em conta economia de energia e custo do produto simultaneamente. Resultados de um modelo de simulação foram comparados com dados experimentais e boa concordância foi obtida entre eles.

A pesquisa exposta apenas reflete o imperativo mundial de busca pelo aumento da eficiência energética de produtos. Embora individualmente o consumo energético dos refrigeradores não pareça alto, quando se considera o número total de unidades em uso, o impacto no consumo de energia se torna bastante significativo, fazendo com que a refrigeração doméstica seja um

---

<sup>8</sup> Registro de comando manual que restringe a passagem do escoamento de modo a regular o fluxo.

<sup>9</sup> Compressor hermético com rotação do motor variável.

alvo natural para controle de eficiência. No Brasil, por exemplo, essa exigência pode ser representada pelo Decreto Presidencial, através da regulamentação dos níveis máximos de consumo de energia para refrigeradores e congeladores<sup>10</sup>.

## 2.2. EVAPORADORES *NO-FROST*

Trocadores de calor são dispositivos utilizados para transferência de calor entre dois fluidos a diferentes temperaturas, que podem ou não estar separados por uma parede sólida. Por exemplo: evaporadores, condensadores e radiadores de automóveis (MORAN et al, 2003).

Em um refrigerador, o evaporador é o agente direto de resfriamento, constituindo a interface entre o processo e o circuito frigorífico (STOECKER, 2002). Como explica Knabben (2010), nesses sistemas a transferência de calor no lado externo pode acontecer tanto de forma sensível como latente. Em alguns evaporadores o refrigerante muda de fase no interior dos tubos (expansão direta), outros empregam fluidos secundários, onde não há evaporação do fluido de trabalho dentro da serpentina (expansão indireta).

Trocadores de calor são encontrados nas mais diversas geometrias e disposição de escoamento, sendo o modelo serpentina aletada (ou tubo aletado) o tipo mais comum para processos nos quais pelo menos um dos fluidos é o ar (KNABBEN, 2010). Nesse caso, as aletas são dispostas no lado externo, ou seja, no lado do ar, onde o coeficiente de transferência de calor é mais baixo. Serpentinhas aletadas são fabricadas com tubo liso, sobre o qual são instaladas placas de metal (denominadas aletas) com o intuito de aumentar a área de troca térmica. As aletas funcionam como superfícies secundárias de absorção de calor e têm efeito de aumentar a área de superfície externa do evaporador, melhorando assim sua eficiência (DOSSAT, 2004).

Parâmetros como dimensões das aletas e distância entre elas variam de acordo com a aplicação a que se destina a serpentina. O diâmetro do tubo determina o da aleta: tubos pequenos requerem aletas pequenas e o aumento do tubo leva ao aumento da aleta. Já o espaçamento entre as aletas é determinado principalmente pela temperatura de operação do trocador.

A redução da temperatura nos compartimentos do refrigerador é proporcionada pela transferência de calor entre ar e fluido refrigerante através do processo de convecção forçada na área externa do evaporador. Nas fileiras do evaporador o escoamento é predominantemente cruzado, ou seja, o refrigerante e o ar escoam perpendicularmente entre si. Quanto à

---

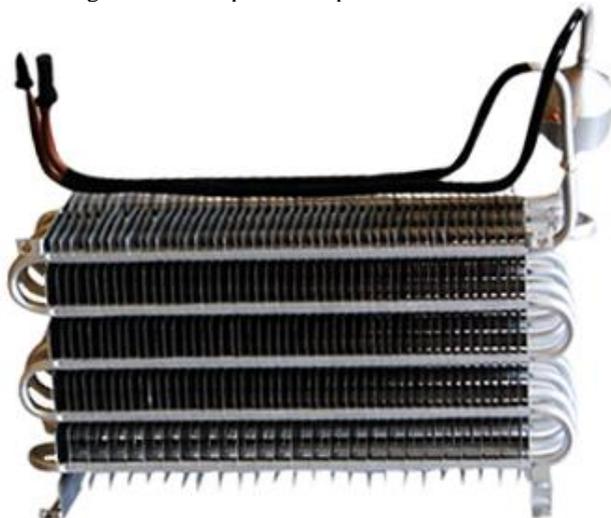
<sup>10</sup> Através da Portaria Interministerial Nº 362, de 24 de Dezembro de 2007.

movimentação de ar, um ventilador força sua passagem no sentido ascendente através dos tubos e aletas do evaporador, fazendo com que o refrigerante absorva calor do ar.

Os trocadores de calor tubo aletados apresentam como principais desvantagens a elevada perda de carga no lado externo aos tubos e a dificuldade para remoção de materiais que podem se acumular entre as aletas como, por exemplo, pó, gelo e a geada (SILVA, 2012). Porém, devido à presença das aletas, os mesmos possuem maior área de superfície por unidade de comprimento e largura que outros tipos de evaporadores, e por isso podem ser construídos de forma mais compacta. Segundo Dossat (2004), esse fato assegura uma economia considerável de espaço e torna as serpentinas aletadas perfeitamente apropriadas para uso com ventiladores como unidades de convecção forçada.

Por esse motivo, esse modelo de evaporador é bastante utilizado em equipamentos domésticos, como é o caso dos refrigeradores *frost-free*<sup>11</sup>. A figura 3 ilustra um exemplo desse modelo de evaporador.

Figura 3 - Exemplo de evaporador tubo aletado



Fonte: Changzhou Xinxin Refrigerating Co. (2014).

Com relação aos trocadores tubo aletados convencionais (figura 4 a), são diversos os aspectos que distinguem o evaporador *no-frost*. Como explica

---

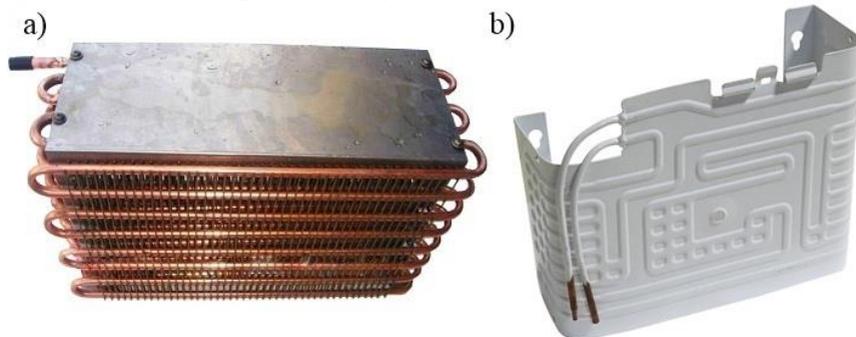
<sup>11</sup> De acordo com Lee et al (2002) a produção mundial de refrigeradores é de 80 milhões por ano, dos quais 40% são de refrigeração indireta, empregando evaporador tubo aletado, com ventilação forçada.

Knabben (2010), a geometria dos evaporadores *no-frost* é tal que a área de face é menor e o comprimento na direção do fluxo de ar é maior. Dessa forma, o número de fileiras de tubos nessa direção é também superior. Além disso, para evitar a obstrução por formação de geada, o espaçamento entre aletas é diferenciado em cada fileira e significativamente maior que nos trocadores convencionais.

Outro aspecto relevante nos evaporadores *no-frost* consiste na faixa de vazão de ar de aproximadamente 50 m<sup>3</sup>/h, inferior a dos trocadores convencionais que tipicamente se encontra na faixa de (100 a 1000) m<sup>3</sup>/h (BARBOSA et al, 2009).

A título de diferenciação, na figura 4 (b) apresenta-se um evaporador do tipo tubo placa, ou evaporador de placa. Esse modelo de trocador de calor é bastante conhecido, pois era empregado em refrigeradores residenciais anteriormente à tecnologia *frost-free*. Embora ainda seja produzido, seu comércio é quase inexpressivo frente aos inúmeros modelos *no-frost* atuais.

Figura 4 - Exemplos de trocadores de calor



**Legenda:** a) tubo aletado convencional;

b) evaporador de placa;

Fonte: Adaptada Jinan Retek Industries Inc (2014).

É possível encontrar na literatura inúmeros trabalhos envolvendo evaporadores e muitas das pesquisas sobre o modelo *no-frost* são estudos do desempenho desses trocadores e suas geometrias. Como é o caso de Karatas et al (1996), que investigaram experimentalmente a queda de pressão e transferência de calor no lado externo de quatro evaporadores empregados em refrigeração doméstica. Nesse estudo foi avaliado o efeito de não uniformidades na distribuição de temperatura e velocidade do escoamento de ar e propostas correlações.

Lee et al (2002) propuseram correlações para três tipos de evaporadores tubo aletados *no-frost* com diferentes geometrias de aletas

comparando os coeficientes de transferência de calor no lado externo (lado ar). Boa concordância experimental foi obtida, o evaporador com aletas do tipo "espinha de peixe" foi o que apresentou melhor transferência de calor na condição seca. Já Melo et al (2006) testaram *in situ* três evaporadores *no-frost* de configurações semelhantes, porém com diferentes arranjos de escoamentos. O estudo apontou que o desempenho dos evaporadores é afetado apenas pela abertura do *dampers* e velocidade do ar, que abaixo de 5 °C o desempenho não é influenciado pelo tipo de escoamento e ainda que a 10 °C a maior taxa de transferência de calor ocorre no evaporador de contra-fluxo.

Barbosa et al (2009) estudaram a influência da taxa de escoamento de ar e a geometria no desempenho termo-hidráulico de evaporadores tubo aletados *no-frost*. Foram avaliados 8 tipos de evaporadores e propostas correlações semiempíricas para diversos parâmetros. Barbosa et al (2010) analisaram em modelo CFD a influência de parâmetros geométricos no desempenho termo-hidráulico de evaporadores tubo aletados *no-frost* (dois modelos com geometrias diferentes), sob condições típicas de operação doméstica. Com objetivo de avaliar aspectos de projeto de um refrigerador, a metodologia de cálculo foi confrontada com dados experimentais da literatura, obtendo boa concordância. Foi identificado ainda que o posicionamento do resistor de degelo tem influência na distribuição de temperatura e velocidade do ar.

Trabalhos propondo novas alternativas aos evaporadores normalmente utilizados também são encontrados. Pussoli (2010) apresenta uma análise teórica e experimental de um conceito alternativo de superfícies estendidas para trocadores de calor compactos, os evaporadores de aletas periféricas. Nessa pesquisa foram avaliados 5 protótipos e um modelo teórico foi desenvolvido para prever o comportamento termo-hidráulico do trocador. Concordância satisfatória dos dados foi obtida. O estudo determina ainda dimensões ótimas do evaporador para taxas de transferência de calor específicas em algumas situações. Waltrich (2008) fez uma análise teórica e experimental de trocadores de calor tubo aletados aplicados à refrigeração doméstica e investiga um conceito alternativo de evaporador, o Evaporador de Fluxo Acelerado (EFA). A pesquisa demonstra que o conceito apresenta grande potencial para aplicação em refrigeração doméstica.

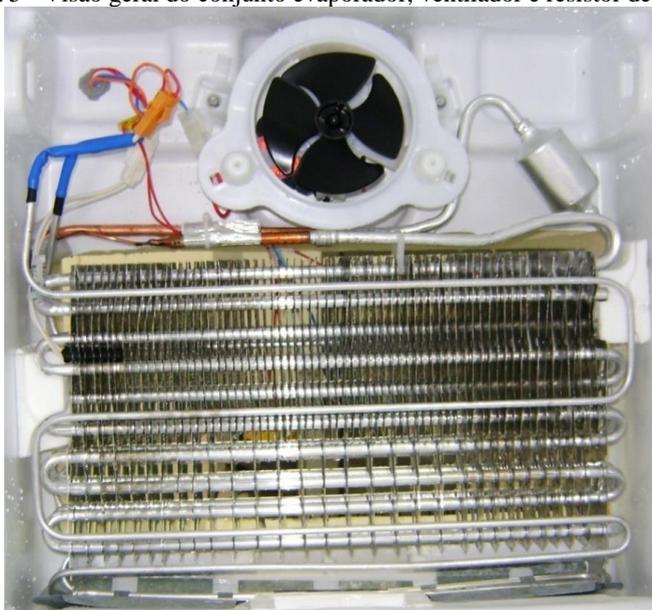
O exposto apresenta as diferenças entre evaporadores *no-frost* em relação aos modelos tubo-placa (*roll-bond*), com enfoque na refrigeração residencial. A migração dos antigos trocadores pelo modelo tubo aletado acontece desde o surgimento, no final da década de 1960, e os torna hoje a maioria comercializada. A revisão da literatura atesta ainda, através do número de trabalhos, as vantagens desse modelo, além de mostrar a constante

busca por melhorias nesse componente.

Segundo a incontestável transição do mercado, o evaporador selecionado neste trabalho é do tipo *no-frost* tubo aletado, com tubos circulares e aletas planas retangulares e descontínuas. Possui uma serpentina com duas fileiras de 10 tubos horizontais, ambos, tubo e aletas, são feitos de alumínio. Uma visão geral do conjunto do evaporador encontra-se na figura 5, enquanto suas dimensões e maiores detalhes podem ser observados no apêndice I.

Com relação ao ventilador, o modelo presente é do tipo axial de pequenas dimensões. Segundo o fabricante, apresenta potência nominal de  $(4,0 \pm 0,6)$  W alimentado com tensão 220 V em corrente alternada (WHIRLPOOL, 2009). Esse tipo de ventilador é mais restrito quanto à aplicação, porém apresenta menor custo inicial, fácil instalação e é indicado para movimentação de grandes quantidades de ar sob baixas diferenças de pressão (SILVA, 2012).

Figura 5 - Visão geral do conjunto evaporador, ventilador e resistor de degelo

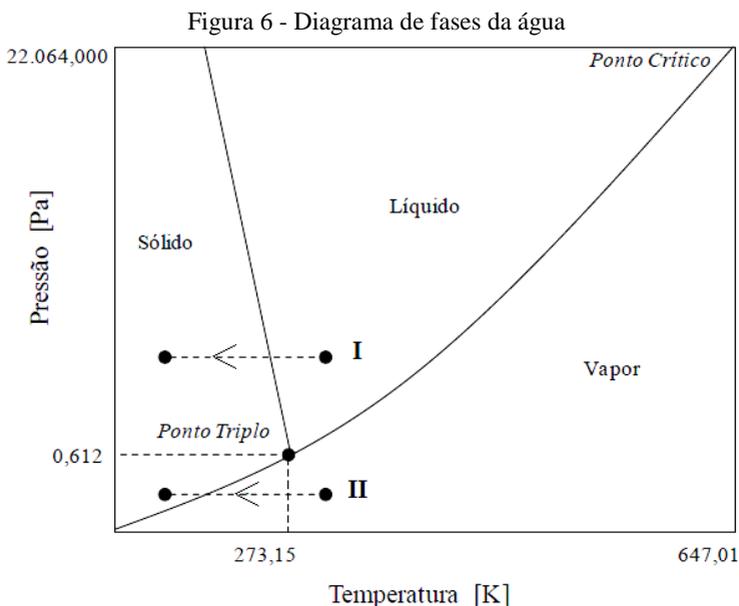


Fonte: Elaborada pela autora (2015).

### 2.3. FORMAÇÃO DE GEADA NO EVAPORADOR

Considerando o diagrama de fases da água (figura 6), define-se como

gelo a fase sólida obtida obrigatoriamente do processo de solidificação da fase líquida (processo I), enquanto a geada resulta do processo de dessublimação do vapor d'água que se encontra a uma pressão parcial inferior à pressão de saturação da água na temperatura do ponto triplo (processo II). Tal diferença na formação provoca mudanças significativas nas propriedades do sólido resultante, uma vez que o gelo apresenta estrutura praticamente maciça e a geada porosa, formada por cristais de gelo irregulares, com estrutura normalmente dendrítica ou fractal, e pequenas bolsas de ar (SILVA, 2012).



Fonte: Silva (2012).

Devido a essas particularidades na formação, os processos de transferência de calor e massa no interior da camada de geada dependem também de parâmetros tais como a porosidade e a tortuosidade desse meio.

Como explica Piucco (2008), para que o processo de formação de geada tenha início, determinadas condições de temperatura e umidade são necessárias. Quando há interação entre uma mistura de ar e vapor d'água e um substrato sólido em temperatura inferior à temperatura de saturação da mistura, pode haver condensação do vapor, formando um filme líquido ou gotas esparsas, ou dessublimação, formando uma camada de geada. Tais casos são processos heterogêneos de mudança de fase, os quais exigem uma quantidade de energia menor do que a exigida nos processos homogêneos

(sem interação com superfícies). Quando a temperatura é inferior à do ponto de congelamento da água, pode ocorrer tanto a condensação com posterior congelamento das gotículas ou do filme líquido, formando uma camada de gelo, como a dessublimação do vapor. Esta última exige uma maior quantidade de energia em relação à condensação com congelamento, o que se reflete em maior grau de resfriamento a partir do ponto de orvalho para que este processo ocorra.

A formação da geada é essencialmente um processo transiente de transferência de calor e massa, dividido em três estágios: nucleação, crescimento e adensamento (WU et al, 2011). Esse processo depende de seis parâmetros principais, que são: temperatura, velocidade, pureza e umidade relativa do ar, temperatura da superfície do metal e suas propriedades (XIAO et al, 2009). As seguintes características experimentais do evaporador apontam condições favoráveis à formação de geada (KNABBEN, 2010):

- material: alumínio (ângulo de contato da água = 90°);
- temperatura do substrato: -25,4 °C;
- temperatura do ar oriundo do refrigerador: 5 °C;
- umidade relativa média: 60%.

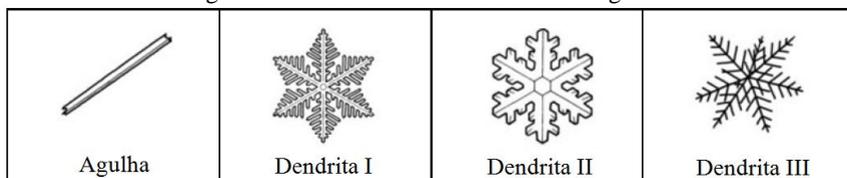
Ademais, a constante abertura de portas e a infiltração de ar quente e úmido através das gaxetas contribuem para que a geada esteja sempre presente nas superfícies do evaporador. Assim, o acúmulo de gelo nas serpentinas de resfriamento de ar, operando a temperaturas baixas, é inevitável (DOSSAT, 2004; KIN et al, 2006).

Em função de alguns parâmetros tais como velocidade e direção preferencial de crescimento, diferentes formas de cristal de geada podem ser observadas para diferentes valores de temperatura e de grau de saturação.

As condições apresentadas, geralmente encontradas em evaporadores de refrigeradores *frost-free*, são típicas para ocorrência de cristais nas formas dendríticas, porém formas de agulha também são encontradas (PIUCCO, 2008).

Ainda segundo Piucco (2008), as formas dendríticas formam a camada de geada menos densa e com menor condutividade térmica. Ilustração dessas formas pode ser observada na figura 7 a seguir.

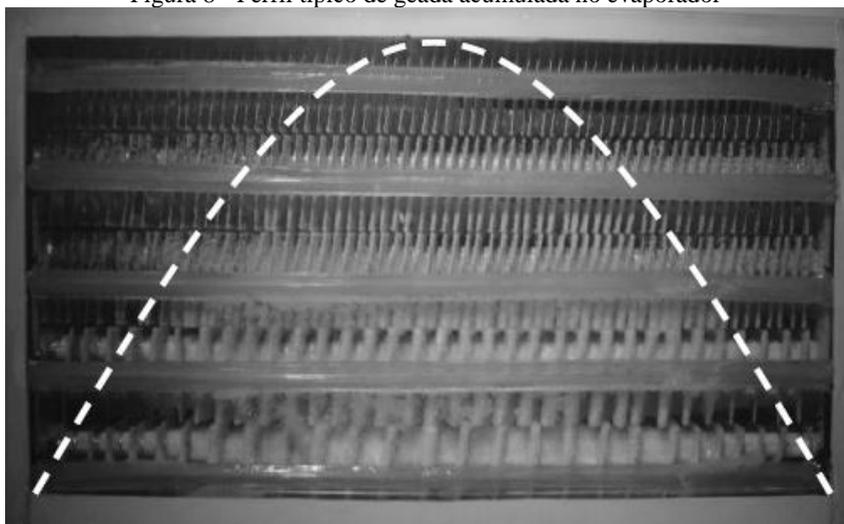
Figura 7 - Diferentes formas de cristal de geada



Fonte: Adaptada de Piucco (2008).

A maior parte da geada acumula-se nas primeiras fileiras e região central do evaporador, formando um perfil parabólico (ÖZKAN; ÖZIL 2006, KNABBEN, 2010; ÖZKAN et al, 2012), como ilustrado na figura 8. A região central da primeira fileira fica rapidamente bloqueada devido à incidência direta da corrente de ar oriunda do refrigerador<sup>12</sup>.

Figura 8 - Perfil típico de geada acumulada no evaporador



Fonte: Knabben (2010).

Estudos mostram que a taxa de acúmulo de massa de geada sobre o evaporador aumenta com a elevação da vazão de ar, grau de super-

<sup>12</sup> Dado que qualquer acúmulo de gelo sobre os tubos aletados tende a restringir a passagem de ar entre as aletas e retardar a circulação de ar através da serpentina, os evaporadores que se destinam a aplicações de baixas temperaturas devem ter uma distância ampla de aletas a fim de minimizar o perigo de limitar a circulação de ar (DOSSAT, 2004).

resfriamento e densidade de aletas, e decresce ao logo do tempo devido à redução da vazão de ar movimentada pelo ventilador e à elevação da temperatura da superfície da geadas (HERMES, 2009; SILVA, 2012). Silva (2012) diz ainda que a mesma massa de geadas pode causar diferentes graus de obstrução no evaporador, dependendo das condições nas quais foi gerada.

Segundo Dossat (2004), qualquer depósito nas superfícies externa ou interna do evaporador tende a atuar como isolamento térmico e diminuir o fator de condutância das paredes do evaporador, reduzindo a taxa de transmissão de calor. Os depósitos da superfície externa de evaporadores de ar refrigerado são causados geralmente por poeira produzida no ar, borra, graxa e outros contaminantes que aderem às superfícies úmidas do tubo ou por acúmulo de gelo na superfície. Tal acúmulo pode ser extremamente prejudicial para o funcionamento eficiente do refrigerador (WU et al, 2011, DATTA et al, 1997, STOECKER, 1957 *apud* SILVA et al, 2011, HUANG, 2008).

A geadas degenera a capacidade de refrigeração e, conseqüentemente, o desempenho do refrigerador. A perda de desempenho ocorre porque a camada de geadas aumenta não só a resistência térmica entre o ar e o evaporador, mas também a restrição ao escoamento, fazendo com que a vazão de ar deslocada pelo ventilador diminua. Com isso, as temperaturas dos compartimentos refrigerados se elevam, exigindo que o compressor permaneça ligado por mais tempo e consuma mais energia elétrica (KNABBEN, 2010).

A formação de geadas é um assunto bastante explorado na literatura. Trabalhos recentes como Hermes et al (2008) e Hermes (2012) apresentam avanços no estudo da formação da geadas em superfícies planas, enquanto Piucco et al (2011) avaliam critério para prever a formação de geadas nas paredes internas dos compartimentos de um refrigerador.

Especificamente em relação à formação de geadas em evaporadores tubo aletados do tipo *no-frost* também é possível encontrar trabalhos. As pesquisas consideradas mais relevantes para este estudo são listadas a seguir.

Aymur et al (2002) apresentaram um trabalho experimental investigando a formação de geadas no evaporador de um refrigerador doméstico de dois compartimentos. Os efeitos de alguns parâmetros sobre o coeficiente global de transferência de calor e perda de carga foram avaliados em condições reais de operação.

Deng et al (2003) trabalharam na investigação do efeito da geadas sobre evaporador de grande capacidade com diferentes espaçamentos entre aletas. Foi avaliado o impacto desse parâmetro sobre a taxa de transferência de calor e sobre o consumo de energia do ventilador. Os resultados mostraram que fatores que influenciam a transferência de calor são: temperatura de

evaporação, altura da camada de geada, velocidade do ar e espaçamento entre aletas. Mostrou ainda que com o acúmulo de geada os coeficientes globais de troca de calor e de energia diminuem gradualmente.

Özkan e Özil (2006) estudaram parâmetros que afetam a formação da geada no evaporador de um refrigerador e examinaram a estrutura da geada formada. Os experimentos foram desenvolvidos com o evaporador posicionado dentro do refrigerador e uma janela de vidro foi instalada na parte de trás do eletrodoméstico para visualização do processo. Diversas observações foram possíveis, tais como o formato de agulha da geada para temperaturas de evaporação de  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  e formato triangular para temperaturas inferiores a  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Trabalhos de modelagem matemática e computacional também foram desenvolvidos sobre esse tema. Como é o caso de Chen et al (2002), que propuseram um modelo para prever a espessura da geada e a consequente degradação da taxa de transferência de calor. Foram utilizadas correlações empíricas para computar os coeficientes de calor e massa e a queda de pressão em função da diminuição da área de passagem do ar. Dados experimentais foram comparados com os resultados e boa concordância foi obtida.

Por fim, Yang et al (2006) apresentaram modelo matemático para avaliar o comportamento de um evaporador *no-frost* sob a influência da geada, foram usadas correlações empíricas para os coeficientes de transferência de calor e o modelo foi validado para variáveis como a espessura da geada e a taxa de transferência de calor, apresentando boa concordância com os valores experimentais.

Como mostra a literatura, o acúmulo de geada em trocadores de calor traz consequências severas à manutenção da eficiência de um refrigerador. Além de influenciar o consumo energético, a conservação dos alimentos pode ser prejudicada quando há esse depósito. A fim de entender e aprimorar os evaporadores, o estudo dos parâmetros de formação da geada, suas propriedades físicas e seu perfil de formação é essencial. Os diversos trabalhos acima relatados demonstram tal anseio.

### **2.3.1. Propriedades termofísicas da geada**

Devido às particularidades de sua formação, gelo e geada possuem coeficientes de transferência de calor distintos, mesmo constituindo-se essencialmente da mesma substância. Assim também acontece com outras propriedades. Ainda, alterações nas propriedades da própria geada também podem ocorrer, como é o caso da densidade, por exemplo, que varia em função da temperatura da superfície em que a formação ocorre.

As propriedades que mais afetam o desempenho dos sistemas onde há formação de geada são: espessura da camada, condutividade térmica e densidade. Segundo Irigorry (2004), a correlação desses parâmetros deve ser função do tipo de superfície, posição, temperatura da superfície, temperatura da geada, temperatura do ar, velocidade do ar e umidade relativa do ar.

Pesquisa na literatura aponta muitos trabalhos acerca das propriedades termofísicas da geada, sendo em sua maioria empírica. Irigorry et al (2004), por exemplo, fizeram ampla revisão das correlações propostas para quantificar a condutividade térmica e a densidade da geada. Obtiveram destaque neste trabalho os estudos de Hayashi (1977) e Mao et al (1999).

No entanto, muitos deles não contemplam as condições tipicamente observadas nos refrigeradores domésticos, tais como a forma da superfície e temperatura desta. Dois estudos diretamente relacionados às condições encontradas no presente trabalho são descritos a seguir.

Piucco (2008) estudou o processo de formação de geada sob condições psicrométricas<sup>13</sup> ( $T_{\infty} = 10^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi = 40\%$ ) e de superfície ( $\theta = 80^{\circ}$ ,  $-20^{\circ}\text{C} < T_p < 0^{\circ}\text{C}$ ) tipicamente observadas em refrigeradores *frost-free*. Suas principais colaborações foram na proposição de modelo semiempírico para a variação da espessura da camada de geada e de correlação para densidade inicial da geada baseada na temperatura do substrato.

Silva (2009) investigou o impacto da formação de geada sobre a capacidade de refrigeração de sistemas comerciais e desenvolveu modelo matemático para simular o crescimento de geada sobre a superfície do evaporador. Seus experimentos concordaram com a teoria e, entre outras observações pertinentes, propôs correlação inédita para a densidade de geada.

As propriedades mais relevantes a este estudo encontram-se listadas a seguir.

Knabben (2010) propõe, com relação à densidade de geada, utilizar um valor médio e invariável com o tempo, calculado a partir da equação empírica apresentada na equação 1 (proposta por Piucco (2008)), obtendo bons resultados em seu trabalho.

$$\rho_{\text{geada}} = 207,3e^{(0,2664T_g - 0,06148T_s)} \quad (1)$$

Onde:

$T_g$  é a temperatura de superfície da geada [ $^{\circ}\text{C}$ ].

$T_s$  a temperatura do substrato [ $^{\circ}\text{C}$ ].

---

<sup>13</sup> Referente à psicrometria. Ramo da ciência que estuda a mistura ar e vapor de água (ar úmido) e suas propriedades.

E a densidade ( $\rho_{\text{geada}}$ ) é dada em  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ .

A condutividade térmica média da geada ( $k$ ), válida para densidades inferiores a  $500 \text{ kg}/\text{m}^3$ , proposta por Sanders (1974) é:

$$k_{\text{geada}} = 0,1202\rho_{\text{geada}}^{0,963} \quad (2)$$

Onde:

$\rho_{\text{geada}}$  é a densidade da geada  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ .

Com relação à porosidade da geada, quanto maior a quantidade de poros, maior a difusão de massa e, conseqüentemente, a espessura da camada de geada. A porosidade (representada neste trabalho por  $E$ ) é dada por:

$$E_{\text{geada}} = \frac{\rho_{\text{geada}} - \rho_{\text{gelo}}}{\rho_{\text{vapor d'água}} - \rho_{\text{gelo}}} \quad (3)$$

Onde:

$\rho_{\text{geada}}$  é a densidade da geada  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ .

$\rho_{\text{gelo}}$  é a densidade do gelo  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ .

$\rho_{\text{vapor d'água}}$  é a densidade do vapor de água  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ .

Diversos trabalhos utilizam a relação de tortuosidade ( $\tau$ ) proposta por Zehnder, citada por Piucco (2008), apresentada na equação 4. Quanto maior a tortuosidade, maior a dificuldade do vapor de água se difundir na camada de geada, e menor é a taxa de crescimento desta.

$$\tau = \frac{E_{\text{geada}}}{1 - \sqrt{1 - E_{\text{geada}}}} \quad (4)$$

Onde:

$E_{\text{geada}}$  é a porosidade da geada.

Quanto à difusividade do vapor de água no ar ( $D_{\text{if}}$ ), admitindo-se que a mistura de ar e vapor de água possua comportamento de gás ideal, o coeficiente  $D_{\text{if}}$  será função direta da temperatura e inversa da pressão. Como a pressão é praticamente constante, um ajuste linear para a faixa de  $-45 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  sugere a seguinte correlação, proposta por Lee et al (1997):

$$\text{Dif} = 0,1326T - 14,042 \quad (5)$$

Onde:

T é a temperatura [K]

Obtém-se Dif em [mm<sup>2</sup>/s].

A pesquisa estabelecida demonstrou que não existe fórmula única e genérica para cálculo das propriedades termofísicas da geada, dado que as condições de formação interferem nessas variáveis. Diante do exposto, para cada situação em particular, a determinação das propriedades depende fundamentalmente das condições psicrométricas envolvidas e da escolha de correlação adequada. Percebe-se ao fim, que este campo de estudo ainda apresenta lacunas em se considerando a influência da geada nos sistemas de refrigeração.

### 2.3.2. Detecção de geada

A detecção de gelo e também de geada é um grande desafio tendo em vista a complexidade do fenômeno de formação, suas diversas causas e variados tipos de produto resultante do processo (HOMOLA et al, 2006). Segundo Long-Hao et al (2012), detectar a geada é a base para um degelo correto.

Atualmente a busca por meios de detectar a presença de gelo está diretamente relacionada aos problemas encontrados na indústria, tais como no setor aeronáutico e usinas eólicas, e fortemente ligada aos propósitos meteorológicos. Em virtude desse fato, a grande maioria dos conceitos propostos e métodos já desenvolvidos provêm dessas áreas. Algumas pesquisas encontradas na literatura são apresentadas em seguida.

As técnicas de medição de gelo podem ser classificadas em métodos diretos e indiretos, como sugere Mughal et al (2012). Os métodos indiretos envolvem medições de condições climáticas que levam à formação de gelo, ou detecção dos efeitos da presença de gelo. Modelos empíricos ou determinísticos são então utilizados para predizer a formação. Já os métodos diretos baseiam-se na detecção de alterações de propriedades provocadas pelo acúmulo de gelo, e categorizados pelos autores em técnicas: capacitivas, indutivas, ultrassônicas, acústicas, ressonância, infravermelho e microondas.

Aviles et al (2003) estudaram o emprego de características vibracionais para detecção de geada no evaporador. Dois métodos foram investigados: com acelerômetros e pela impedância eletromecânica. O estudo com acelerômetro não se mostrou adequado para identificação. Já na estratégia de medir a variação da impedância eletromecânica foi utilizado um

filme de material piezocerâmico aderido à superfície de uma aleta. Variações notáveis puderam ser observadas, apontando que a geada causa variação suficiente para implementação do método. No entanto o teste foi desenvolvido apenas em uma aleta separada do evaporador, e para atestar o método ensaios devem ser feitos no sistema completo.

Homola et al (2006) fizeram uma revisão de 29 métodos existentes e potencialmente aplicáveis para detecção de gelo em geradores, discutem o desempenho dos conceitos e mostram que a maioria dos métodos não são confiáveis, concluindo que os conceitos baseados em variação de propriedades elétricas são os de maior potencial para a aplicação. Tabelas desse estudo foram sintetizadas por Owusu (2010) e podem ser observadas no anexo I.

Com intuito de detectar gelo em bombas de calor, e dessa forma controlar o sistema de degelo, Byun et al (2006) investigaram um novo método empregando fotoacopladores de raio infravermelho com fotodiodos. O transdutor, composto de um emissor e um receptor, foi instalado entre as aletas na serpentina do trocador e sua variação de tensão foi medida de acordo com o gelo depositado. Os testes mostraram que o transdutor é bastante eficiente na automação do sistema de degelo, porém não se mostra ideal para aplicação prática em refrigeradores domésticos.

Ikiades et al (2007) propõem uma nova abordagem para detecção de gelo e sua espessura em superfícies de aviões, baseada na difusão óptica de um feixe de luz em um volume de gelo. Experimentos indicaram que é possível identificar o tipo de gelo formado pela análise da distribuição espectral de uma reflexão especular e do feixe disperso. Estudo da potencialidade da técnica para medição da espessura do gelo formado também foi feito, no entanto o trabalho conclui que a geometria do transdutor utilizada na investigação não é possível de ser utilizada na prática, necessitando mais estudos para ser aplicada.

Com relação aos refrigeradores, pesquisas sobre detecção de gelo também são encontradas na literatura, porém em menor quantidade. As mais relevantes para este trabalho, no julgamento da autora, serão descritas.

Com o intuito de medir a quantidade de geada depositada no evaporador e então promover o degelo adaptativo propriamente dito, Sanchez (2008) propôs utilizar um sensor de campo elétrico. Seus testes utilizaram eletrodos, sensor de campo e microcontrolador, e os resultados iniciais mostraram que a presença de geada promove alteração na tensão de saída do sensor. Isso mostra que a solução é propícia, porém maiores pesquisas acerca de tal sensor precisam ser desenvolvidas.

Xiao et al (2009) apresentam uma análise das características e viabilidade de aplicação de técnica fotoelétrica para detecção de gelo e

controle do processo de degelo. Os pesquisadores conduziram experimentos laboratoriais em escala reduzida e em apenas um tipo de trocador de calor, porém os resultados revelaram que os sensores fotoelétricos podem detectar a altura de gelo diretamente e com baixa incerteza.

Na sequência do estudo, Xiao et al (2010) investigam uma correlação entre o sinal de saída (em tensão) do sensor desenvolvido anteriormente e a espessura do gelo formado. Diversos experimentos com variação de temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do ar e temperatura da superfície proporcionaram o estabelecimento de uma correlação linear, que foi posteriormente validada com outros experimentos. Os resultados indicam que a tecnologia fotoelétrica pode estimar a espessura de gelo diretamente e de forma exata.

Wang et al (2010) conduziram um experimento para investigar a confiabilidade e efetividade de um método empregando microcâmera e processamento de imagens para medir a espessura de gelo depositada em uma placa. O interesse do estudo eram medições de microcristais de gelo e camadas de espessura (0 a 4) mm. Os autores apontam que o método possui vantagens, tais como não prejudicar o gelo da superfície e boa exatidão de medição. O sistema, no entanto, não é viável comercialmente.

Long-Hao et al (2012) desenvolveram um transdutor de detecção de gelo utilizando fibra óptica para aplicação em refrigeradores e um sistema de degelo inteligente, fundamentado na utilização desse transdutor. O transdutor fotoelétrico desenvolvido baseia-se nas propriedades de absorção, reflexão e dispersão ópticas do gelo. Tem a vantagem de ter baixo preço, boa consistência e facilidade de instalação. O estudo mostra resultados de testes em laboratório comprovando que o transdutor é consistente e tem boa capacidade de prevenir interferência provinda do gelo formado.

Owusu et al (2013) demonstraram um conceito e sua potencialidade para detectar gelo dentro de uma nuvem e a taxa de acúmulo de gelo baseado na variação da capacitância e resistência entre duas sondas cilíndricas carregadas. O trabalho tem enfoque na aplicação em turbinas de geradores eólicos e torres meteorológicas. Em laboratório apresentou bons resultados na detecção do tipo de gelo formado através da resistência, mostrando que essa identificação é uma possibilidade. Porém não obtiveram correlação entre a taxa de geada e a capacitância do sensor devido à não linearidades observadas nos experimentos.

Ainda, com pesquisa de mercado encontrou-se modelo comercial de detector de gelo do fabricante New Avionics, o “Ice Meister”, ilustrado na figura 9. O transdutor pode ser instalado em diversos lugares, tais como refrigerador, heliporto, para-brisa de automóvel, plantação, câmara frigorífica e estação meteorológica. Ao ser implantado, juntamente com um

sistema de atuação, ele impede a irrigação de plantações durante a chuva, inicia o degelo quando necessário, monitora condições de estradas e pontos de pouso de helicópteros, aciona o limpador de para-brisas, entre outros (NEW AVIONICS, 2014).

O princípio de funcionamento desse produto é baseado na oclusão e refração óptica. Um laser emite um sinal infravermelho que é direcionado ao receptor através de uma fibra óptica, o que se interpõe entre a fibra e o receptor (neve, geada, orvalho, condensação, gelo e pingos de chuva) atenua a resposta do sinal emitido. Uma placa com interface ao usuário identifica essa diferença e relata ao sistema. Embora se mostre efetivo, o equipamento citado exige ajustes específicos para determinar a quantidade de geada necessária para iniciar o processo de degelo, e ocupa espaço relativamente grande entre aletas e não mede a quantidade de geada presente.

Figura 9 - Ice\*Meister™ Model 9734: conjunto e detalhe do transdutor



**Legenda:** Esquerda: conjunto;

Direita: detalhe do sensor;

Fonte: New Avionics (2014).

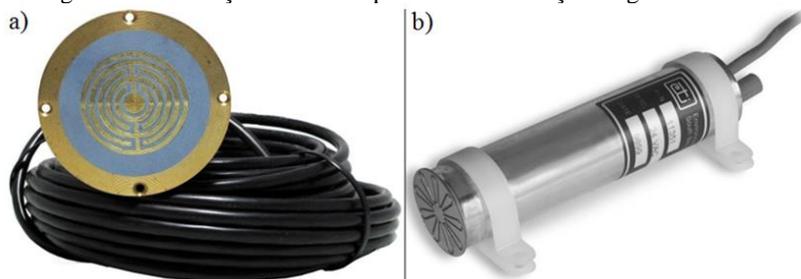
Essa solução, no entanto não está disponível para o consumidor, a menos que o transdutor já venha instalado no refrigerador, o que ainda não acontece nos produtos, segundo pesquisa da autora. Também se mostra caro<sup>14</sup> para aplicação em refrigeradores residenciais. Ademais, o Ice Meister não é somente um transdutor, mas um controlador de degelo com sensor em sua constituição.

Outros dois equipamentos para detecção de gelo foram encontrados na pesquisa, e embora suas aplicações não estejam relacionadas aos refrigeradores, os objetivos de ambos são impedir degelos desnecessários e

<sup>14</sup> Preço de US\$120,00, sem taxas de importação e demais custos associados, em 13 de outubro de 2014.

também detectar o instante em que a remoção passa a ser necessária. O “Snow/ice sensor 090” (figura 10 a), da Tekmar, é um dispositivo para ser disposto no chão de locais de clima frio, onde a presença de neve é corriqueira. Ele é usado para detectar neve ou gelo em garagens e calçadas, tais como rampas de acesso e saídas de emergência, podendo ser associado a elementos aquecedores e então controlar de maneira automatizada o derretimento dessas formações. Já a Environmental Technology Inc oferece três tipos de equipamentos: o “GIT-1” (figura 10 b), que é para calhas e tubulações e visa impedir o entupimento do fluxo pela formação de gelo; o “CIT-1”, que detecta queda de precipitação e permite o gerenciamento da neve antes do seu acúmulo, podendo ser instalado em telhados ou mastros; e o “SIT-6E”, para pavimentações como calçadas, ruas e superfícies em geral (PENTAIR, 2014).

Figura 10 - Ilustração de dois dispositivos de detecção de gelo comerciais



**Legenda:** a) Snow/ice sensor 090;  
b) GIT-1 Gutter Ice Sensor;  
Fonte: a) Tekmar (2014) e b) Eti (2014).

Embora exista uma solução comercial específica para refrigeradores e alguns conceitos teóricos já foram desenvolvidos para detecção, todos envolvem inserção de um novo elemento no refrigerador. Além de aumentar o custo associado ao produto, tendo em vista que a maior complexidade no projeto tem efeito direto sobre a elevação dos custos, uma série de efeitos negativos pode decorrer do aumento do número de peças em um equipamento. Back et al (2008) citam que usar menos componentes em um produto, em geral, proporciona menores custos de fabricação, montagem e manutenção, além de menos operações de processamento e fixações, menos erros de fabricação e montagem, menos manipulações são necessárias, e como consequência maior confiabilidade é obtida.

Ademais, o custo do transdutor ainda é relativamente alto para inserção em toda linha de refrigeradores de uma fábrica, pois implica na necessidade de instalação de seu próprio sistema de controle.

## 2.4. DEGELO DO EVAPORADOR

Segundo Dossat (2004), quando os evaporadores tubo aletados são usados para operação em baixa temperatura (abaixo de 1 °C), deve ser providenciado algum modo de degelar a serpentina em intervalos regulares de tempo, pois sua capacidade é afetada mais por acúmulo de gelo do que em qualquer outro tipo de evaporador. Long-Hao et al (2012) afirmam que um acúmulo de 5 mm e 10 mm de geada no evaporador faz com que o consumo de energia de um refrigerador aumente em 20% e em 33%, respectivamente.

O degelo pode ser executado automaticamente por diversos meios, porém esse processo irá interromper o funcionamento normal do sistema de refrigeração e irá afetar de forma negativa o consumo de energia do refrigerador (KIN et al, 2006).

Existem diferentes métodos de degelo, tais como aspersão de água, aquecimento elétrico, ciclo reverso, degelo natural, gás quente, segundo fluido etc. Dentre eles, gás quente, ciclo reverso e aquecimento elétrico são as técnicas mais comuns, sendo que os dois primeiros tipos consomem menos energia, porém requerem grandes modificações no sistema, o que os torna inviáveis de serem utilizados em refrigeradores residenciais devido ao maior custo (MELO et al, 2013). Os resistores utilizados para o aquecimento elétrico, por serem os mais empregados, terão suas vantagens e desvantagens detalhadas no tópico a seguir.

Diversos fatores contribuem para aumento do consumo de energia global do refrigerador. Ao iniciar o degelo, compressor e ventilador são desligados, o que por si só causa aumento das temperaturas internas<sup>15</sup>. O próprio degelo também contribui para o aumento da carga térmica no sistema, uma vez que apenas parte do calor dissipado funde a geada, enquanto o resto é liberado no ambiente refrigerado, além de a presença do resistor aumentar a perda de carga do lado do ar. Por tudo isso, com o término do degelo o compressor deve trabalhar por mais tempo para compensar o aumento de temperatura (KNABBEN, 2010).

Os métodos atuais de degelo baseiam-se, majoritariamente, em previsões, sendo intervalos fixos predeterminados. Porém, as condições de carga do sistema variam continuamente, alterando também os momentos ideais para início e para fim do degelo (AVILES et al, 2003).

A forma mais utilizada para controle do processo de degelo é o início por tempo (através de um *timer*) e término, por temperatura. No entanto, é sabido que um sistema de degelo baseado em tempo pode causar ciclos de

---

<sup>15</sup> O aumento da temperatura interna durante o degelo pode inclusive prejudicar a conservação dos alimentos nele armazenados.

degelo desnecessários, reduzindo a eficiência energética do refrigerador e dificultando o controle de temperatura dos compartimentos (TASSOU et al, 2001). Ainda, de acordo com Long-Hao et al (2012), o *timer* desajustado de um refrigerador pode fazer com que o consumo de energia do mesmo aumente em 27%.

Na maioria dos casos onde o controle de término do degelo é feito por temperatura, essa é medida por um sensor eletrônico ou bimetálico (termostato) posicionado na serpentina próximo à saída do evaporador. Quando a temperatura nesse ponto atinge 10 °C, o degelo é encerrado. Dessa maneira, o fabricante garante que não haverá mais geada no trocador (MELO et al, 2013). No entanto, essa estratégia para o processo de degelo é baseada nas condições de pior caso, para assegurar o derretimento completo. Então, eventualmente, o aumento desnecessário da temperatura ocorrerá, aumentando o consumo do sistema (FRICKE; SHARMA, 2011).

Bejan et al (1994) mostraram a existência de um momento ótimo para a remoção de geada em evaporadores. O modelo proposto considera diversas irreversibilidades associadas aos processos de compressão, expansão, perdas de cargas nas tubulações, o calor dissipado pelo resistor de degelo e o método de diferenças finitas para as temperaturas. Devido a sua forte influência, a taxa de variação da espessura da camada de geada foi obtida e avaliada em 0,42 mm/h. Os resultados foram expressos através de grupos adimensionais, permitindo a determinação do momento para início do processo de degelo a partir das condições geométricas e operacionais do refrigerador.

Uma rotina de degelo bastante comum em refrigeradores é acionar o resistor a cada 8 h de compressor ligado<sup>16</sup>, mantendo-se, enquanto isso, ventilador e compressor desativados. Essa condição permanece até a temperatura no evaporador atingir 10 °C ou decorrerem 40 min. Alguns produtos modernos apresentam rotinas que consideram a quantidade e o momento em que as portas são abertas, a duração do último ciclo de degelo e a diferença entre as temperaturas do evaporador e do ar. A partir dessas informações o ciclo pode ser alterado, por exemplo, extendendo o intervalo entre degelos para 36 horas.

O refrigerador empregado neste estudo possui sistema de degelo constituído pelos seguintes componentes: placa eletrônica, resistor de degelo, fusível térmico, sensor de temperatura de degelo (termistor aderido à serpentina denominado assim pelo fabricante), calha de degelo e recipiente de evaporação<sup>17</sup>.

---

<sup>16</sup> Refere-se ao tempo acumulado de funcionamento do compressor.

<sup>17</sup> Constitui-se de uma bandeja localizada sobre o compressor cuja finalidade é armazenar a água resultante do degelo até que a mesma evapore naturalmente. Sua localização facilita a evaporação pela troca de calor com o compressor, pois este se

No refrigerador em estudo, todo esse sistema é monitorado pela placa eletrônica, que define o tempo de degelo primeiramente através do tempo total de funcionamento do compressor. O tempo necessário para realizar a rotina de degelo é variável, sendo definido por um algoritmo de cálculo que leva em consideração diversos fatores. O tempo de execução da rotina de degelo irá variar de quatro até 26 horas, dependendo das condições de utilização do produto, por exemplo, se houve ou não abertura de portas (WHIRLPOOL, 2009).

O tempo médio de degelo nesse refrigerador é aproximadamente 20 min, sendo limitado por segurança em 40 min caso o sensor de degelo não atinja a temperatura final de 10 °C. Após 5 min do término do degelo o controle eletrônico acionará o compressor e o ventilador (ambos ligam e desligam juntos).

Nesse sistema, para proteção contra bloqueio do evaporador por geada, a seguinte lógica é seguida: quando a temperatura dos sensores de degelo e do refrigerador atinge uma diferença de 20 °C por um tempo igual ou superior a 10 min, o módulo comanda a realização de um degelo.

Há ainda uma rotina de segurança para os casos onde ocorre defeito no sensor de temperatura do refrigerador. Neste modo, o produto irá ciclar por tempo (11 min ligado e 10 min desligado) e o degelo continuará monitorado pelo sensor de degelo. Caso ocorra falha somente neste, o tempo de degelo é alterado para 28 min e o produto continua em funcionamento normal, não entrando em modo de segurança.

Existem também rotinas de emergência de degelo, tais como:

- $T_{\text{block}}$ : rotina de segurança para evitar bloqueio de gelo no evaporador. Nesta rotina o degelo é realizado em no mínimo 4 h após o último degelo realizado;
- Heater on time: se o último degelo durou mais de 21 min, após 2,5 h de trabalho do compressor, inicia-se novo ciclo de degelo;
- $R_{\text{critical}}$ : caso o fator de funcionamento do compressor<sup>18</sup> esteja abaixo de 30%, após 2,5 h de trabalho do compressor será iniciado o degelo.

Por questões de segurança, refrigeradores apresentam um fusível térmico localizado junto ao evaporador, cujo objetivo é evitar superaquecimento dos elementos. Esse elemento é ligado em série com o

---

mantém aquecido durante seu funcionamento.

<sup>18</sup> Termo que representa a razão entre o tempo de compressor ligado e o tempo de um ciclo, que compreende o tempo de compressor ligado e desligado. É uma medida de eficiência do compressor.

resistor de degelo interrompendo a passagem de corrente elétrica, e, conseqüentemente, o funcionamento do resistor, quando determinada temperatura for ultrapassada (em torno de 77 °C). Esse dispositivo é de ação única e seu funcionamento é bastante simples<sup>19</sup>, possui tamanho reduzido, é de fácil instalação e tem baixo custo de produção.

Novos refrigeradores chegam às residências com sistemas de controle de degelo eletrônicos complexos e diversas opções de configuração disponíveis, cujas rotinas são muitas vezes inacessíveis aos usuários finais. Contudo, os ciclos de degelo dos produtos existentes não se baseiam em medições da quantidade de geada depositada, mas sim na suposição de que em determinada condição a quantidade de geada depositada será maior (XIAO et al, 2010).

No intuito de otimizar o degelo, diversos métodos de controle do processo já foram estudados. No entanto, trabalhos relacionados ao degelo do evaporador são, em sua maioria, referentes ao consumo que esse processo impõe ao refrigerador e suas conseqüências.

Machielsen e Kerschbaumer (1989) apresentaram uma discussão sobre as desvantagens do degelo, tais como descontinuidade de operação do ventilador e do compressor e desvios de temperatura e umidade em relação às condições desejadas. O estudo descreve o processo e o conceito de eficiência de degelo e deriva dois parâmetros adimensionais com o objetivo de determinar o tempo ideal de resfriamento antes de o degelo ocorrer, bem como sua duração ideal. Esses parâmetros descrevem o desempenho do evaporador sob a influência de geada e consideram o tempo de operação do refrigerador e o tempo de degelo.

Bansal et al (2010) analisaram a distribuição do fluxo de calor do resistor de degelo para as demais partes do refrigerador e quantificaram os efeitos do ciclo de degelo no consumo de energia do produto. Mostraram também que menor quantidade de energia é consumida quando um mecanismo de degelo automático é integrado à operação do refrigerador. E que o resistor de degelo do tipo tubo de vidro disposto na parte inferior não é a melhor opção no quesito consumo de energia. Por transmitir calor essencialmente por radiação, a temperatura na superfície desse elemento precisa atingir valores muito superiores aos necessários para derreter a geada.

Knabben et al (2011) apresentaram um estudo *in-situ* dos processos de

---

<sup>19</sup> O componente ativo de um fusível térmico é uma cera térmica eletricamente isolada. Esta cera detém uma mola de contato contra um contato fixo sob temperatura normal de funcionamento. Quando a temperatura de corte predefinida é atingida, a cera se funde e a mola cede, afastando o contato elétrico do circuito que se abre (ADD-THERM, 1013).

formação da geada e degelo em evaporador tubo aletado de refrigerador doméstico. Um modelo matemático foi desenvolvido para prever a formação de geada, bloqueio do evaporador e as taxas de transferência de calor e massa. Testes validaram o modelo que também foi utilizado para avaliar mudanças na configuração do evaporador e seus efeitos. Encontrou-se que a melhor eficiência de degelo, dentre as estudadas, é conseguida com o acionamento de dois resistores com potências elétricas diferentes. O estudo também demonstrou as consequências de alterações na quantidade de aletas.

Visando diminuir o consumo de energia e aumentar a eficiência no processo de degelo, Özkan et al (2012) experimentaram um evaporador *no-frost* em condições reais de operação e calcularam o tempo de derretimento da geada através de um modelo analítico. Apontaram que: a geada formada à temperatura de  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  é mais densa que a formada em temperaturas mais altas; o acúmulo de geada é maior na parte inferior do evaporador, e ela derrete primeiro na parte superior em virtude da espessura nessa porção ser menor; segregar em partes o resistor de degelo e conduzi-los separadamente, bem como alterar dimensão dos tubos e fazer o degelo mais frequentemente na parte inferior são formas para reduzir o consumo de energia.

Diversos trabalhos também são encontrados no âmbito do desenvolvimento de novos métodos para realização do degelo. Alguns desses serão descritos a seguir.

Tudor et al (2005) introduziram uma técnica de aplicação de campo elétrico para controle da geada em serpentina de evaporadores, chamado de "descarga de barreira dielétrica". Essa técnica se baseia no aquecimento localizado das aletas através da aplicação de uma alta tensão (corrente alternada através de eletrodos). A técnica demonstra ser mais adequada para evaporadores com maior densidade de aletas. Experimentos do estudo mostraram que o tempo de degelo usando essa técnica foi substancialmente menor que o demandado pelo método convencional, enquanto o consumo de energia foi menor que a metade do gasto pelo método normalmente empregado. O relato aponta ainda que a técnica evita grandes oscilações térmicas - prejudiciais à conservação dos alimentos.

Yin et al (2012) propuseram um método de degelo baseado na combinação da circulação de ar e resistor elétrico. Estudaram experimentalmente cinco combinações dessas possibilidades e mostraram que o resistor embutido nas aletas com circulação de ar através dos tubos é a melhor forma de configuração. Com relação ao degelo utilizando apenas resistor elétrico, esse método diminui o tempo necessário, o consumo de energia e a flutuação de temperatura nos compartimentos, além de aumentar a eficiência do processo. O estudo aponta que método é mais adequado para câmaras frigoríficas que adotaram o suprimento de ar unilateral.

Mader e Thybo (2012) propuseram um método para degelo da serpentina de bombas de calor utilizando ar. O método utiliza uma válvula de distribuição para segregar o evaporador em diferentes circuitos de maneira individual. Com ela é possível que cada circuito menor seja desligado individualmente para degelo. O estudo propõe a remoção contínua da geada e, embora mais apropriado para evaporadores de microcanais, os autores apontam que é possível empregá-lo em evaporadores tubo aletados.

Chang et al (2010) discutiram a configuração e experimentaram um novo esquema de degelo por ciclo reverso com algumas alterações para evitar o problema de superaquecimento do refrigerante na entrada no evaporador. A pesquisa obteve bons resultados: o método não causou choque térmico no evaporador, o degelo foi mais rápido que o convencional e ainda dissipou menos energia para os compartimentos internos (o que evita grande variação de temperatura nos alimentos e trabalho excessivo do compressor após o degelo). Porém demanda esforços na alteração da configuração do sistema.

Em relação ao controle do processo de degelo, Jiang et al (2013) relataram um método estudando o desempenho de uma bomba de calor. Tal modo é baseado no grau de superaquecimento do refrigerante na saída da serpentina, e utiliza essa informação como início do processo. Resultados de experimentos demonstraram que, aplicando o método proposto, o degelo teve início antes do desempenho da bomba se deteriorar rapidamente, o que se mostra bastante adequado.

Um sistema automático de degelo deve, idealmente, variar o intervalo entre as operações de acordo com a real necessidade do sistema, iniciando o processo somente quando quantidade crítica de geada estiver acumulada. Processo com esse tipo de controle é comumente denominado sistema de degelo por demanda (em inglês: *demand defrost system*). Se implementado com sucesso, um sistema como esse economiza energia sem reduzir o desempenho do refrigerador (ALLARD; HEINZEN, 1988).

A busca por um sistema de degelo mais eficiente, baseado no conceito de degelo por demanda, é bastante antiga. Já em 1968, Hahn e Broyles (1968) descreveram um sistema de controle de degelo eletrônico baseado na diferença do fluxo de ar que ocorre devido à impedância imposta pela presença de geada no evaporador. O estudo propôs monitorar a diferença de fluxo de ar entre dois pontos do evaporador e relata resultados positivos de experimentos com essa técnica.

Bell (1977) identificou a energia desperdiçada no degelo de refrigeradores. Seu trabalho discute as consequências do degelo desnecessário, as principais fontes de umidade que causam a formação de geada em um refrigerador e propõe um sistema para iniciar o ciclo baseado na umidade contida nos compartimentos e no tempo de funcionamento do

compressor. Porém é um modelo teórico que não teve aplicação prática.

Knoop et al (1988) propuseram um sistema de controle integrado do refrigerador para as funções de: zonas independentes de temperatura, degelo automático e monitoramento e teste de funcionamento do sistema, usando microcomputador, sensores, atuadores e *software*. Sobre o degelo, os autores descrevem um modelo que se adapta às condições de uso e do ambiente, o intervalo entre os ciclos é determinado pelos seguintes parâmetros: quantidade e duração da abertura de portas, duração do degelo anterior e temperatura do congelador.

Allard e Heinzen (1988) exibiram um conceito de degelo adaptativo que proporcionaria o degelo por demanda. A proposta foi um controle em *loop* onde o tempo de acúmulo de geada é uma função iterativa do tempo ideal de degelo (específico para cada sistema), tempo de acúmulo de geada anterior (monitorado) e do tempo de degelo efetivo anterior (também monitorado).

Tassou et al (2001) relataram a investigação dos processos de formação de geada e degelo do evaporador de um balcão de expor alimentos. Estudo de campo e experimentos apontaram que um número predefinido de ciclos de degelo pode acarretar na ocorrência desnecessária desse processo. Os autores mostram que para economizar energia sem prejudicar a qualidade dos alimentos pode-se empregar o degelo com frequência variável baseado nas condições ambientais do refrigerador (tais como temperatura, umidade, entalpia etc, tanto do ar como do fluido refrigerante). Por fim, registram que o controle ideal do processo teria capacidade de aprender e se adaptar às condições de operação em que está atuando.

Comercialmente, solução para controle eletrônico de refrigeração também está disponível. O KE2 da indústria Therm Solutions e o Centinel da Century Refrigeration são opções que propõem degelo adaptativo. Esses produtos combinam sensores para controle das cabines de refrigeração, através de placa de circuito permitem acionar ventiladores, compressores e resistores de degelo, contando com sensores de temperatura podem eliminar o *timer*. Possuem inúmeros parâmetros disponíveis para seleção pelo usuário. Estes produtos, no entanto, têm enfoque comercial, adequados para câmaras frigoríficas que não possuam controle integrado dos componentes.

De maneira semelhante, existem as opções: “Adap-Kool” da marca Danfoss, “E2 Einstein” da Emerson, “Wizard” da Genesis International, “Smart Defros Kit” e “Beacon System” da Heatcraft e “SmartVap” da Keeprite. Salienta-se que todos citados são soluções de enfoque comercial para ambientes de maiores proporções quando comparados aos refrigeradores domésticos.

De maneira geral, embora existam diversos trabalhos na literatura, não

se encontram suas implementações em produtos finais. Como exalta Sanchez (2008), muitas companhias têm desenvolvido sistemas próprios para controle do degelo de forma adaptativa, e diversas patentes existem nessa área. Entretanto sem sucesso, pois não existe atualmente medição exata da geada presente no evaporador. Os métodos comerciais baseiam-se em previsões e têm como principal objetivo integrar o controle dos elementos do sistema (resistor de degelo, ventilador e compressor) com sensores de temperatura, em câmaras frigoríficas. A solução mais próxima da ideal encontrada foi o Ice Meister, que é um detector de apenas um nível, e exige que o usuário selecione a quantidade de geada que iniciará o processo de degelo. Portanto, observa-se que as opções disponíveis não solucionam efetivamente o problema de quantificar a geada em evaporadores.

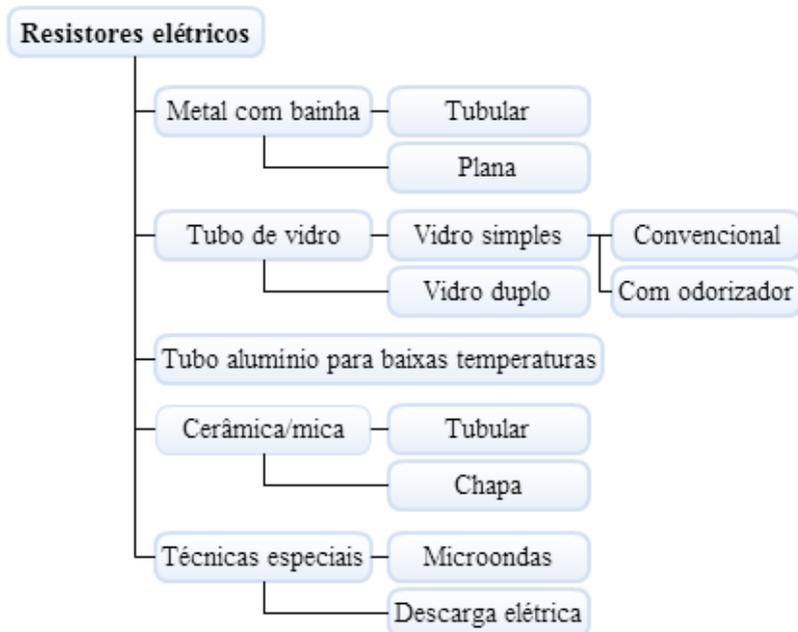
## 2.5. RESISTORES DE DEGELO

Embora aumente o consumo de energia do sistema, por ser bastante simples e de operação estável, o aquecimento elétrico por resistor é o método mais comum para remoção de geada em evaporadores de pequena capacidade (KIN et al, 2006). Valores típicos da eficiência de degelo, definida como a razão entre a quantidade de energia requerida para derreter a geada e a energia elétrica dissipada em forma de calor durante esse processo, são da ordem de 5% a 15% (PUSSOLI, 2010).

Uma classificação dos resistores elétricos pode ser observada na figura 11, proposta por Kim et al, (2006).

Os resistores elétricos mais comumente empregados em degelo são os modelos: serpentina tubular de alumínio para baixa temperatura (por vezes chamadas de “distribuídas”), tubulares revestidos em metal (*calrod*) e tubos de vidro. Dentre estes modelos, a serpentina tubular de alumínio é o mais utilizado em refrigeradores domésticos *frost-free* (KNABBEN, 2010). A figura 12 exemplifica um resistor deste modelo. Com relação ao posicionamento, os resistores podem ser dispostos no evaporador sobre as aletas ou estarem embutidos nestas.

Figura 11 - Classificação dos resistores elétricos de degelo



Fonte: adaptada de Kim et al (2006).

Figura 12 - Resistor elétrico tubular em alumínio



Fonte: <http://smec.en.hisupplier.com/product-78479-Defrost-Heater.html> (2014).

Algumas vantagens da serpentina tubular de alumínio são: não elevar substancialmente a temperatura da superfície dos tubos<sup>20</sup>, não causar danos

<sup>20</sup> Raramente excedem temperatura de 100 °C (MELO et al, (2013).

às partes plásticas e do isolamento presentes no evaporador, além de distribuir uniformemente o calor. Essas são as razões pelas quais esse modelo é indicado para refrigeradores que operam com os fluidos refrigerantes R600a e R134a.

Contudo, esse modelo aumenta consideravelmente a perda de carga do lado do ar, tem fabricação e montagem mais complicadas e pode apresentar problemas de corrosão.

Os resistores utilizados para degelo possuem dimensões e formatos variados, fatores que dependem do modelo de refrigerador em que são empregados. De maneira geral, os resistores são constituídos por um elemento resistivo, onde passa a corrente elétrica e por efeito Joule propicia o aquecimento, por um isolante elétrico envolvendo este elemento e por um revestimento externo (ou envoltório). As duas extremidades do tubo são bloqueadas e lacradas por meio da injeção de material plástico ou borracha para evitar a entrada de umidade.

Como elemento resistivo é comum a utilização de ligas níquel-cromo, pois possuem alta resistividade comparativamente a outras ligas (aproximadamente  $1 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ), possuem alto ponto de fusão, suportam altas temperaturas e têm boa resistência à oxidação. Também apresentam boa estabilidade mecânica, são dúcteis e de fácil conformação em fios e bobinas e ainda possuem custo relativamente baixo.

Para a isolamento elétrica é necessário que o material seja dielétrico e tenha, preferencialmente, condutividade térmica elevada. São utilizados principalmente óxido de magnésio e fibra de vidro.

O envoltório serve para encapsulamento desses componentes e se constitui de material inoxidável, em geral aços AISI 304 e AISI 316, ou, o que é mais empregado atualmente, alumínio. Sua função principal é proteção mecânica e contra oxidação do elemento resistivo.

Resistores de degelo enquadram-se na norma IEC 60335-1<sup>21</sup>, de requisitos gerais, e na norma de requisitos particulares, a IEC 60335-2-24. Essas normas são aplicáveis a aparelhos eletrodomésticos e similares<sup>22</sup> visando prevenir acidentes e proteger os consumidores em relação aos riscos elétricos, mecânicos, térmicos, fogo e radiação dos aparelhos quando em

---

<sup>21</sup> Equivalente à VDE 0700, CEI 61-50, e no Brasil à ABNT NRB NM 60335.

<sup>22</sup> Esta norma trata da segurança de aparelhos eletrodomésticos e similares com tensão nominal inferior a 250 V para aparelhos monofásicos, e 480 V para outros aparelhos. Enquadram-se nessa norma produtos como: adegas, refrigeradores com porta de vidro, máquinas de sorvete, máquinas de gelo, aparelhos de refrigeração para uso em *campings*, *trailers* e embarcações, aparelhos de refrigeração operados a bateria etc (IEC 60335-1, 2001, IEC 60335-2-24, 2002).

utilização normal. Também abrange algumas situações anormais que podem ocorrer na prática. Segundo essa norma, por exemplo, em condições normais de utilização o resistor não deve ultrapassar a temperatura de 210 °C.

No refrigerador em estudo, a potência do resistor de degelo é de 165 W e sua resistência ôhmica de 300,1  $\Omega$ . Segundo o fabricante, a resistência deve residir na faixa de (305,1 $\pm$ 23,4)  $\Omega$  (WHIRLPOOL, 2009). Um corte transversal em resistor de degelo de mesmo modelo mostrou a forma dos componentes e como estão dispostos internamente (figura 13).

Figura 13 - Corte transversal no resistor de degelo



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

O invólucro exterior é um tubo metálico e internamente a ele há outro tubo emborrachado, flexível, isolante elétrico que envolve o elemento resistivo. Este, por sua vez, constitui-se de um filamento com 0,20 mm de diâmetro enrolado em espiral com formato de bobina. Em seu eixo encontra-se fibra de vidro, um isolante térmico que também dá suporte ao elemento. Dimensões do resistor e de seus elementos internos são encontradas no apêndice II.

Trabalhos contemplando resistores de degelo não são comuns na literatura, sendo que apenas duas pesquisas relacionadas ao tema em questão foram encontradas pela autora. Resumos destas encontram-se a seguir.

Kim et al (2006) compararam diferentes tipos de aquecedores elétricos aplicáveis a refrigeradores de pequeno porte e investigaram dois modelos: serpentina tubular (diâmetro 6,5 mm) e placa cerâmica (espessura 1,50 mm). Duas configurações foram experimentadas: sob condições especiais de testes e sob condições reais de aplicação: montados no congelador de um refrigerador do tipo *side by side*. Os testes investigaram os efeitos de variação da potência, geometria e localização desses resistores na duração do degelo e energia consumida para esse processo.

Melo et al (2013) estudaram os resistores elétricos para degelo tubular distribuída, *calrod* e tubo de vidro, combinados com três tipos de acionamento da potência elétrica: integral, em degrau e em pulso. A pesquisa experimental mostrou que a eficiência de degelo dos três resistores é praticamente a mesma para cada modo de operação, sendo que as maiores

obtidas foram com o tubo de vidro e a potência entregue em degraus. No entanto esse resistor atingiu as maiores temperaturas. Os autores apontam que o modelo *calrod* pode ser o mais indicado para aplicações em refrigeradores domésticos, pois além do baixo custo apresentam fácil instalação.

## 2.6. TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Transferência de calor é a transferência de energia térmica entre dois sistemas (ou um sistema e sua vizinhança). O calor passará de um corpo para outro quando, e somente quando, existir diferença de temperatura entre os corpos (DOSSAT, 2004). A transferência de calor sempre ocorre da região de maior temperatura para a região de menor temperatura, e nunca na direção oposta.

Três meios são possíveis para transmissão de calor: condução, convecção e radiação. Os três mecanismos podem ocorrer simultaneamente em um sistema, sendo que a transferência de calor por radiação pode ser negligenciada em sistemas onde a convecção é do tipo forçada.

Diversos autores sugerem analogia entre as difusões de calor e de carga elétrica. Segundo Incropera (2008), da mesma forma que uma resistência elétrica está associada à condução de eletricidade, uma resistência térmica pode ser associada à transferência de calor. Assim, qualquer oposição à passagem de calor entre o fluido e o ambiente é considerada uma resistência, podendo ser uma parede, um meio fluido, deposição de sujeira, geadas, entre outros.

Adotando-se este modelo, a resistência térmica de um circuito é composta pela equivalência entre resistências associadas aos processos envolvidos. Dada por:

$$R_{\text{total}} = \frac{\Delta T}{q} \quad (6)$$

Onde:

$\Delta T$  é a diferença de temperaturas [°C].

$q$  é a taxa de transferência de calor [W].

Em um refrigerador, o calor alcança o evaporador pelos três métodos de transmissão. Porém, nas aplicações de resfriamento de ar, como é o caso do produto em estudo, a maior parte do calor é conduzido ao evaporador por correntes de convecção formadas no espaço refrigerado, tanto por ação do

ventilador como pela circulação resultante da diferença de temperatura entre o evaporador e o espaço (DOSSAT, 2004).

Como a maior parte do calor dos alimentos armazenados é levada para o evaporador por circulação de ar, se esta não for adequada o calor não é levado em fluxo suficiente para que o evaporador desempenhe seu rendimento de projeto. No entanto, a circulação de ar também não pode ser superior à projetada, pois aumentaria a taxa de evaporação de umidade dos alimentos, resultando em desidratação excessiva<sup>23</sup>.

Dossat (2004) enfatiza que estando o refrigerador com a circulação de ar adequada, é necessário ainda que ela seja distribuída igualmente em todas as partes do espaço refrigerado e também sobre a serpentina. No primeiro caso para que não haja temperaturas desiguais ou pontos sem circulação, e no segundo, para garantir que a serpentina mantenha sua eficiência ao longo de todo seu comprimento, ou seja, sem diminuir a capacidade do evaporador.

### 2.6.1. Coeficiente de transferência de calor por convecção

Como visto, dos três métodos de transferência de calor o mais relevante em um refrigerador é a convecção. A transmissão de calor por convecção está intimamente relacionada à dinâmica do escoamento do fluido. Em um escoamento sobre feixe de tubos, como é o caso dos evaporadores tubo aletados, ela depende da configuração do escoamento e do grau de turbulência. E estes, por sua vez, são função da velocidade do fluido, do tamanho e arranjo dos tubos (KREITH, 1977).

A grande complexidade dos problemas envolvendo transferência de calor por convecção é a determinação do coeficiente convectivo. Segundo Kreith (1977), a equação da transferência de calor por convecção (equação 7) é mais uma definição do coeficiente médio de transferência de calor do que uma lei da transmissão de calor por convecção.

$$q_{\text{conv}} = hA(T_{\text{sup}} - T_{\infty}) \quad (7)$$

Onde:

$h$  é o coeficiente convectivo [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ].

$A$  é a área [ $\text{m}^2$ ].

$T_{\text{sup}}$  a temperatura da superfície.

$T_{\infty}$  a temperatura do fluido [ $^{\circ}\text{C}$ ].

---

<sup>23</sup> A desidratação da superfície dos alimentos armazenados, como cita Dossat (2004), deteriora a aparência e qualidade, além de encurtar a vida útil.

O coeficiente de transferência de calor por convecção não é uma propriedade do fluido, e sim um parâmetro cujo valor depende de todas as variáveis que influenciam a convecção, tais como a geometria do sistema, a natureza do movimento do fluido, as propriedades térmicas do fluido e a velocidade do escoamento do fluido (ÇENGEL; BOLES, 2006).

Seu valor numérico não é, em geral, uniforme sobre a superfície, dependendo também do local onde a temperatura do fluido é medida. Segundo Incropera et al (2008), valores típicos do coeficiente convectivo para gases são: em convecção natural de (2 a 25) W/m<sup>2</sup>K, em convecção forçada de (25 a 250) W/m<sup>2</sup>K e em convecção com mudança de fase, de (2500 a 100000) W/m<sup>2</sup>K.

O evaporador em estudo se constitui de um feixe de tubos alternados formando uma matriz tubular cujo escoamento é denominado cruzado. A figura 14 ilustra o descrito. Esse arranjo é caracterizado pelo diâmetro dos tubos e pelos passos transversal e longitudinal.

Figura 14 - Escoamento em feixe de tubos alternados



Fonte: Adaptada de Incropera et al (2008).

O coeficiente de transferência de calor associado a um tubo é determinado por sua posição na matriz. Geralmente se deseja conhecer o coeficiente de transferência de calor médio para a totalidade do conjunto. Para o arranjo geométrico desse trocador, pode-se utilizar a correlação obtida por Zukauskas (INCROPERA et al, 2008) para o número de Nusselt médio, equação 8.

$$\overline{Nu}_D = C_2 C Re_{D,máx}^m Pr^{0,36} \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^{1/4} \quad (8)$$

Para utilização desta correlação o sistema deve respeitar as seguintes

condições:

$$\left[ \begin{array}{c} N_L \geq 20 \\ 0,7 \lesssim Pr \lesssim 500 \\ 1000 \lesssim Re_{D,m\acute{a}x} \lesssim 2 \times 10^6 \end{array} \right]$$

Onde:

$N_L$  é o número de fileiras na direção longitudinal do escoamento.

$Re_{D,m\acute{a}x}$  é o número de Reynolds na direção em que a velocidade do fluido é máxima na matriz ( $Re_{D,m\acute{a}x} = \rho V_{m\acute{a}x} D / \mu$ ).

$Pr$  é o número de Prandtl ( $Pr = c_p \mu / k$ ).

$Pr_s$  o número de Prandtl na temperatura da superfície dos tubos.

$C$  e  $m$  são constantes da correlação cujos valores encontram-se no quadro 1.

Quadro 1 - Constantes  $C$  e  $m$  para correlação de Zukauskas

Arranjo	$Re_{D,m\acute{a}x}$	$C$	$m$
Alinhado	$10 - 10^2$	0,8	0,4
Alternado	$10 - 10^2$	0,9	0,4
Alinhado	$10 - 10^3$	Aproximado como um único cilindro	
Alternado	$10 - 10^3$		
Alinhado	$10^3 - 2 \times 10^5$	0,27	0,63
Alternado ( $S_T/S_L < 2$ )	$10^3 - 2 \times 10^5$	$0,35(S_T/S_L)^{0,2}$	0,6
Alternado ( $S_T/S_L > 2$ )	$10^3 - 2 \times 10^5$	0,4	6
Alinhado	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	0,021	0,84
Alternado	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	0,022	0,84

Fonte: Adaptado de Incropera et al (2008).

Caso o número de fileiras de tubo seja inferior a 20 unidades, a constante  $C_2$  deve ser inserida na equação (quadro 2). Todas as propriedades, exceto o  $Pr_s$ , são avaliadas na média aritmética das temperaturas de entrada e saída do fluido.

Quadro 2 - Fator de correção  $C_2$  da correlação de Zukauskas para  $N_L < 20$

$N_L$	1	2	3	4	5	7	10	13	16
Alinhada	0,7	0,8	0,86	0,9	0,92	0,95	0,97	0,98	0,99
Alternada	0,64	0,76	0,84	0,89	0,92	0,95	0,97	0,98	0,99

Fonte: Adaptado de Incropera et al (2008).

Em situações onde a matriz é aproximada para um único cilindro em escoamento cruzado, a correlação de Churchill & Bernstein pode ser utilizada. Essa equação é recomendada para  $Re_D Pr \gtrsim 0,2$  e pode ser escrita segundo Incropera et al (2008) pela equação (9).

$$\overline{Nu}_D = 0,3 + \frac{0,6Re_D^{1/2}Pr^{1/3}}{[1 + (0,4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \left[ 1 + \left( \frac{Re_D}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (9)$$

A partir do valor de Nusselt médio calculado, encontra-se o coeficiente convectivo médio através da equação 10.

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}D}{k} \quad (10)$$

Onde:

$\bar{h}$  é o coeficiente convectivo médio [W/m<sup>2</sup>K].

D é o diâmetro do tubo [m].

k é a condutividade térmica [W/mK].

O cálculo do coeficiente convectivo de um sistema é, em geral, feito experimentalmente, assim como a maioria das correlações existentes na literatura. Utilizando-se um transdutor de fluxo de calor e medindo-se as temperaturas da superfície do tubo e do ar pode-se obter um valor para o coeficiente convectivo de forma experimental.

### 2.6.2. Capacidade do evaporador

A capacidade de um evaporador é definida como a taxa na qual o calor passa através de suas paredes do espaço refrigerado, para o líquido vaporizante<sup>24</sup> interno (DOSSAT, 2004).

Para propiciar o resfriamento desejado, um evaporador deve ter boa capacidade de transmissão de calor. Em um trocador, o calor provindo do meio externo atinge os tubos pelos três métodos de transmissão: convecção, radiação e condução, porém passa através das paredes para o refrigerante essencialmente por condução.

---

<sup>24</sup> Embora “vaporizante” não esteja presente no Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa, é uma palavra bastante utilizada para designar o fluido refrigerante que percorre o evaporador. Está aqui empregada pois se apresenta dessa forma na referência consultada.

Dessa maneira, a capacidade do evaporador é determinada pelos mesmos fatores que controlam a taxa de fluxo de calor por condução através de uma superfície:

$$q = A \cdot U \cdot \text{LMTD} \quad (11)$$

Onde:

$q$  é a taxa de transferência de calor [W].

$A$  é área de superfície do evaporador, composta pela área primária (tubos) e secundária (aletas) [m<sup>2</sup>].

$U$  é o coeficiente global de troca de calor [W/m<sup>2</sup>K].

LMTD a diferença de temperatura média logarítmica entre a temperatura externa do evaporador e a temperatura do refrigerante dentro do evaporador [°C], dada pela equação 12.

$$\text{LMTD} = \frac{(T_{ar,e} - T_{\infty \text{refri}}) - (T_{ar,s} - T_{\infty \text{refri}})}{\ln \frac{(T_{ar,e} - T_{\infty \text{refri}})}{(T_{ar,s} - T_{\infty \text{refri}})}} \quad (12)$$

Onde:

$T_{ar,e}$  é a temperatura do ar que entra no evaporador.

$T_{ar,s}$  a temperatura do ar que deixa o evaporador.

$T_{\infty \text{refri}}$  a temperatura do fluido refrigerante.

O fator  $U$ , também chamado de coeficiente global de transmissão de calor ou fator de condutância total, representa a resistência ao fluxo de calor oferecida pelas paredes do evaporador. É uma soma de diversos fatores, tais como coeficientes de condutância das películas das superfícies, estrutura da serpentina e do material usado, volume da superfície úmida interna, velocidade e condutividade do refrigerante etc.

Para o caso de um evaporador resfriado a ar com o refrigerante circulando dentro dos tubos, como acontece no evaporador estudado, o coeficiente global de transferência de calor pode ser calculado pela equação 13 (DOSSAT, 2004).

$$U = \frac{1}{(A_o/A_i)/h_i + (e/k)(A_o/A_m) + 1/(h_e \phi_e)} \quad (13)$$

Nesta equação:

$A_o$ ,  $A_i$  e  $A_m$  são as áreas da superfície externa, interna e

circunferencial média da parede do tubo, respectivamente [m<sup>2</sup>].

$h_i$  = coeficiente convectivo interno (lado refrigerante) [W/m<sup>2</sup>°C].

$e$  = espessura da parede do tubo [m].

$k$  = condutividade térmica do material do tubo [W/m<sup>2</sup>°C].

$h_e$  = coeficiente convectivo externo (lado ar) [W/m<sup>2</sup>°C].

$\varphi_e$  = eficiência da aleta.

Visto que a capacidade de resfriamento do refrigerador está diretamente relacionada à capacidade do evaporador, é desejada então uma taxa elevada de transmissão de calor através das paredes. Assim, o fator de condutância deve ser tão alto quanto possível.

Por terem elevado fator de condutância, os metais são geralmente empregados na construção de evaporadores. Contudo, deve-se considerar um metal que não reaja com o refrigerante. Segundo Dossat (2004), ferro, aço, latão, cobre e alumínio são os metais mais usados. Os dois primeiros não são atacados por refrigerantes comuns, mas podem sofrer oxidação se houver alguma umidade livre no sistema. Dessa maneira, os tubos em geral são feitos de cobre ou alumínio, enquanto as aletas normalmente são de alumínio.

Além dos elementos que formam parte da equação base de transmissão de calor, há outros fatores externos à própria serpentina que afetam seu desempenho, como é o caso da circulação, velocidade e distribuição do ar no espaço refrigerado e sobre a serpentina. Estes fatores estão relacionados, e em muitos casos dependem uns dos outros.

## 2.7. SISTEMAS DE MEDIÇÃO

De posse das informações até aqui apresentadas, pode-se estudar os meios e instrumentos de medição disponíveis para avaliar as grandezas envolvidas no estudo. Nesta seção serão abordadas medição de fluxo de calor e de tensão, por serem tópicos relevantes envolvidos neste trabalho.

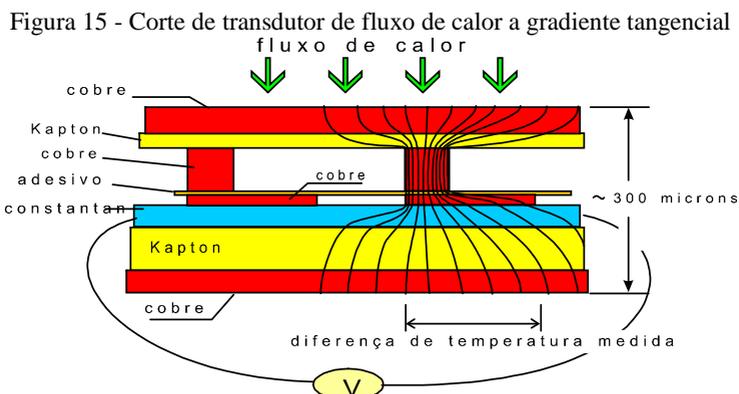
### 2.7.1. Transdutor de fluxo de calor

A densidade de fluxo de calor que atravessa uma superfície pode ser determinada experimentalmente pela utilização de transdutores de fluxo de calor, os quais geram um sinal elétrico proporcional ao fluxo térmico (CARCIOFI et al, 2002). Esses transdutores são placas de pequena espessura, que devem ser colocados junto à superfície onde se deseja medir o fluxo de calor.

Os fluxímetros, como são comumente denominados<sup>25</sup>, têm sido empregados em diversas aplicações, tais como medição da carga térmica em edificações, da eficiência de aletas, da condutividade térmica de materiais, do coeficiente de troca de calor e na determinação das perdas de calor em fornos e estufas.

Os transdutores tradicionais, chamados “a gradiente transversal”, em geral possuem grande espessura devido aos aspectos construtivos necessários, o que se torna fonte de erros de medição, além do risco elevado de ruptura do circuito.

Outro modelo de transdutor, dito “a gradiente tangencial”, determina o fluxo de calor através da medição de gradiente de temperatura em um plano tangente ao de medição do fluxo (Güths et al, 1995). Uma assimetria física desvia as linhas de fluxo, gerando uma diferença de temperatura sobre a termopilha planar. O desvio das linhas de fluxo é causado pelo contato pontual entre a superfície isotérmica superior e a parede auxiliar, segundo o esquema mostrado na figura 15.

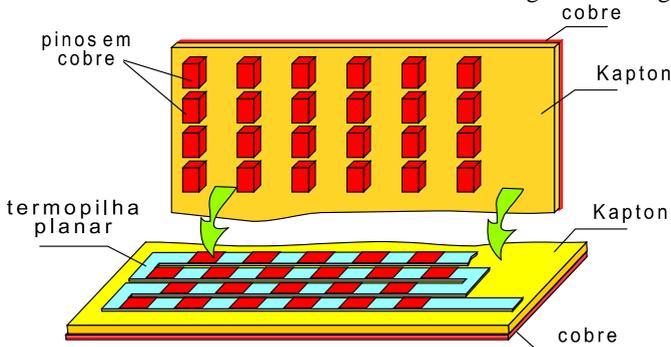


Fonte: Güths et al (1995).

As diferenças de temperaturas são medidas por termopares planares a eletrodos depositados ligados em série. Cada um dos termopares converte a diferença de temperatura em força eletromotriz (fem) de Seebeck. A fem produzida é diretamente proporcional ao número de termoelementos distribuídos sobre a superfície útil do sensor. A figura 16 ilustra o transdutor a gradiente tangencial aberto.

<sup>25</sup> Ao longo deste documento os transdutores de fluxo de calor serão denominados simplesmente fluxímetros.

Figura 16 - Vista aberta de transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial



Fonte: Güths et al (1995).

A utilização de técnicas de fotogravura facilita a fabricação de transdutores com grande superfície de medição e a alta sensibilidade.

Esse transdutor gera um sinal elétrico proporcional ao fluxo de calor total na superfície. O fluxo de calor medido é dividido pela área de superfície fixa do sensor para se obter a densidade de fluxo de calor. Para sua leitura, portanto, faz-se necessário um sistema de medição de tensão, ao qual seus terminais são conectados.

Antes de utilizar o transdutor é necessário calibrá-lo. Para tanto, emprega-se um resistor de aquecimento de resistência ôhmica conhecida, conectado a uma fonte de tensão. O resistor é colocado sobre o fluxímetro, e este aderido à superfície de medição. Alimenta-se o resistor com tensão elétrica e sobre ele coloca-se isolante térmico a fim de minimizar a perda de calor nessa superfície do transdutor.

A potência elétrica dissipada no resistor (calculada pela equação 14) é convertida em fluxo de calor ao ser dividida pela área do transdutor. Parte do calor gerado é transferida ao fluxímetro e o restante ao isolante sobre o resistor<sup>26</sup>. A indicação do fluxímetro correspondente a essa situação é utilizada para o balanço de energia.

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (14)$$

Onde:

P é a potência elétrica em [W].

U é a tensão imposta ao resistor em [V].

<sup>26</sup> Considera-se, por conhecimento prévio, que 2% da energia é perdida para o isolante.

R é a resistência ôhmica do resistor em  $[\Omega]$ .

Do balanço de energia se obtém a constante de calibração que será utilizada para converter a tensão de saída do transdutor em fluxo de calor propriamente, pela equação:

$$q'' = c \cdot V \quad (15)$$

Onde:

$q''$  é o fluxo de calor  $[W/m^2]$ .

c é a constante obtida na calibração  $[(W/m^2)/V]$ .

V é o sinal de saída do transdutor  $[V]$ .

A partir do fluxo de calor medido é possível então a obtenção da resistência à transferência de calor do sistema (equação 6).

### 2.7.2. Tensão

Análise de sinais elétricos é um problema fundamental para muitos engenheiros e cientistas. Ainda que o problema direto não seja elétrico, as grandezas básicas de interesse são muitas vezes transformadas em sinais elétricos por meio de transdutores, visto que é a forma mais simples de se analisar uma grandeza física, seja com uma saída proporcional em tensão ou corrente.

Os benefícios de transformar as grandezas físicas em sinais elétricos são grandes, já que muitos são os instrumentos disponíveis para análise de sinais elétricos nos domínios tempo, frequência e modais (AGILENT TECHNOLOGIES, 2014). Existem diversas opções de instrumentos para medir tensão. As mais comuns são voltímetro, osciloscópio e placa DAQ<sup>27</sup>.

De forma genérica, instrumentos para medição de tensão elétrica são chamados voltímetros. Com a popularização dos semicondutores, os voltímetros eletrônicos passaram a predominar nas mais diversas aplicações. Atualmente o alto desempenho desses dispositivos proporciona instrumentos mais exatos e baratos que os eletromecânicos.

Uma opção quando se deseja medir tensão elétrica são placas DAQ. Diversas configurações estão disponíveis no mercado: internas encaixadas na placa mãe do computador (placas de expansão), em módulos externos, porém conectados em computador (entradas USB, RS232 entre outras), e outro modelo externo, que possuem seu próprio chassi e módulos (exemplo:

---

<sup>27</sup> DAQ é sigla para *Data Acquisition*, em português “aquisição de sinais”.

sistemas VXI, LXI, CompactPCI e PXI).

Além das possibilidades de forma, diversas opções de barramento (USB, PCI, PCI Express, Ethernet e *Wi-Fi*, por exemplo), quantidade e tipos de entradas e saídas e funções estão disponíveis nas placas DAQ, oferecendo ao usuário flexibilidade na escolha.

A maior parte dos sensores requer condicionamento de sinais, como amplificação ou filtragem, como é o caso dos termopares, por exemplo. O condicionamento de sinais pode ser externo (antes de o sinal entrar na placa DAQ) ou integrado, que é uma das vantagens de algumas placas. Muitos dispositivos também incluem conectividade para sensores específicos, o que torna a integração desses sensores mais conveniente e prática.

### 3. BANCADA DE ENSAIOS

A fim de que diversos testes pudessem ser executados, um refrigerador escolhido para estudo precisou ser modificado. Neste capítulo são apresentadas suas características mais relevantes, as alterações feitas, os sistemas de medição empregados e também a instrumentação adicional da bancada.

#### 3.1. REFRIGERADOR E ADAPTAÇÕES

Neste trabalho foi escolhido como objeto de estudo um modelo de refrigerador bastante comum<sup>28</sup>. Trata-se de um eletrodoméstico de duas portas, do tipo *frost-free*, com volume interno de 263 l. Na parte superior encontra-se o congelador, com volume de 60 l, e na parte inferior o refrigerador, com 203 l. A circulação interna de ar é forçada através de ventilador, e a distribuição do ar entre os compartimentos é ajustável.

Este refrigerador opera através de um sistema eletrônico composto basicamente pelos seguintes componentes: placa de controle e interface, dois transdutores de temperatura (refrigerador e degelo), compressor, ventilador e resistor de degelo. Os transdutores de temperatura empregados, tanto de degelo como do refrigerador, são termistores do tipo NTC - *Negative Temperature Coefficient*.

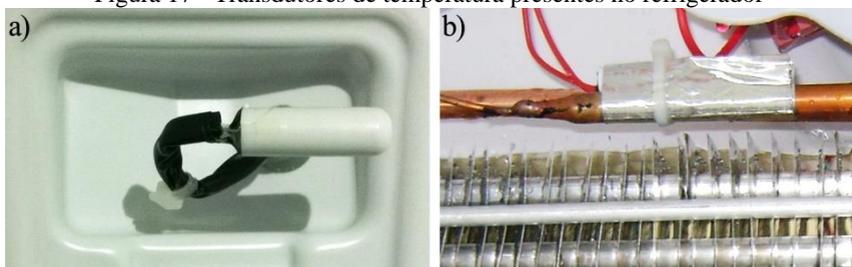
A temperatura no interior do produto depende da opção selecionada pelo usuário no painel de controle, da quantidade de alimentos armazenados e da frequência de abertura da porta (WHIRLPOOL, 2009). O sensor de temperatura do refrigerador está localizado nos fundos do mesmo e é responsável por monitorar a temperatura interna. Os sinais são enviados para a placa eletrônica para que esta acione ou desligue os componentes para manter a temperatura do refrigerador dentro da faixa selecionada. Imagem desse transdutor pode ser observada na figura 17 a.

Na figura 17 b está representado o transdutor de degelo, localizado no congelador junto ao tubo de entrada do evaporador. O mesmo é responsável por enviar sinais ao módulo do sistema eletrônico, que comandará o degelo ligando ou desligando o resistor de degelo. Além disso, informa também as condições de temperatura do evaporador quando o produto é ligado, indicando ao módulo qual a programação deve ser seguida.

---

<sup>28</sup> No Brasil, os refrigeradores mais vendidos são os de dois compartimentos com degelo automático, os denominados “*frost-free*” (MELO et al, 2006).

Figura 17 - Transdutores de temperatura presentes no refrigerador



**Legenda:** a) do refrigerador;  
b) de degelo;

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

O refrigerador escolhido opera com 39 g de fluido refrigerante tipo R600a em seu circuito fechado. Possui compressor modelo EM U60CLP, com tensão elétrica eficaz de alimentação de 220 V alternada e frequência nominal 60 Hz. As pressões de sucção e descarga do mesmo são 565 kPa e 1069 kPa (ou 5,65 bar e 10,69 bar), respectivamente.

Com relação às adaptações desenvolvidas, inspirada nos trabalhos de Knabben (2010), Bansal et al (2010) e Özkan et al (2012), para que se pudesse observar o processo de formação da geada sobre o evaporador e permitir aquisição de imagens, cortou-se uma janela no refrigerador.

Uma abertura retangular de (20 cm x 30 cm) foi feita na parte superior traseira, na altura do evaporador. Retirou-se papel, isolamento térmico de poliuretano e plásticos que constituem a estrutura do refrigerador. Internamente, presa ao evaporador, encontra-se uma chapa metálica de pequena espessura que foi substituída por material acrílico transparente com espessura de 4 mm. As etapas de transformação da abertura descritas podem ser acompanhadas na figura 18, na qual a ordem alfabética respeita a ordem cronológica das modificações.

Alguns fios do refrigerador precisaram ser interrompidos, prolongados e conectados novamente passando ao redor da janela, pois originalmente localizavam-se em frente à abertura. A janela foi revestida em suas laterais por chapas de acrílico e o acabamento foi feito com plástico autoadesivo branco.

Na configuração original do refrigerador há um duto que direciona o ar provindo do refrigerador para a parte inferior do evaporador, que foi removido junto com a estrutura. Este anteparo foi reconstruído em material plástico transparente com mesmo formato e dimensões e posicionado novamente em seu local.

Figura 18 - Etapas de abertura da janela no refrigerador



**Legenda:** a) etapa 1: retirada do papel externo;  
 b) etapa 2: janela sem isolante térmico;  
 c) etapa 3: abertura sem plástico de separação  
 d) etapa 4: retirada da chapa metálica;

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Para fechar a abertura, outra placa de material acrílico transparente foi selecionada, porém com 10 mm de espessura, aqui denominada “placa externa”. Esta chapa pode ser retirada quando necessário, sendo suportada por cantoneiras de metal e parafusos. Com intuito de melhorar o contato entre placa e refrigerador, e assim minimizar a transferência de calor pelas frestas, tiras de isolante térmico<sup>29</sup> foram coladas nas bordas da janela.

Com o refrigerador em operação, foi observado embaçamento das placas, dificultando a visualização da geada. Para impedir essa condensação, esferas de sílica gel foram adicionadas no compartimento entre as duas placas de acrílico. Não suficiente, um fio de constantan de pequeno diâmetro foi disposto ao redor da abertura, fixado em presilhas no acrílico e ligado a uma fonte de corrente, funcionando como resistor de aquecimento. Detalhes dessa adaptação estão expostos na figura 19.

<sup>29</sup> Utilizou-se manta de espuma elastomérica, emborrachada, indicada para temperatura na faixa de (-50 a +105) °C. Esse material é flexível, de fácil instalação e caracterizado por baixa condutividade térmica e elevada resistência à difusão do vapor de água.

Figura 19 - Janela de visualização



Legenda: Placa de acrílico interna;  
Esferas de sílica gel (abaixo);  
Fio de constantan (esquerda);  
Duto de direcionamento de ar (porção inferior direita);  
Fonte: Elaborada pela autora (2015).

O resultado das alterações é apresentado na figura 20.

Figura 20 - Visão geral da abertura traseira do refrigerador



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Outra pequena mudança necessária foi com relação à bandeja de coleta de água do degelo. Quando ocorre o degelo, a água escoas das superfícies do evaporador por canal interno à estrutura do refrigerador por gravidade, e goteja por uma abertura em borracha (bocal) na parte inferior traseira do produto.

A fim de que essa água fosse coletada facilmente, a bandeja originalmente posicionada sobre o compressor<sup>30</sup> foi removida e substituída por um recipiente plástico disposto diretamente no chão. O bocal de saída foi prolongado com uma mangueira flexível fixada ao novo recipiente. De maneira mais acessível, o recipiente pode ser retirado e a massa de água medida quando necessário. O resultado dessa alteração pode ser observado na figura 21.

Figura 21 - Resultado das alterações para coleta de água proveniente do degelo



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Analisando o sistema é possível perceber que não há outra fonte de líquido chegando nesse coletor de água. Dessa maneira, pode-se assumir que a massa de água disponível após o degelo corresponde à quantidade de geada

---

<sup>30</sup> O recipiente é encaixado em alguns pontos das conexões de sucção e descarga do compressor, em alguns sistemas é também colado a este, o que dificulta sua retirada.

depositada no evaporador.

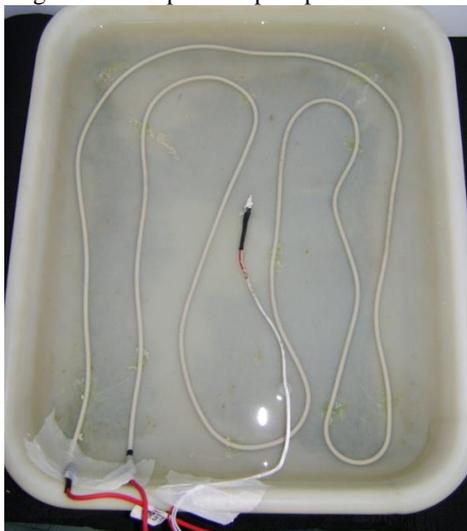
Existe, no entanto, a possibilidade da quantidade de água coletada ser menor que a de massa de geada depositada no evaporador, pois gotas podem permanecer na tubulação de escoamento. Para evitar essa diferença, após o processo de degelo, ar comprimido era inserido manualmente na tubulação, fazendo com que toda água fosse drenada ao recipiente.

### 3.2. PRODUÇÃO DE GEADA

Nos refrigeradores residenciais a geada que se deposita no evaporador provém do ambiente externo durante aberturas das portas, de infiltração nas gaxetas e principalmente dos alimentos nele depositados. Como essas fontes de umidade não se fazem presentes no refrigerador em estudo, desenvolveu-se sistema para prover umidade nos ensaios.

Tal feito foi conseguido por meio de água disposta no interior do refrigerador e mantida em estado líquido continuamente. Para tanto, utilizou-se recipiente plástico e, fixados em seu fundo, resistor elétrico e transdutor de temperatura (figura 22).

Figura 22 - Dispositivo para prover umidade



**Legenda:** recipiente com água;  
resistor;  
transdutor de temperatura;

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Esses dois elementos foram então conectados a um controlador simples do tipo PID (proporcional, integral e derivativo), marca EUROTHERM, modelo 2216.

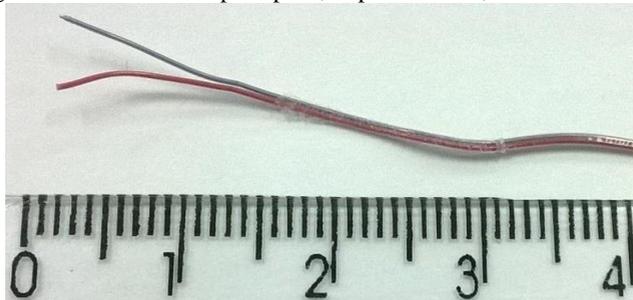
O controlador possui entrada para transdutores de temperatura tipo Pt100 e saída que foi conectada a um rele de estado sólido para acionamento do resistor elétrico. Selecionou-se temperatura máxima de 5 °C e mínima de 4 °C. Essa é uma faixa elevada o suficiente para que a água presente na bandeja não congelasse e, assim fornecesse umidade ao ambiente, porém baixa para que não configurasse carga térmica relevante ao refrigerador.

### 3.3. MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

Para as medições de temperatura foram selecionados termopares tipo T. Esses termopares são resistentes à corrosão e de baixo custo, sendo amplamente utilizados em diversos processos de medição de temperatura incluindo indústrias de refrigeração e criogenia, pois compreendem medições em ampla faixa de temperaturas negativas e positivas (IOPE, 2014).

O diâmetro do termopar foi escolhido sabendo que quanto menor for o diâmetro da bainha, mais rápida será sua resposta. Ainda, pela aplicação deste trabalho não possuir requisitos de temperatura elevada, o fio utilizado foi o número AWG 30<sup>31</sup>, do tipo sólido, com isolamento duplex de PFA<sup>32</sup>, do fabricante Omega. O conjunto tem tamanho nominal de (0,6 mm x 1,0 mm) e segue o padrão de cores ANSI (figura 23).

Figura 23 - Fio de termopar tipo T, duplex isolado, fabricante Omega



**Legenda:** Escala principal em centímetros.

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

<sup>31</sup> Unidade de medida usada para padronização de fios e cabos elétricos pela escala americana. O número 30 corresponde a 0,2546 mm de diâmetro.

<sup>32</sup> Sigla de “perfluoroalcoxialcano”. É um fluoropolímero com propriedades similares ao politetrafluoretileno (teflon), porém pode ser processado por fusão.

A partir do fio de termopar foram confeccionados 20 transdutores de 1 m de comprimento. O tipo da junta escolhida foi junção exposta ao ambiente. Esse modelo oferece tempo de resposta mais rápido, mas a sua utilização é limitada a aplicações não corrosivas e não pressurizadas (OMEGA, 2014a). As extremidades foram unidas pelo processo de brasagem.

Adotou-se a utilização de cabos de compensação para deixar os transdutores mais longos com menor custo. Para que não houvesse diferença entre a leitura dos termopares, as juntas de todos foram mantidas à mesma temperatura. Utilizou-se um bloco metálico de grande massa, em forma de tubo, proporcionando inércia térmica grande a fim de evitar gradiente entre elas. As junções foram unidas e dispostas todas à mesma distância das extremidades do tubo. Junto a elas instalou-se um dos termopares construídos, a fim de medir a temperatura das junções (ver figura 24).

Figura 24 - Junção dos termopares



**Legenda:** junção dos termopares;  
em detalhe: termopar de referência.

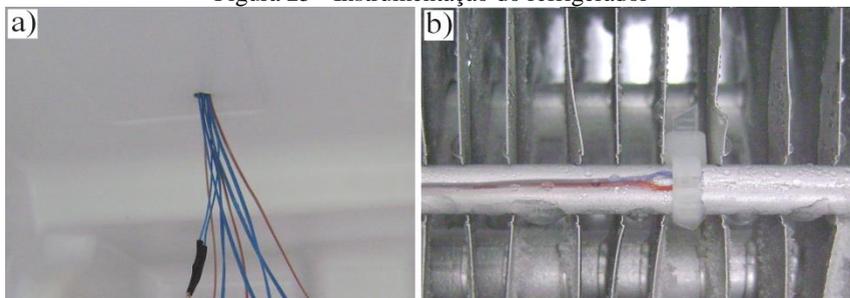
Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Outra razão pela qual um termopar foi inserido nesse local é o fato de não ser utilizada medição de temperatura no equipamento selecionado, e sim tensão. Apenas um canal, para o termopar, foi configurado para medição de temperatura, de forma a diminuir os erros referentes à compensação de temperatura feita internamente ao instrumento. Depois de prontos os termopares foram calibrados em banho termostático.

Para instrumentação, um furo de 6 mm foi aberto no topo do refrigerador a fim de que os termopares fossem inseridos no evaporador sem interferir no fechamento da porta. Depois de passados os termopares, o furo

foi preenchido com algodão para minimizar a transferência de calor. A fixação nos pontos escolhidos se deu com cintas plásticas, por serem práticas, de baixo custo e de fácil instalação, além de não sofrerem degradação com a umidade, fator presente no evaporador. A figura 25 ilustra o descrito.

Figura 25 - Instrumentação do refrigerador



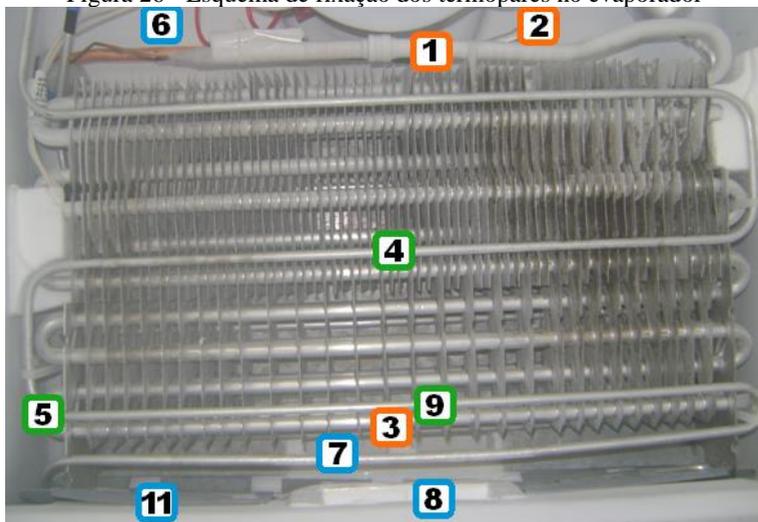
**Legenda:** a) Furo na parte superior do refrigerador para inserção dos termopares;

b) Detalhe da fixação de um termopar no resistor de degelo;

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Quanto à disposição no refrigerador, foram colocados três termopares no resistor de degelo, três na serpentina (tubo) do evaporador e outros 6 em posições diversas de entradas e saídas de ar. A figura 26 esquematiza o posicionamento dos termopares no evaporador.

Figura 26 - Esquema de fixação dos termopares no evaporador



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Número, posição e localização dos termopares estão detalhados no quadro 3.

Quadro 3 - Nomenclatura dos termopares: número, local e posição de fixação.

Número	Local	Cor	Posição
1 (T <sub>1</sub> )	Tubo	Alaranjado	Entrada do fluido no evaporador
2 (T <sub>2</sub> )	Tubo	Alaranjado	Saída do fluido do evaporador
3 (T <sub>3</sub> )	Tubo	Alaranjado	Porção inferior, parte central (meio)
4 (T <sub>4</sub> )	Resistor	Verde	Porção central, parte do meio
5 (T <sub>5</sub> )	Resistor	Verde	Porção inferior, parte lateral
6 (T <sub>6</sub> )	Ar (evap)	Azul	Saída evaporador para congelador
7 (T <sub>7</sub> )	Ar (evap)	Azul	Entrada refrigerador para evaporador
8 (T <sub>8</sub> )	Ar (evap)	Azul	Saída evaporador para refrigerador
9 (T <sub>9</sub> )	Resistor	Verde	Porção inferior, parte central
10 (T <sub>10</sub> )	Bloco metálico		Junção dos termopares
11 (T <sub>11</sub> )	Ar (evap)	Azul	Entrada congelador para evaporador
12 (T <sub>12</sub> )	Ar (refrig)	Azul	Centro do refrigerador
13 (T <sub>13</sub> )	Ar (refrig)	Azul	Porção inferior do refrigerador

Fonte: Elaborado pela autora (2015).

Além da instrumentação do evaporador, dois termopares foram posicionados no compartimento inferior do refrigerador. Os transdutores foram dispostos no meio geométrico do compartimento e na sua porção inferior. A fim de evitar flutuações, pequenos blocos metálicos foram presos às juntas para aumentar suas inércias térmicas.

Ressalta-se que a escolha dos locais de fixação dos termopares se deu com base na identificação das porções nas quais há maior formação de geada e em pontos onde se estimou que as informações de temperatura fossem mais relevantes.

### 3.4. MEDIÇÃO DE FLUXO DE CALOR

Com intuito de enriquecer a pesquisa, aliado a condições favoráveis de custo e disponibilidade do transdutor, selecionou-se para este trabalho um transdutor de fluxo de calor construído no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas - LMPT da UFSC.

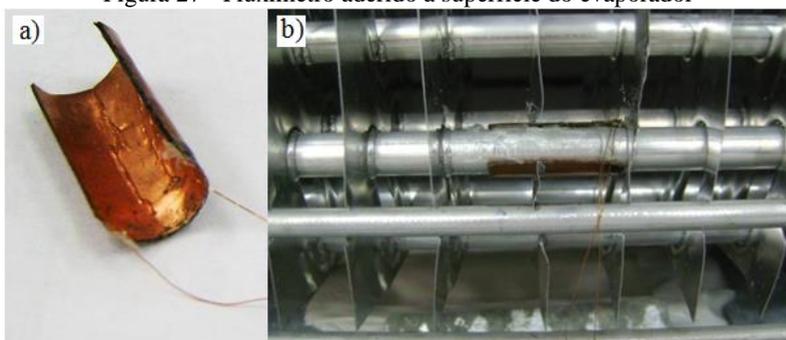
O transdutor tem formato quadrado de área 441 mm<sup>2</sup>, possui pequena espessura e boa sensibilidade. Foi moldado na forma cilíndrica de raio igual

ao tubo do evaporador, onde foi posteriormente aderido com auxílio de adesivo epóxi.

A disposição escolhida para colagem foi a parte central da fileira de tubos inferiores, localizando-se, portanto, próximo ao meio do evaporador. Essa posição compreende a porção onde há o maior fluxo de ar direto advindo do compartimento inferior, que é mais quente e úmido. Por isso, onde se espera ocorrer as maiores transferências de calor.

A figura 27 apresenta o fluxímetro e também o mostra aderido ao tubo do evaporador na porção escolhida para sua fixação.

Figura 27 - Fluxímetro aderido à superfície do evaporador



**Legenda:** a) Transdutor de fluxo de calor;

b) Transdutor já aderido à serpentina do evaporador.

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Para que a transferência de calor no transdutor não fosse prejudicada pelo contato, a resistência entre as superfícies do tubo e do fluxímetro foi minimizada preenchendo-se os interstícios com adesivo epóxi. A calibração desse transdutor foi feita *in loco*, como descrito na seção 2.7.1. Utilizou-se um resistor de 10  $\Omega$ , uma fonte de alimentação de tensão constante e um multímetro da marca Agilent, modelo 34401A. A equação da curva de calibração encontrada para o transdutor foi:

$$q'' = 25.V \quad (16)$$

Onde:

V é a tensão em [V].

$q''$  é o fluxo de calor [ $W/m^2$ ].

A partir do conhecimento do fluxo de calor trocado nessa porção do evaporador pode-se obter a resistência à transferência de calor como

mostrado na equação 6. Basta, para tanto, conhecer as temperaturas da superfície do tubo onde está aderido o transdutor e do ar nessa região.

### 3.5. OUTRAS MEDIÇÕES E CONTROLE DO SISTEMA

Após o degelo, a massa de água coletada era medida e relacionada à quantidade de geada depositada no evaporador. Para as medições de massa utilizou-se balança digital da marca Neutral, modelo HD-NPD, cuja capacidade máxima é de 1000 g e erro máximo de 0,1 g.

Foi necessário um sistema de aquisição de sinais para um total de 13 medições de tensão (12 termopares tipo T e o fluxímetro) e uma de temperatura: termopar tipo T.

Pela facilidade e experiência de uso, disponibilidade de equipamento e características metrológicas adequadas à aplicação, o multímetro modelo 34972A da marca Agilent foi selecionado juntamente com o módulo 34901A, tipo multiplexador.

Quanto à leitura do termopar da junta de compensação, por ser a referência, esse termopar deve se aproximar ao máximo do sensor interno que fornece a temperatura de referência do multímetro. Isso para que não haja gradiente de temperatura entre o canal e o sensor, internamente ao módulo. A folha de dados do equipamento mostrou que o local mais adequado para instalação desse termopar é o canal 10. Portanto o canal 10 foi destinado à leitura direta de temperatura.

Para controle dos componentes do refrigerador de forma independente, uma placa de circuito impresso foi desenvolvida e fabricada. Através dela foi possível ligar/desligar individualmente compressor, ventilador e resistor de degelo. Para acionamento da placa utilizou-se um módulo ADAM 6018<sup>33</sup>, do Fabricante Advantech, com comunicação baseada em Ethernet.

Por fim, um programa em LabVIEW, *software* de linguagem gráfica, foi desenvolvido. Sendo próprio para esse tipo de aplicação, através dele foi possível acompanhar, em tempo real, as variações de temperatura. Ao usuário eram apresentadas diretamente as informações desejadas em um computador. Os dados adquiridos foram organizados em tabela e salvos com documentação de data e hora de aquisição.

---

<sup>33</sup> Fornece entradas e saídas digitais, faz aquisição de dados e os transmite em rede, entre de outras características. Neste trabalho foi empregado apenas como equipamento de controle e não dispositivo DAQ. Necessita alimentação.

### 3.6. AVALIAÇÃO DA BANCADA

Apesar das diversas adaptações no produto, as características de escoamento de ar e transferência de calor do refrigerador foram mantidas bastante próximas às originais. Portanto, considerou-se que as alterações não interferiram nas características originais do refrigerador.

A respeito do sistema provedor de umidade, para o desenvolvimento dos testes foi necessário que o depósito de geada fosse contínuo ao longo do tempo. Sendo assim, o sistema desenvolvido supriu as necessidades de maneira satisfatória, ainda com a qualidade de não impor carga térmica relevante ao sistema.

A alteração do recipiente de coleta de água do degelo não alterou fundamentalmente o funcionamento normal do refrigerador. Bem como a mudança não impediu o escoamento normal do fluxo de água.

As diversas necessidades apresentadas pelo estudo no quesito medições de grandezas na bancada foram supridas pelos instrumentos selecionados de maneira satisfatória. Preferiu-se emprego de equipamentos disponíveis no laboratório e cuja familiaridade era de domínio do mesmo. Dessa maneira, foi possível evitar custo de aquisições significativo, bem como minimizar os tempos demandados para instalação e solução de problemas. Do ponto de vista metrológico, os equipamentos selecionados tiveram bom desempenho, sendo compatíveis com as necessidades do projeto.

A integração dos equipamentos correu sem complicações. O controle dos elementos do refrigerador de forma individual, de maneira simples e através de computador foi proporcionado por uma placa de circuito impresso.

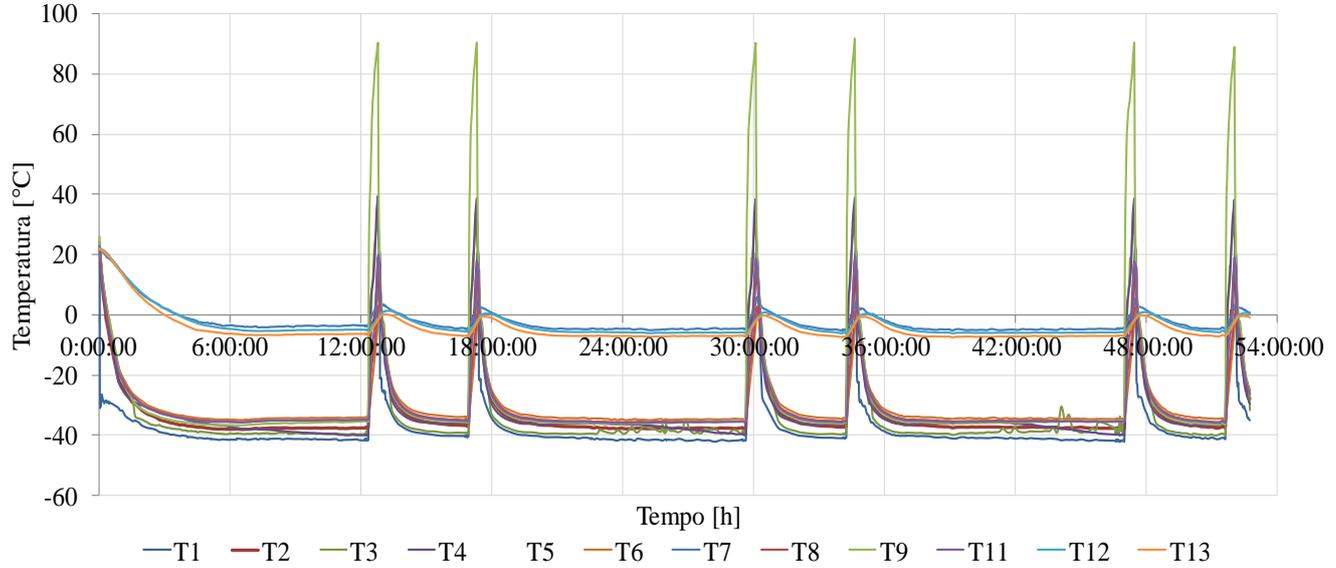
Ademais, o programa em *software* LabVIEW permitiu visualização das grandezas medidas em tempo real, além do registro fiel dos dados.

#### 3.6.1. Funcionamento normal do refrigerador

Antes de ensaios específicos no refrigerador, desejou-se conhecer seu funcionamento sob condições normais de operação. Para tanto, o produto foi posto em operação por pouco mais de dois dias e as temperaturas foram monitoradas.

Nesse ensaio, nenhum parâmetro foi alterado, de modo que ele operou normalmente como nas residências, com a particularidade de que suas portas não foram abertas. Ressalta-se que nenhuma carga térmica foi inserida no sistema neste ensaio. As curvas encontradas estão representadas na figura 28, lembrando que as posições dos termopares foram indicadas na figura 26.

Figura 28 - Evolução das temperaturas do evaporador com refrigerador funcionando por 54 h em condição normal de operação



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

No gráfico apresentado, os seis picos de temperatura são os degelos, onde compressor e ventilador permaneceram desligados e o resistor foi acionado automaticamente pelo sistema. Observa-se que as temperaturas no evaporador aumentam rapidamente e atingem valores bastante altos.

Como esperado, as temperaturas que mais se elevam são as medidas no próprio resistor de degelo, em ordem decrescente: T9, T5 e T4. Seguidas das temperaturas medidas na serpentina e no ar. As três curvas que se mantêm segregadas das demais, com temperaturas superiores na maior parte do funcionamento, são as duas temperaturas do ar medidas no interior do refrigerador e a temperatura do ar na entrada do evaporador provinda do refrigerador. É possível notar que também essas temperaturas se elevam durante os períodos de degelo, retornando a valores menores posteriormente.

A partir do início do funcionamento, assim como após os degelos, as diversas temperaturas atingem valores negativos rapidamente, e se estabilizam em patamares, onde permanecem durante toda a operação.

Em relação ao processo de degelo, a partir do acionamento do refrigerador, o primeiro degelo acontece em 12 h de funcionamento, tem duração de 20 min e massa de água coletada média de 85 g. O segundo ocorre 4 h após e tem a mesma duração, derretendo em média 25 g de geada. Os intervalos e durações observados se repetem alternadamente até o fim da avaliação como esquematiza a figura 29.

Figura 29 - Esquema de degelo em funcionamento normal do refrigerador: intervalos e massas de água coletadas



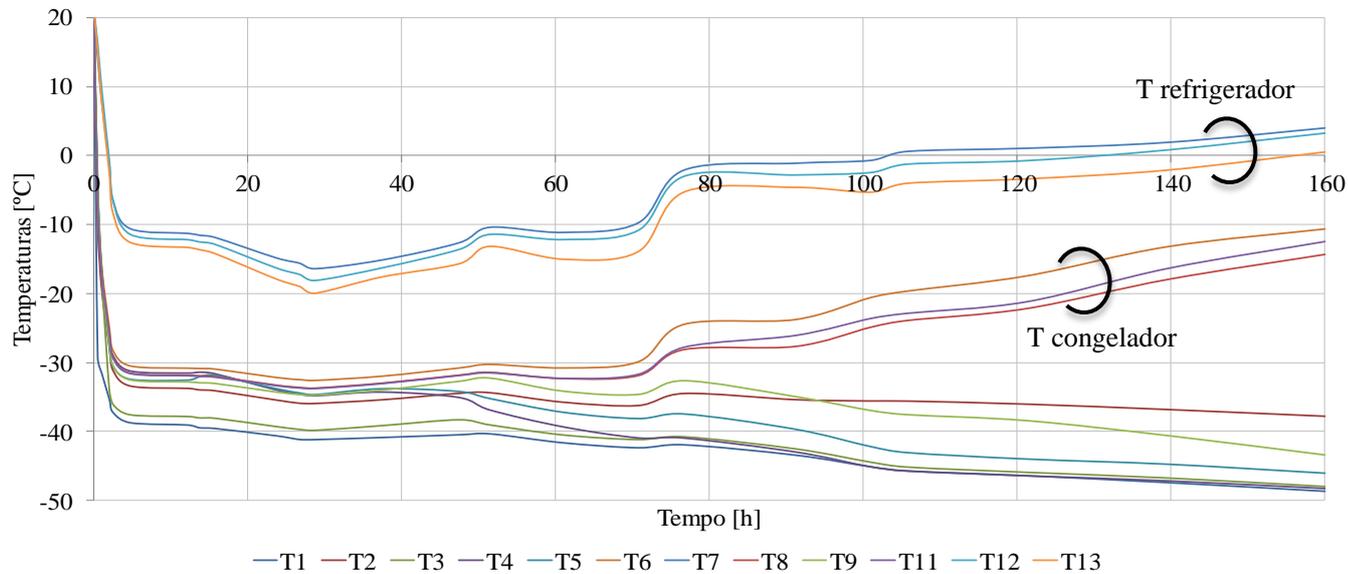
Fonte: Elaborada pela autora (2015).

### 3.6.2. Operação sem ocorrência de degelo

Com intuito de verificar o comportamento do refrigerador sem a ocorrência de degelos, algumas horas de funcionamento do refrigerador foram monitoradas desde o momento em que ele foi acionado.

Nesse experimento o refrigerador não foi controlado pelo seu sistema. Através do novo controle, compressor e ventilador foram mantidos ligados e resistor de degelo não foi acionado. Esse ensaio foi repetido três vezes. Um resultado típico obtido é apresentado na figura 30.

Figura 30 - Comportamento do refrigerador em 160 h sem ocorrência de degelo



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Nota-se, através do apresentado, que algumas temperaturas continuam diminuindo durante todo experimento. Tal fato ocorre para as temperaturas da serpentina (fluido) e próximas a ela, pois o compressor não é desligado, funcionando de modo ininterrupto. Aqui também se observa a segregação das três temperaturas do ar com relação às demais.

Através desse ensaio evidencia-se a influência prejudicial da geada no refrigerador. A partir de 30 h de funcionamento, aproximadamente, algumas temperaturas começam a se elevar. São as temperaturas medidas no compartimento do refrigerador (ar) e da entrada do ar no evaporador provindo do refrigerador. O comportamento é decorrente do bloqueio do evaporador, e, conseqüentemente, do escoamento de ar, e, também pelo efeito isolante da camada de geada, que impede a troca de calor do fluido com o ar.

É possível observar que em 5 h de funcionamento as temperaturas do refrigerador chegam ao patamar estável de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , valor de operação já observado anteriormente, e permanecem nele por aproximadamente 60 h. Pode-se dizer que esse patamar caracteriza a operação em regime permanente do refrigerador na condição normal de operação.

A evolução da camada de geada no evaporador foi documentada em imagens durante as primeiras quatro horas de funcionamento do refrigerador deste experimento. Registraram-se as condições do evaporador no tempo inicial (figura 31), após 1 h (figura 32), 2 h (figura 33) e 4h (figura 34) de funcionamento.

Figura 31 - Condição inicial do evaporador ( $t = 0$ )



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 32 - Condição do evaporador após 1 h de funcionamento



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 33 - Condição do evaporador após 2 h de funcionamento



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 34 - Condição do evaporador após 4 h de funcionamento



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

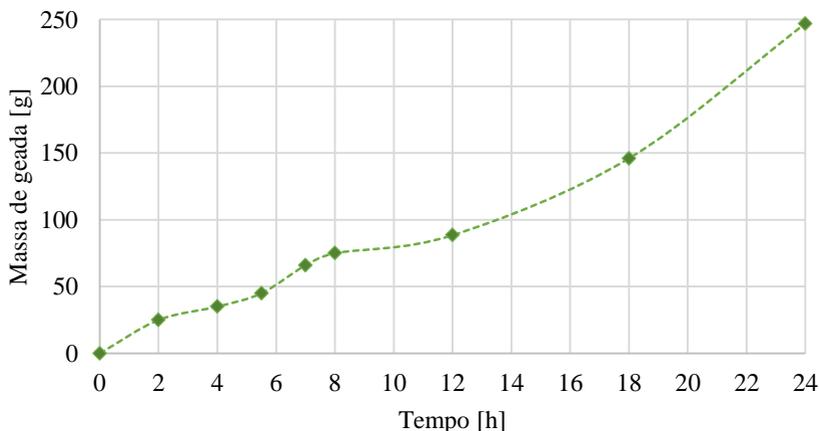
Nas imagens registradas é notório o formato com que a geada se deposita no trocador. Como previsto na literatura, as maiores quantidades dessa formação encontram-se na parte central e inferior do evaporador. Nessa porção há incidência direta do ar provindo do refrigerador por meio do dispositivo transparente na parte inferior das imagens. A causa principal do depósito reside no fato desse ar que atinge o evaporador possuir umidade relativa elevada. Ao ser resfriado o ar perde umidade, já que o vapor de água se deposita na superfície dos tubos.

Já na primeira hora de funcionamento do refrigerador é possível notar a formação de geada, porém ela está restrita à porção central. Durante as horas seguintes o acúmulo aumenta e se forma também nas demais regiões. Em 4 h todas as superfícies do evaporador já estão cobertas e a parte central já apresenta bloqueio parcial da área de escoamento do ar. A massa de água resultante do degelo nesses ensaios foi, em média, 800 g.

### 3.6.3. Acúmulo de geada

A partir dos ensaios desenvolvidos foi possível levantar uma curva de crescimento de geada no evaporador no decorrer do período de funcionamento do refrigerador. A curva experimental, ilustrada na figura 35, é apenas uma estimativa da geada que se forma em todo trocador durante 24 h de funcionamento sem ocorrência de degelo.

Figura 35 - Massa de geada acumulada no evaporador em 24 h



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Observando-se o gráfico apresentado é possível notar tendência linear de crescimento da geada sobre o evaporador. Ainda, observa-se que esse aumento apresenta inclinação aproximadamente constante ao longo de todo tempo de funcionamento do refrigerador.

O progresso de geada sobre o evaporador foi tomado sobre todas as superfícies do mesmo. No entanto, dividindo-se o evaporador em duas regiões e considerando-se dois momentos de ensaio tem-se:

- nas primeiras horas de funcionamento a maior formação de geada se dá nas fileiras inferiores da serpentina e na porção central do trocador. Enquanto ao final do ensaio o acréscimo de massa nessa região é praticamente nulo;
- o inverso acontece nas porções laterais do evaporador e nas fileiras superiores da serpentina: o crescimento é praticamente irrelevante no início do ensaio, e o maior acúmulo ocorre ao final desse.

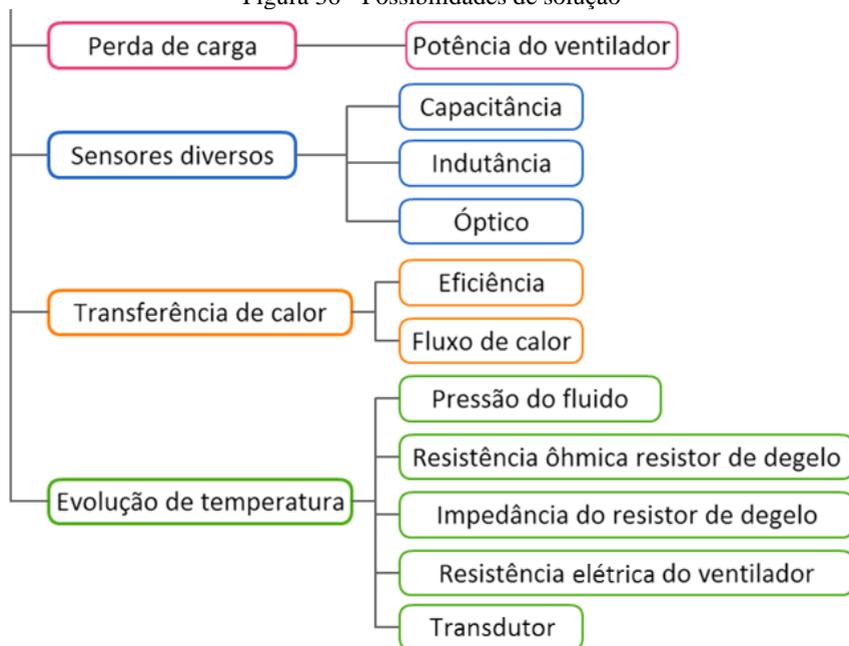
A soma dos acréscimos nessas regiões gera a curva mostrada acima, na figura 35, na qual as peculiaridades descritas não podem ser vistas.

#### 4. FUNDAMENTAÇÃO E ANÁLISE DE SOLUÇÕES

Este capítulo detalha os métodos pesquisados que apresentam potencial para detecção de geada em evaporadores e suas avaliações teórico-experimentais. A busca se baseou nos elementos presentes no refrigerador, em especial no evaporador, e na influência que a geada causa nas propriedades desses componentes. Investigaram-se grandezas físicas que sofrem variações em decorrência da variação de temperatura imposta pela geada, bem como a própria temperatura.

As possibilidades foram divididas em quatro grandes grupos: baseadas em perda de carga, sensores, transferência de calor e evolução de temperaturas, como ilustra a figura 36. Na sequência são detalhadas cada uma das alternativas bem como as verificações experimentais desenvolvidas.

Figura 36 - Possibilidades de solução



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

#### 4.1. PERDA DE CARGA NO ESCOAMENTO ATRAVÉS DA POTÊNCIA DO VENTILADOR

Por se tratar de um sistema real, irreversibilidades ocorrem por todo circuito de refrigeração, sendo algumas delas relacionadas à presença de geada no evaporador. Esse acúmulo nas serpentinas aumenta gradativamente a perda de carga no escoamento de ar sobre o evaporador. Uma maneira de perceber a perda de carga nesse escoamento é através da potência do ventilador que induz a circulação no refrigerador.

Motores monofásicos e trifásicos de corrente alternada de vários modelos são empregados na indústria frigorífica como acionadores de compressores, bombas e ventiladores (DOSSAT, 2004). O refrigerador em estudo apresenta ventilador com motor de corrente alternada (CA) do tipo monofásico e assíncrono (ou de indução). Quanto ao tipo de rotor esse motor é conhecido como gaiola de esquilo.

Os motores de indução são as máquinas elétricas de maior aplicação na indústria, pois conciliam robustez, grande versatilidade de aplicação, exigem pouca manutenção, são de baixo custo, melhores rendimentos, não poluentes e alimentados com energia elétrica (KCEL, 2014). Esse motor se caracteriza por somente o estator estar ligado à rede e pelas correntes que circulam no rotor serem induzidas pelo estator.

A potência elétrica média do ventilador ( $P$ ) é dada por:

$$P = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \cos\phi \quad (17)$$

Onde:

$V_{\text{rms}}$  é a tensão eficaz [V].

$I_{\text{rms}}$  a corrente elétrica eficaz [A].

$\cos\phi$  é o fator de potência.

Segundo informações do fabricante, o ventilador em estudo apresenta potência nominal de  $(4,0 \pm 0,6)$  W e é alimentado com tensão de 220 V (WHIRLPOOL, 2009).

A potência elétrica fornecida ao ventilador é convertida pelo motor em potência mecânica, porém com perdas. O giro das pás converte então a potência mecânica em potência hidráulica elevando a pressão do fluido. Nessa conversão também há perdas, nesse caso referentes aos efeitos viscosos, por desvios do escoamento uniforme e por desvios da direção do escoamento em relação ao ângulo das pás.

De maneira simplificada, pode-se entender potência hidráulica ( $P_{\text{hid}}$ ) como a variação de pressão que o ventilador causa no fluido que o percorre,

podendo ser escrita pela equação (35):

$$P_{hid} = \forall \Delta p \quad (18)$$

Onde:

$\Delta p$  é a variação de pressão [Pa].

$\forall$  a vazão volumétrica do fluido [ $m^3/s$ ].

No evaporador, o depósito de geada causa gradual estreitamento da área de passagem de ar até que esse acúmulo bloqueie totalmente o fluxo caso não ocorra degelo. O aumento na quantidade de geada depositada se refletirá em aumento na perda de carga e conseqüente redução da vazão.

Sabendo que vazão volumétrica é a quantidade de volume de fluido que atravessa determinada seção (área) por um período de tempo, é fácil observar que a potência está relacionada à área. Pela redução da vazão volumétrica do fluido, também a potência do ventilador será reduzida de maneira correspondente, de acordo com a curva característica do ventilador.

Dessa maneira, propõe-se estimar a quantidade de geada presente no evaporador através da medição de potência do ventilador. Espera-se que maiores quantidades se relacionem com menores potências de maneira que uma correlação entre as variações seja possível para inferência do nível de geada depositado.

A fim de analisar a proposta fez-se necessária investigação da variação de potência elétrica do ventilador. O ventilador presente no refrigerador é alimentado com tensão 220 V em corrente alternada e possui resistência de 830  $\Omega$ . Com o objetivo de medir sua potência, conhecer a corrente consumida em funcionamento é fundamental. Para tanto, selecionou-se o osciloscópio Tektronix TDS10028.

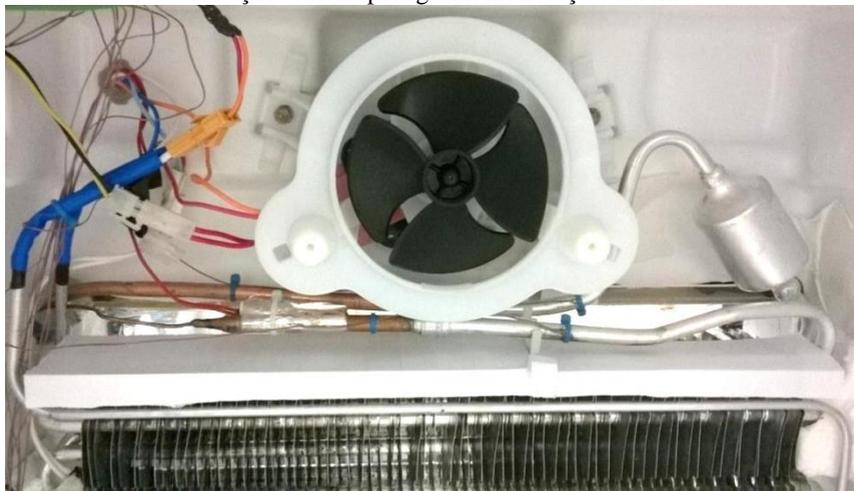
Normas de ensaios de ventiladores sugerem que eles sejam testados partindo da vazão zero (condição de bloqueio) até a condição de descarga máxima. Somente as duas condições extremas foram ensaiadas: ventilador travado (manualmente) e girando em condição livre, porém não houve variação de corrente detectável entre as duas situações com o sistema de medição utilizado.

Diante da não variação observada, um multímetro Agilent de 6 ½ dígitos foi então utilizado e novamente as situações extremas foram medidas. Nessa ocasião variação de 2 mA foi observada entre as condições (de 28 mA para 30 mA). Além das correntes medidas apresentarem valores baixos, a alteração identificada também foi bastante baixa.

Por fim, último teste foi executado. Com o ventilador em sua posição de trabalho mediu-se a corrente em situação livre, simulando quando não há

deposito de geada, e também em situação onde haveria obstrução total do escoamento de ar ocasionado pela geada. Essa situação foi conseguida dispondo-se folhas de papel sobre o evaporador, impedindo que o ar chegasse ao ventilador (figura 37).

Figura 37 - Bloqueio do escoamento de ar sobre o evaporador simulando a obstrução causada pela geada em situação extrema



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

A variação da corrente foi de aproximadamente  $60 \mu\text{A}$ , ou de maneira relativa: 0,2%, supondo obstrução total. O experimento torna a proposta de relacionar a quantidade de geada depositada através da medição de variação da potência do ventilador impraticável.

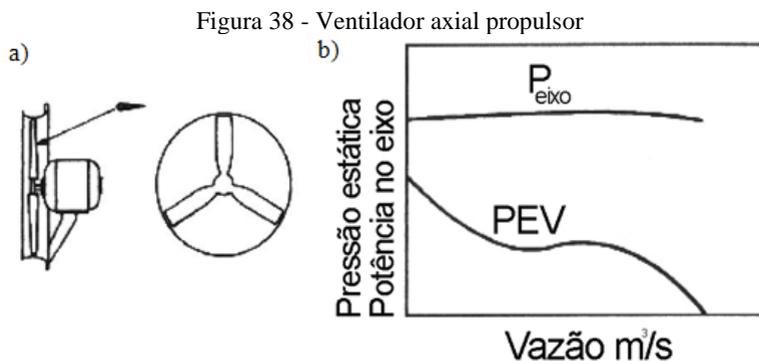
Na tentativa de explicar a pequena variação observada, encontrou-se que o motor do ventilador é do tipo polos sombreados, também denominado campo distorcido, ou ainda *shaded pole*. Esse motor se destaca pelo método de partida ser simples e econômico. Algumas características desse modelo, segundo Kcel (2014), são:

- baixo conjugado de partida: 15% a 50% do nominal;
- baixo rendimento: 35%;
- baixo fator de potência: 0,45.

Por suas características, esses motores são fabricados, em geral, apenas para pequenas potências, tais como projetor de *slides* e secadores de cabelo. Com relação ao experimento, a baixa potência nominal apresentada

pelo motor resultam em correntes bastante pequenas.

Outro fator que pode justificar a pequena variação medida está relacionado ao modelo do ventilador. Ventiladores axiais apresentam curva de potência *versus* vazão volumétrica bastante plana, como ilustra a figura 38, retirada de Clezar e Nogueira (1999). De modo que grandes variações de vazão não provocam variações de potência significativas.



**Legenda:** a) Vista lateral e frontal;  
b) Curva característica.

Fonte: Adaptada de Clezar e Nogueira (1999).

## 4.2. SENSORES DIVERSOS

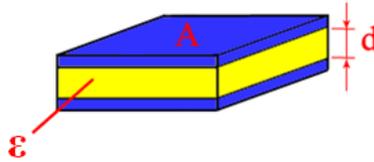
Diversos conceitos de transdutores para inferência da geada já foram explorados na literatura, como disposto na seção 2.3.2. A maioria com enfoque em outras áreas, como aviação e meteorologia.

Com base nos princípios de funcionamento de sensores capacitivos, indutivos e ópticos, avaliou-se o comportamento de sensores simples, de fácil acesso e baixo custo, na identificação da quantidade de geada presente em evaporadores.

### 4.2.1. Capacitivo

Sensores capacitivos são aplicados em medição de fluxo, pressão, nível de líquidos, espaçamento, espessura e até de gelo em aviões. Seu princípio de funcionamento está baseado na variação de capacitância que uma grandeza, ou a variação desta, causa no sensor. Um capacitor pode ser formado por duas placas planas e um meio dielétrico entre elas (ver figura 39) sendo a capacitância dada pela equação 19:

Figura 39 - Ilustração de um capacitor de placas planas



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} \quad (19)$$

Onde

$\varepsilon$  é a permissividade do meio entre as placas [F/m].

A é a área das placas [m<sup>2</sup>].

d é a distância entre as placas [m].

Analisando a expressão observa-se que a capacitância será maior quanto: maior for a área das placas, menor for a distância entre elas e maior for a constante dielétrica do meio que as separa. Para a medição de capacitância pode-se utilizar circuitos osciladores ou circuitos em ponte reativos.

Estando o sensor no compartimento do evaporador, inicialmente haverá ar entre as placas, mas com o funcionamento do evaporador, gradualmente geada se formará nesse espaço. Desse modo, a constante dielétrica do meio será alterada, sendo percebida através da medição de capacitância.

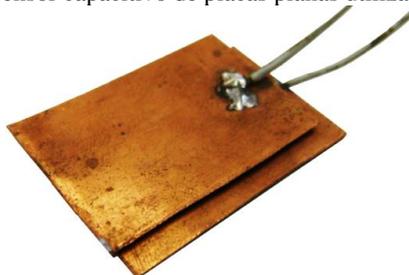
Como lembra Chuvienco (1995), de maneira geral, os materiais secos oferecem uma constante dielétrica (relativa ao vácuo) entre 3 e 8, enquanto a água possui um valor de 80. Valores aproximados de constante dielétrica à temperatura ambiente para formações que podem acontecer no evaporador são (HAYT JR; BUCK, 2013):

- ar: 1,0005;
- neve (propriedades próximas as da geada): 3,3;
- gelo: 4,2.

Sensores capacitivos já existem para monitoramento de gelo em estradas, por exemplo. Porém, para analisar a aplicação do conceito com sensor de baixo custo, duas placas de cobre de área próxima a 14 cm<sup>2</sup> foram utilizadas. Em seus corpos foram brasados fios, e estes foram ligados a um

multímetro utilizado para medição da capacitância. A figura 40 ilustra o sensor descrito.

Figura 40 - Sensor capacitivo de placas planas utilizado no ensaio



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

A capacitância do sensor foi inicialmente medida apenas com ar entre as placas, e, posteriormente, inseriu-se entre elas fina película de água e também formação de gelo, e a medição foi repetida para as duas condições. Os ensaios representam as duas situações extremas, com intuito de avaliar a sensibilidade do sensor.

Valores da ordem de 0,28 nF foram obtidos, porém não se detectou, com o instrumento de medição utilizado (AGILENT 34401A, de 6½ dígitos) variação dessa grandeza pela mudança do meio entre as placas. Tal resultado invalida o sensor para a aplicação proposta, pois a variação ocasionada exigiria instrumento de medição com melhores características metrológicas, o que aumentaria o custo, ou então placas de área maior, que poderia então influenciar no desempenho do trocador quando instaladas.

Pesquisa na literatura mostrou que a constante dielétrica da neve (formação semelhante à geada), pode se alterar com a densidade, temperatura, forma do cristal de gelo entre outras propriedades físicas (STILES; ULABY, 1981). Esses são fatores que podem dificultar a determinação da capacitância em aplicações que apresentam variações nessas grandezas.

#### 4.2.2. Indutivo

O princípio dos transdutores indutivos é a variação da indutância em uma bobina. Sendo esta um fio condutor qualquer em forma espiral, a indutância é dada por:

$$B = \frac{\mu N^2 A_T}{L} \quad (20)$$

Onde

$\mu$  é a permeabilidade do material no interior do solenoide [H/m].

N o número de espiras.

$A_T$  é a área da seção transversal [m<sup>2</sup>].

l o comprimento [m].

Instalando-se um solenoide no interior do evaporador, o acúmulo de geada fará com que no seu interior (antes com ar), passe a conter também geada. A alteração trará mudança nas propriedades do meio, entre elas a permeabilidade magnética e, portanto, na indutância. Assim, através da medição da indutância identifica-se a quantidade de geada depositada. Esta também pode ser medida através de circuito em ponte reativa.

A fim de avaliar o comportamento, um sensor indutivo foi construído. Este sensor consiste de um fio condutor em forma de bobina de aproximadamente 7 mm de diâmetro. A bobina é feita pelo enrolamento de fio de cobre de 1 mm de diâmetro em 25 espiras. A figura 41 apresenta o indutor.

Figura 41 - Sensor indutivo testado



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Duas situações foram medidas com esse sensor: somente ar em seu interior e também com gelo em seu núcleo. Obteve-se o valor de 1,35 H para as duas medições, ou seja, não houve detecção de variação com o instrumento de medição empregado. Como medidor da indutância foi utilizado um multímetro marca Agilent modelo 34401A.

A permeabilidade magnética do ar é semelhante a do vácuo, de  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m, enquanto a da água, relativa ao vácuo, é de 0,999991 H/m (GRIFFITHS, 1999). Ou seja, a diferença entre a permeabilidade desses meios é bastante pequena. Valores numéricos para gelo e geada não foram obtidos na pesquisa, porém, por serem constituídos de combinação desses

materiais, presume-se estarem dentro da faixa de valores da água e do ar. Os resultados obtidos tornam o sensor testado inviável para a aplicação desejada.

### 4.2.3. Óptico

Sensores ópticos são amplamente utilizados na automação industrial, controle de processos e em diversos aparelhos eletrônicos se uso doméstico. A larga aplicação se deve ao fato de serem sistemas de detecção remota, transmitindo informação elétrica entre dois circuitos sem contato elétrico.

O princípio de funcionamento é baseado na emissão de um feixe gerado por um dispositivo (emissor) e captação desse sinal por outro dispositivo (receptor). Um objeto no caminho do feixe permite, ou impede, o sinal enviado de chegar ao receptor. Nos dispositivos mais comuns, o emissor consiste em um LED infravermelho e o dispositivo receptor um fototransistor.

O sensor óptico testado é um fotoacoplador com emissor e receptor posicionados um frente ao outro em um mesmo invólucro, conforme mostrado na figura 42. A radiação emitida localiza-se na região do espectro infravermelho, com pico no comprimento de onda 930 nm. O receptor é um fototransistor que dista 10 mm do receptor.

Através de circuito elétrico apropriado, o sensor apresentou sinal de saída de 5 V para a condição livre, sem obstrução da radiação, e de aproximadamente 0,16 V quando foi totalmente bloqueado por uma superfície opaca.

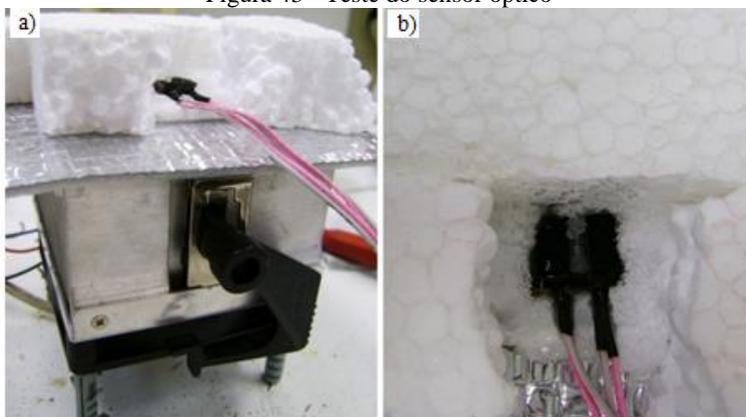
Figura 42 - Sensor óptico testado



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

O sensor foi disposto sobre a superfície de um pequeno sistema de refrigeração por efeito Peltier conforme ilustra a figura 43.

Figura 43 - Teste do sensor óptico



**Legenda:** a) Sistema de refrigeração por efeito Peltier e sensor testado;  
b) Detalhe da formação de gelo no sensor;

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

O sinal foi medido em duas situações: com sensor bloqueado pela formação de gelo e geada e com o sensor livre. Ambas as situações apresentaram a mesma indicação, com valor residindo em torno de 0,157 V.

Pela configuração do sensor (receptor frente ao emissor), a transmissividade do material é a propriedade que governa a porcentagem do sinal emitido que atinge o receptor. Portanto, através do experimento observa-se que no comprimento de onda do sensor a transmissividade da formação é elevada o suficiente para não causar variação na indicação.

Na busca de informações, pesquisa na literatura foi desenvolvida, porém valores para as propriedades ópticas da geada não foram encontrados. Para análise primária, dados da neve foram utilizados, pois as características são relativamente semelhantes.

Diversos parâmetros influenciam nas propriedades ópticas da neve, tais como densidade, tamanho e forma dos grãos, impurezas presentes e quantidade de água dissolvida internamente. Para a região espectral do infravermelho próximo, na qual o sensor testado se insere, o tamanho dos grãos é a propriedade que mais influencia na transmissividade desse material (MATZL; SCHNEEBELI, 2006).

A partir de dados de PEROVICH (2007)<sup>34</sup>, para comprimentos de onda próximos a 800 nm é possível estimar que uma camada de neve de 5 mm transmite mais de 85% da energia incidente sobre ela. Em vista disso,

<sup>34</sup> Condições da amostra: massa específica de 120 kg/m<sup>3</sup>, formato de grão esférico e diâmetro de grão na faixa de (0,25 a 0,50) mm.

supondo-se as propriedades da geada presente no evaporador próximas às pesquisadas, o sensor empregado não é capaz de detectar formação nessas faixas.

#### 4.3. DETECÇÃO DE GEADA PELA ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO EVAPORADOR

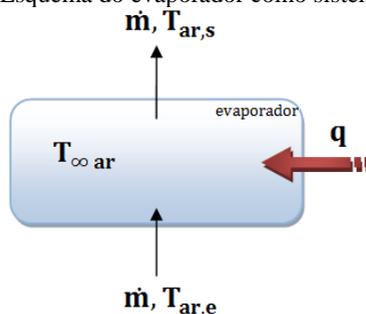
Por ser um trocador de calor, uma possibilidade apontada como alternativa de solução consiste em avaliar a transferência de calor nesse meio. Duas formas foram suscitadas: através da determinação da eficiência do trocador e também através do fluxo de calor medido na superfície da serpentina.

##### 4.3.1. Eficiência do trocador

A consequência do depósito de geada na serpentina do evaporador é a perda de eficiência do sistema. O desempenho de um trocador de calor é essencialmente uma relação entre a taxa de transferência de calor e grandezas como as temperaturas de entrada e de saída dos fluidos, o coeficiente global de transferência de calor e a área de superfície total disponível para troca (INCROPERA et al, 2008).

Uma das formas de cálculo da eficiência é considerar o evaporador um sistema, como mostra a figura 44, e avaliar a diferença entre as temperaturas de entrada e de saída do ar que escoa sobre a serpentina.

Figura 44 - Esquema do evaporador como sistema de análise



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Ao se considerar:

- sistema fechado: vazão mássica de entrada é igual a de saída ( $\dot{m}$ );

- processo contínuo;
- em regime permanente.

Pode-se aplicar a equação da conservação da energia no sistema e obter, para o lado do ar:

$$q = \dot{m}(h_{ar,e} - h_{ar,s}) \quad (21)$$

Onde:

$h_{ar,e}$  é a entalpia do ar na entrada do evaporador [J].

$h_{ar,s}$  é a entalpia do ar na saída do evaporador [J].

$\dot{m}$  é a vazão mássica do ar que escoar sobre o evaporador [kg/s].

Supondo-se ainda:

- pressão constante;
- propriedades do ar constantes;
- processo sem mudança de fase.

A equação 36 pode ser alterada para:

$$q = \dot{m}c_p(T_{ar,e} - T_{ar,s}) \quad (22)$$

Onde:

$c_p$  é o calor específico do ar dado à pressão constante [J/kg°C].

$T_{ar,e}$  a temperatura do ar na entrada do evaporador [°C].

$T_{ar,s}$  a temperatura do ar na saída do evaporador [°C].

Ainda, como visto anteriormente, a troca de calor na serpentina pode ser representada por:

$$q = A \frac{T_{\infty ar} - T_{sup tubo}}{R_{total}} \quad (23)$$

Onde:

$T_{sup tubo}$  é a temperatura da superfície do tubo [°C].

$T_{\infty ar}$  é a temperatura do ar escoando [°C].

$A$  é a área de troca de calor [m<sup>2</sup>].

$R_{total}$  a resistência à troca de calor [m<sup>2</sup>K/W].

Por fim, ao se supor a temperatura do ar como a média das temperaturas de entrada e de saída desse ar no evaporador ( $T_{\infty \text{ ar}} = (T_{\text{ar,e}} + T_{\text{ar,s}})/2$ ) e a temperatura na superfície da serpentina constante ao longo de sua extensão, tem-se que o calor trocado no tubo é igual ao perdido pelo ar. Portanto, obtém-se para a resistência à troca de calor a equação:

$$R_{\text{total}} = \frac{A}{\dot{m}c_p} \frac{(T_{\text{ar,e}} + T_{\text{ar,s}})/2 - T_{\text{sup tubo}}}{T_{\text{ar,e}} - T_{\text{ar,s}}} \quad (24)$$

Desse modo, a resistência ao fluxo de calor imposta pela formação da geada é representada em função da diferença entre as temperaturas do ar na entrada e na saída do evaporador. A solução proposta então, para avaliar a quantidade de geada presente no evaporador, consiste em monitorar essa diferença entre as temperaturas.

Em uma situação sem depósito de geada, a variação será grande, pois a resistência é menor, de modo que troca de calor está sendo mais eficiente. À medida que a geada se acumula, a capacidade de troca de calor do sistema diminui, e a diferença entre as temperaturas do ar serão menores. Cabe salientar que a hipótese é válida somente se não ocorrer uma variação significativa da vazão mássica de ar, o que é verdadeiro para pequenos depósitos de geada.

Para avaliar essa possibilidade a temperatura do ar na entrada do evaporador ( $T_{\text{ar,e}}$ ) foi aproximada pelo valor da temperatura medida em T7, a de saída do ar ( $T_{\text{ar,s}}$ ) pela medida em T8. A temperatura do ar no evaporador ( $T_{\infty \text{ ar}}$ ) uma média entre estas duas. A temperatura na superfície do tubo ( $T_{\text{sup. tubo}}$ ) é a própria temperatura obtida em T3.

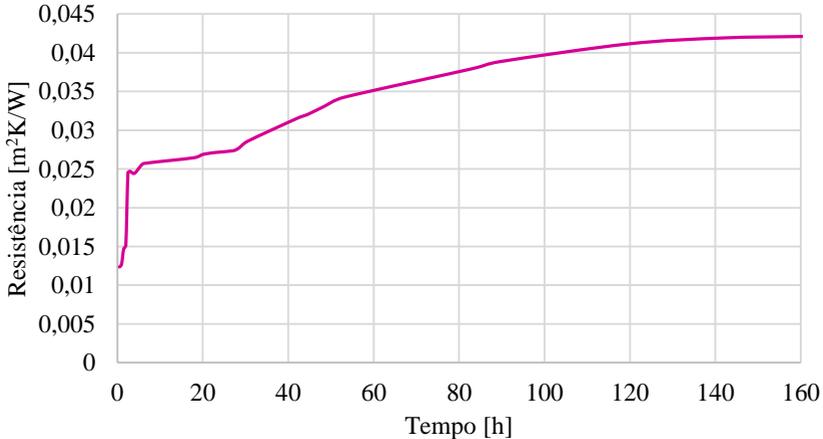
A área total da superfície de troca de calor é aproximada pela consideração das aletas individuais e com mesma temperatura da superfície do tubo em metade de sua área. Obtém-se através desse cálculo 0,524 m<sup>2</sup> de área total.

A vazão mássica de ar que adentra o evaporador é calculada através da medição de sua velocidade, área dos dutos por onde o ar passa e massa específica do ar ( $\dot{m} = vAp$ ). Para medição da velocidade um anemômetro foi disposto nas entradas de ar para o evaporador. A área das aberturas de entrada foi calculada e a massa específica do ar úmido foi computada para condição típica de -5 °C e umidade relativa de 60%. Nessas condições, a vazão mássica foi de aproximadamente 0,015 kg/s. O calor específico do ar úmido à pressão constante ( $c_p$ ) foi calculado considerando essas mesmas condições de temperatura e umidade. Assim, o produto  $A/\dot{m}c_p$  obtido foi 0,0035 m<sup>2</sup>K/W, sendo aproximado a um valor constante ao longo do tempo.

Para o ensaio de 160 h de funcionamento do refrigerador sem

ocorrência de degelos (cujas temperaturas foram demonstradas na figura 30), a resistência ao fluxo de calor calculada através da eficiência do evaporador é apresentada na figura 45.

Figura 45 - Resistência ao fluxo de calor em ensaio de 160 h sem degelo

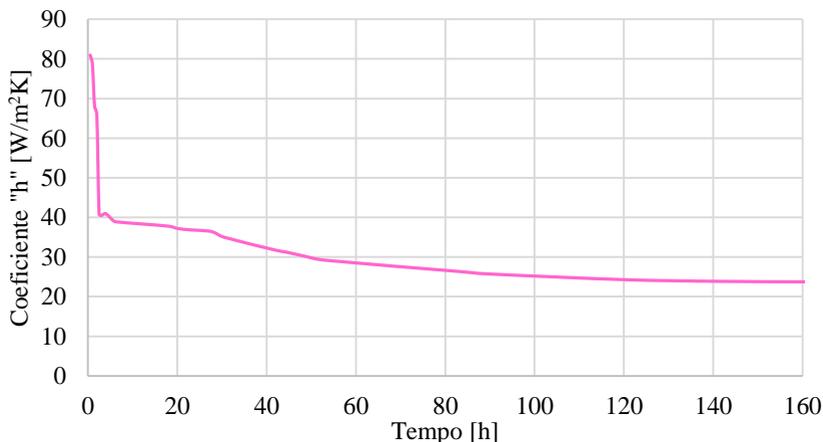


Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Através do resultado é possível notar que a resistência à transferência de calor aumenta continuamente ao longo do tempo quando não há ocorrência de degelos. Nas primeiras horas de ensaio, até ser atingida a condição de regime permanente (após 5,5 h de funcionamento), a resistência têm variação acentuada. Já no período de 6 h até 30 h aproximadamente, a variação permanece em patamar praticamente fixo. Ressalta-se que é nesta faixa de tempo que o funcionamento normal do refrigerador se encontra.

Para facilitar a interpretação, é comum a resistência à transferência de calor ser representada como um coeficiente de transferência de calor (aqui simbolizado por “h”), dado matematicamente pelo seu inverso. Dessa forma, para o mesmo ensaio têm-se os resultados apresentados na figura 46.

Figura 46 - Coeficiente "h" para ensaio de 160 h sem degelo



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

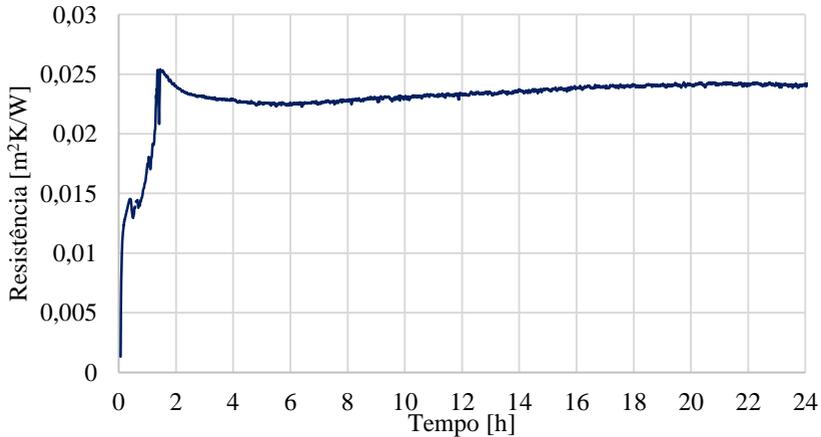
Ao se analisar o exposto, é visível a degradação do coeficiente de transferência de calor pela presença da geadas. A variável tem máximo no início do ensaio, partindo de valores altos pois a resistência é praticamente nula nessa condição. Ao longo do ensaio ele diminui acentuadamente nas primeiras horas devido à variação de temperatura ser continuamente maior, já que o refrigerador partiu da condição de equilíbrio. Ao se atingir o regime permanente a variação do coeficiente é mais suave, devendo-se principalmente pela formação da geadas. Próximo às 30 horas de funcionamento o coeficiente volta a cair com destaque, sendo decorrência do aumento das temperaturas do refrigerador pelo bloqueio da passagem de ar no evaporador.

Ao final do ensaio, quando se obteve 800 g de massa de água no degelo, o coeficiente de transferência de calor calculado através da eficiência do trocador residiu na faixa de 24 W/m²K. Em 12 h de operação o coeficiente sofreu queda de 6% com relação às 4 h, em 24 h esta queda foi de 9,7%, e em 160 h, de 41%.

Considerando-se as primeiras 40 h de funcionamento (onde se encontram os intervalos de degelo em operação normal) a sensibilidade do coeficiente é de -0,2 (W/m²K)/h, mostrando-se bastante baixa, porém significativa.

Novos ensaios foram desenvolvidos com 24 h de funcionamento do refrigerador sem a ocorrência de degelo. A resistência ao fluxo de calor típica obtida nesses ensaios é apresentada na figura 47.

Figura 47 - Resistência ao fluxo de calor em ensaio de 24 h sem degelo



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

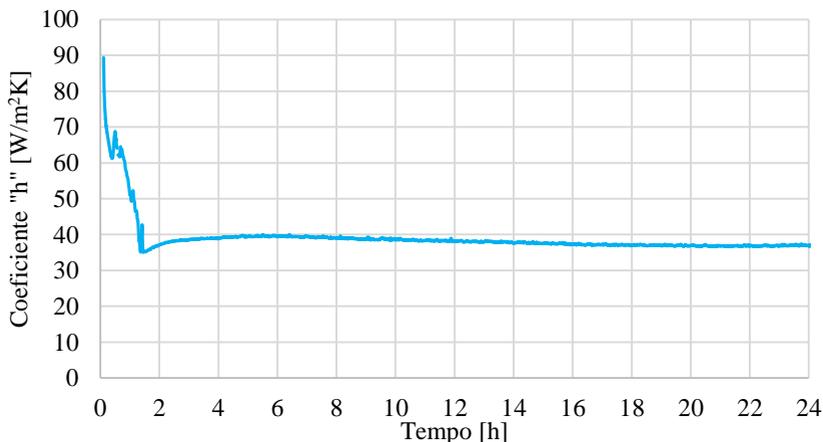
Observa-se comportamento semelhante ao registrado anteriormente, porém com maior detalhamento nas primeiras horas. Partindo de valores próximos a zero, a resistência aumenta acentuadamente nas primeiras horas, fortemente influenciada pela variação das temperaturas.

Próximo a 1,5 h de ensaio constata-se a maior resistência, nesse momento a temperatura do tubo diminui de maneira mais íngreme que a do ar, e a diferença entre a temperatura do ar na entrada e na saída é a menor, configurando o pico de maior resistência.

A partir de 1,5 h de ensaio, as temperaturas de saída do ar e do tubo estão em regime permanente, enquanto a temperatura de entrada do ar no evaporador continua diminuindo, também os efeitos da geada já começam a ser perceptíveis. Entre 5 h e 6 h, quando as temperaturas estão em regime, é possível notar a influência quase exclusiva da camada de geada na transferência de calor. Nesse período a resistência atinge os menores valores da condição de regime, passando a partir desse ponto a aumentar gradativamente. Em 5 h de funcionamento a camada formada já é bastante espessa, de modo que seu aumento só aumenta a resistência ao fluxo.

O coeficiente “h” também é calculado para esse ensaio e mostrado na figura 48.

Figura 48 - Coeficiente "h" para ensaio de 24 h sem degelo



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Novamente na condição inicial é que se encontram os maiores coeficientes. No decorrer do ensaio o valor permanece próximo a um patamar de  $40 \text{ W/m}^2\text{K}$ , bastante estável por diversas horas. Sendo que diminui a partir de 6 h de ensaio, atingindo em 24 h o valor de  $37 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Em 12 h de funcionamento o coeficiente apresenta queda de 2,5% em relação às 4 h, e em 24 h de 5%. A partir dos ensaios observa-se que os maiores valores do coeficiente “h” acontecem entre 4 h e 6 h, decaindo na sequência.

Por essa análise aponta-se que a resistência à transferência de calor apresenta variação sutil, sendo pouco sensível, o que descarta a avaliação da necessidade de degelo pelo monitoramento dessa grandeza.

O ensaio foi repetido também para intervalos de 12 h e de 4 h e os resultados mostraram repetibilidade. Avaliação com o refrigerador ciclando, em seu modo de operação normal, também foram desenvolvidos, estes resultados encontram-se no apêndice VI.

### 4.3.2. Fluxo de calor

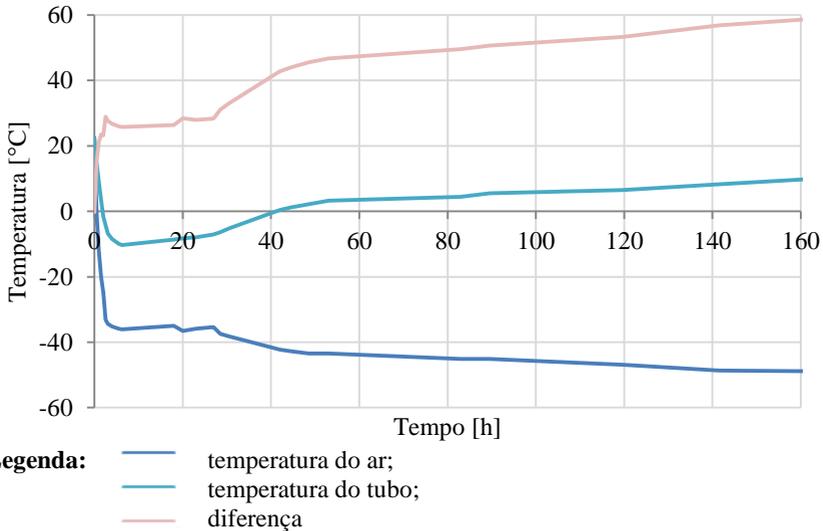
De maneira paralela às medições de temperaturas, dados do transdutor de fluxo de calor também foram registrados nos ensaios. Através das medições do fluxímetro e termopares é possível obter a resistência à transferência de calor no trocador.

Para tanto, a temperatura do ar sobre o tubo foi aproximada pela temperatura do ar que entra no evaporador provindo do refrigerador (T7), visto que ela incide diretamente nessa região. A temperatura do tubo é

medida no próprio tubo na porção central através de T3.

Para o refrigerador funcionando sem degelo por 160 h contínuas, as temperaturas do tubo, do ar e a diferença entre elas ( $\Delta T = T7 - T3$ ) são apresentadas na figura 49.

Figura 49 - Temperaturas em ensaio de 160 h sem degelo

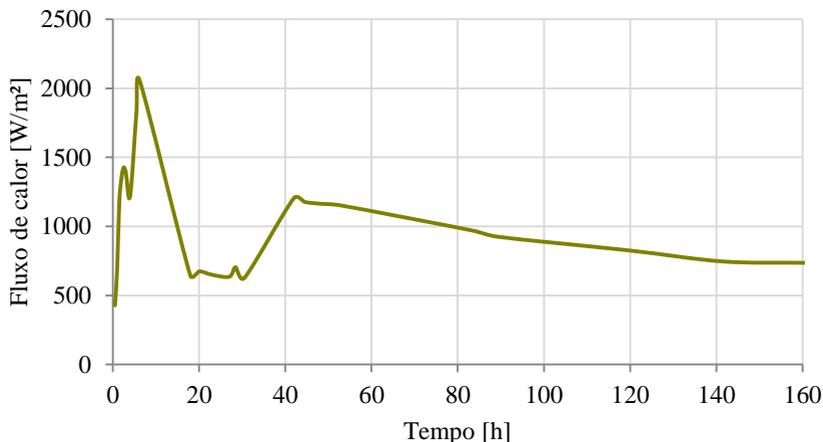


Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Observa-se que ao atingir a condição de estabilidade, próximo às 5 h, as temperaturas mantêm-se em patamar por diversas horas. Decorridas 20 h de ensaio a temperatura do fluido (T3) ainda diminui, pois o compressor permanece ligado, enquanto a camada de geadas, já bastante espessa, impede a troca de calor, fazendo com que a temperatura do ar aumente. Com o passar do tempo de ensaio a condição de bloqueio total do ar pela geadas faz com que a temperatura do compartimento inferior continue aumentando.

Para este mesmo ensaio, o fluxo de calor obtido através de medições com fluxímetro é apresentado na figura 50.

Figura 50 - Fluxo de calor medido com fluxímetro em ensaio de 160 h sem degelo

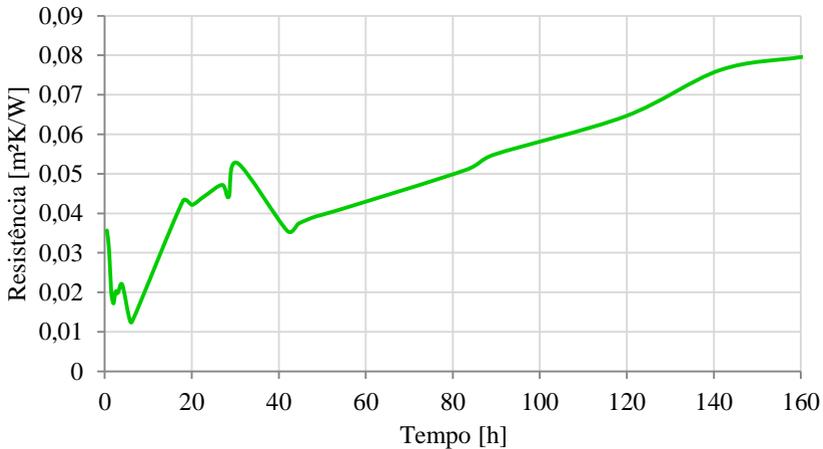


Fonte: Elaborada pela autora (2015).

A partir do início do resfriamento o fluxo de calor é crescente até atingir seu ponto máximo em 6 h de ensaio, quando decai. Por cerca de 10 h o fluxo é praticamente constante em  $700 \text{ W/m}^2$ . Um ligeiro aumento ocorre próximo às 30 horas quando a temperatura do ar também tem aumento. A elevação do fluxo notada a partir de 30 h até as 40 h, aproximadamente, deve-se à redução da temperatura da serpentina, que nesse intervalo apresenta nova queda. Estabilizada essa temperatura (agora em patamar inferior), o fluxo tende novamente a diminuir, pois a camada de geada continua aumentando, aumentando assim a resistência à troca de calor.

A partir do fluxo de calor e das temperaturas medidas pode-se calcular a resistência à transferência de calor. Para esse ensaio de 160 h sem degelo a resistência é ilustrada na figura 51.

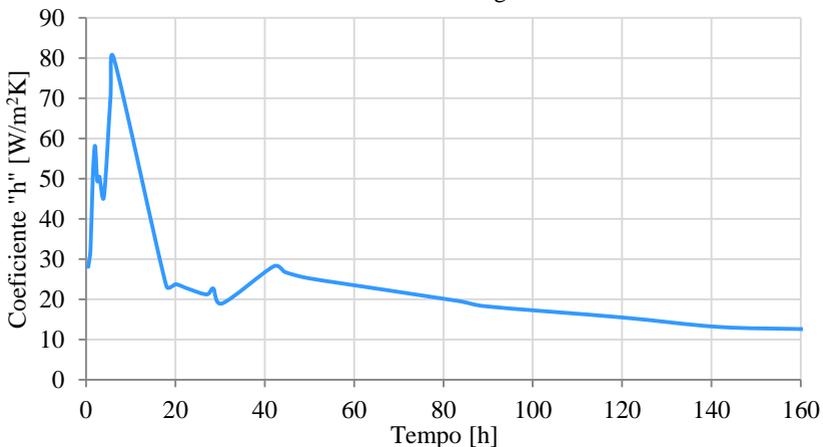
Figura 51 - Resistência à transferência de calor em ensaio de 160 h sem degelo



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

De maneira geral, a resistência à transferência de calor tende a aumentar ao longo de todo o ensaio. A partir de 40 h de ensaio o aumento se dá de forma bastante linear. Uma forma mais clara de avaliar a resistência à troca de calor é através do coeficiente de troca “h”, cujo valor numérico é dado pelo inverso da resistência. Para o ensaio de 160 h de funcionamento sem ocorrência de degelo o coeficiente é apresentado na figura 52.

Figura 52 - Coeficiente de transferência de calor a partir do fluxo de calor para ensaio de 160 h sem degelo

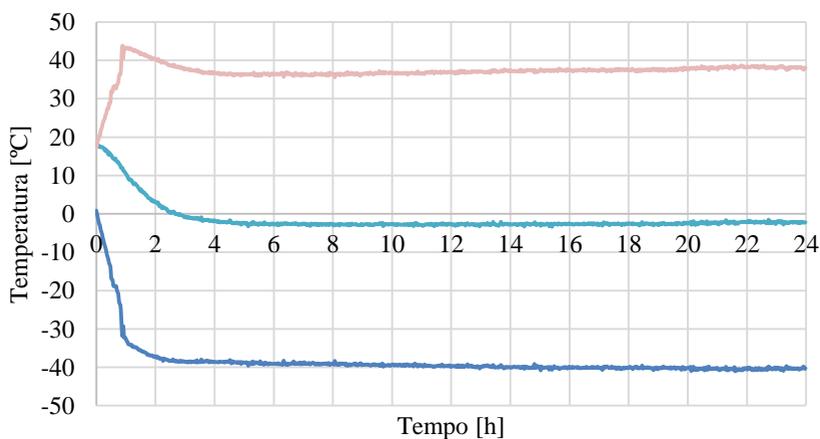


Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Como esperado, a menor resistência ocorre quando o fluxo é maior, em 6 h de ensaio. Nessa ocasião, consequentemente, o coeficiente de transferência de calor atinge valor de  $80 \text{ W/m}^2\text{K}$ . No decorrer do ensaio a resistência apresenta aumento quase constante. A pequena diminuição observada na curva se deve à diminuição mais acentuada que ocorre na temperatura da serpentina próximo às 40 h de ensaio. Ao fim do ensaio o coeficiente já está bastante degradado, apresentando valor de  $12,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Analisando-se então ensaios de 24 h de duração sem ocorrência de degelo, tem-se o comportamento típico das temperaturas ilustrado na figura 53, o fluxo de calor medido na figura 54 e a resistência à transferência é mostrada na figura 55.

Figura 53 - Temperaturas em ensaio de 24 h sem degelo

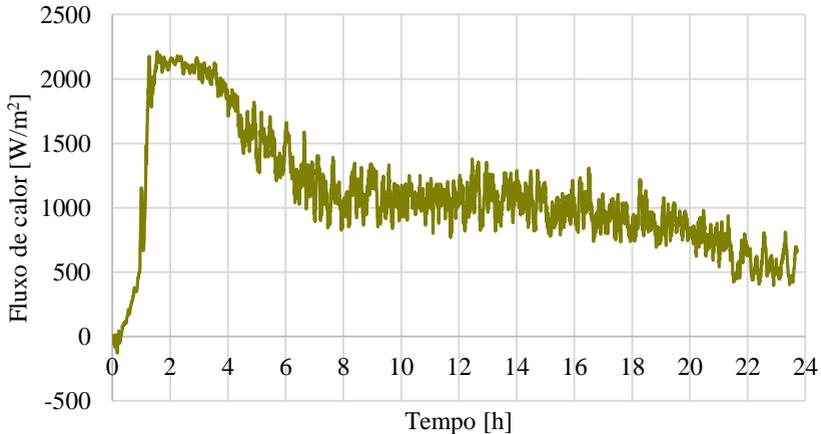


**Legenda:**

- temperatura do ar;
- temperatura do tubo;
- diferença

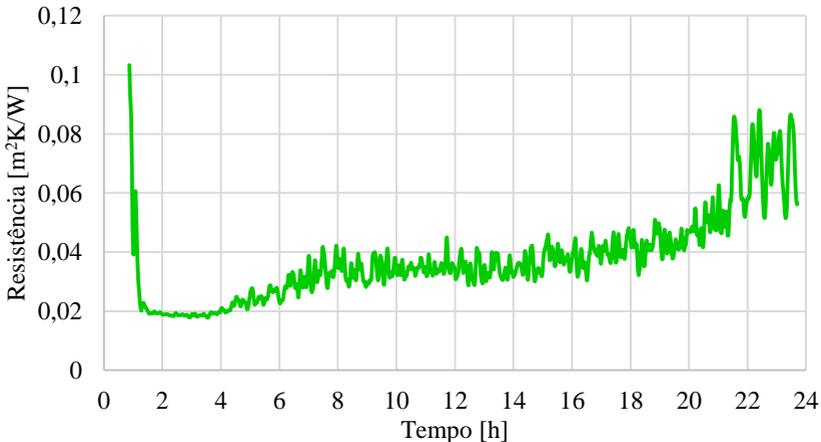
Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 54 - Fluxo de calor medido com fluxímetro em ensaio de 24 h sem degelo



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 55 - Resistência à transferência de calor em ensaio de 24 h sem degelo



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Como já observado no outro ensaio, o fluxo possui um pico e diminui com o passar do tempo, enquanto a resistência à transferência de calor aumenta continuamente. O pico de transferência de calor ocorre quando decorridas 2 h de ensaio. Onde um valor próximo a  $2100 \text{ W/m}^2$  é atingido. A partir desse momento a influência da geada começa a ser mais evidente no sistema, podendo ser notada pelo aumento da resistência registrado.

Em 2 h de ensaio a resistência à transferência de calor é aproximadamente  $0,02 \text{ m}^2\text{K/W}$  ou, em termos de coeficiente “h”,  $50 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Em 4 h de funcionamento, o fluxo é próximo a  $1500 \text{ W/m}^2$ , enquanto a resistência pouco variou. Decorridas 12 h do início, o fluxo já caiu para valores próximos a  $800 \text{ W/m}^2$ , em média, enquanto a resistência fica em torno de  $0,05 \text{ m}^2\text{K/W}$ . O coeficiente de transferência de calor, em 12 h, é calculado em  $20 \text{ W/m}^2\text{K}$ , apresentando queda de 40% em seu valor máximo registrado.

Ensaio com 12 h e 4 h de intervalo sem ocorrência de degelo foram também desenvolvidos e os resultados apresentaram-se bastante semelhantes, mostrando repetibilidade. Também para a detecção de geada através do fluxo de calor, o ensaio de funcionamento normal do refrigerador (seção 5.1.1) foi segregado nos três períodos de 12 h sem degelo, sendo apresentado no apêndice VII.

### 4.3.3. Comparações

Considerando as informações de temperatura obtidas nos experimentos e as dimensões do evaporador, o coeficiente convectivo de troca de calor (sem geada) foi calculado através da relação de Zukauskas para escoamento cruzado em matriz tubular (apresentada na seção 2.6.1). Ressalta-se que o coeficiente de transferência de calor por convecção não é uma propriedade do fluido, mas sim um parâmetro cujo valor depende de todas as variáveis que influenciam a convecção, tais como a geometria do sistema, a natureza do movimento do fluido, as propriedades térmicas do fluido e a velocidade do escoamento do fluido (ÇENGEL; BOLES, 2006).

Para o escoamento estudado, as propriedades do ar úmido foram selecionadas para temperatura de  $-5 \text{ }^\circ\text{C}$  e 60% de umidade relativa, enquanto a temperatura do tubo foi estimada em  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tais condições ocorrem normalmente em tempo próximo à condição de regime permanente do sistema e permanecem por algum tempo, representando assim boa estimativa de condições para o evaporador.

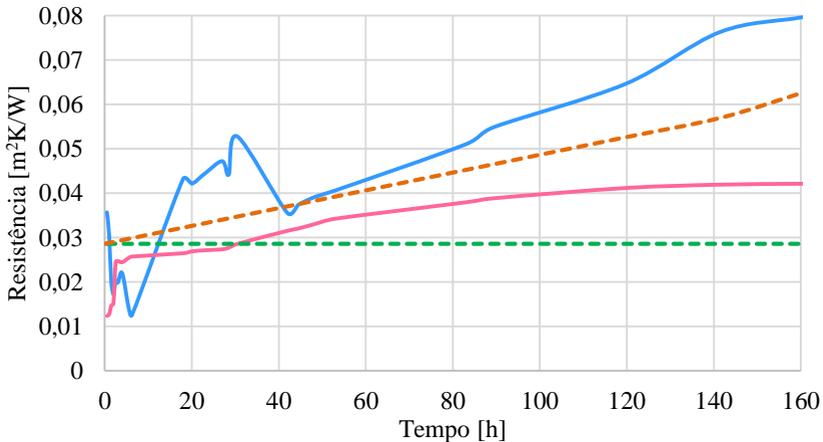
O valor do coeficiente convectivo médio calculado para a troca de calor entre o ar e as superfícies do evaporador foi de  $35 \text{ W/m}^2\text{K}$ , o que representa uma resistência ao fluxo de  $0,029 \text{ m}^2\text{K/W}$ . O valor obtido reside na faixa típica de (25 a 250)  $\text{W/m}^2\text{K}$  para convecção forçada de gases sugerida por Incropera et al (2008). Lembra-se, no entanto, que o valor numérico não é, em geral, uniforme sobre a superfície, dependendo também do local onde a temperatura do fluido é medida.

Com relação à condutividade térmica, seu valor teórico foi calculado com base na quantidade de água medida ao final do degelo. A partir da densidade da geada e da área de superfície do trocador, obtém-se um valor de espessura da camada. Assim, com o valor de condutividade térmica da

geada encontra-se a resistência à troca térmica imposta pela geada que estava presente. Espera-se que inicialmente seu valor seja baixo, pois não há resistência visto que não há geada depositada, e com o aumento da camada ela aumente até a ocorrência do degelo.

A título de comparação, as resistências à troca de calor teóricas: sem geada (referente à convecção) e com geada (referente à condução), foram representadas em um mesmo gráfico. Junto com elas também se dispôs os valores de resistência obtidos através dos experimentos: calculada pela eficiência do trocador (apresentada na seção 5.4.1) e através do fluxímetro (apresentada em 5.4.2). Todas para um mesmo ensaio de 160 h sem degelo estão representadas na figura 56.

Figura 56 - Resistência à transferência de calor em ensaio de 160 h sem degelo



**Legenda:**

- (Azul) : R fluxímetro;
- (Rosa) : R eficiência;
- - - (Verde) : R teórico sem geada;
- - - (Laranja) : R teórico com geada;

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Análise do gráfico permite identificar certa concordância entre as resistências obtidas através dos quatro meios distintos. Como esperado, as curvas crescem no decorrer do ensaio.

Valores experimentais de resistência, obtidos através dos dois métodos diferentes (fluxímetro e eficiência), apresentam comportamento semelhante de crescimento, aproximadamente linear, atingindo valores máximos ao final do ensaio de  $0,08 \text{ m}^2\text{K/W}$  e  $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ , respectivamente.

O valor de resistência teórica sem geada representa a resistência à convecção que ocorreria ao longo de todo ensaio caso a geada não se

depositasse nas superfícies (médio para toda a matriz tubular). Valor de  $0,029 \text{ m}^2\text{K/W}$  foi obtido para essa resistência.

Já o valor da resistência teórica com geada, diz respeito à resistência de condução imposta pelo aumento da camada de geada. Este valor inicia em mínimo igual à convecção quando não há geada e aumenta de maneira linear com o incremento da camada, até o fim do ensaio quando atinge um valor de  $0,062 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

Através dos valores calculados é possível avaliar a influência pura da camada de geada ao longo do ensaio através da diferença entre as resistências teóricas com e sem geada. Assim, ao final das 160 h, a geada representa incremento de resistência à troca de calor de  $0,033 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

O gráfico apresentado demonstra o aumento da resistência, que sugere a degradação do coeficiente de troca de calor decorrente da presença de geada. Lembra-se que maiores coeficientes representam melhores trocas de calor, o que é desejado em um evaporador.

#### 4.4. EVOLUÇÃO DE TEMPERATURAS DO EVAPORADOR

Por ser um trocador de calor, a temperatura do evaporador talvez seja a grandeza de variação mais evidente e direta dentre as existentes no sistema. Já é conhecido que a geada depositada no evaporador tem influência na transferência de calor entre os componentes do sistema. O acúmulo tende a atuar como isolante térmico e, então, alterar a taxa de variação da temperatura durante o degelo.

Em vista disso, alternativa de solução proposta consiste em avaliar a dinâmica de variação das temperaturas do evaporador dada uma perturbação no sistema. A quantidade de geada é então inferida com base na resposta em temperatura *versus* tempo, sendo que a análise pode ser feita durante aquecimento ou resfriamento dos elementos.

Nesta proposta, a perturbação do sistema se dá pelo acionamento do resistor de degelo por determinado período de tempo. A resposta do sistema pode ser obtida pela medição de temperatura e também através de grandezas termicamente variáveis. São apontadas como alternativas de avaliação a medição de:

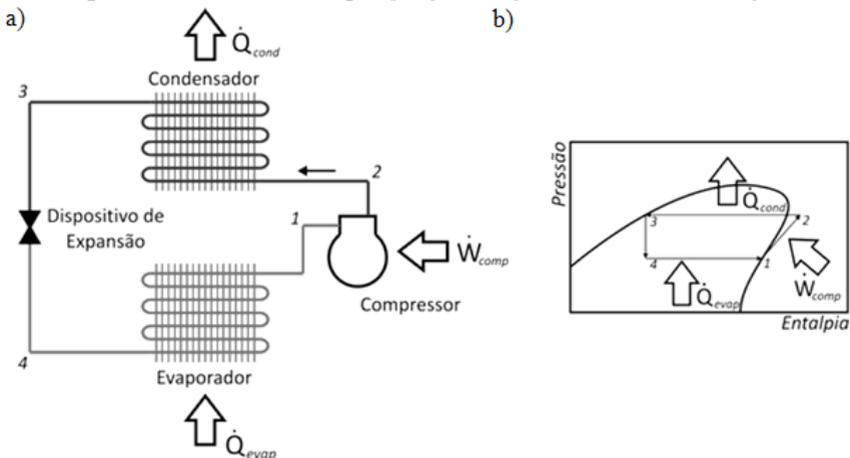
- temperatura, utilizando transdutores;
- resistência do elemento resistivo do resistor de degelo;
- impedância do resistor de degelo;
- resistência elétrica do enrolamento do ventilador;
- pressão do fluido refrigerante.

Cada uma dessas opções citadas é explorada teórica e experimentalmente nos tópicos a seguir, a fim de caracterizar a influência que a temperatura provoca sobre elas. Para todas deve-se considerar uma variação térmica decorrente de perturbação pelo acionamento do resistor de degelo.

#### 4.4.1. Pressão do fluido refrigerante

Atualmente a compressão mecânica de vapor é o princípio mais utilizado na refrigeração doméstica. O esquema básico de um sistema de refrigeração por compressão de vapor com seus principais componentes e o seu respectivo ciclo teórico construído sobre um diagrama pressão *versus* entalpia é ilustrado na figura 57.

Figura 57 - Sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor



**Legenda:** a) Esquema do circuito;

b) Diagrama de pressão *versus* entalpia;

Fonte: Adaptada de Pussoli (2010).

O ciclo de refrigeração, de forma simplificada, como explica Gosney (1982), consiste em comprimir o fluido refrigerante por meio de um compressor para então, no condensador, este dissipar calor ao ambiente externo à pressão aproximadamente constante. Após perder energia e se condensar, o fluido passa pelo dispositivo de expansão diminuindo sua pressão em um processo que mantém sua entalpia aproximadamente constante. Ao sair desse dispositivo, à temperatura e pressão baixas, o fluido entra no evaporador onde retira calor do ambiente a ser refrigerado. O fluido

volta então ao compressor e inicia o ciclo novamente.

O ciclo descrito representa um ciclo saturado simples ideal. No entanto, os ciclos reais de refrigeração desviam-se deste modelo devido algumas simplificações adotadas. Por exemplo, como cita Dossat (2004), no ciclo ideal são negligenciadas as quedas de pressão no evaporador, condensador e demais tubulações devido ao atrito. Também são desconsiderados os efeitos de sub-resfriamento do líquido e de superaquecimento do vapor, além da compressão isentrópica no compressor não ser verdadeira.

Em um ciclo real de refrigeração, o efeito de uma irreversibilidade em determinado ponto do circuito tem efeitos negativos sobre todos os demais pontos, pois seus componentes não se ajustam às condições de operação. O circuito passa então a operar fora das condições para as quais foi projetado.

Como visto, a capacidade do evaporador depende, entre outras variáveis, da condição de sua superfície externa. Salienta-se que qualquer depósito nessa superfície tende a atuar como isolante térmico e diminuir o fator de condutância das paredes do evaporador, reduzindo a taxa de transferência de calor do trocador (DOSSAT, 2004).

Uma redução da troca de calor no evaporador representa o fluido refrigerante deixando o trocador à temperaturas menores que as projetadas, e como consequência, também pressões menores. No compressor, pressões de sucção menores impõem, entre outras consequências, pressões de descarga também menores. Em decorrência, temperaturas menores no condensador fazem com que a troca de calor nesse elemento também seja menor. Devido à troca ineficiente no condensador, o fluido chega a maiores temperaturas no dispositivo de expansão, resultando em pressões de saída maiores, ou seja, temperaturas maiores do fluido na entrada do evaporador. Sendo a troca de calor regida pela diferença de temperatura, a consequência são trocas menores.

O efeito, portanto, da quantidade de geada no evaporador pode levar o sistema a operar em diferentes condições, todas diferentes da projetada.

Tomando-se conhecimento dos apontamentos apresentados, propõe-se identificar a quantidade de geada presente no evaporador através do monitoramento da pressão do fluido refrigerante após sua passagem pelo evaporador.

Medindo-se a pressão em um ponto do circuito após o evaporador, podendo ele ser ligeiramente aquém do compressor ou logo após o evaporador, estima-se ser possível notar a variação de pressão que a presença de geada causará devido a temperatura de saída do fluido. Monitorando-se o comportamento dinâmico dessa grandeza é possível então avaliar o instante em que o degelo se torna necessário.

#### 4.4.2. Resistência ôhmica do resistor de degelo

Ainda com intuito de avaliar a dinâmica de variação de temperatura a partir de uma perturbação no sistema, aponta-se uma solução que não necessita novo transdutor de temperatura. A proposta baseia-se na medição da resistência ôhmica do resistor de degelo.

Da literatura, lembra-se que a resistência elétrica de um condutor depende de suas dimensões e do material de que é constituído através da seguinte relação:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A_T} \quad (25)$$

Onde:

R é a resistência elétrica (ou ôhmica) do condutor [ $\Omega$ ].

$\rho$  é a resistividade do material do condutor [ $\Omega/m$ ]

l é seu comprimento [m].

$A_T$  é a área da seção transversal [ $m^2$ ].

Verifica-se que os materiais condutores possuem resistividade que se eleva com o aumento da temperatura, e por consequência também sua resistência se eleva. Materiais semicondutores, ao contrário, apresentam redução de sua resistividade com o aumento da temperatura.

A relação entre resistividade e temperatura não é exatamente linear. A mudança média da resistividade em função da temperatura, em um determinado intervalo de temperatura é descrita pelo coeficiente de variação da resistividade com temperatura - TCR (coeficiente de temperatura da resistividade, ou ainda, fator de temperatura), denotado por  $\alpha$  (alfa). Esse coeficiente é uma propriedade física da liga do metal e do método pelo qual o elemento foi fabricado (PACHECO, 2007), e é dado por:

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (26)$$

Nesta equação:

$\rho$  é a resistividade do material do condutor [ $\Omega/m$ ].

T é a temperatura [ $^{\circ}C$ ].

A partir da informação de resistência elétrica, a temperatura de um elemento pode ser obtida, sendo este o princípio de funcionamento dos termômetros de resistência.

Em aplicações práticas, algumas vezes a medição de temperatura é feita utilizando o próprio elemento condutor como um transdutor de temperatura. O cobre é usualmente empregado na medição de temperatura de motores e transformadores que utilizam o enrolamento como medidor de temperatura (SCHLICKMANN, 2012). Silveira (2010) aponta que, de fato, é comum na indústria a utilização da medição da resistência de enrolamento de compressores para estimar sua temperatura. A própria ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ASSOCIAÇÃO...2008), na NBR 7094:2003, recomenda a monitoração da temperatura do bobinamento principal do estator através da variação da resistência ôhmica do enrolamento em motores de indução (denominado método da superposição).

Um registro americano de patente (OROSY et al, 1974) propõe controlar a temperatura de um sistema qualquer com dispositivo de aquecimento elétrico, onde o elemento resistivo é o próprio sensor de temperatura. A ideia se baseia na variação da resistência ôhmica e propõe detectar e regular a tensão do elemento resistivo fazendo dele um dos braços de uma ponte de Wheatstone.

Como descreve Childs (2000), de maneira teórica qualquer condutor pode ser utilizado como detector de temperatura de resistência, porém considerações práticas, tais como custo, valor da resistividade, resistência à oxidações e restrições de produção limitam a escolha do material.

Sabendo que o resistor de degelo é essencialmente um resistor de aquecimento cuja função é dissipar calor, seu elemento resistivo se constitui de uma liga metálica e, portanto, um material condutor.

Diante do apresentado, suscita-se emprego do resistor de degelo presente no refrigerador como medidor indireto da quantidade de geadas. Através da perturbação do sistema e avaliação do comportamento da resistência ôhmica frente à variação de temperatura, existe a possibilidade de se determinar a geadas depositada sem emprego de novos dispositivos de medição, apenas através do resistor.

A relação entre variação de resistência, temperatura e quantidade de geadas pode ser determinada através das equações de transferência de calor e conhecimento das propriedades dos materiais envolvidos.

Ressalta-se, porém, que para relacionar essa grandeza com a quantidade de geadas, a curva de resistência *versus* temperatura para o material constituinte do resistor de degelo deve ser conhecida e bem determinada.

Avaliar resistência ôhmica é bastante simples: consiste em variar a temperatura e monitorar a resistência ôhmica do elemento. Duas formas foram consideradas para esta avaliação: uma com o resistor de degelo montado no refrigerador e outra com resistor fora do seu local de

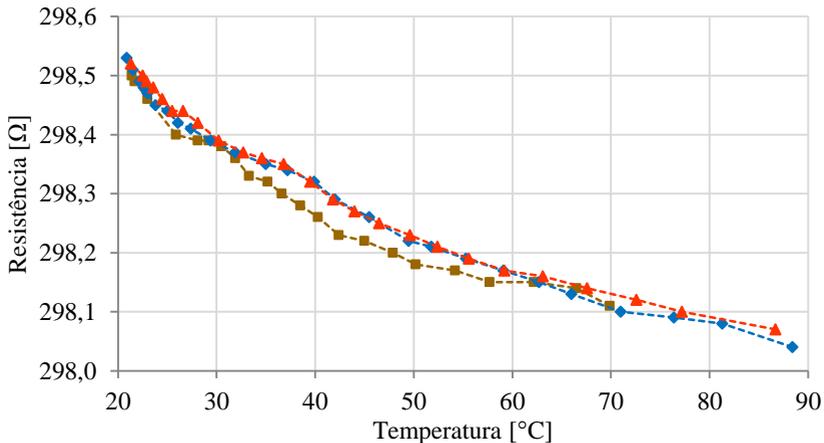
funcionamento.

No primeiro experimento o resistor foi alimentado com 220 V conectado no próprio refrigerador, como ocorre em seu funcionamento normal. Após alguns instantes (aproximadamente 5 min) foi desligado e imediatamente teve seus terminais conectados em um ohmímetro. Esse ensaio foi repetido por três vezes.

Para medição de sua temperatura, um termopar foi aderido ao corpo do resistor em sua porção central (equidistante dos seus terminais), sendo os dados de temperatura e resistência medidos manualmente em intervalos de 15 s, aproximadamente.

Ressalta-se que esse experimento foi realizado em regime transiente, e a análise foi realizada após o desligamento da tensão de alimentação. A partir desse momento o resistor esfriou naturalmente. Os resultados obtidos nos três ensaios são apresentados na figura 58.

Figura 58 - Resistência ôhmica do resistor de degelo montado no refrigerador



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

As variações correspondentes às curvas encontradas e suas variações percentuais são:

- ◆--- -7,3 mΩ/°C e -0,0025% ou -25 μΩ/Ω°C
- -8,0 mΩ/°C e -0,0027% ou -27 μΩ/Ω°C
- ▲--- -6,9 mΩ/°C e -0,0023% ou -23 μΩ/Ω°C

Em média  $(-7,4 \pm 1,5)$  mΩ/°C e -0,0025%, ou -25 μΩ/Ω°C, ou ainda -25 ppm/°C).

Diante do apresentado observa-se repetição no comportamento das

três curvas. Tal comportamento, no entanto, não se aproxima do esperado para um elemento resistivo. Pois metais e ligas metálicas têm coeficiente térmico positivo, ou seja, o aumento da temperatura causa aumento de resistência ôhmica. Com relação à ordem de grandeza das variações, os valores encontrados foram bastante baixos.

A fim de melhor entender o que se verificou no experimento descrito, planejou-se teste com resistor de degelo fora do refrigerador e com temperatura estabilizada para leitura de resistência.

Esperando-se evitar problema em tirar e posteriormente reposicionar o resistor de degelo presente no refrigerador, adquiriu-se resistor extra. Tal elemento é uma peça de reposição de mesmo modelo e fabricante. Foi denominado “resistor extra 1”.

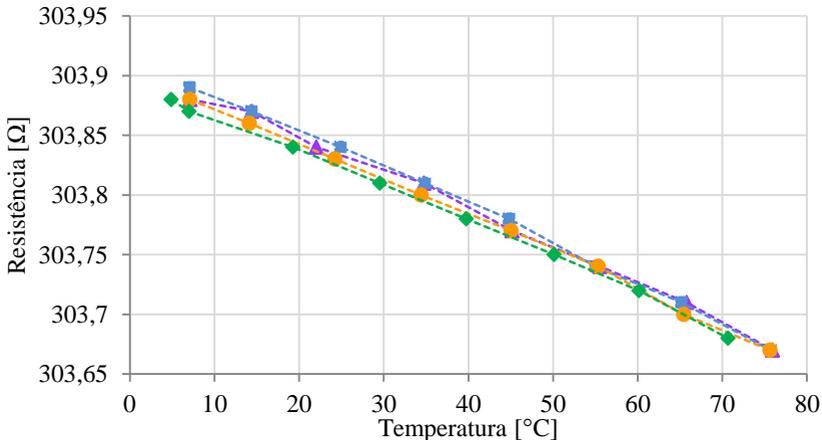
Para aquecer o resistor foi utilizado banho termostático de marca Julabo disponível no Laboratório de Instrumentação e Automatização de Ensaios. Tal equipamento possui controle térmico rigoroso com estabilização de temperatura em  $\pm 0,01$  °C e aquecimento em até 80 °C. Também um termopar tipo T foi disposto junto ao resistor com leitura adquirida a partir de um sistema de aquisição de dados da marca ADAM e bloco conector específico para termopares. Para caber no recipiente do banho, o resistor foi dobrado com bastante cuidado<sup>35</sup>.

O resistor teve seus terminais conectados ao multímetro Agilent 34410A em ligação a 4 fios, de maneira que esses não influenciassem na medição. Selecionaram-se temperaturas para compor uma curva e em cada uma mediu-se a resistência após estabilização. Nessas condições, foram feitos 4 ensaios, cujos resultados estão apresentados na figura 59.

---

<sup>35</sup> Durante o processo lento de dobrar o resistor em formato desejado, sua resistência foi monitorada, atestando que não houve danos, visto que não houve alteração nesse valor.

Figura 59 - Resistência ôhmica do resistor de degelo extra 1 em banho térmico



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

As variações correspondentes às curvas do quadro acima, acompanhadas de suas variações relativas percentuais, são:

- ◆--- -3,0 mΩ/°C e -0,0010% ou -10 μΩ/Ω°C
- ▲--- -3,2 mΩ/°C e -0,0011% ou -11 μΩ/Ω°C
- -3,1 mΩ/°C e -0,0010% ou -10 μΩ/Ω°C
- -3,0 mΩ/°C e -0,0010% ou -10 μΩ/Ω°C

Em média  $(-3,1 \pm 0,13)$  mΩ/°C e -0,0010% ou -10 μΩ/Ω°C, ou ainda -10 ppm/°C)

Observa-se boa repetibilidade das curvas obtidas, principalmente devido à estabilização da temperatura. Porém os resultados ainda não se aproximaram do esperado para o material, principalmente no que tange o sinal negativo da derivada de variação e sua ordem de grandeza.

Suspeitando-se de problemas na medição referente às ligações e possíveis interferências dessas nos resultados, novo experimento foi executado. Nesse ensaio os mesmos equipamentos e parâmetros foram empregados, porém os terminais do resistor foram cortados<sup>36</sup> e brasados com os fios de ligação diretamente no multímetro. Obteve-se assim ligação mais robusta, e por meio de tubo isolante termorretrátil impediu-se contato elétrico dos fios com a carcaça do banho térmico, de maneira que essa possibilidade

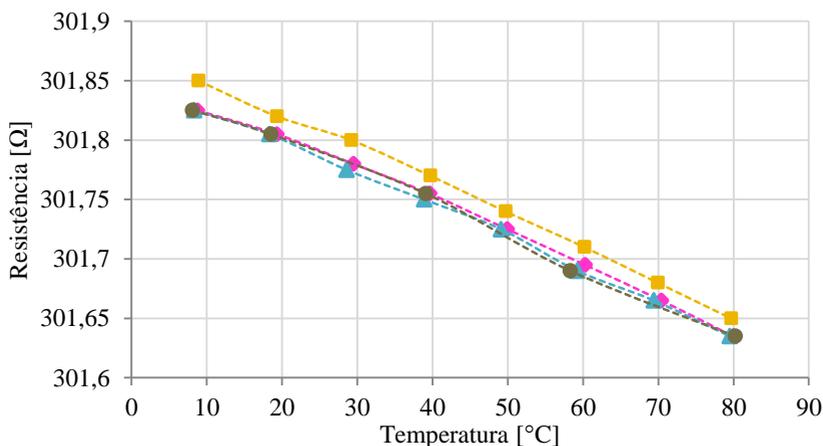
<sup>36</sup> Na ocasião de segmentação das extremidades do resistor verificou-se que o elemento resistivo não se consistia apenas de um fio enrolado, mas sim de três fios. Informações a respeito de tal configuração encontram-se no apêndice II.

de influência foi eliminada.

Neste experimento, garantiu-se que as extremidades do resistor ficassem próximas, de maneira que tivessem a mesma temperatura, visando minimizar qualquer efeito termoelétrico residual. Para avaliar essa possibilidade mediram-se também os valores de tensão termoelétrica entre os fios.

Todo o resistor foi mergulhado no banho térmico. Quatro repetições do mesmo ensaio foram feitas. Os resultados encontram-se na figura 60.

Figura 60 - Resistência ôhmica do resistor de degelo extra 3 em banho térmico



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

As variações correspondentes às curvas representadas e variações relativas percentuais são:

- -2,7 mΩ/°C e -0,00088% ou -8,8 μΩ/Ω°C
- -2,8 mΩ/°C e -0,00093% ou -9,3 μΩ/Ω°C
- ▲— -2,7 mΩ/°C e -0,00088% ou -8,8 μΩ/Ω°C
- -2,6 mΩ/°C e -0,00087% ou -8,7 μΩ/Ω°C

Em média (-2,7±0,14) mΩ/°C e -0,00089% ou -8,9 μΩ/Ω°C, ou ainda -8,9 ppm/°C).

Novamente os resultados obtidos apresentaram boa repetibilidade, porém não refletiram o comportamento esperado com relação ao sentido de variação.

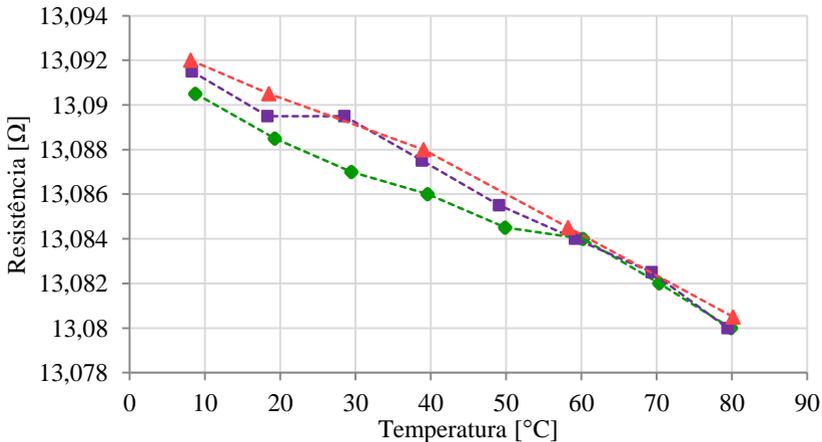
As tensões termoelétricas medidas foram da ordem de 1 μV para todas a faixa de temperatura, o que corresponde a uma diferença de temperatura de 0,026 °C aproximadamente. Portanto, a partir de tais resultados ficou

expresso que não se tratava de influência da tensão termoeétrica no comportamento inesperado.

Como análise adicional, o segmento de elemento resistivo de um dos resistores extras foi retirado do invólucro externo e isolamento emborrachado que o envolve e ensaiado em banho termostático. Nesse caso também ligação a 4 fios foi feita, o experimento respeitou as condições já apresentadas anteriormente.

Para que não houvesse contato com a água do banho, o segmento retirado (15 cm de comprimento) foi novamente “encapsulado”, porém com tubo termorretrátil. Três séries de medições foram feitas. Os resultados podem ser observados na figura 61.

Figura 61 - Resistência ôhmica de segmento de elemento resistivo do resistor de degelo em banho térmico



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

As variações apresentadas pelas curvas, juntamente com as variações relativas percentuais, são:

- -0,150 mΩ/°C e -0,0011% ou -11 μΩ/Ω°C
- -0,160 mΩ/°C e -0,0012% ou -12 μΩ/Ω°C
- ▲--- -0,159 mΩ/°C e -0,0012% ou -12 μΩ/Ω°C

Em média  $(-0,0156 \pm 0,0020)$  mΩ/°C e -0,0012%, ou -12 μΩ/Ω°C, ou ainda -12 ppm/°C).

Os resultados mostraram que não houve alterações no comportamento do material por consequência da retirada de seu invólucro. Donde se pode afirmar que, estando o resistor completamente sob a mesma temperatura, e

esta estabilizada, seu invólucro metálico externo e isolante emborrachado não interferem no comportamento do elemento. No entanto, o gradiente de variação observado ainda se mostrou negativo, diferindo do esperado.

As tensões termoeletricas medidas nesses ensaios foram, em média, 2  $\mu\text{V}$ , e não ultrapassaram o valor de 7  $\mu\text{V}$ . Portanto o efeito da tensão termoeletrica deve ser desconsiderado.

Com relação aos diferentes ensaios desenvolvidos, nota-se que os três que utilizaram banho térmico apresentam variações relativas percentuais próximas, em torno de 0,0010% de variação, indicando concordância entre os ensaios. Esse valor também demonstra a influência da estabilização da temperatura no resultado final.

Nos primeiros ensaios, onde as temperaturas não eram lidas em patamar estável, a variação relativa percentual foi superior. No entanto, nestes ensaios o resistor não estava sob a mesma temperatura por inteiro, estando inclusive em contato com as demais partes do evaporador, tais como as aletas. Além de apenas um ponto de leitura de temperatura ser tomado para o computador. Fato que pode ter influência no resultado, pois o experimento investigativo posterior mostrou que a distribuição de temperaturas ao longo do comprimento do resistor não é uniforme (experimento descrito no apêndice V).

Diante do comportamento intrigante do elemento resistivo, seu material foi submetido à caracterização química. Análise semiquantitativa através da técnica de espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) foi executada no Laboratório de Espectrometria Atômica do Departamento de Química da UFSC.

Essa técnica permite a identificação em partes por milhão (ppm) dos metais majoritários encontrados em determinada amostra, porém apresenta incertezas elevadas. Os resultados, em ordem crescente de concentração, estão dispostos no quadro 4. O relatório da análise encontra-se no anexo II. Ressalta-se que outros materiais podem estar presentes na composição e não terem sido identificados na análise.

Quadro 4 - Metais majoritários presentes em amostra do elemento resistivo do resistor de degelo

<b>Símbolo</b>	<b>ppm</b>
<b>Cu</b>	316214,94
<b>Ni</b>	259781,48
<b>Mn</b>	8713,30
<b>Fe</b>	2025,17
<b>Si</b>	184,15

<b>Mg</b>	147,92
<b>Al</b>	71,09
<b>Cr</b>	4,89
<b>Co</b>	3,25

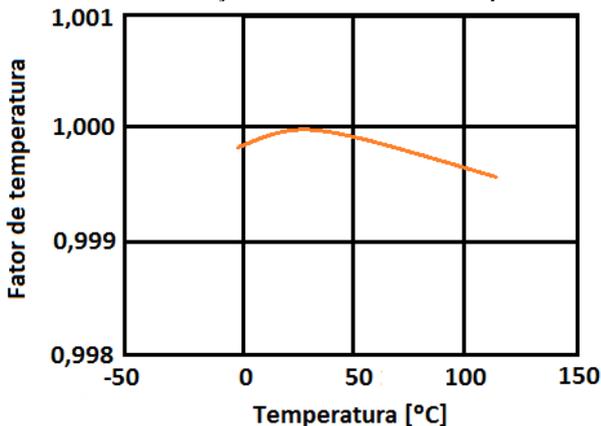
Fonte: Elaborado pela autora (2015).

Examinando o resultado pode-se supor que o material analisado trata-se de liga cobre-níquel com pequenos percentuais de ferro e manganês em sua composição. Ressalta-se que os valores em porcentagem calculados são aproximações, e devido às incertezas da análise podem variar.

Constantan na literatura indica que o material pode ser constantan (comercialmente conhecido como *Sandvik Cuprothal49*, *Special Metals FERRY Alloy*, *Hecnum*, *Telconstan*, entre outros). Normalmente são empregados em componentes elétricos como resistores de controle, fazem parte de instrumentos de precisão, termopares tipos T e K, componentes de válvulas, elementos de aquecimento, termostatos bimetálicos etc.

Constantan é o nome genérico para diversas ligas<sup>37</sup> constituídas de cobre e níquel. Essas ligas apresentam resistividade moderada e coeficiente de temperatura da resistência (TCR ou  $\alpha$ ) baixo. Esse coeficiente é função da própria temperatura, sendo apresentado para algumas ligas na figura 62.

Figura 62 - Coeficiente de variação da resistência com temperatura do constantan



Fonte: Adaptada de ASM Internacional (2001).

É possível observar que o constantan, o TCR é relativamente baixo e

<sup>37</sup> Porcentagem nominal de 55Cu-45Ni, porém variam de 50Cu-50Ni a 65Cu-35Ni (ASM INTERNACIONAL, 2001).

possui forma de parábola com concavidade voltada para baixo. Em temperatura ambiente possuem TRC localizado no pico da curva, enquanto que para faixas de temperatura de (-55 a +25) °C e de (25 °C a 105) °C o TRC é aproximadamente 20 ppm/°C em módulo (para cada faixa). Ou então de 40 ppm/°C para todo intervalo.

Segundo ASM Internacional (2001), o acréscimo de 3% de manganês (Mn) na composição da liga provoca um achatamento da curva de variação do TCR para 20 ppm/°C para todo intervalo de (-55 a +105) °C, ou seja, 10 ppm/°C para cada faixa. O mesmo trabalho mostra ainda que o uso de constantan como resistor elétrico é restrito em grande parte a circuitos de CA, justamente devido à pouca variação de sua resistência ôhmica com a temperatura.

A partir do exposto, nota-se que as propriedades do constantan podem explicar o comportamento do resistor avaliado nos ensaios. Os valores foram -25 ppm/°C para a medição sem estabilização da temperatura e, em média, -10,9 ppm/°C nas medições em banho térmico. Valores próximos ao apresentado para liga cobre-níquel contendo manganês em sua composição. O sinal negativo da variação encontrada é explicado pela faixa de temperatura analisada estar após o ponto de inflexão da curva.

Com relação à alternativa de solução proposta para inferir a quantidade de geada presente no evaporador, as características observadas no material constituinte a tornam a praticamente inviável. Algumas são:

- baixos valores do TCR;
- dependência do TCR com temperatura de maneira desconhecida;
- influência não determinada da composição da liga sobre o TCR.

Considerando as variações da resistência com temperatura, em módulo, dos ensaios, questiona-se a respeito do êxito da proposta na aplicação em questão. Estima-se que não seja possível obter sucesso, pois as variações esperadas são bastante baixas, insuficientes para indicar a presença de geada.

#### **4.4.3. Impedância do resistor de degelo**

Outra grandeza que tende a variar com a temperatura e pode possibilitar a análise de seu comportamento frente a uma perturbação a fim de estimar a quantidade de geada é a impedância elétrica do resistor de degelo.

Impedância elétrica (Z) expressa a oposição que um componente eletrônico, circuito ou sistema oferece à passagem de corrente elétrica

variável no tempo (ALCIATORE; HISTAND, 2012). É um vetor dado pela razão entre tensão e corrente num circuito (equação 30).

$$\vec{Z} = \frac{\vec{V}}{\vec{I}} \quad (27)$$

Nessa equação:

$\vec{I}$  é a corrente [A].

$\vec{V}$  a tensão [V].

A impedância é representada por um número complexo no qual a parte real é equivalente à resistência e a parte imaginária é dada pela reatância capacitiva e indutiva:

$$\vec{Z} = R + iX \quad (28)$$

Onde:

R é a resistência [ $\Omega$ ];

X é a reatância [ $\Omega$ ].

$i$  é a unidade imaginária.

Para resistores a impedância é escrita como a própria resistência [ $\Omega$ ]:

$$Z_R = R \quad (29)$$

Em circuitos CA dois mecanismos adicionais de impedância devem ser levados em consideração, além da resistência normal nos circuitos CC. São elas: a indução de tensões nos condutores autoinduzidos por campos magnéticos gerados pela corrente (indutância), e o armazenamento de carga eletrostática induzida por tensões entre os condutores (capacitância).

Para capacitores a reatância capacitiva é dada por:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (30)$$

Onde:

f é a frequência do sinal [Hz].

C a capacitância do elemento [F].

Já os indutores têm a reatância representada por:

$$X_L = 2\pi fL \quad (31)$$

Onde:

$f$  é a frequência do sinal [Hz].

$L$  é a indutância do elemento [H].

Além da resistência, tanto capacitância quanto indutância podem apresentar variações com temperatura. Na indutância, o coeficiente de temperatura de indutância expressa a relação entre a variação dessa grandeza com a temperatura. Para capacitância, a relação entre sua variação e a temperatura é dada pelo coeficiente de temperatura de capacitância. Tais variações podem ser resultantes da variação do dielétrico do meio e também da própria dilatação dos materiais, entre outras causas.

Na literatura encontra-se que a indutância de indutores padrão varia significativamente com a temperatura e tem impacto considerável na medição de suas incertezas. Por serem utilizados como referência em laboratórios e institutos de metrologia, conhecer o coeficiente de temperatura desses componentes é fundamental. O trabalho de Satish et al (2013) relata que segundo especificações esses componentes apresentam variação de 0,0076% da indutância e 1% da resistência quando a temperatura aumenta 2,54 °C. O estudo apresenta medição do coeficiente de temperatura de indutores padrão através de três métodos: variação da indutância em 1 kHz, e variação de resistência nas frequências de 1 kHz e 20 kHz. Foi encontrado que o coeficiente de temperatura é maior quando medido como função da variação da indutância comparado com a variação da resistência, como sugere o fabricante do componente. Medindo através da indutância, os resultados divergiram das especificações, porém concordaram com demais experimentos.

O resistor de degelo presente no refrigerador se constitui de um condutor metálico enrolado sobre isolante térmico e encapsulado por isolante elétrico (dimensões e imagens do resistor encontram-se no apêndice II). Por sua constituição, o resistor é essencialmente um elemento resistivo. Já quanto a sua forma construtiva, o resistor pode ser considerado um indutor, e por consequência apresenta também determinada capacitância.

A partir desta constatação, propõe-se inferir a quantidade de geada presente no evaporador através da avaliação do comportamento dinâmico dessa grandeza frente à perturbação. Também nesse caso é necessário que se disponha da curva de impedância *versus* temperatura para o resistor.

A impedância de um elemento pode ser analisada em uma só frequência ou ao longo de uma faixa de frequências. É necessário medição

das magnitudes de tensão e de corrente, e também da diferença de fase entre essas. Normalmente são utilizados métodos de ponte, nos quais uma impedância conhecida calibrada é ajustada para balancear o efeito que a impedância em teste causa no circuito.

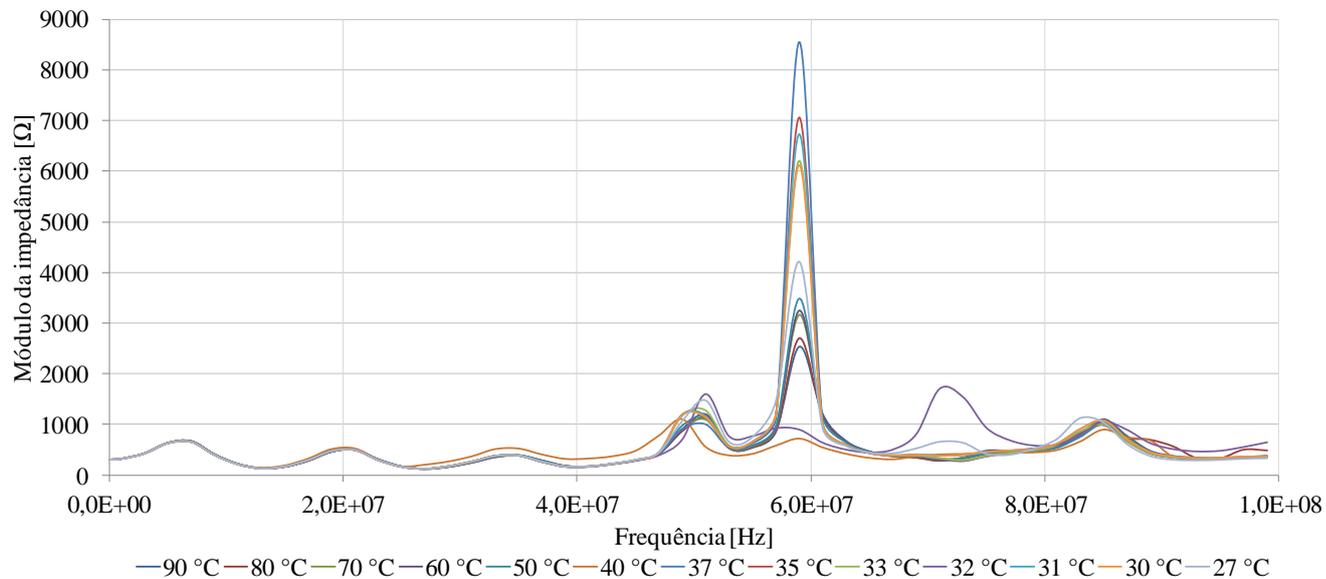
Para avaliar o efeito da variação causada pela temperatura no resistor de degelo, utilizou-se o analisador de impedância 4294A da marca Agilent. Este equipamento é capaz de fazer medições na faixa de frequência de 40 Hz a 110 MHz e impedância entre 3 m $\Omega$  a 500 M $\Omega$ .

Para medição de temperatura um termopar foi aderido ao corpo do resistor em sua porção central. Antes de iniciar os ensaios avaliou-se a interferência desse transdutor na medição, testes com e sem sua presença sob mesmas condições foram feitos. Concluiu-se que o transdutor de temperatura não interferia na configuração do experimento.

O experimento foi desenvolvido com resistor idêntico ao presente no refrigerador, porém fora do produto. O resistor foi alimentado com 220 V em rede elétrica até atingir a temperatura desejada. Nesse instante desligou-se a alimentação e seus terminais foram conectados ao analisador.

Enquanto o resistor resfriava naturalmente, ao atingir determinadas temperaturas, fazia-se varredura pela faixa de frequência escolhida (automaticamente pelo programa). Avaliou-se o módulo da impedância nas temperaturas de (27 a 90) °C em intervalos de 10 °C, na faixa de frequência de 40 Hz a 10 MHz. A figura 63 apresenta os resultados obtidos.

Figura 63 - Módulo da impedância do resistor de degelo para frequências de 40 Hz a 100 MHz



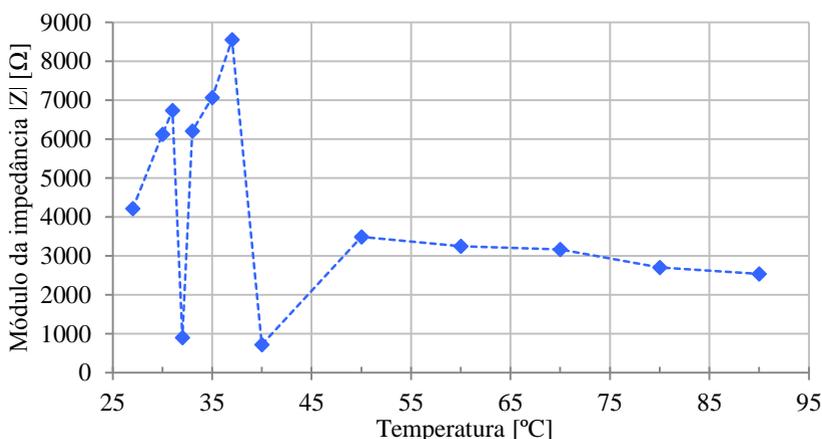
Fonte: Elaborada pela autora (2015).



Através da figura apresentada observa-se que para frequências até 45 MHz não há influência relevante da temperatura no módulo da impedância. A partir dessa frequência o comportamento para as diversas temperaturas se mantém, porém divergência entre os valores pode ser notada.

Ao atingir a frequência de ressonância, em 59 MHz, a influência da temperatura no módulo da impedância pode ser percebida de maneira mais evidente. A figura 64 apresenta os valores do módulo da impedância em relação às temperaturas medidas somente para a frequência de ressonância.

Figura 64 - Módulo da impedância do resistor de degelo na frequência de ressonância



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

A partir do apresentado nota-se que a temperatura tem influência sobre o valor da impedância em módulo. Variações de até 7,8 kΩ são observadas entre temperaturas. Porém não é possível identificar padrão no comportamento de variação dessa grandeza.

Lembra-se que o resistor não possui componentes de resistência, indutância ou de capacitância individuais, embora possa ele ser representado como um capacitor e um resistor em paralelo, associados em série a um indutor (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2015). Por isso, os efeitos de cada fator não podem ser individualizados, eles se sobrepõem e influenciam o comportamento geral do resistor de degelo.

Como consequência do apresentado, a proposta de utilização da variação da impedância do resistor de degelo com a temperatura para estimar a quantidade de geada depositada no evaporador é inviável.

#### 4.4.4. Resistência elétrica do ventilador

Outro elemento presente no conjunto do evaporador é o ventilador, responsável pela circulação de ar forçada no interior do refrigerador. No produto explorado, esse elemento é alimentado por tensão alternada de 220 V, com frequência de 60 Hz e velocidade angular próxima a 230 rad/s (WHIRLPOOL, 2009).

Na definição de Fox et al (2006), ventilador é um tipo de máquina de fluxo que realiza trabalho sobre um fluido (nesse caso o ar). O modelo em estudo é identificado como turbomáquina, pois direciona o fluxo com pás fixadas em um elemento rotativo e não há volume confinado. Dentre as turbomáquinas é classificado quanto ao percurso do fluido em axial, porque a trajetória do fluido é aproximadamente paralela à linha de centro da máquina e o raio do percurso não varia significativamente.

Em um ventilador, a energia mecânica necessária para movimentação das pás provém da conversão de energia elétrica por um motor. Os motores elétricos possuem em sua construção enrolamento metálico que consiste em uma série de bobinas, ou seja, fios condutores enrolados em torno de um eixo, formando os polos. O enrolamento em geral é feito de cobre, de maneira que se constitui em um resistor elétrico e, portanto, possui resistência ôhmica relacionada ao seu material.

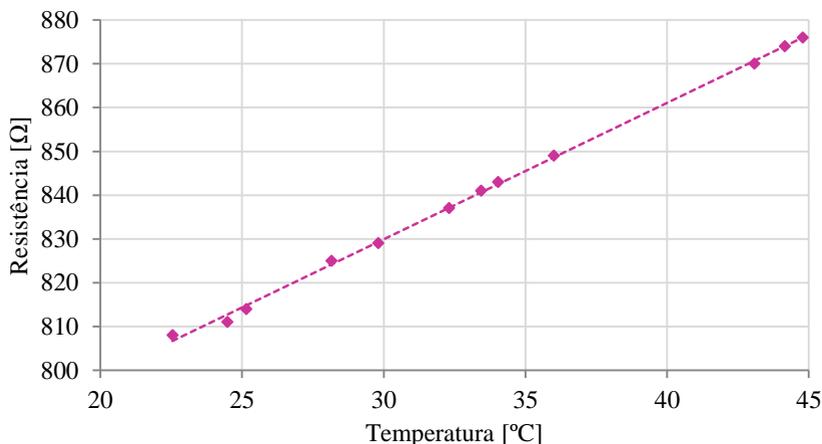
Por estar situado no compartimento do evaporador, estima-se que uma perturbação imposta pelo resistor de degelo ao sistema seja percebida no ventilador de diferentes formas dependendo da camada de geada presente. A variação notada é inferida então através da medição de resistência do seu enrolamento.

No entanto, também para essa análise, é fundamental que se conheça de maneira bem determinada a curva de resistência *versus* temperatura para o material constituinte do enrolamento. Assim, essa análise foi desenvolvida com auxílio de estufa, multímetro e transdutor de temperatura.

Dispôs-se na estufa um ventilador de mesmo modelo presente no refrigerador em estudo. Transdutor de temperatura foi agregado em seu corpo próximo ao enrolamento. No intuito de levantar a curva de resistência *versus* temperatura, selecionaram-se algumas temperaturas na estufa e, depois de garantida sua estabilização, fez-se leitura da resistência com multímetro.

Também neste experimento os terminais do ventilador foram ligados a 4 fios. Portanto, a influência das resistências dos fios de ligação não faz parte do resultado. A curva encontrada é apresentada na figura 65.

Figura 65 - Resistência do enrolamento do ventilador



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

A curva obtida no ensaio apresenta comportamento bastante linear e ascensão com variação positiva da temperatura. A variação encontrada para a resistência do ventilador é de  $3,1 \Omega/^{\circ}\text{C}$  e a variação relativa percentual de  $0,38\%$  ( $38 \mu\Omega/\Omega^{\circ}\text{C}$ ).

Analisando a variação apresentada, pode-se supor que o material constituinte desse enrolamento seja o cobre. De acordo com a literatura (HALLIDAY; RESNICK, 1984), o cobre apresenta coeficiente de temperatura de resistividade aproximadamente  $0,39\%$ , considerado linear para a faixa testada.

Com relação à proposta de solução, duas possibilidades são apontadas para medição da resistência: medição direta com multímetro, estando nesse caso o ventilador desligado; medição através de injeção de corrente contínua no circuito CA, que permite medição com motor em funcionamento.

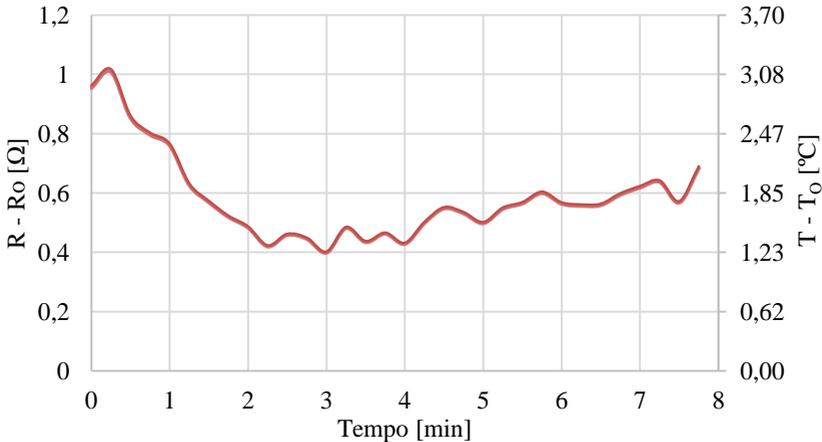
Pensando na aplicação, onde é desejado que o ventilador permaneça desligado quando o resistor de degelo é acionado<sup>38</sup>, pela menor complexidade de operação, tempo e custo necessários para tal, optou-se pela avaliação da resistência através de medição direta com multímetro.

Para tanto, o refrigerador foi ligado até entrar em regime permanente. Em 5,5 h, compressor e ventilador foram desligados e resistor de degelo acionado, imediatamente os terminais do ventilador foram conectados ao multímetro Agilent 34410 A em ligação a 4 fios.

<sup>38</sup> O funcionamento do ventilador durante operação do resistor faz com que o calor produzido se propague com mais facilidade para os compartimentos de armazenagem do refrigerador, prejudicando assim a conservação dos alimentos.

Neste ensaio, a variação de resistência encontrada, assim como sua equivalente em temperatura, é apresentada na figura 66.

Figura 66 - Variação da resistência do enrolamento e equivalente em temperatura



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Examinando-se o gráfico é possível notar que a variação dessa resistência não tem comportamento como esperado. Nos dois primeiros minutos ela varia negativamente, indicando que o ventilador está sob resfriamento. Sabendo-se que o ensaio iniciou quando o ventilador foi desligado, a queda na resistência elétrica observada pode ser consequência do resfriamento das espiras.

Não é possível separar esses efeitos, sendo que nos primeiros instantes observados a perturbação causada pelo resistor de degelo pode não estar se manifestando devido à inércia térmica ou por estar sendo anulada.

Ademais, mesmo considerando-se o resfriamento, a resposta do sistema frente à perturbação se mostra lenta. Tomando-se em consideração a aplicação, é factível a inviabilidade de acionar o resistor de degelo por 8 min para verificação do nível de geada depositada. Esse tempo representa 40% do tempo total médio de degelo quando o refrigerador está em operação normal.

#### 4.4.5. Medição direta de temperatura

No momento em que o refrigerador é ligado, e também após degelos completos, não há presença de geada no evaporador. A figura 67 ilustra um esquema do tubo do evaporador na porção onde o fluxímetro está aderido

(esquerda) e um corte na direção transversal nessa área (direita) em uma situação onde não há geada.

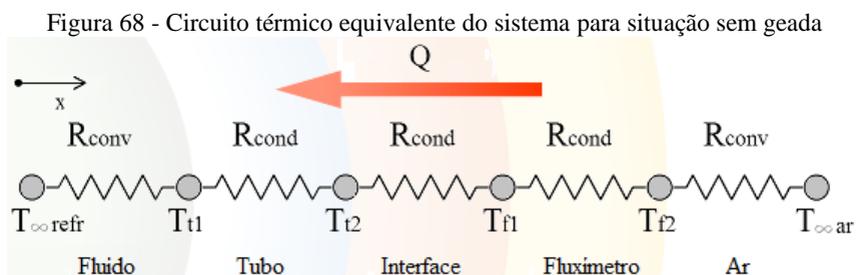


**Legenda:** a) Visão geral do conjunto;  
b) Corte na sessão transversal;

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Nessa condição, a única resistência se opondo à transferência de calor entre o fluido e o ar é o próprio meio, ou seja, a transferência de calor está ocorrendo majoritariamente através de convecção. Tomando-se a simetria do tubo, considera-se que só há gradiente de temperatura em uma direção, e assim a transferência de calor é unidimensional no sentido radial do tubo.

Utilizando o modelo de resistência térmica, essa situação pode ser representada pelo circuito a seguir:



**Legenda:**

$R_{conv}$  é a resistência à transferência de calor por convecção.

$R_{cond}$  a resistência para a condução.

$T_{t1}$  e  $T_{t2}$  são as temperaturas das superfícies interna e externa do tubo, respectivamente.

$T_{f1}$  e  $T_{f2}$  são as temperaturas da superfície interna e externa do fluxímetro, respectivamente.

$T_{\infty refr}$  a temperatura do fluido refrigerante

$T_{\infty ar}$  a temperatura do ar.

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Internamente à serpentina o fluido refrigerante sofre um processo evaporativo. Sabendo que os processos de mudança de fase ocorrem com resistência de evaporação baixa, considera-se a temperatura da parede interna do tubo igual à do fluido.

Dado que a condutividade térmica aparente do fluxímetro é de aproximadamente 0,6 W/mK e sua espessura é de 300  $\mu\text{m}$ , sua resistência térmica será considerada desprezível. Essa mesma hipótese também será considerada para a parede do tubo.

A resistência de contato entre as paredes do fluxímetro e do tubo será desconsiderada por ser bastante baixa. O fluxímetro foi colado no tubo com adesivo epóxi de condutividade térmica próxima a 0,22 W/mK a 25 °C<sup>39</sup>.

Considerando-se ainda o regime estacionário das situações, a resistência de condução apresentada pela parede do tubo será desconsiderada, assim como a troca radiante entre as superfícies com a vizinhança. Assim, a resistência à transferência de calor na situação sem geada se resume ao próprio coeficiente convectivo (h):

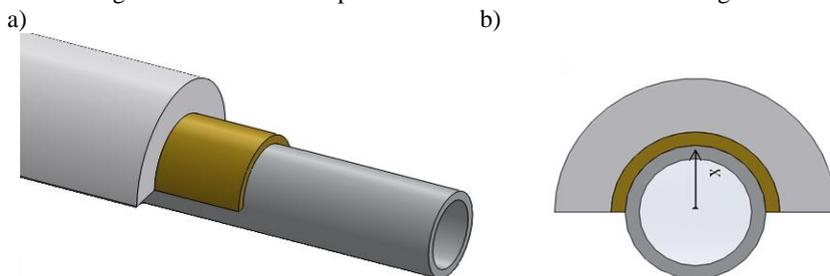
$$h = \frac{q}{\Delta T} \quad (32)$$

Com o resfriamento do ar no evaporador, ocorre também sua desumidificação. O vapor de água antes presente no escoamento se deposita nas superfícies do tubo formando a camada de geada que vai gradualmente aumentando de espessura. A figura 69 ilustra um esquema do tubo do evaporador com camada de geada depositada em sua porção onde o fluxímetro está aderido (esquerda) e um corte transversal nessa área (direita).

---

<sup>39</sup> A resistência de contato se deve principalmente aos efeitos de rugosidade das superfícies. Segundo Incropera (2008), qualquer substância que preencha os interstícios entre as superfícies em contato e cuja condutividade térmica exceda a do ar irá causar uma redução na resistência de contato.

Figura 69 - Tubo do evaporador com fluxímetro e camada de geada

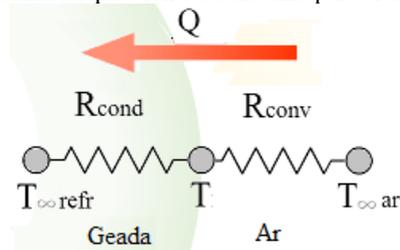


**Legenda:** a) Visão geral do conjunto;  
b) Corte na sessão transversal;

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Adotando as considerações já citadas, o circuito térmico da situação pode ser resumido ao circuito da figura 70.

Figura 70 - Circuito térmico equivalente do sistema para situação com geada



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Na condição onde a camada de geada está presente no tubo, a transferência de calor passa a ter outras resistências associadas à sua ocorrência, podendo ser representada por:

$$R_{\text{total}} = \frac{\Delta T}{q} \quad (33)$$

Da mesma forma, a resistência total dada pelas resistências à condução e convecção é:

$$R_{\text{total}} = R_{\text{cond}} + R_{\text{conv}} \quad (34)$$

Para sistemas radiais, a resistência térmica total por unidade de

comprimento do tubo, fica:

$$R_{\text{total}} = \frac{\ln(r_{\text{geada}}/r_{\text{tubo}})}{2\pi k} + \frac{1}{2\pi r_{\text{geada}} h} \quad (35)$$

Onde:

$r_{\text{tubo}}$  é o raio externo do tubo [m].

$r_{\text{geada}}$  o raio externo da camada de geada [m].

$h$  o coeficiente convectivo [ $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ ].

$k$  a condutividade térmica [ $\text{W}/\text{mK}$ ].

Assim, a espessura da geada é dada pela diferença entre  $r_{\text{geada}}$  e  $r_{\text{tubo}}$ .

Sendo a resistência à troca de calor uma oposição ao fluxo, maior será a transferência quanto maiores forem os coeficientes  $k$  e  $h$ . Observa-se também que o outro parâmetro de influência é a espessura da camada de geada. A partir de determinado limite, quanto maior for esta camada, maior será a resistência imposta, e menor o fluxo. A espessura crítica pode ser avaliada analogamente ao problema de raio crítico de isolamento.

Resolvendo-se as equações de maneira a maximizar o fluxo de calor, ou minimizar a resistência, encontra-se:

$$r_{\text{critico}} = \frac{k}{h} \quad (36)$$

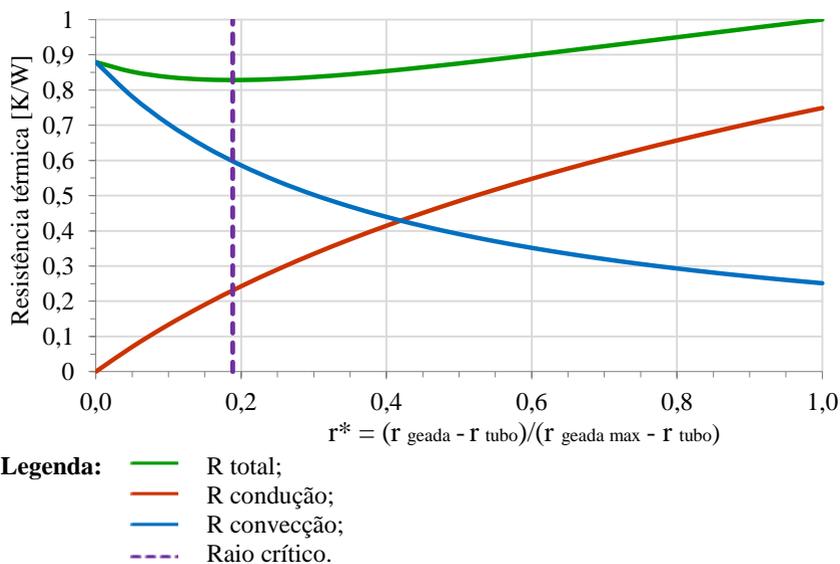
Onde:

$k$  é a condutividade térmica [ $\text{W}/\text{mK}$ ].

$h$  o coeficiente convectivo [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ].

A figura 71 ilustra a variação das resistências de condução e convecção em condições típicas de operação do evaporador e camada de geada de 10 mm sobre a serpentina. Também para a situação típica de funcionamento o raio crítico é apresentado.

Figura 71 - Resistências térmicas em relação ao raio crítico



Fonte: Laboratório de Ciências Térmicas (2015).

Para a situação representada, o raio crítico de isolamento é de 6 mm, ou seja, acima de 2 mm de geada formada sobre a serpentina a camada passa a ser prejudicial à transferência de calor.

Com relação às aletas, por serem contínuas, considerou-se a divisão da área total de uma aleta pelo número de tubos que a atravessam. Dessa maneira, cada porção do tubo tem uma aleta individual de menor tamanho. Quanto às temperaturas ao longo das aletas, uma boa aproximação pode ser feita considerando a temperatura na superfície do tubo constante até metade da área da aleta individual. Assim, desconsidera-se metade da área da aleta individual, e a porção restante possui a mesma temperatura da superfície do tubo.

Como visto, o aumento da camada de geada diminui a capacidade do evaporador. Para que o refrigerador não opere em níveis indesejáveis, periodicamente o degelo do evaporador ocorre pelo acionamento do resistor de degelo.

A taxa de calor fornecida pelo resistor em determinado intervalo de tempo é dada pela equação 24, e provém da passagem de corrente elétrica pelo elemento resistivo do resistor.

$$q = \frac{Q}{\Delta t} \quad (37)$$

Na equação:

$q$  é a taxa de calor fornecida pelo resistor [W].

$Q$  é a quantidade de calor [J].

$\Delta t$  o intervalo de tempo [s].

Para que a geada derreta é necessário que ela receba quantidade de calor mínima. Inicialmente o calor recebido faz com que sua temperatura aumente até 0 °C (calor sensível). Em se considerando esse processo à pressão constante tem-se:

$$q = mc_p\Delta T \quad (38)$$

Onde:

$m$  é a massa de geada [kg].

$c_p$  é o seu calor específico [J/kg°C].

$\Delta T$  a variação de temperatura [°C].

À temperatura de 0 °C, o calor recebido pela geada é empregado na sua fusão, na forma de calor latente. A quantidade de calor latente é dada por:

$$q = mh_{sl} \quad (39)$$

Onde:

$h_{sl}$  é o calor latente de fusão [J/kg].

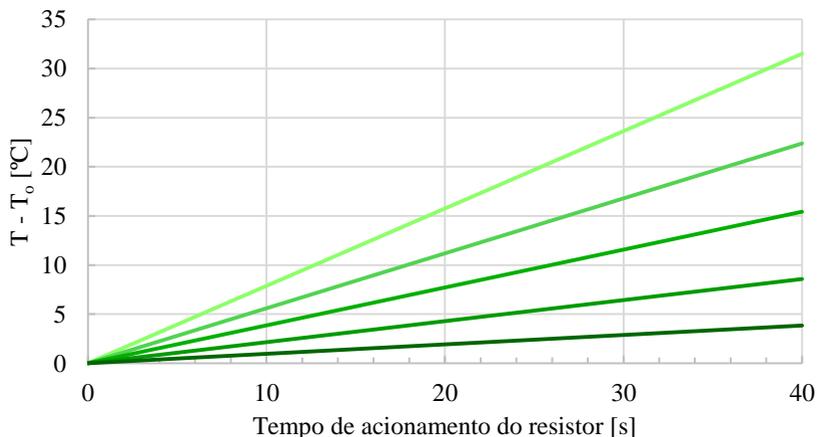
$m$  a massa da geada [kg].

A fim de se observar o efeito da quantidade de geada na temperatura do evaporador quando o resistor de degelo é acionado, calcularam-se as variações teóricas que ocorrem em 40 s. Como não se tem interesse em derreter a geada, mas apenas conhecer a forma com que sua temperatura varia, somente o calor sensível foi considerado.

Supôs-se distribuição uniforme do calor e sem perdas, a massa de geada foi considerada uniformemente distribuída sobre as superfícies. Assim, as variações de temperatura para determinadas massas de geada obtidas foram as apresentadas na figura 72.

Figura 72 - Variação de temperatura teórica do evaporador para diferentes

quantidades de geada em relação ao tempo de acionamento do resistor de degelo



**Legenda:**

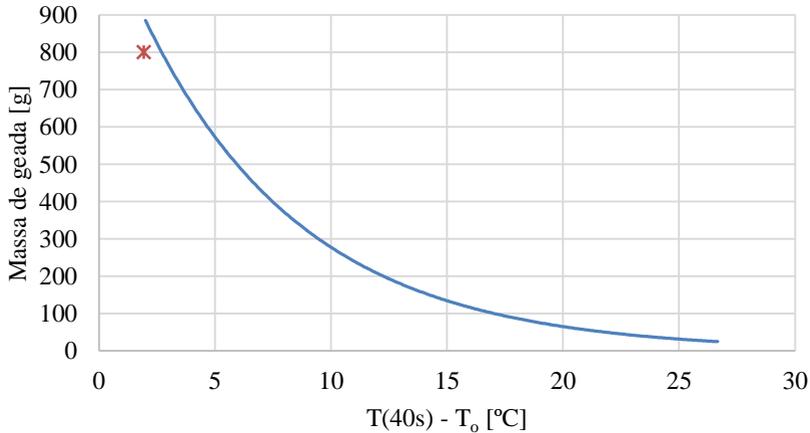
- 5 g;
- 50 g;
- 120 g;
- 300 g;
- 800 g.

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Como esperado, maior tempo provoca variações de temperatura maiores, e maiores quantidades de geada apresentam menores variações para um mesmo intervalo de tempo. Enquanto 5 g de geada fazem com que o evaporador varie em 32 °C, já 800 g provocam 4 °C de variação.

Dessa maneira, é possível mostrar que a dinâmica de variação de temperatura pode ser relacionada com a quantidade de geada presente no evaporador. Uma equação que permite relacionar a variação de temperatura calculada com intervalo de 40 s de acionamento do resistor com a quantidade de geada é apresentada graficamente na figura 73, onde também está representado um ponto experimental medido, quando 800 g de geada estavam presentes no evaporador.

Figura 73 - Relação entre massa de geada no evaporador e variação de temperatura



**Legenda:**    ✕ Experimental (800 g de geada);  
                   — Teórico.

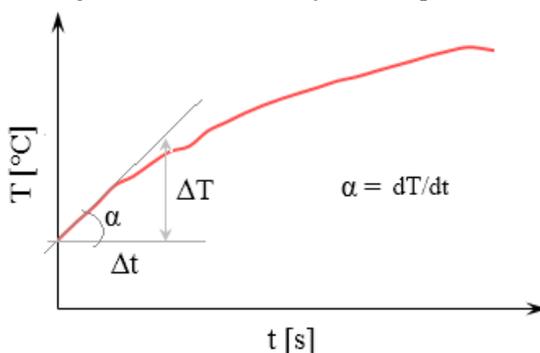
Fonte: Elaborada pela autora (2015).

De acordo com a teoria, a variação de temperatura observada no experimento (temperaturas medidas na serpentina na posição de entrada do fluido refrigerante - termopar T1) diverge em 8%. Embora ligeiramente diferentes, a alternativa apontada ainda pode ser uma possibilidade de solução.

Como visto, a quantidade de geada no evaporador interfere na transferência de calor, pois ela atua como isolante. Através das equações apresentadas é possível observar que maior quantidade de geada exige mais tempo de resistor acionado para derreter toda a formação. De fato, observa-se na prática que os degelos não têm duração fixa, porém não devido ao conhecimento direto da quantidade de geada depositada.

Em se considerando o exposto, a solução apontada para estimar o nível de geada presente no evaporador é, a partir de perturbação do sistema, avaliar a resposta em temperatura *versus* tempo através de transdutor de temperatura inserido no sistema. A figura 74 ilustra o gráfico proposto, no qual a análise pode ser feita em variação de temperatura ( $\Delta T$ ) ou em taxa de variação desta ( $dT/dt$ ).

Figura 74 - Taxa de variação da temperatura



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Com relação à localização do transdutor para análise, é necessário investigar os pontos do trocador mais sensíveis, que permitam obter informação relevante para diagnóstico. Como a geada se deposita nas aletas, resistor de degelo e na própria serpentina do evaporador, a medição pode ser possível em qualquer uma dessas áreas do refrigerador.

O comportamento da curva obtida pode ser avaliado através da sua inclinação, matematicamente representada pela sua derivada, tanto no período de aquecimento (“subida” do pulso) quanto no de resfriamento (“descida” do pulso).

Embora a ideia demande emprego de transdutor específico para medição de temperatura, ela ainda deve ser considerada, uma vez que existem no mercado transdutor de baixo custo com boas características metrológicas. Ademais, a medição com estes transdutores é bastante consolidada pela indústria e a eletrônica necessária muitas vezes já está disponível nos refrigeradores, tendo em vista que eles já possuem sensores de temperatura em sua configuração atual.

A análise desta proposta foi feita com base no comportamento de diferentes temperaturas durante o aquecimento provocado pelo acionamento do resistor. As temperaturas foram medidas com termopares inseridos no sistema, como mostrado no capítulo 3, e as avaliações foram feitas em variação de temperatura e também através da dinâmica de variação dessa grandeza.

Para tanto, experimentou-se o refrigerador em duas situações extremas: evaporador sem depósito de geada e com elevada quantidade de geada. No entanto, a situação de evaporador sem depósito deve ser medida em condição de regime permanente para que posteriores comparações possam ser feitas. Sete ensaios foram executados:

- quatro **com geada**, denominados a, b, c e d, com refrigerador em funcionamento por 160 h, massa de geada próxima a 800 g;
- três **sem geada**<sup>40</sup>, denominados e, f e g, com 5,5 h de funcionamento do refrigerador e massa de água coletada em torno de 45 g.

Os ensaios para a condição com geada foram desenvolvidos sem acionamento do resistor de degelo em nenhum momento, com compressor e ventilador funcionando ininterruptamente.

Nos tempos determinados (160 h e 5,5 h de funcionamento) o resistor de degelo foi acionado por cinco minutos. Nessas ocasiões, ventilador e compressor foram desligados. As temperaturas foram monitoradas e ao fim do degelo a massa de água medida.

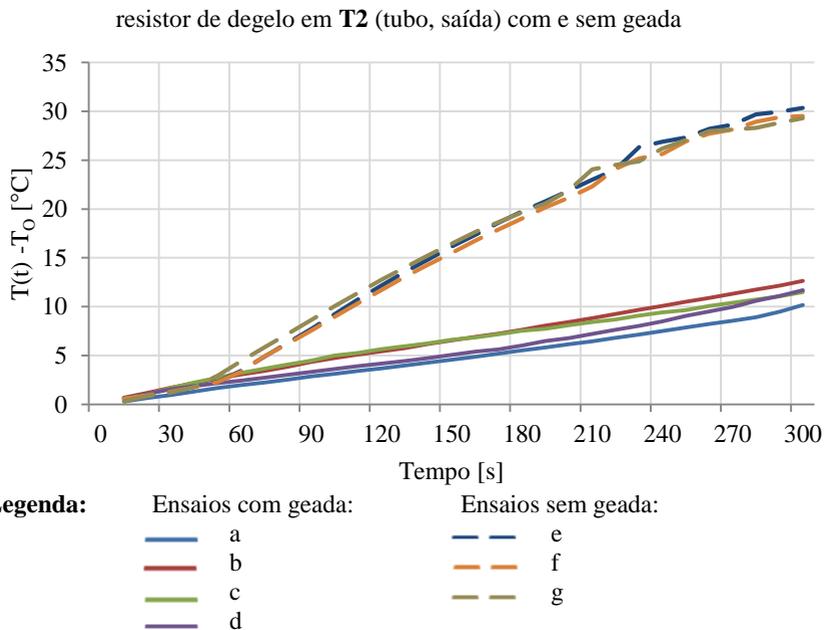
As figuras 75, 77 e 79 apresentam as variações das temperaturas medidas na saída da serpentina (T2), no meio da serpentina (T3) e no resistor, em sua porção inferior central (T9), pois esses foram os pontos de medição de temperatura que apresentaram maiores diferenças. Cada qual apresenta também a taxa de variação da temperatura das médias dos ensaios com e sem geada nas figuras 76, 78 e 80.

Uma análise inicial dos resultados mostrou que, como esperado, as temperaturas do ar (termopares T6, T7, T8, T11, T12 e T13) apresentaram variações menores comparadas aos demais termopares. As variações foram também irregulares, não se mostrando, portanto, próprias para solução desejada. Os gráficos das temperaturas medidas nesses e nos demais termopares estão demonstrados no apêndice III.

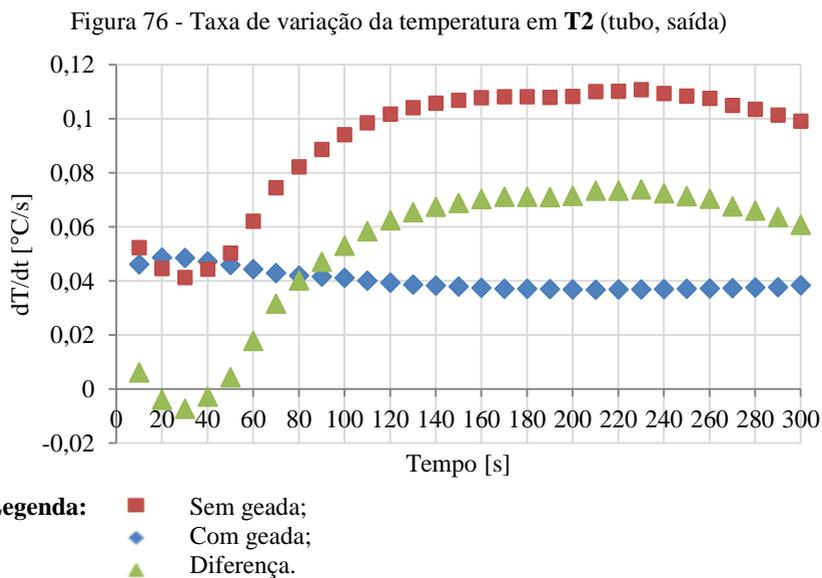
Figura 75 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do

---

<sup>40</sup> Os ensaios foram assim denominados pois, comparados aos demais, apresentam quantidade de geada muito menor. Embora se tenha observado anteriormente que em 5 h de funcionamento do refrigerador existe depósito de geada.



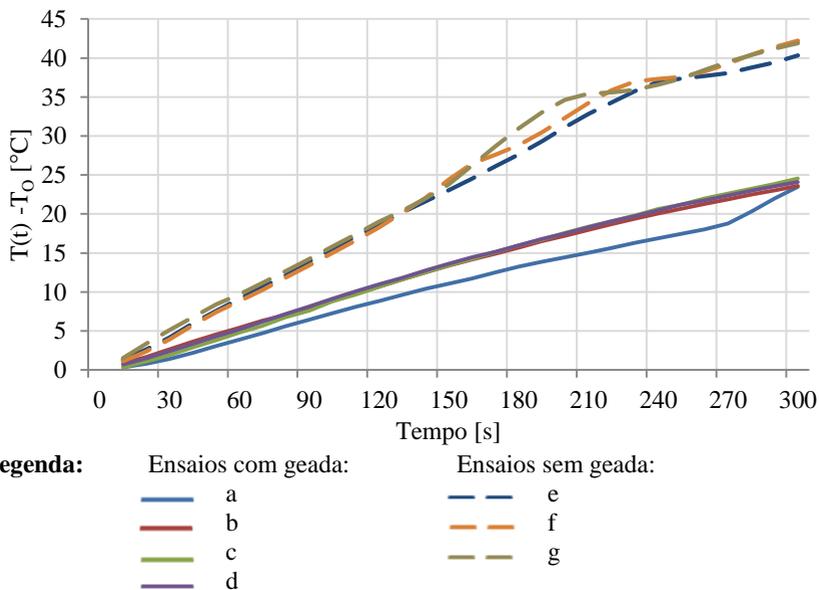
Fonte: Elaborada pela autora (2015).



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

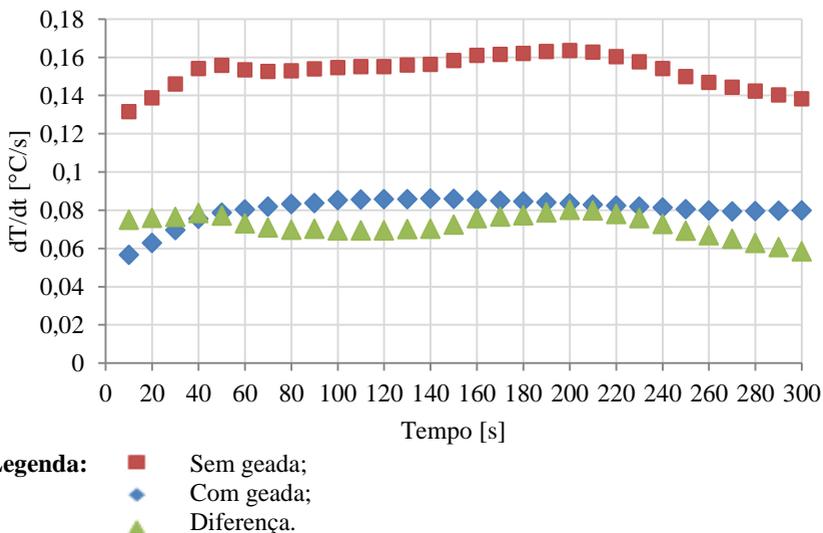
Figura 77 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do

resistor de degelo em T3 (tubo, meio) com e sem geada



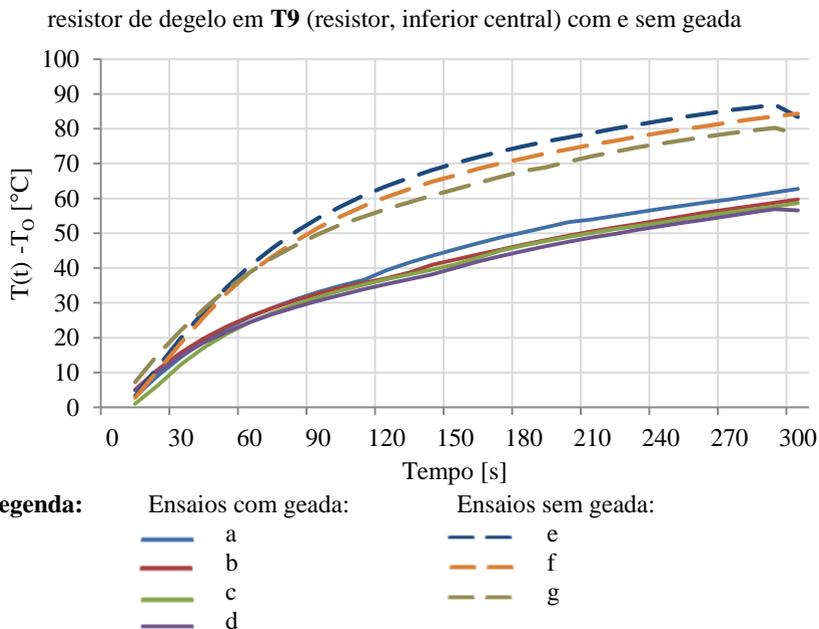
Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 78 - Taxa de variação da temperatura em T3 (tubo, meio)



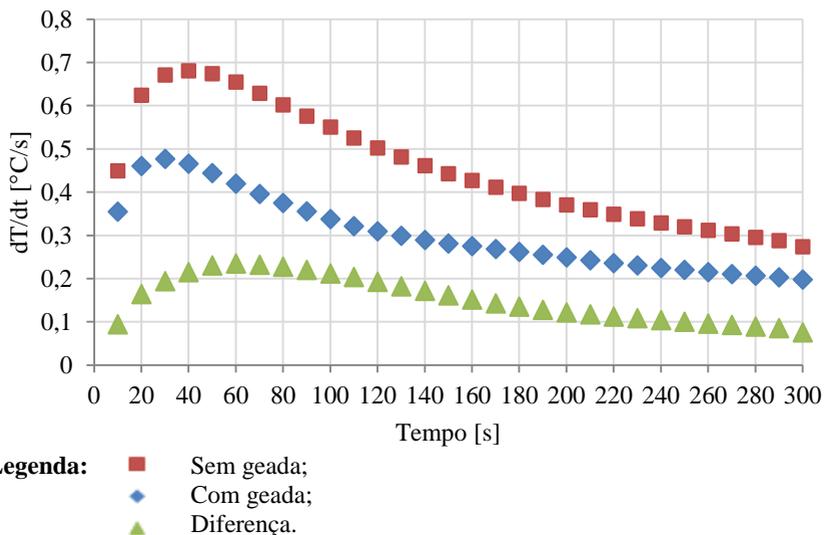
Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 79 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 80 - Taxa de variação da temperatura em **T9** (resistor, inferior central)



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

A partir dos gráficos é possível observar que, excetuando-se os

períodos iniciais, todos os intervalos de análise apresentam segregação evidente entre os dois grupos de ensaios (com e sem geada). Nota-se também que os três ensaios sem geada apresentam diferenças sempre maiores ao longo dos períodos, e em todos os pontos de medição de temperatura. É possível notar também que a diferença de temperaturas, de forma geral, aumenta com o aumento do período analisado.

O termopar 2 (T2), localizado no final da serpentina, ou seja, na saída do fluido no evaporador, apresenta diferença de temperatura crescente, atingindo valor máximo de 18 °C no período de 4,5 min (270 s). Quanto a sua taxa de variação, apresenta comportamento aleatório nos estágios iniciais, chegando até a inverter momentaneamente o comportamento.

Outro termopar medindo as temperaturas do tubo é o T3, que está localizado na porção central da serpentina. Nesse termopar o mesmo comportamento observado no anterior é registrado. A maior diferença entre as médias dos ensaios acontece nos períodos maiores (4,5 min) e são próximas aos 17 °C. Esse ponto de medição apresenta diferença de taxa de variação de temperatura quase constante ao longo do período de aquecimento, com diferença de 0,08 °C/s entre as médias dos ensaios com e sem geada.

O termopar T9 está posicionado diretamente no corpo do resistor, por isso, como esperado, apresenta sensibilidade à variação de temperatura mais acentuada já nos primeiros instantes. A diferença máxima é próxima a 25 °C em 4 min (240 s). Quanto à taxa de variação de temperatura, possui em 10 s cerca de 0,1 °C/s de diferença entre as médias dos ensaios com e sem geada. Esse valor aumenta um pouco ao longo do período, chegando a apresentar 0,23 °C/s de diferença em 60 s.

Diante dos resultados, e sabendo que a diferença entre a média dos ensaios com e sem geada foi em torno de 755 g de geada, pode-se dizer que a presença de geada influencia a dinâmica de variação das temperaturas, e que essa variação é detectável. A identificação através apenas da variação de temperatura também se mostra propícia. Portanto, com base neste ensaio, atesta-se a validade dos conceitos propostos.

Os ensaios desenvolvidos, no entanto, consideram duas situações extremas, sendo a condição sem geada analisada em 5,5 h de funcionamento, e os ensaios com geada com 160 h de funcionamento sem ocorrência de degelo. Cabe salientar que tal fato não ocorre na operação normal do refrigerador.

Desse modo, e tendo atestado a funcionalidade do conceito proposto, realizaram-se ensaios onde a diferença de temperaturas foi analisada para situações reais de operação, ou seja, acionando-se o resistor de degelo após 4 h e 12 h de funcionamento do refrigerador. Dois ensaios para cada situação

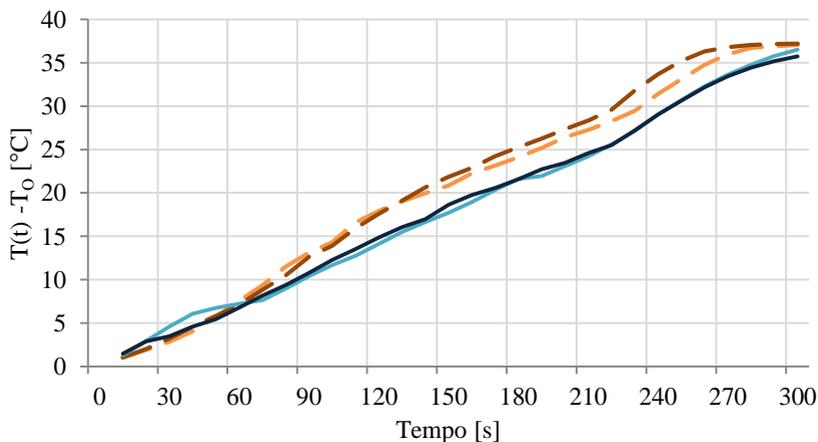
foram realizados.

Também como anteriormente, após o acionamento do resistor por 5 min, com compressor e ventilador desligados, mediram-se as massas de água providas do degelo.

A massa de água coletada nos ensaios mais curtos foi de 35 g em média, enquanto que para os de 12 h a média foi de 88 g. Quanto à representação, os ensaios após o período de 4 h estão descritos em linhas tracejadas, enquanto os de 12 h em linhas contínuas.

Somente os pontos de medição que apresentaram maiores variações de acordo com o experimento anterior serão apresentados. As figuras 81 e 83 apresentam as variações na serpentina em seu meio (T3) e na parte inferior central do resistor (T9). As figuras 82 e 84 apresentam as taxas de variação das médias de temperaturas para esses termopares. As demais variações de temperatura e taxas (T1, T2, T4, T5, T6, T7, T8, T11, T12 e T13) são apresentadas no apêndice IV.

Figura 81 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T3 (tubo, meio) em experimentos de 4 h e 12 h

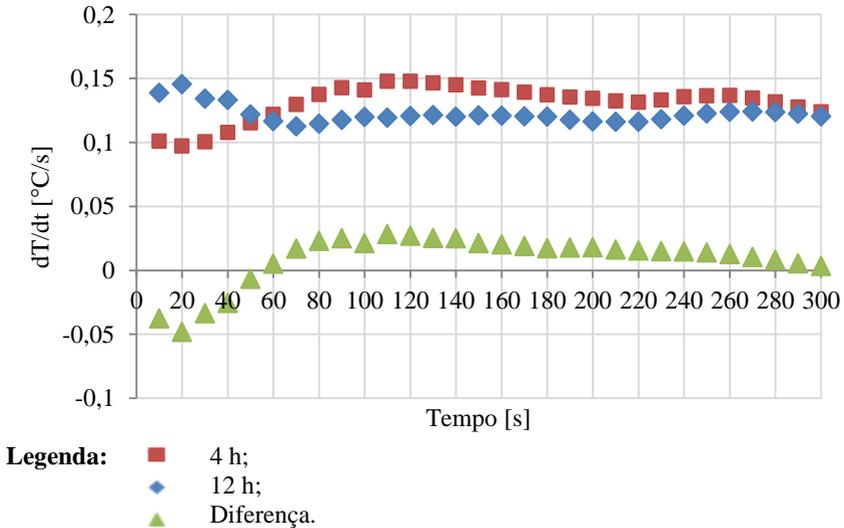


**Legenda:**

4 h:	12 h:
— a	— c
— b	— d

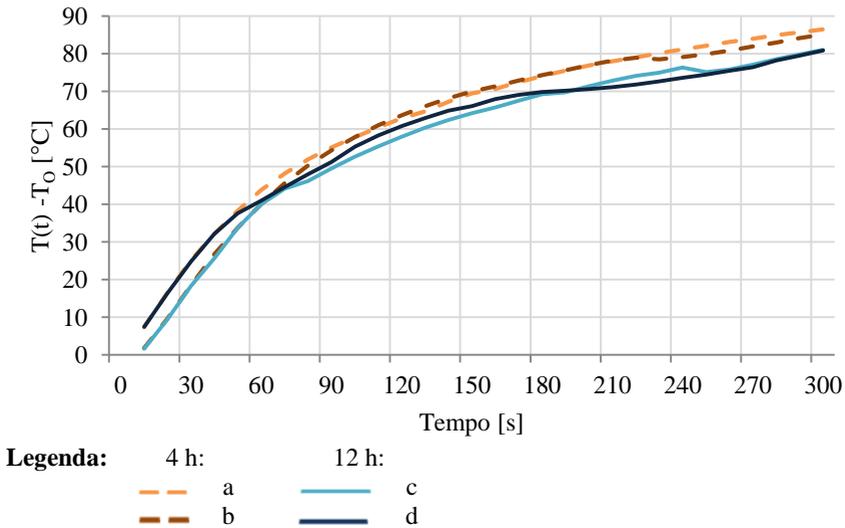
Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 82 - Taxa de variação da temperatura em T3 (tubo, meio) em 4 h e 12 h



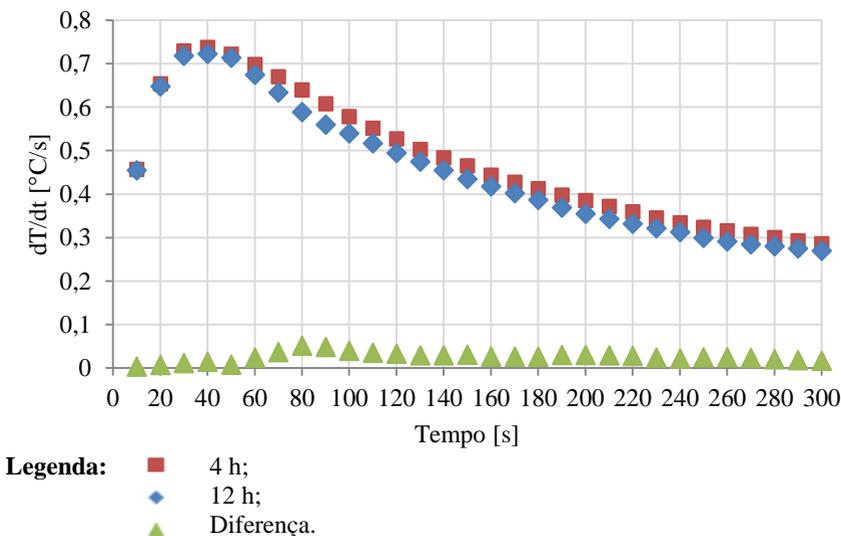
Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 83 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T9 (resistor, inferior central) em experimentos de 4 h e 12 h



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 84 - Taxa de variação da temperatura em T9 (resistor, inferior central) em 4 h e 12 h



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Analisando os gráficos é possível notar que a diferenciação entre as situações não é mais tão evidente como observada no ensaio anterior, embora ainda ocorra.

Aqui também, para todos os termopares analisados e para a grande maioria dos períodos de tempo, os ensaios com menores níveis de geada apresentam diferenças de temperatura ligeiramente superiores, como esperado. Para intervalos curtos (até 1 min) as diferenças entre ensaios de 4 h e 12 h não se mostram significativas.

Para T3 as maiores diferenças entre as variações de temperatura ocorrem nos intervalos maiores, apresentando valor máximo de 3,6 °C em 3,5 min (210 s). Suas taxas de variação das temperaturas não apresentam valores elevados e o comportamento é imprevisível.

A posição de T9 apresenta as maiores diferenças no intervalo de (2 a 4) min com valor de 6,3 °C. A diferença entre as taxas de variação é pouco significativa, e se mantém assim ao longo de todo período analisado.

Deve-se salientar que durante o acionamento do resistor, compressor e ventilador foram mantidos desligados, de maneira que as variações de temperaturas não sofreram efeito somente do acionamento, como também da interrupção de circulação do fluido refrigerante. Ambos os efeitos causam o aumento das temperaturas, porém com intensidades diferentes dependendo da localização do ponto em análise.

Assim, embora o conceito tenha sido atestado, o mesmo se mostrou pouco eficiente na diferenciação de pequenas porções de geadas. Avaliando-se a quantidade de geadas através da variação de temperatura, em alguns casos houve diferença de temperatura considerável, porém em tempos elevados, o que inviabiliza a proposta já que prejudicaria energeticamente o refrigerador.

Com relação à taxa de variação, pouca diferença foi observada, e em alguns casos até inversão de comportamento, sendo necessários mais ensaios para verificar se a variação ocorre dessa maneira.

A avaliação através da taxa mostra-se interessante por necessitar acionamento do resistor por menos tempo. Uma proposta é acionar o resistor de degelo com compressor e ventilador em funcionamento, por alguns segundos, em 4 h de funcionamento do refrigerador, caso desnecessário o processo de degelo não seria ativado. A proposta ainda não é capaz de avaliar a geadas em intervalos menores para identificar a necessidade do degelo. Porém estudos mais aprofundados podem permitir tal desenvolvimento.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1. CONCLUSÕES

Considera-se que o objetivo geral deste trabalho foi alcançado pelo cumprimento dos objetivos específicos, muito embora uma solução para o problema não pode ser apontada.

De posse do levantamento de alternativas de solução, ponto de início deste projeto, foi desenvolvida bancada de testes a partir de um refrigerador de modelo bastante empregado em domicílios no Brasil.

Possibilidades de formas foram apontadas a para identificação de níveis de geada no evaporador. Diversas propostas apresentaram potencial de sucesso, sendo que algumas delas atenderam o requisito desejado de não necessitar a inserção de transdutor extra para tal avaliação. Por se mostrarem promissoras, algumas foram exploradas de maneira experimental para terem sua eficiência comprovada.

As oportunidades de identificação de níveis de geada pela variação de impedância do resistor de degelo, de resistência elétrica do resistor de degelo, de resistência elétrica do ventilador e de potência do ventilador não se mostraram adequadas para a aplicação. A presença de geada não causou variação suficiente nessas grandezas, de maneira que possibilitassem a quantificação da formação.

Especial atenção foi dada à avaliação de níveis de geada através da análise da dinâmica de variação de temperatura do evaporador utilizando transdutores de temperatura. Testaram-se diversos pontos de medição de temperatura na serpentina, no ar e no resistor de degelo, através da perturbação do sistema pelo acionamento do resistor de degelo. A diferença entre as temperaturas no início e ao final da perturbação foi analisada para diferentes períodos de acionamento do resistor; assim como as taxas de variação das temperaturas. O conceito se mostrou válido para situações extremas testadas (5,5 h e 160 h), porém encontrou maiores complicações quando intervalos de funcionamento menores (4 h e 12 h) foram testados.

Os sensores simples testados, baseados em princípio óptico, em variação de capacitância e de indutância, não foram sensíveis à presença de geada com a configuração analisada. Não se pode, no entanto, descartar sua utilização, dado que outras dimensões e materiais de confecção podem se mostrar promissores.

Examinaram-se também as consequências da formação de geada através da eficiência do trocador pela medição das temperaturas do ar e da superfície do tubo. Nesses ensaios foi possível verificar o aumento da resistência à transferência de calor pelo acréscimo de geada nas superfícies

do evaporador. Ensaios com diversas durações foram desenvolvidos, nos quais a degradação do coeficiente de transferência de calor pela presença de geada foi evidenciada, embora essa variável não possa ser utilizada como indicador de nível de geada tendo em vista sua pequena variação.

A instalação de um transdutor de fluxo de calor no tubo em região central do evaporador permitiu comparar valores teóricos calculados para a transferência de calor, com medições experimentais desenvolvidas na bancada. Isso propiciou melhor entendimento do fenômeno de transferência nesse sistema, no entanto esse método também não permitiu identificar a quantidade de geada depositada.

Ainda, uma curva experimental de formação da geada no evaporador foi levantada e suas peculiaridades devido ao bloqueio parcial da porção central do trocador foram descritas.

Acredita-se que os desvios experimentais dos valores teóricos obtidos neste trabalho decorreram, principalmente, da dificuldade na determinação das propriedades da geada. Como visto, as propriedades dessa formação variam por dependerem das condições de formação e também por estas serem influenciadas por diversos parâmetros.

## 5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dada a relevância deste tema, no intuito de controlar o sistema de degelo de refrigeradores a partir da demanda de geada no evaporador, sugere-se que esta pesquisa tenha continuidade. Propõe-se que a busca por sistemas simples para quantificação da geada seja intensificada, e que outras configurações e princípios de sensores sejam avaliados.

O refinamento da avaliação teórica deve ser feito pelo melhoramento dos modelos térmicos e, então, melhores estimativas das possibilidades poderão ser encontradas. Para melhores resultados, também se sugere avaliar a densidade da geada em todos os ensaios desenvolvidos, para que o valor utilizado nos cálculos seja mais condizente com a realidade experimentada. Muito embora seja perceptível que em um mesmo ensaio diversos valores dessa grandeza podem ser encontrados ao longo do tempo e da posição em que se formam, resultados melhores podem ser obtidos com valores mais próximos à realidade. A inserção de mais fluxímetros no sistema, em outros pontos do evaporador, também permitirá melhores resultados a partir do entendimento das trocas de calor e seus pontos mais relevantes.

Com relação aos métodos já testados neste trabalho, sugere-se que sejam avaliados em outros refrigeradores, com diferentes cargas térmicas no refrigerador e também com variações dessa carga e abertura de portas, para

que comparações possam ser feitas. Os mesmos ensaios podem ser refeitos em ambiente de condições controladas, para que os resultados sejam comparados com os obtidos neste trabalho e a influência do ambiente avaliada.

No que concerne à avaliação da influência da geada a partir da taxa de variação de temperatura, sugere-se investigação do consumo energético demandado para acionamento do resistor e medição em diversos tempos. Testes com compressor e ventilador ligados também devem ser desenvolvidos para que a proposta possa ser mais bem avaliada.

Novas avaliações poderão ser desenvolvidas caso a bancada de ensaios seja aprimorada. Um ponto importante é torná-la capaz de incentivar a produção de geada apenas quando o refrigerador já estiver em regime permanente. Dessa maneira a influência da camada de geada poderá ser avaliada de maneira independente. Uma modificação visando facilitar a medição da quantidade de geada presente nos ensaios, sem que o degelo precise ser feito todas as vezes é através da utilização de câmera e de processamento de imagem. Por exemplo, calibrando a massa de geada depositada com a quantidade de pixel presente em uma imagem.



## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13773**: termorresistência industrial de platina: requisitos e ensaios. Rio de Janeiro, 2008.

ADD-THERM. **Fusíveis térmicos**. Disponível em: <<http://www.addtherm.com.br/protecao-termica/fusiveis-termicos/>>. Acesso em: 3 nov. 2013.

AGILENT TECHNOLOGIES. *The fundamentals of signal analysis: application note 243*. Disponível em: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5952-8898E.pdf>>. Acesso em: 5 mar. 2013.

AGILENT TECHNOLOGIES. **34970A/34972A Data acquisition/switch unit: user's guide**. EUA, 2012. Disponível em: <[http://www.naic.edu/~phil/hardware/Misc/hp34970\\_UserMan.pdf](http://www.naic.edu/~phil/hardware/Misc/hp34970_UserMan.pdf)>. Acesso em: 5 mar. 2013.

ALCIATORE D. G.; HISTAND M. B. *Introduction to mechatronics and measurement systems*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2012.

ALLARD, J.; HEINZEN, R. *Adaptive defrost*. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 24, n. 1, p. 39-42, 1988. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=87247>>. Acesso em: 25 set. 2013.

ANACLETO, A. M. da C. **Temperatura e sua medição**. 2007. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física Para O Ensino, Departamento de Física, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, 2007. Disponível em: <[http://www.fc.up.pt/fcup/contactos/teses/t\\_000355002.pdf](http://www.fc.up.pt/fcup/contactos/teses/t_000355002.pdf)>. Acesso em: 28 ago. 2013.

AVILES, E. A.; MILLER, N. R.; NEWELL, T. A. *Detection of Evaporator Frost*. Illinois, 2003. Disponível em: <<https://ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/12169/TR215.pdf?sequence=2>>. Acesso em: 21 mai. 2014.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E1137/E1137M-04: standard specification for industrial platinum resistance thermometers, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.

AYNUR, T. N. et al. *Real time upright freezer evaporator performance under frosted conditions*. In: 9º INTERNATIONAL REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING CONFERENCE AT PURDUE, West Lafayette, IN, USA, jul. 2002. **Anais...** USA, 2002.

BACK, N. et al. **Projeto integrado de produtos**: planejamento, concepção e modelagem. Barueri: Manole, 2008, 601p.

BAKER, H. D.; RYDER, E. A.; BAKER, N. H. *Temperature measurement in engineering*. Stamford: Omega Press, 1975. 1 v.

BAKER, H. D.; RYDER, E. A.; BAKER, N. H. *Temperature measurement in engineering*. Stamford: Omega Press, 1975a. 2 v.

BANSAL, P.; FOTHERGILL, D.; FERNANDES, R. *Thermal analysis of the defrost cycle in a domestic freezer*. **International Journal Of Refrigeration**, v. 33, n. 3, p. 589-599, mai. 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.ijrefrig.2009.11.012>>. Acesso em: 5 jun. 2013.

BARBOSA, JR, J. R.; HERMES, C. J. L.; MELO, C. *CFD analysis of tube-fin 'no-frost' evaporators*. **J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.**, Rio de Janeiro, v. 32, n. 4, dec. 2010. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1678-58782010000400006&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-58782010000400006&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 5 out. 2013.

BARBOSA JR., J. R. et al. *A study of the air-side heat transfer and pressure drop characteristics of tube-fin 'no-frost' evaporators*. **Applied Energy**, v. 86, n. 9, p. 1484-1491, set. 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.apenergy.2008.11.027>>. Acesso em: 17 jan. 2013.

BEJAN, A., VARGAS, J. V. C., LIM, J. S. *When to defrost a refrigerator, and when to remove the scale from the heat exchanger of a power plant*. **International Journal of Heat Mass Transfer**, v. 37, n. 3, p. 523-532, fev. 1994. Disponível em: <[http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/0017-9310\(94\)90087-6](http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/0017-9310(94)90087-6)>. Acesso em: 5 jun. 2013.

BELL, C. A. *Investigation of a demand-actuated defrost system for residential refrigerators*. **Energy**, v. 3, n. 4, p. 479-483, ago. 1978. Disponível em: <<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.10>

16/0360-5442(78)90008-7>. Acesso em: 25 set. 2013.

BYUN, J. et al. *The application of photo-coupler for frost detecting in an air-source heat pump*. **International Journal Of Refrigeration**, v. 29, n. 2, p. 191-198, mar. 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.ijrefrig.2005.06.008>>. Acesso em: 26 set. 2013.

CARCIOFI, B.; GUTHS, S.; LAURINDO, J. B. Uso de transdutores de fluxo de calor no estudo da transferência de calor em alimentos embalados. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, v. 22, n. 3, p. 314-318, 2002. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cta/v22n3/v22n3a20.pdf>>. Acesso em: 27 mai. 2014.

CAVACO, M. A. M. **Medição de temperatura**. Pós-Graduação em Metrologia Científica Industrial, Departamento de Engenharia Mecânica Laboratório de Metrologia e Automatização. Florianópolis: UFSC, [20--].

CHANG, W.R. et al. *A new reverse cycle defrost design concept for refrigerators*. **ASHRAE Transactions**, Atlanta, GA. jan. 2010. Disponível em: <<http://www.thefreelibrary.com/A+new+reverse+cycle+defrost+design+concept+for+refrigerators.-a0227975391>>. Acesso em: 7 fev. 2014.

CHEN, A. et al. *Experimental research on a novel cold storage defrost method based on air bypass circulation and electric heater*. In: 7<sup>a</sup> Biennial International Workshop “Advances in Energy Studies”. **Energy**, v. 37, n. 1, p. 623–631, jan. 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.energy.2011.10.040>>. Acesso em: 25 set. 2013.

CHEN, H.; THOMAS, L.; BESANT, R. W. *Fan supplied heat exchanger fin performance under frosting condition*. **International Journal of Refrigeration**, v. 26, n. 1, p. 140–149, jan. 2003. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700702000117>>. Acesso em: 25 set. 2013.

CHILDS, P. et al. *Practical Temperature Measurement*. [S. l.]: Butterworth-Heinemann, 2000.

CHUVIECO, E. *Fundamentos de teledetección espacial*. 2. ed. Madrid: Rialp, 1995.

CLEZAR, A. C.; NOGUEIRA, A. C. R. **Ventilação**

**industrial.** Florianópolis: Editora da UFSC, 1999.

ÇENGEL, Y. A, BOLES, M. A. **Termodinâmica.** 5. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006. 848 p.

DATTA, D.; TASSOU, S. A.; MARRIOTT, D. *Frost prediction on evaporator coils of supermarket display cabinets using artificial neural networks.* In: PROCEEDINGS OF CLIMA 2000 CONFERENCE, 1997, Belgium. **Anais...** Belgium, 1997. Disponível em: <[http://www.inive.org/members\\_area/medias/pdf/Inive/clima2000/1997/P99.pdf](http://www.inive.org/members_area/medias/pdf/Inive/clima2000/1997/P99.pdf)>. Acesso em: 9 out. 2013.

ASM INTERNACIONAL. *Copper and copper alloys: ASM specialty handbook.* [S.l.]: J. R. Davis, 2001. 621 p.

DENG, D.; XU, L.; XU, S. *Experimental investigation of air cooler under frost conditions.* **Applied Thermal Engineering**, v. 23, n. 7, p 905-912, mai. 2003. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00022-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00022-X)>. Acesso em: 7 fev. 2014.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN IEC 751:** *Temperature/resistance table for platinum sensors.* Ohio: Lake Shore Cryotronics, 2014. Disponível em: <<http://www.lakeshore.com/Documents/F038-00-00.pdf>>. Acesso em: 3 jul. 2013.

DOSSAT, R. J. **Princípios de Refrigeração.** Hemus, 2004. 896 p.

ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY INC. *Automatic gutter deicing controls operating costs: model GIT-1 gutter ice sensor.* Disponível em: <<http://networketi.com/products/git-1-gutter-ice-sensor/>>. Acesso em: 15 jul. 2014.

FERRERO, A. *Meter voltage measurement.* In: CRC Press. **The measurement, instrumentation and sensors handbook on CD-ROM.** Disponível em: <<http://www.crcnetbase.com/isbn/978-0-8493-2145-0>>. Acesso em: 18 set. 2014.

FIGLIOLA, R. S.; BEASLEY, D. E. *Theory and design for mechanical measurements*, 3 ed. New York: John Wiley&Sons, 2000.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à**

**Mecânica dos Fluidos.** Rio de Janeiro: LTC, 2006.

FRICKE, B. A.; SHARMA, V. *Demand defrost strategies in supermarket refrigeration systems: interim report.* Oak Ridge, Refrigeration Project Team Retail Energy Alliance, 2011.

GOODFELLOW. *Constantan resistance alloy wire.* Disponível em: <<http://www.goodfellow.com/E/Constantan-Resistance-Alloy.html>>. Acesso em: 20 out. 2014.

GOSNEY, W. B. *Principles of refrigeration.* New York: Cambridge University Press, 1982. 666 p.

GRIFFITHS, D. J. **Introduction to Electrodynamics.** 3. ed. Prentice Hall, New Jersey, 1999.

GUPTA, J. K.; GOPAL, M. R.; CHAKRABORTY, S. *Modeling of a domestic frost-free refrigerator.* **International Journal of Refrigeration**, v. 30, n. 2, p. 311–322, mar. 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.ijrefrig.2006.06.006>>. Acesso em: 5 out. 2013.

GÜTHS S. et al. Um transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial. In: XI COBEM, 1995, Belo Horizonte, Brasil. **Anais eletrônicos...** Belo Horizonte, 1995. 1 CD-ROM.

HAHN, T. W.; BROYLES, J. D. *Electronic refrigeration defrost control - report of performance.* **IEEE Transactions on Industry and General Applications**, v. IGA-4, n. 1, p. 114-119, fev. 1968. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4180859>>. Acesso em: 25 set. 2013.

HAYT JR, W. H.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo.** 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física - 3.** 9. ed. Livros Técnicos e Científicos Editora, São Paulo, 2012.

HERMES, C. J. L. et al. *A study of frost growth and densification on flat surfaces.* **Experimental thermal and fluid science**, v. 33, n. 2, p. 371–379, jan. 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br>>

/10.1016/j.expthermflusci.2008.10.006>. Acesso em: 10 out. 2013.

HERMES, C. J. L.; MELO, C.; KNABBEN, F. T. *Alternative energy test method for frost-free refrigerators and freezers*. **Applied Thermal Engineering**, v. 50, n. 1, p.1029-1034, jan. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.applthermaleng.2012.07.035>>. Acesso em: 17 jan. 2014.

HERMES, C. J. L. *An analytical solution to the problem of frost growth and densification on flat surfaces*. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 55, n. 23-24, p. 7346-7351, nov. 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.06.070>>. Acesso em: 17 jan. 2014.

HOMOLA, M. C.; NICKLASSON, P. J.; SUNDSBO, P. A. *Ice sensors for wind turbines*. **Cold Regions Science and Technology**, Science Direct, v. 46, n. 2, p.125-131, nov. 2006. Disponível em: <[http://ac.els-cdn.com/S0165232X06000760/1-s2.0-S0165232X06000760-main.pdf?\\_tid=80a3e5f2-7174-11e4-a58e-00000aabb0f02&acdnat=1416570771\\_b4cdc00636757838958deb8f6f191ed7](http://ac.els-cdn.com/S0165232X06000760/1-s2.0-S0165232X06000760-main.pdf?_tid=80a3e5f2-7174-11e4-a58e-00000aabb0f02&acdnat=1416570771_b4cdc00636757838958deb8f6f191ed7)>. Acesso em: 17 mar. 2014.

HONEYWELL. *Rerefence and application data: temperature sensors. Platinum RTDs*. Disponível em: <[http://sensing.honeywell.jp/index.php?ci\\_id=50022&la\\_id=1](http://sensing.honeywell.jp/index.php?ci_id=50022&la_id=1)>. Acesso em: 20 ago. 2013.

HUANG, L.; LIU, Z.; LIU, Y.; GOU, Y. *Experimental study of frost growth on a horizontal cold surface under forced convection*. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 24, n. 7, p. 1523-1529, jul. 2010. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12206-010-0410-8>>. Acesso em: 20 ago. 2013.

HUANG, J. et al. *The effects of frost thickness on the heat transfer of finned tube heat exchanger subject to the combined influence of fan types*. **Applied Thermal Engineering**, v. 28, n. 7, p. 728-737, mai. 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431107002220>>. Acesso em: 9 out. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa nacional por amostra de domicílio 2001-2011**. Disponível em: <<http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?no=1&op=1&vcodigo=PD279&t=domicilios-particulares-permanentes-posse-geladeirahttp>>

[//www.ibge.gov.br/brasil\\_em\\_sintese/tabelas/habitacao.htm](http://www.ibge.gov.br/brasil_em_sintese/tabelas/habitacao.htm)>. Acesso em: 10 abr. 2014.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60335-1: household and similar electrical appliances – safety – part 1: general requirements**. 4, ed. 2001-05. Geneva, Switzerland: IEC, 2001. Disponível em: <[http://www.safequipment.com/DATA\\_BAG/SC\\_Edt/2011413173512866.pdf](http://www.safequipment.com/DATA_BAG/SC_Edt/2011413173512866.pdf)>. Acesso em: 18 jul. 2013.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60335-2-24: household and similar electrical appliances – safety – part 2-24: particular requirements for refrigerating appliances, ice-cream appliances and ice-makers**. Geneva, Switzerland: IEC, 2002.

IKIADES, A. et al. *Measurement of optical diffusion properties of ice for direct detection ice accretion sensors*. **Sensors and actuators A: physical**, v. 140, n. 1, p. 24-31, out. 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.sna.2007.05.036>>. Acesso em: 18 jul. 2013.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. São Paulo: LTC, 2008.

INFOMET (Org.). **Metais e ligas: cuproníquel**. Disponível em: <<http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=66>>. Acesso em: 20 out. 2014.

IOPE. INSTRUMENTOS DE PRECISÃO. **Termometria: termopares**. Disponível em: <[http://www.iope.com.br/index\\_port.htm](http://www.iope.com.br/index_port.htm)>. Acesso em: 10 ago. 2014.

\_\_\_\_\_. **Literatura: termorresistências**. Disponível em: <[http://www.iope.com.br/3ig1\\_termoresisencias.htm](http://www.iope.com.br/3ig1_termoresisencias.htm)>. Acesso em: 20 ago. 2013.

IRAGORRY, J.; TAO, Y-X.; JIA, S. *A critical review of properties and models for frost formation analysis*. **HVAC&R Research**, v. 10, n. 4, p. 393-420, 2004.

JIANG, Y. et al. *A novel defrosting control method based on the degree of refrigerant superheat for air source heat pumps*. **International Journal of Refrigeration**, v. 36, n. 8, p. 2278-2288, dez. 2013. Disponível em:

<<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.ijrefrig.2013.05.016>>. Acesso em: 26 set. 2013.

JINAN BESTAR INC. **Roll Bond Evaporator**. Disponível em: <<http://www.bestarinc.com/cpshow.asp?id=211&lid=37>>. Acesso em: 22 out. 2014.

KARATAS, H.; DIRIK, E.; DERBENTIL, T. *An experimental study of air-side heat transfer and friction factor correlations on domestic refrigerator finned-tube evaporator coils*. In: 8º INTERNATIONAL REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING CONFERENCE AT PURDUE, West Lafayette, IN, jul. 25-28, 1996. **Anais...** West Lafayette, 1996.

KCEL MOTORES E FIOS LTDA. **Manual de motores elétricos**. Disponível em: <<http://www2.ele.ufes.br/~jussara/maquinasII/ManualMotoresKcel.pdf>>. Acesso em: 9 jun. 2014.

KIM, Y.; TIKHONOV, A.; SHIN, Y.; LEE, J. *Experimental study on high performance defrosting heater for household refrigerator*. In: 13ª INTERNATIONAL HEAT CONFERENCE, Sydney, Australia, 2006. **Anais...** Australia, 2006.

KNABBEN, F. T. **Um estudo *in-situ* da formação de geada em evaporadores *no-frost***. 2010. 126f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010. Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/94460>>. Acesso em: 9 jun. 2014.

KNABBEN, F. T.; HERMES, C. J.; MELO, C. *In-situ study of frosting and defrosting processes in tube-fin evaporators of household refrigerating appliances*. **International Journal of Refrigeration**, v. 34, n. 8, p. 2031-2041, dez. 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.ijrefrig.2011.07.006>>. Acesso em: 5 jun. 2013.

KNOOP, D. E.; TERSHAK, A. T.; THIENEMAN, M. *An adaptive demand defrost and two-zone control and monitor system for refrigeration products*. **IEEE Transactions On Industry Applications**, v. 24, n. 2, p. 337-342, abr. 1988. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=2876>>. Acesso em: 25 set. 2013.

KREITH, F. **Princípios da transmissão de calor**. São Paulo: Edgar Blücher, 1977.

LABORATÓRIO DE CIÊNCIAS TÉRMICAS. **Planilha - Espessura Crítica de Isolamento em Cilindro e Esfera**. Disponível em: <<http://www.labtermo.ufsc.br/>>. Acesso em: 12 mar. 2015.

LACERDA, V.T. et al. *Measurements of the air flow field in the freezer compartment of a top-mount no-frost refrigerator: the effect of temperature*. **International Journal of Refrigeration**, v. 28, n. 5, p. 774-783, 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.ijrefrig.2004.10.009>>. Acesso em: 17 jan. 2014.

LEE, K.; KIM, W.; LEE, T. *A one-dimensional model for frost formation on a cold flat surface*. **International Journal of Heat & Mass Transfer**, Great Britain, p. 4359-4365, fev. 1997.

LEE, T. H. et al. *Comparison of air-side heat transfer coefficients of several types of evaporators of household freezer/refrigerators*. In: 9<sup>o</sup> INTERNATIONAL REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING CONFERENCE AT PURDUE, West Lafayette, IN, jul. 16-19, 2002. **Anais...** West Lafayette, 2006.

LYNCH, D. K. *The infrared spectral signature of water ice in the vacuum cryogenic AI&T environment*, **Aerospace Report** n. TR2006(8570)-1, dez. 2005. California: The Aerospace Corporate, 2005.

LIU, D.; CHANG, W.; LIN, J. *Performance comparison with effect of door opening on variable and fixed frequency refrigerators/freezers*. **Applied Thermal Engineering**, v. 24, n. 14-15, p. 2281-2292, out. 2004. Disponível em: <<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.applthermaleng.2004.01.009>>. Acesso em: 26 set. 2013.

LONG-HAO, Z. et al. *The research of optical fiber frost sensor and intelligent refrigerator defrost system*. In: IEEE 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE, Signal Processing (ICSP), p. 2199-2203, 21-25 Oct. 2012. **Anais...** Beijing, China, 2012. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=6492017](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6492017)>. Acesso em: 15 ago. 2013.

MACHIELSEN, C. H. M.; KERSCHBAUMER, H. G. *Influence of frost*

*formation and defrosting on the performance of air coolers: standards and dimensionless coefficients for the system designer. International Journal of Refrigeration*, v. 12, n. 5, p. 283-290, set. 1989. Disponível em: <[http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/0140-w7007\(89\)90095-9](http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/0140-w7007(89)90095-9)>. Acesso em: 15 ago. 2013.

MADER, G; THYBO, C. *A new method of defrosting evaporator coils. Applied Thermal Engineering*, v. 39, p. 78-85, jun. 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.applthermaleng.2012.01.033>>. Acesso em: 26 set. 2013.

MATZL, M.; SCHNEEBELI, M. *Measuring specific surface area of snow by near-infrared photography. Journal of Glaciology*, v. 52, n. 179, p. 558-564, ago. 2006.

MELO, C.; KNABBEN, F. T.; PEREIRA, P. V. *An experimental study on defrost heaters applied to frost-free household refrigerators. Applied Thermal Engineering*, p. 239-245, mar. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.applthermaleng.2012.08.044>>. Acesso em: 05 jun. 2013.

MELO, C.; PIUCCO, R.O.; DUARTE, P.O. O. *In-situ performance evaluation of no-frost evaporators. In: 11° INTERNATIONAL REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING CONFERENCE AT PURDUE, West Lafayette, IN, jul. 17-20, 2006. Anais...* West Lafayette, 2006.

MICHALSKI, L. et al. **Temperature Measurement**. 2. ed. England: John Wiley & Sons, 2001.

MITISHITA, R. S. et al. *Thermoeconomic design and optimization of frost-free refrigerators. Applied Thermal Engineering*, v. 50, n. 1, p. 1376-1385, jan. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.applthermaleng.2012.06.024>>. Acesso em: 05 out. 2013.

MORAN, M. J. et al. **Introduction to thermal systems engineering: thermodynamics, fluid mechanics, and heat transfer**. [S.l.]: John Wiley & Sons: 2003.

MUEHLBAUER, J. *Investigation of performance degradation of*

*evaporator for low temperature refrigeration applications*. 2006. 88 f. Thesis - Mechanical Engineering, University Of Maryland, Maryland, 2006. Disponível em: <<http://drum.lib.umd.edu/bitstream/1903/3687/1/umi-umd-3390.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2014.

MUGHAL, U. N.; VIRK, M. S.; MUSTAFA, M. Y. *Review of capacitive atmospheric icing sensors*. In: SENSORCOMM 2012, 6ª INTERNATIONAL CONFERENCE ON SENSOR TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS, Roma, Italian, p. 42 – 47, 2012. **Anais...** Roma, 2012.

NAWROCKI, W. *Measurement systems and sensors*. Boston: Artech House, 2005.

NEW AVIONICS. **Ice\*Meister™**. Disponível em: <[http://www.newavionics.com/9734\\_oem.html](http://www.newavionics.com/9734_oem.html)>. Acesso em: 13 fev. 2014.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Como escolher o melhor hardware de aquisição de dados para o seu sistema de medição**. 2012. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/13655/pt/>>. Acesso em: 18 set. 2014.

\_\_\_\_\_. **Ambiente gráfico de desenvolvimento de sistemas LabVIEW**. Disponível em: <<http://www.ni.com/labview/applications/daq/pt/>>. Acesso em: 29 ago. 2014.

\_\_\_\_\_. **Medições de temperatura com termistores: guia prático**. 2013. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/7112/pt/>>. Acesso em: 19 ago. 2014.

\_\_\_\_\_. **Medições de temperatura com termopares: guia prático**. 2013a. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/7108/pt/>>. Acesso em: 19 ago. 2014.

\_\_\_\_\_. **Como fazer medições de temperatura com RTD: guia prático**. 2013b. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/7115/pt/>>. Acesso em: 15 ago. 2014c.

OMEGA. **Fio de termopar isolado duplex com fio fino**. Disponível em: <[http://br.omega.com/Temperature/pdf/FineWire\\_DupInsul.pdf](http://br.omega.com/Temperature/pdf/FineWire_DupInsul.pdf)>. Acesso em: 19 set. 2014.

\_\_\_\_\_. **Introdução aos termopares.** Disponível em:  
<<http://br.omega.com/prodinfo/termopares.html>>. Acesso em: 16 maio 2014a.

OROSY, D. J.; MATLEN, A. J. *Temperature regulation for electrical heater.* EUA, n. 3789190, 29 jan.1974; 17 out. 1972.

OWUSU, K. P. *Capacitive probe for ice detection and accretion rate measurement: proof of concept.* Masters thesis report submitted at University of Mannitoba, 2010.

OWUSU, K. P.; KUHN, D. C. S.; BIBEAU, E. L. Capacitive probe for ice detection and accretion rate measurement: Proof of concept. *Renewable Energy*, v. 50, p.196-205, fev. 2013. Disponível em:  
<<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.renene.2012.06.003>>. Acesso em: 28 fev. 2014.

ÖZKAN, D. B.; ÖZIL, E. *Experimental study on the effect of frost parameters on domestic refrigerator finned tube evaporator coils.* **Applied Thermal Engineering**, Turquia, v. 1, n. 1, p. 2490-2493, jun. 2006. Disponível em:  
<<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.applthermaleng.2006.04.015>>. Acesso em: 25 set. 2013.

ÖZKAN, D. B.; ÖZIL, E.; INAN, C. *Experimental investigation of the defrosting process on domestic refrigerator finned tube evaporators.* **Heat Transfer Engineering**, v. 33, n. 6, p. 548-557, abr. 2012. Disponível em:  
<<http://search-ebsohost-com.ez46.periodicos.capes.gov.br/login.aspx?direct=true&db=aph&AN=69732530&lang=pt-br&site=ehost-live&authtype=ip,cookie,uid>>. Acesso em: 16 jan. 2014.

PACHECO, A. L. S. **Desenvolvimento de um sistema para medir a resistência de enrolamento em motores de compressores energizados.** 2007. 180f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

PENTAIR. *Snow and ice melting sensors.* Disponível em:  
<[http://www.pentairthermal.com/Images/EN-ETICIT1GIT1SIT6E-DS-H58114\\_tcm432-26128.pdf](http://www.pentairthermal.com/Images/EN-ETICIT1GIT1SIT6E-DS-H58114_tcm432-26128.pdf)>. Acesso em: 21 jul. 2014.

PEROVICH, D. K. *Light reflection and transmission by a temperate snow cover*. **Journal of Glaciology**, v. 53, n. 181, p. 201-207, jan. 2007.

Disponível em: <<http://www.igsoc.org:8080/journal/53/181/j06j041.pdf>>. Acesso em: 02 dez. 2014.

PIUCCO, R. O.; HERMES, C. J. L.; MELO, C. *In-situ evaluation of a criterion to predict frost formation on liners of refrigerated cabinets*.

**Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 14-15, p. 3084-3091, out. 2011.

Disponível em: <<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.applthermaleng.2011.05.003>>. Acesso em: 27 jun. 2013.

PUSSOLI, B. F. **Análise e otimização de evaporadores de aletas periféricas**. 2010. 177f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

SCHLICKMANN, D. G. **Aprimoramento e caracterização do comportamento metrológico de uma bancada de ensaios de partida e de tombamento de compressores de refrigeração**. 2012. 135f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

SANCHEZ, G. *Adaptive demand defrost using proximity sensors*.

**Appliance Magazine**, ago. 2008. Disponível em:

<<http://www.appliancemagazine.com/editorial.php?article=2019>>. Acesso em: 14 out. 2014.

SANDERS, C. T. *Frost formation: the influence of frost formation and defrosting on the performance of air coolers*. PhD Thesis, Delf Technical University, 1974. Disponível em: <<http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3Ab99381a0-893c-4382-8b14-b1d9bdb370dd/>>. Acesso em: 14 out. 2014.

SATISH; ANSARI, A. M.; SAXENA, A. K. *Determination and comparison of temperature coefficient of standard inductors by measuring change in inductance and resistances*. **Journal of Metrology Society of India**, Índia, v. 29, n. 1, p. 73-76, oct. 2013.

SILVA, D. L. **Análise da formação de gelo e geada e seu efeito no desempenho termo-hidráulico de evaporadores do tipo tubo aletado**. 2012. 198f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

SILVA, D. L.; HERMES, C. J. L.; MELO, C. *Experimental study of frost accumulation on fan-supplied tube-fin evaporators*. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 6–7, p. 1013–1020, mai. 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.applthermaleng.2010.11.006>>. Acesso em: 25 set. 2013.

SILVEIRA, A. N. **Diminuição do tempo de transitório em ensaios de desempenho de compressores utilizando injeção de corrente contínua**. 2010. 225f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

STILES, W. H.; ULABY, F. T. **Dielectric properties of snow**. Kansas, 1981. 44 p. Disponível em: <<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19820011764.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2014.

STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M. S. **Refrigeração industrial**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

TASSOU, S. A.; DATTA, D.; MARRIOTT, D. *Frost formation and defrost control parameters for open multideck refrigerated food display cabinets*. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineering, **Professional Engineering publishing**, v. 215, n. 2, p. 213-222, 2001.

TEKMAR. **Snow/Ice Sensor 090**. Disponível em: <<http://tekmarcontrols.com/products/snow-melting/090.html>>. Acesso em: 14 jul. 2014.

TROIANO, A.; PASERO, E.; MESIN, L. *An innovative water and ice detection system for monitoring road and runway surfaces*. In: VI CONFERENCE ON PH.D. RESEARCH IN MICROELECTRONICS AND ELECTRONICS (PRIME 2010), IEEE, p 1-4, Berlin, Germany, jul. 18-21, 2010. **Anais...** Berlin, Germany, 2010. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5587181>>. Acesso em: 14 jul. 2014.

TUDOR, V. et al. *Advances in control of frost on evaporator coils with an applied electric field*. **International Journal of Heat and Mass Transfer**,

v. 48, p. 4428–4434, 2005. Disponível em:

<[http://www.researchgate.net/publication/222518695\\_Advances\\_in\\_control\\_of\\_frost\\_on\\_evaporator\\_coils\\_with\\_an\\_applied\\_electric\\_field/links/0deec526f2eb71b325000000](http://www.researchgate.net/publication/222518695_Advances_in_control_of_frost_on_evaporator_coils_with_an_applied_electric_field/links/0deec526f2eb71b325000000)>. Acesso em: 5 mar. 2014.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO. **Circuitos**

**elétricos I: EEL420: Módulo 5.** Disponível em:

<[http://www.peb.ufrj.br/cursos/eel420/EEL420\\_Modulo5.pdf](http://www.peb.ufrj.br/cursos/eel420/EEL420_Modulo5.pdf)>. Acesso em: 13 mar. 2015.

WALTRICH, P. J. **Análise e otimização de evaporadores de fluxo acelerado aplicados a refrigeração doméstica.** 2008. 225f. Dissertação (Mestrado) – Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

WANG, D.; TAO, T.; KANG, S.; XU, G. *Non-contact frost thickness measurement by using a micro-camera and image processing technology.* In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS AND AUTOMATION, IEEE, Xi'an, China, p. 288-293, 4-7 Aug. 2010. **Anais...** Xi'an, China, 2010. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5589056&isnumber=5587913>>. Acesso em: 5 mar. 2014.

WHIRLPOOL. **Manual de serviços:** consul CRM33EB. Versão 3, 2009.

WU, J. et al. *Experimental investigation of frost formation on a parallel flow evaporator.* **Applied Energy**, v. 88, n. 5, p. 1549–1556, mai. 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.apenergy.2010.11.006>>. Acesso em: 9 set. 2013.

XIAO, J. et al. *An analysis of the feasibility and characteristics of photoelectric technique applied in defrost-control.* **International Journal of Refrigeration**, Revue Internationale Du Froid, p. 1350-1357, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.ijrefrig.2009.02.014>>. Acesso em: 25 set. 2013.

XIAO, J. et al. *An experimental study of the correlation for predicting the frost height in applying the photoelectric technology.* **International Journal of Refrigeration**, v. 33, n. 5, p. 1006-1014, 2010. Disponível em: <<http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.elsevier-6bb1f33-90b0-39eb-b422-03b7a65a0114>>. Acesso em: 5 set. 2013.

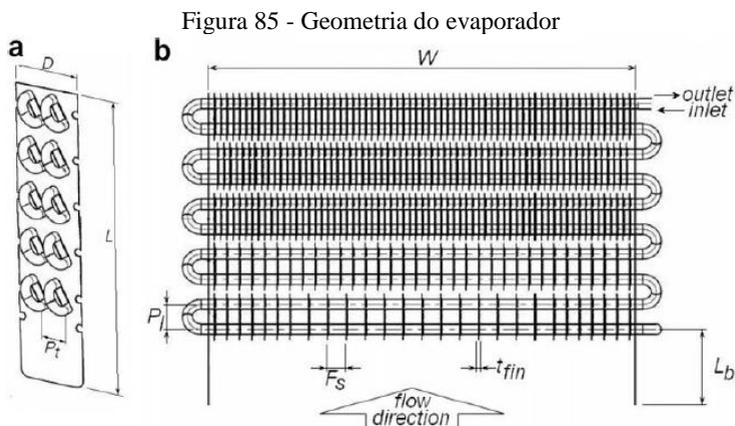
YANG, D. K.; LEE, K. S.; SONG, S. *Modeling for predicting frosting behavior of a fin-tube heat exchanger*. **International Journal of Heat Mass Transfer**, v. 49, p. 1472–1479, 2006. Disponível em: <[http://nbc.hanyang.ac.kr/down/Publication\\_I\\_10.pdf](http://nbc.hanyang.ac.kr/down/Publication_I_10.pdf)>. Acesso em: 5 set. 2013.

YIN, H. J. et al. *Experimental research on a novel cold storage defrost method based on air bypass circulation and electric heater*. **Energy**, v. 37, n. 1, p. 623-631, jan. 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org.ez46.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.energy.2011.10.040>>. Acesso em: 25 set. 2013.

## APÊNDICE I

### GEOMETRIA DO EVAPORADOR

A figura 85 apresenta um esquema da geometria de evaporador *no-frost* semelhante ao estudado.



**Legenda:**  
 a) Vista lateral  
 b) Principais dimensões e distribuição de aletas em vista frontal

Fonte: Barbosa Jr. et al (2009).

As dimensões do evaporador são:

$D = 60 \text{ mm}$	$P_l = 20 \text{ mm}$
$L = 200 \text{ mm}$	$t_{fin} = 0,1 \text{ mm}$
$P_t = 24 \text{ mm}$	$F_s \text{ (superior)} = 5 \text{ mm}$
$W = 355 \text{ mm}$	$F_s \text{ (inferior)} = 9 \text{ mm}$
Diâmetro do tubo = 8 mm	Comprimento total do tubo = 8 m

Com relação às aletas, uma aleta inteira envolve mais de uma fileira de tubo no seu sentido longitudinal. O número de aletas em cada fileira de tubo é mostrado no quadro a seguir.

Quadro 5 - Quantidade de aletas em cada fileira do evaporador

Fileiras	Número de aletas
1, 2, 3, 4, 5, 6	68
7, 8, 9, 10	28

Fonte: Elaborado pela autora (2015).



## APÊNDICE II

### DIMENSÕES DO RESISTOR DE DEGELO

O resistor de degelo em estudo é destacado na figura a seguir:

Figura 86 - Evaporador em estudo com resistor de degelo em destaque



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Quanto às dimensões, tem comprimento total de 3,7 m e corte na sua seção transversal apresenta, de fora para dentro:

- invólucro exterior: tubo metálico de alumínio, diâmetro 5,00 mm e espessura 0,90 mm;
- isolante elétrico: tubo emborrachado, flexível, diâmetro 3,20 mm e espessura 0,90 mm;
- elemento resistivo: filamento com 0,20 mm de diâmetro enrolado em espiral formando uma bobina de diâmetro 1,4 mm;
- isolante térmico e suporte: fibra de vidro. Preenche o eixo da bobina formada pelo elemento resistivo.

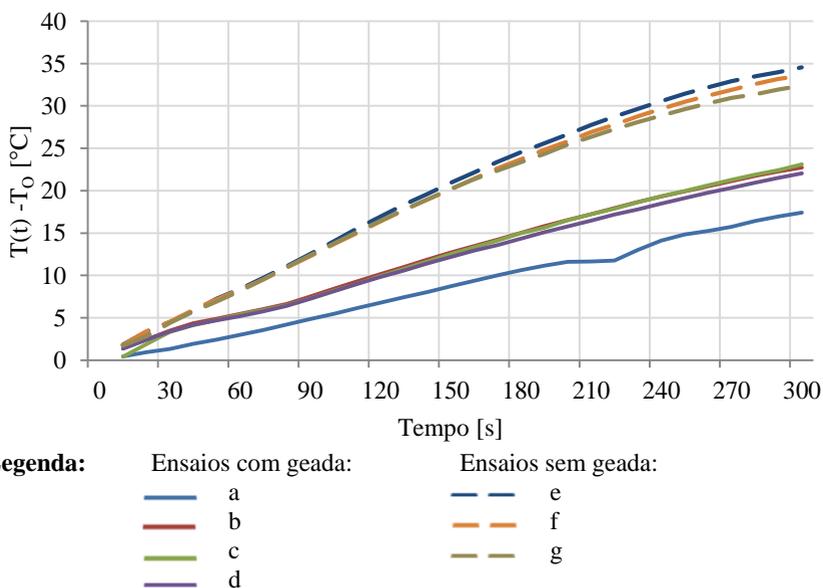


### APÊNDICE III

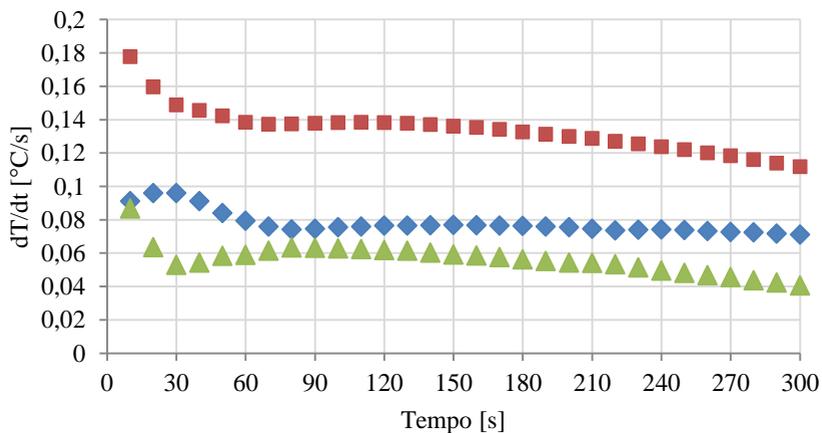
#### VARIAÇÕES DE TEMPERATURA E TAXAS DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DOS ENSAIOS COM E SEM GEADA

Variação de temperatura dos termopares T1, T4, T5, T6, T7, T8, T11, T12 e T13 para ensaios com e sem geada (160 h e 5,5 h de funcionamento do refrigerador) e suas taxas de variação de temperatura.

Figura 87 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em **T1** (tubo, entrada) com e sem geada



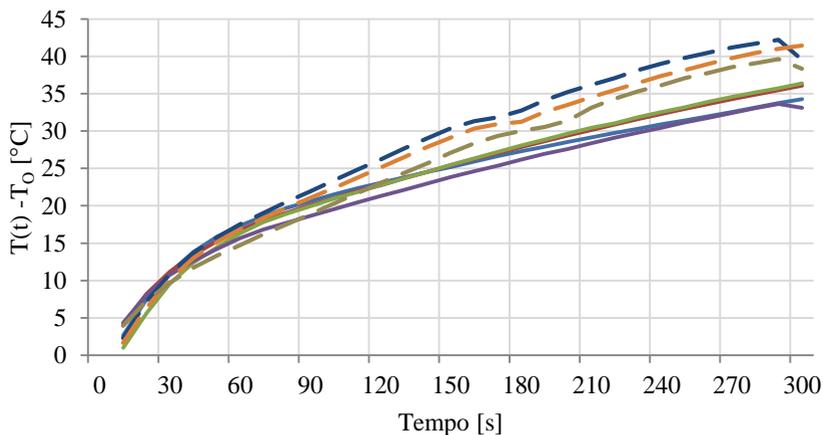
Fonte: Elaborada pela autora (2014)

Figura 88 - Taxa de variação da temperatura em **T1** (tubo, entrada)

**Legenda:**

- Sem geada;
- ◆ Com geada;
- ▲ Diferença.

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

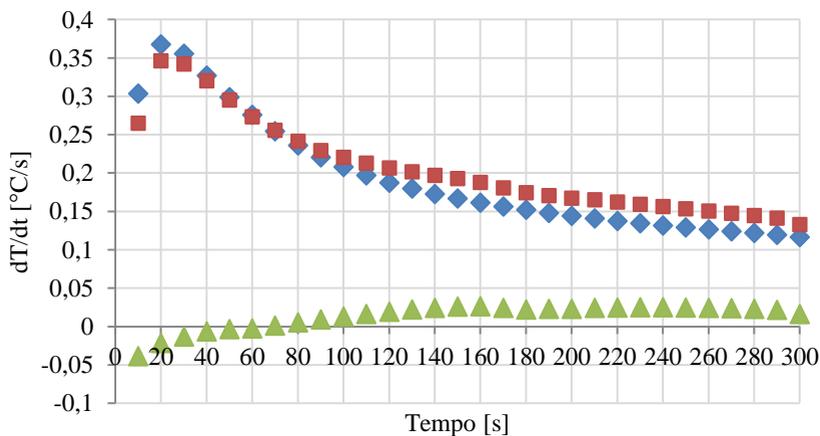
Figura 89 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em **T4** (resistor, meio central) com e sem geada

**Legenda:**

Ensaio com geada:	Ensaio sem geada:
— a	— e
— b	— f
— c	— g
— d	

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 90 - Taxa de variação da temperatura em **T4** (resistor, meio central)

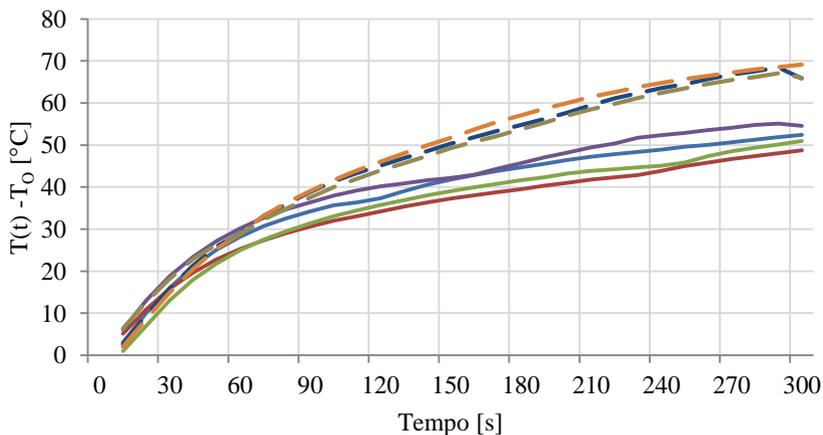


**Legenda:**

- Sem geada;
- ◆ Com geada;
- ▲ Diferença.

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 91 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em **T5** (resistor, inferior lateral) com e sem geada

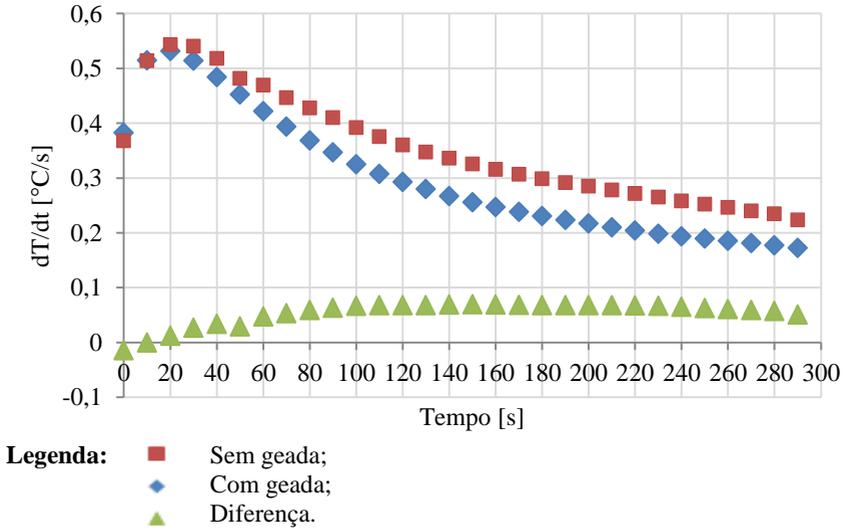


**Legenda:**

<b>Ensaio com geada:</b>	<b>Ensaio sem geada:</b>
— a	— e
— b	— f
— c	— g
— d	

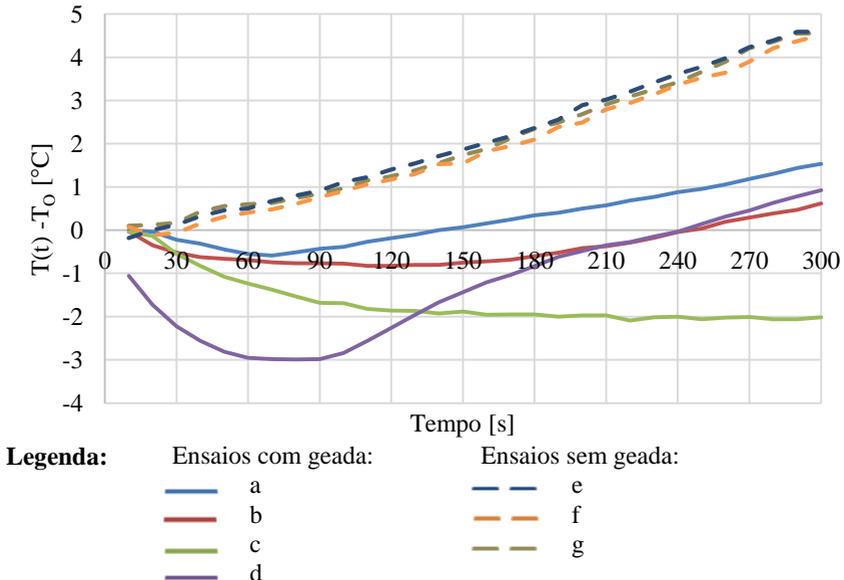
Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 92 - Taxa de variação da temperatura em **T5** (resistor, inferior lateral)



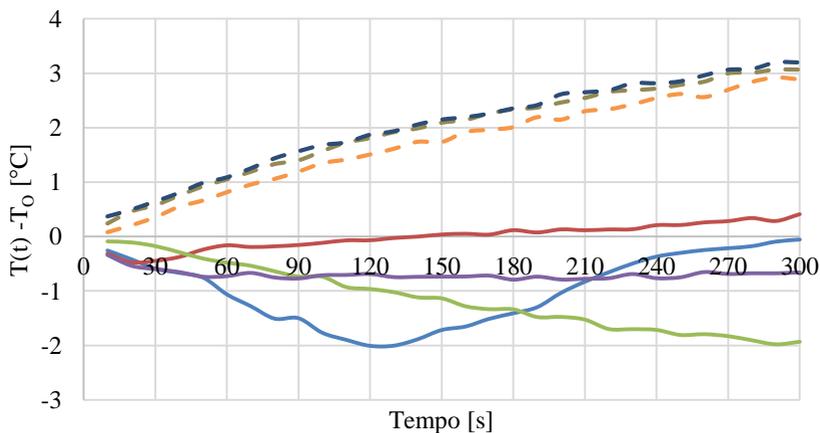
Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 93 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em **T6** (ar, saída para congelador) com e sem geada



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 94 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T7 (ar, entrada do refrigerador) com e sem geada

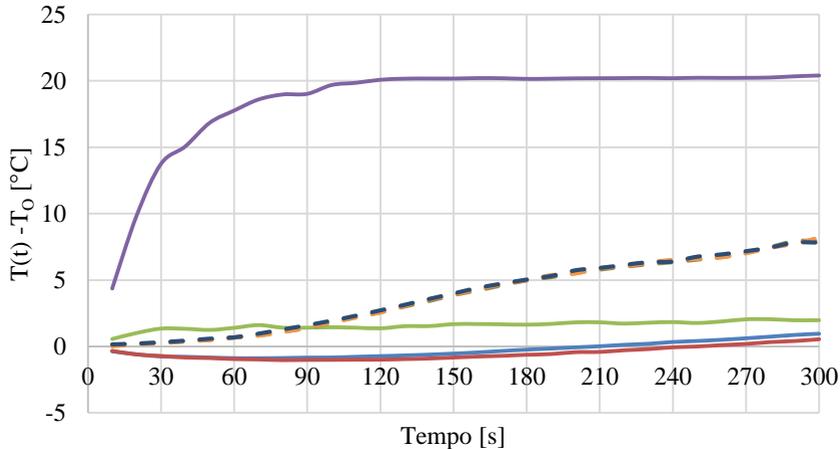


**Legenda:**

<b>Ensaios com geada:</b>	<b>Ensaios sem geada:</b>
— a	— e
— b	— f
— c	— g
— d	

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 95 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em T8 (ar, saída para refrigerador) com e sem geada



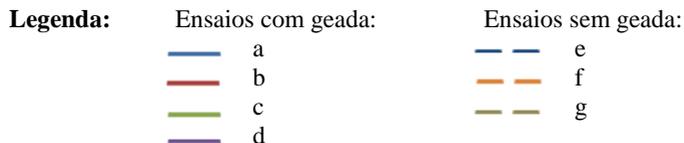
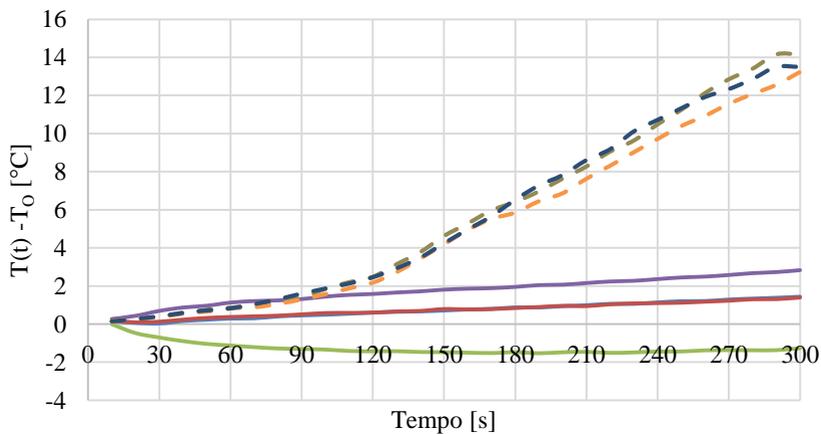
**Legenda:**

<b>Ensaios com geada:</b>	<b>Ensaios sem geada:</b>
— a	— e



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

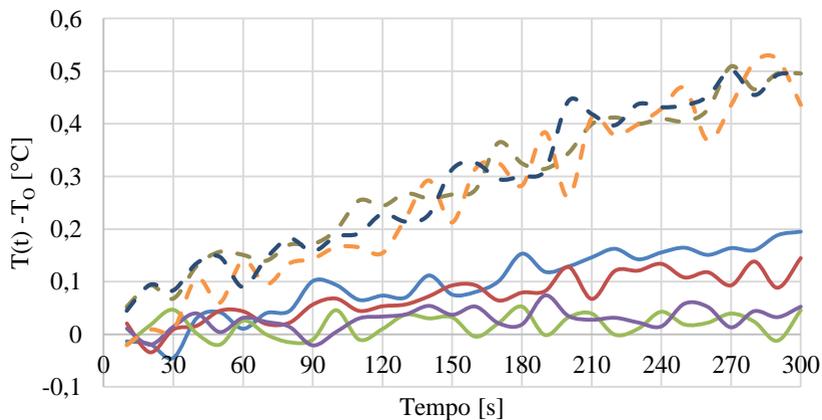
Figura 96 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em **T11** (ar, entrada do congelador) com e sem geada



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 97 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do

resistor de degelo em **T12** (ar, centro do refrigerador) com e sem geada

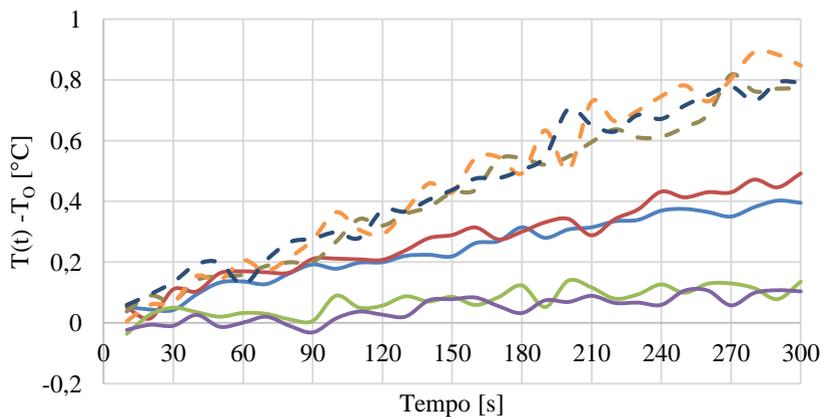


**Legenda:**

Ensaio com geada:	Ensaio sem geada:
— a	— e
— b	— f
— c	— g
— d	

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 98 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em **T13** (ar, refrigerador inferior) com e sem geada



**Legenda:**

Ensaio com geada:	Ensaio sem geada:
— a	— e
— b	— f
— c	— g
— d	

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

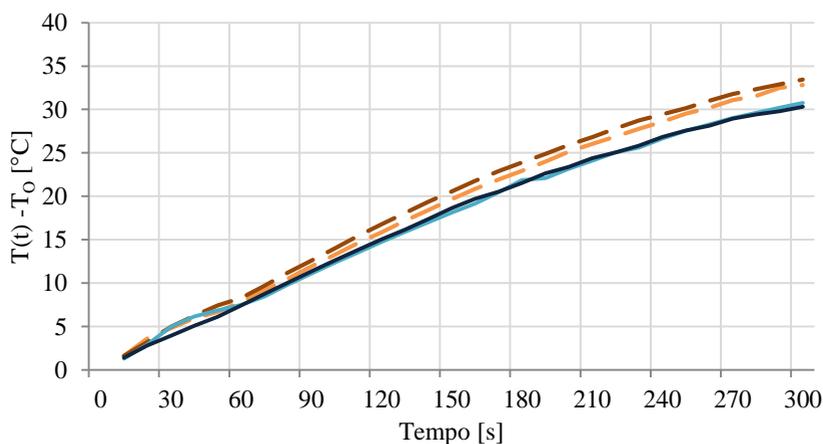


## APÊNDICE IV

### VARIAÇÕES DE TEMPERATURA E TAXAS DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DOS ENSAIOS DE 4 H E 12 H

Variação de temperatura e taxa de variação dos termopares T1, T4, T5, T6, T7, T8, T11, T12 e T13 para os ensaios de 4h e 12 h.

Figura 99 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em **T1** (tubo, início) em experimentos de 4 h e 12 h



**Legenda:**

4 h:	12 h:
— a	— c
— b	— d

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 100 - Taxa de variação da temperatura em **T1** (tubo, início) em 4 h e 12 h

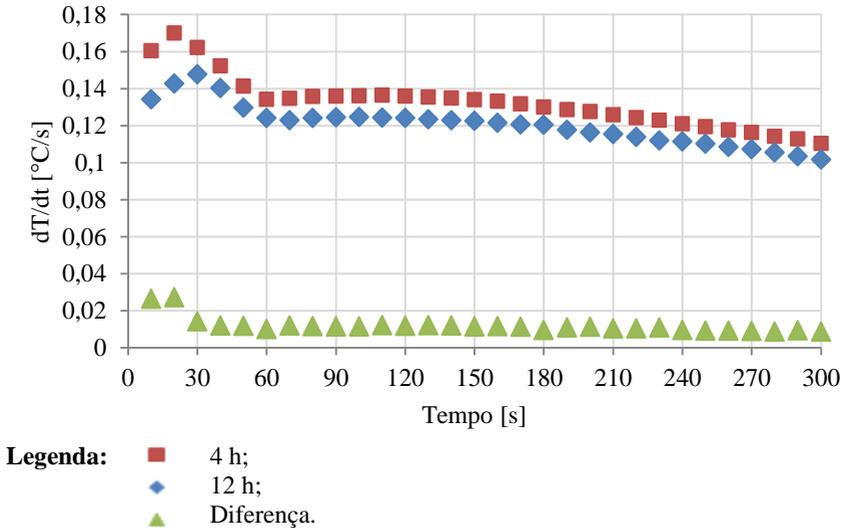


Figura 101 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em **T2** (tubo, saída) em experimentos de 4 h e 12 h

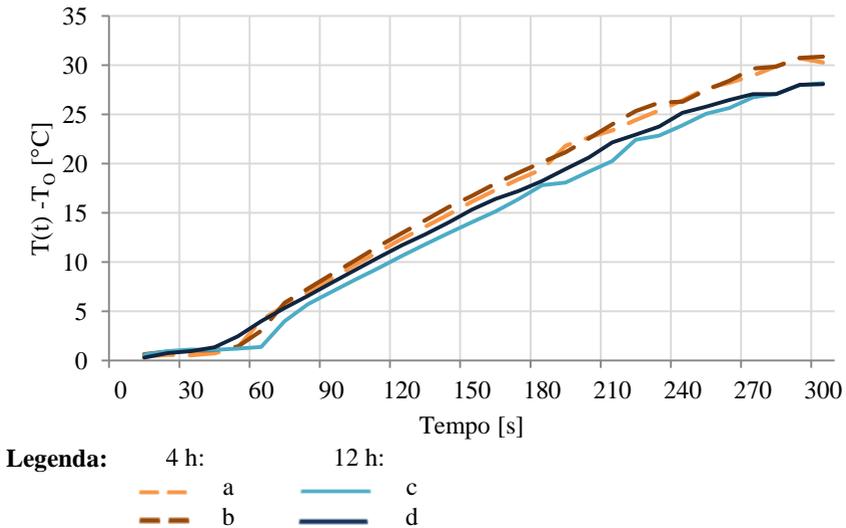
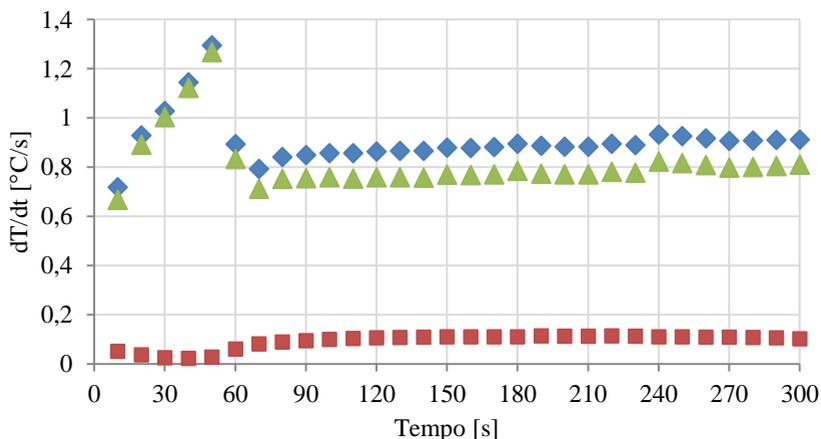


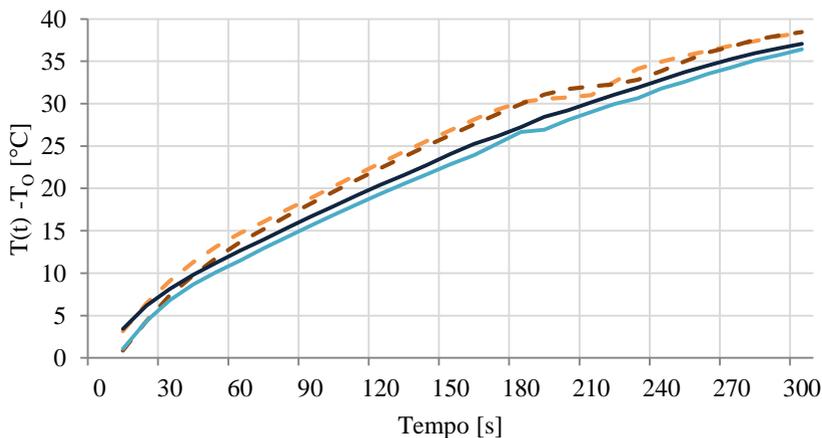
Figura 102 - Taxa de variação da temperatura em **T2** (tubo, saída) em 4 h e 12 h



**Legenda:** ■ 4 h;  
 ◆ 12 h;  
 ▲ Diferença.

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

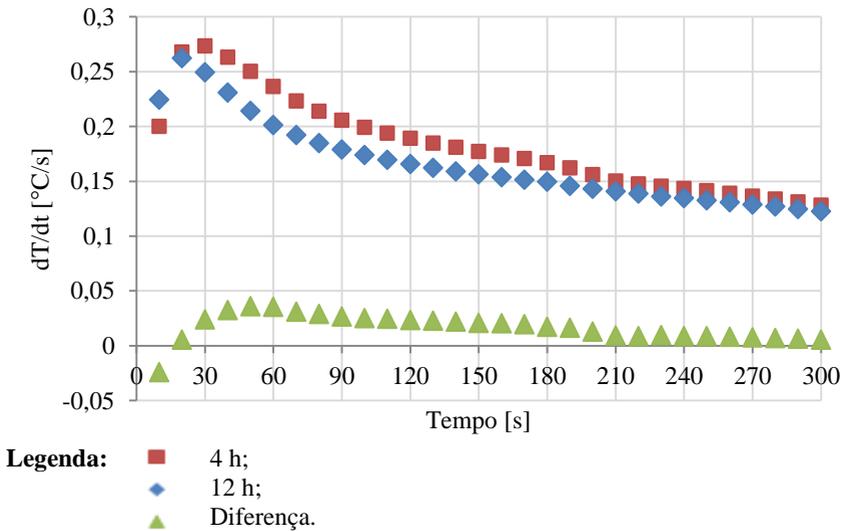
Figura 103 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em **T4** (resistor, meio central) em experimentos de 4 h e 12 h



**Legenda:** 4 h: a b; 12 h: c d

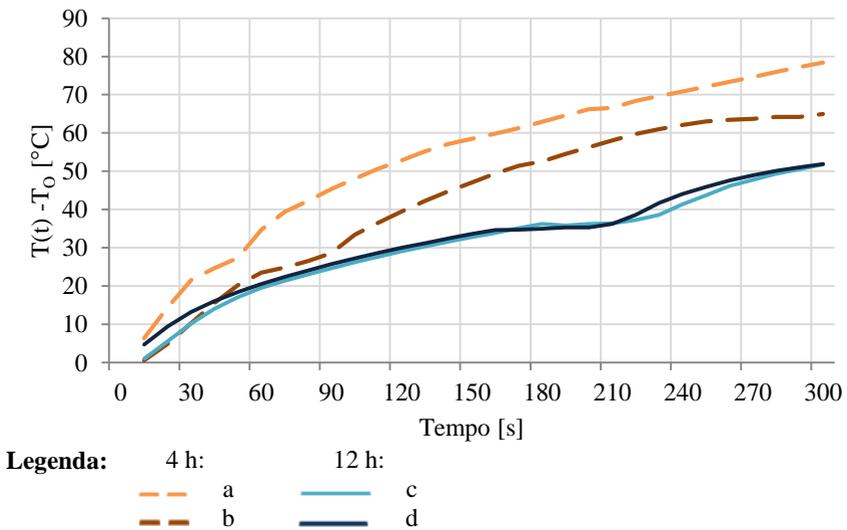
Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 104 - Taxa de variação da temperatura em **T4** (resistor, meio central) em 4 h e 12 h e 12 h



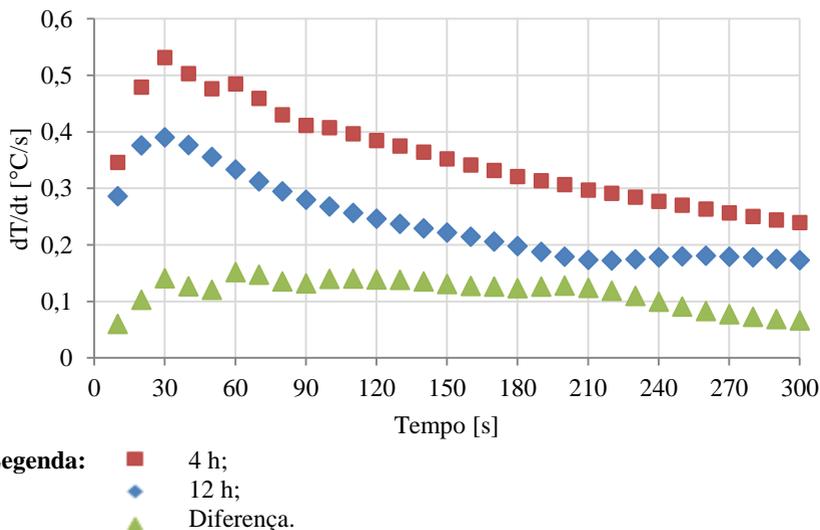
Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 105 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em **T5** (resistor, inferior lateral) em experimentos de 4 h e 12 h



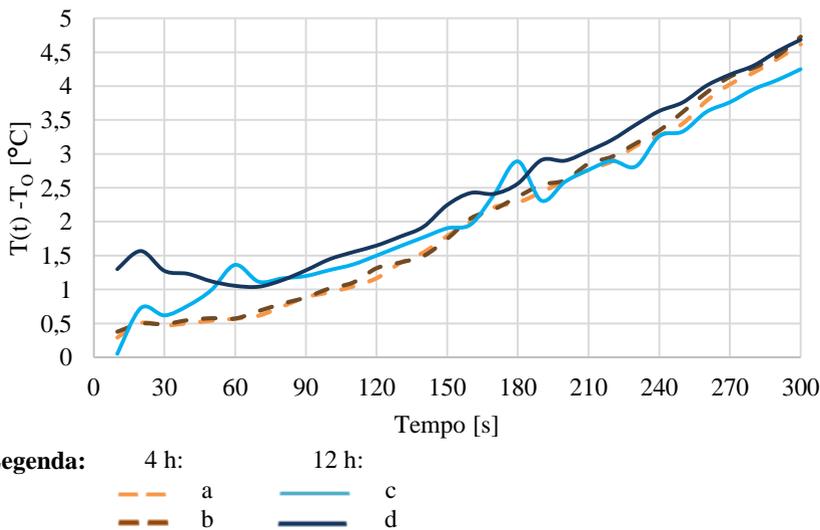
Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 106 - Taxa de variação da temperatura em **T4** (resistor, inferior lateral em 4 h e 12 h



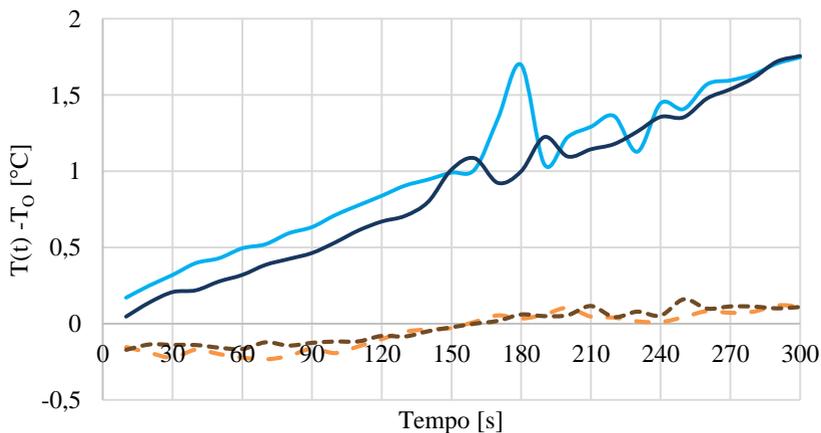
Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 107 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em **T6** (ar, saída para congelador) em experimentos de 4 h e 12 h



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 108 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em **T7** (ar, entrada refrigerador) em experimentos de 4 h e 12 h



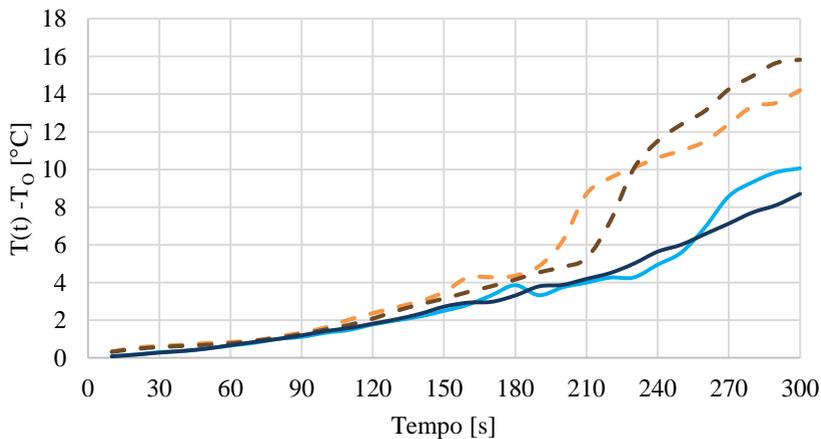
**Legenda:**      4 h:                      12 h:

                  — a                      — c

                  - - b                      - - d

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 109 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em **T8** (ar, saída para refrigerador) em experimentos de 4 h e 12 h



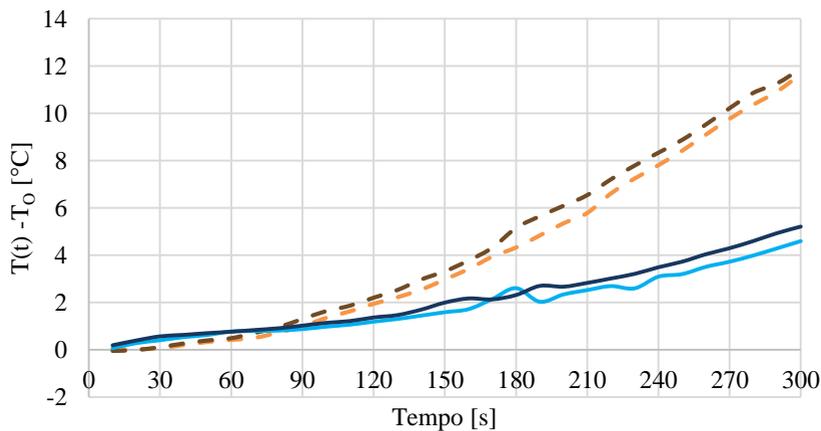
**Legenda:**      4 h:                      12 h:

                  — a                      — c

                  - - b                      - - d

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

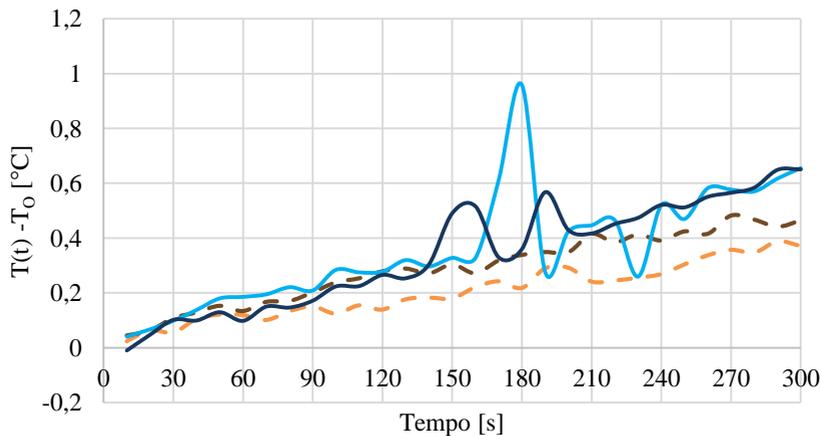
Figura 110 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em **T11** (ar, entrada congelador) em experimentos de 4 h e 12 h



**Legenda:** 4 h: a b  
12 h: c d

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

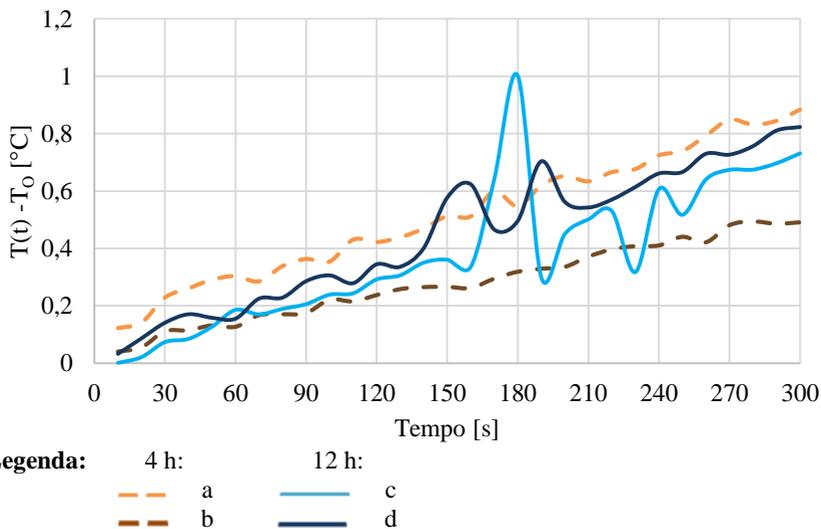
Figura 111 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em **T12** (ar, centro refrigerador) em experimentos de 4 h e 12 h



**Legenda:** 4 h: a b  
12 h: c d

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Figura 112 - Variação de temperatura em função do tempo de acionamento do resistor de degelo em **T13** (ar, refrigerador inferior) em experimentos de 4 h e 12 h



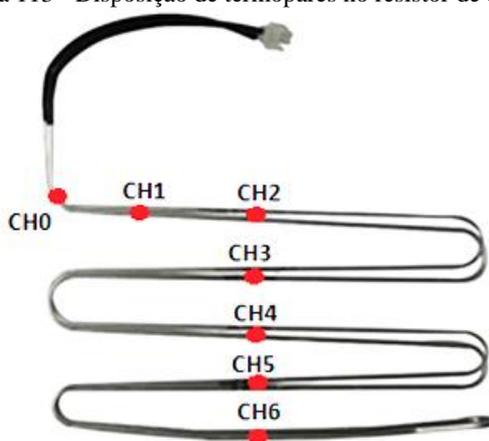
Fonte: Elaborada pela autora (2015).

## APÊNDICE V

### TEMPERATURAS AO LONGO DO RESISTOR DE DEGELAMENTO

O ensaio foi desenvolvido com o resistor extra 1, disposto fora do refrigerador. Utilizaram-se 7 termopares, e para aquisição de sinais, o sistema ADAM. Os termopares foram denominados conforme canal (CH) de leitura no bloco conector onde foram instalados, numerados de 0 a 7. A figura 113 ilustra a disposição dos transdutores no resistor.

Figura 113 - Disposição de termopares no resistor de degelo

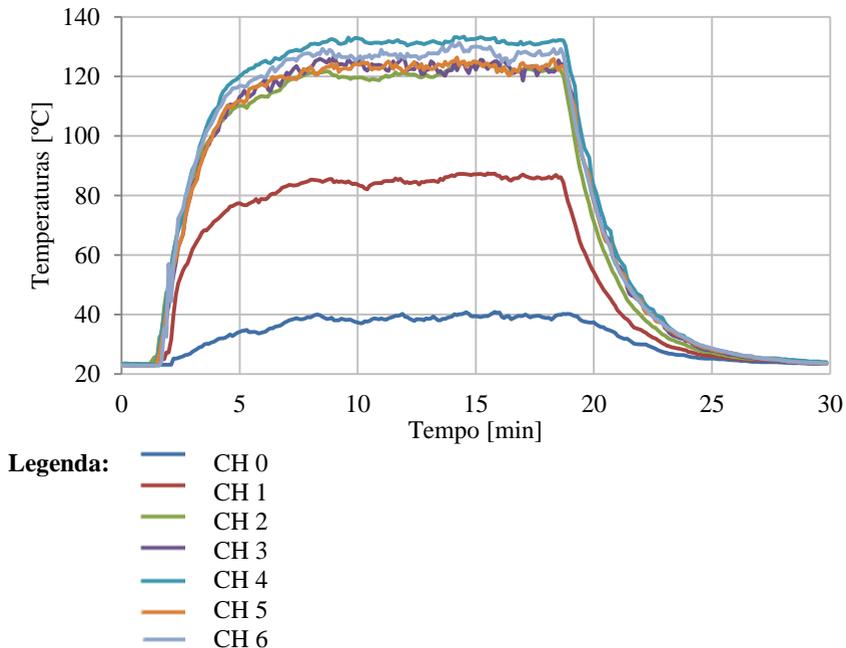


Fonte: Elaborada pela autora (2015).

O resistor foi conectado em rede elétrica 220 V por aproximadamente 15 min e as temperaturas foram monitoradas desde o aquecimento até o resistor retornar à temperatura ambiente. O experimento foi repetido por 6 vezes.

Os resultados foram semelhantes em todos os ensaios, de maneira que apenas um, de maneira aleatória, foi escolhido para ilustrar o comportamento geral das temperaturas (figura 114).

Figura 114 - Temperatura ao longo do resistor de degelo



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Observa-se aquecimento e resfriamento rápidos. As temperaturas alcançadas são bastante altas e após atingir determinada faixa elas permanecem estáveis ao longo de todo resistor. O resultado, no entanto, apresenta dois pontos de leitura com temperaturas bastante diferentes das demais.

Os dois primeiros pontos, localizados próximos à extremidade (conector), não aquecem tanto quanto os demais. Esse comportamento se mostrou intrigante tendo em vista que se repetiu em todos os testes.

A fim de explicar essa singularidade, um resistor foi cortado em seu sentido transversal em diversas partes. Verificou-se que as porções iniciais do resistor possuíam, junto ao elemento resistivo, outros dois fios metálicos (figura 115).

Figura 115 - Interior do resistor de degelo em seus terminais: elemento resistivo

(enrolamento) e dois fios de cobre em contato



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Medições mostram que os fios alaranjados (provavelmente constituídos de cobre) não possuem isolamento elétrico e estão em contato direto com o fio do elemento resistivo.

A investigação apontou ainda que esses fios têm 15 cm de comprimento, iniciando juntamente com o elemento resistivo nos terminais conectores. E ambas as extremidades do resistor apresentam os fios.

Os fios provocam curto circuito nessas porções iniciais do resistor, diminuindo a resistência ôhmica e, por isso, a dissipação de calor nessas regiões. Os principais motivos para suas existências são: não queimar os terminais e não provocar derretimento das peças plásticas que conectam o resistor.

Outra hipótese para explicação seria a parte do evaporador onde os extremos do resistor ficam dispostos. Na parte superior há menor acúmulo de geadas, de modo que não se faz necessária a mesma quantidade de calor que na porção inferior. No entanto, sendo essa a razão, os fios deveriam estender-se mais ao longo do resistor, e não apenas por 15 cm. Buscou-se contato com o fabricante do resistor, porém não se obteve sucesso.



## APÊNDICE VI

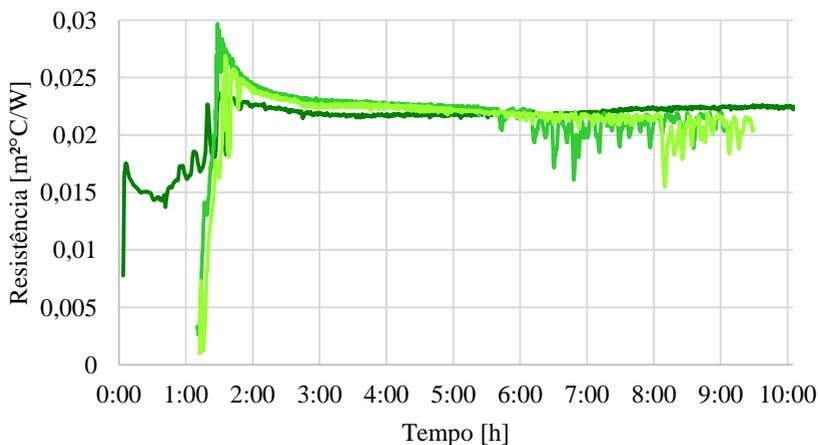
### RESISTÊNCIA À TROCA DE CALOR ATRAVÉS DA EFICIÊNCIA PARA O REFRIGERADOR OPERANDO EM CICLO

Com o intuito de observar o comportamento da resistência à troca de calor através da eficiência do trocador para o refrigerador operando sob condições normais, um ensaio já desenvolvido foi explorado. Os dados do ensaio de funcionamento normal, apresentados na seção 5.1.1, foram computados e são então discutidos.

A condição inicial dos diversos ensaios foi o refrigerador em equilíbrio térmico à temperatura ambiente, iniciando desligado. Contudo, durante o funcionamento do produto, compressor e ventilador são acionados logo após o desligamento do resistor de degelo, e o conjunto todo inicia o resfriamento em temperaturas superiores à temperatura ambiente e diferentes nos diversos pontos medidos, até atingir o regime novamente.

Quanto aos degelos após 12 h, o ensaio de operação normal considerado (figura 28) compreende três ocorrências destes. Sendo que o primeiro inicia do equilíbrio à temperatura ambiente. A resistência à troca de calor calculada através da eficiência do trocador para o primeiro, o segundo e o terceiro intervalo desse ensaio são apresentadas na figura 116.

Figura 116 - Resistência à transferência de calor em funcionamento normal



**Legenda:**

- 1º Intervalo;
- 2º Intervalo;
- 3º Intervalo.

Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Observa-se, ao se comparar o primeiro intervalo com os ensaios anteriores, que o comportamento da resistência é semelhante. Apresentando pico em 2 h e posterior diminuição com comportamento estável em  $0,023 \text{ m}^2\text{C/W}$  (“h” de  $43,5 \text{ W/ m}^2\text{C}$ ), como era esperado.

Relacionando-se então o segundo e o terceiro intervalo com os demais, é possível notar que o comportamento segue o mesmo padrão, inclusive com valores bastante próximos para o patamar estável. Sendo que a maior diferença ocorre nos valores de máximos.

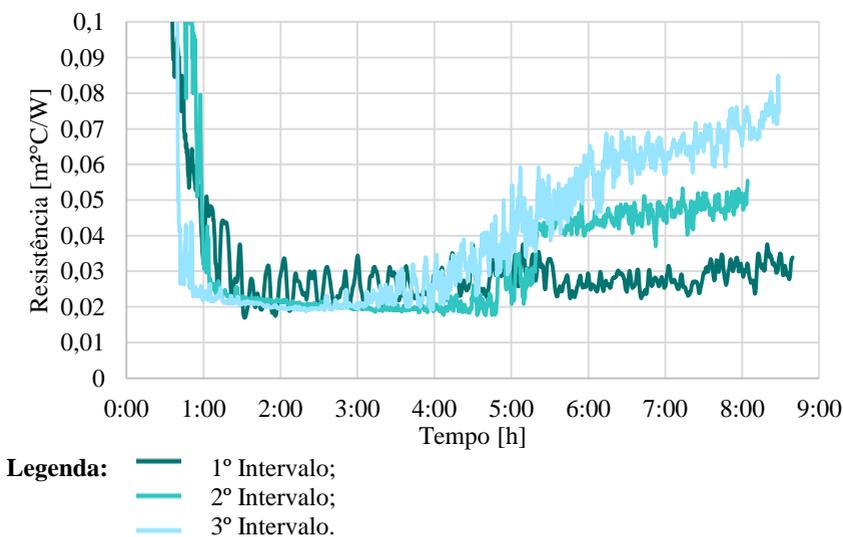
Através dessa comparação pode-se afirmar que o comportamento da resistência à transferência de calor no evaporador é semelhante independente da condição inicial do ensaio. Porém com sensibilidade baixa, o que mostra que essa avaliação não é adequada à aplicação a que se propunha.

## APÊNDICE VII

### RESISTÊNCIA À TROCA DE CALOR ATRAVÉS DO FLUXO DE CALOR PARA O REFRIGERADOR OPERANDO EM CICLO

Também para a detecção de geada através do fluxo de calor, o ensaio de funcionamento normal do refrigerador (seção 5.1.1) foi segregado nos três períodos de 12 h sem degelo. Assim, tem-se na figura 117 a resistência à troca de calor nos três intervalos entre degelos.

Figura 117 - Resistência à transferência de calor em ensaio de funcionamento normal calculada através do fluxo de calor



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Como os anteriores, a resistência inicia em valores elevados e diminui até um patamar próximo a  $0,02 \text{ m}^2\text{C/W}$ , a partir do qual volta a aumentar pelo acúmulo da geada.

Ao final das 12 h nota-se que nos ensaios onde a temperatura não inicia da temperatura ambiente a resistência é mais elevada, podendo indicar que a taxa de produção de geada nesses casos é maior que nas situações onde o refrigerador inicia o ensaio desligado.



## ANEXO I

## MÉTODOS DE DETECÇÃO DE GELO

## • Métodos indiretos:

<b>Estudo/Companhia</b>	<b>Conceito</b>
Craig and Craig, 1995	Variations in the speeds of a heated and unheated anemometers
Seifert, 2003	Variations in the cycles per second of noise emanating from wind turbine
Makkonen et al., 2005	Measurement of temperature and dew point of winter weather
Laakso et al., 2003	Variations in the power calculated using the wind speed against actual power from the wind turbine
Laakso et al., 2003	Variations in the resonant cycles per second of wind turbine blades

## • Métodos diretos:

<b>Estudo/Companhia</b>	<b>Conceito</b>
Labkotec Oy, 2009	Ultrasonic principle
Chamuel, 1984	Ultrasonic principle
Wallace et al., 2002	Measurement of electrical impedance
Lee and Seegmiller, 1996	Measurement of electrical inductance
Geraldi et al., 1996	Measurement of capacitance
Maatuk, 2004	Effect of phase change on an icing surface
Lardiere and Wells, 1998	Monitoring the behaviour of a material with temperature
Goodrich, 2008	Magnetostrictive principle
Vibro-Meter, 2005	Measurement of piezoelectric effects
Magenheim, 1977	Transmission and monitoring of a low microwave signal into a layer of dielectric material
Federow and Silverman, 1994	Detection of refracted light along the surface of a plastic by a photo detector
Klainer and Milanovich, 1990	Variation in the optical properties of ice and water
DeAnna, 1999	Movement or non-movement of a diaphragm due to water or ice covering it
Gerardi et al., 1993	Capacitance change
Ryerson, 2008	Analysis of infrared red signal
Infralytic, 2005	Differences in absorbing properties of materials
Khurgin, 1989	Covering an aperture by ice
Laakso et al., 2003	Infrared beam
Seifert, 2003	Monitoring via camera
Hansman and Kirby, 1986	Ultrasonic principle
Laakso et al., 2003	Impedance and temperature measurement
Laakso et al., 2003	Monitoring of ice build on load cells
Goldberg and Lardiere, 1993	Strain and stress principles of an electro-expulsive blanket

Fonte: Owusu et al (2010).



## ANEXO II

## ANÁLISE DO MATERIAL DO ELEMENTO RESISTIVO DO RESISTOR DE DEGELÓ



Universidade Federal de Santa Catarina.  
Departamento de Química  
Laboratório de Espectrometria Atômica.  
Florianópolis, 16 de outubro de 2014.

### Resultado de Análise

**Serviço Prestado:** Análise semi-quantitativa em amostra de fio metálico.

**Interessado:** Renata C. Sette

**Solicitação do Serviço:** Renata C. Sette

**Técnica Utilizada:** Espectrometria de Massa com Plasma indutivamente Acoplado ICP-MS.

**Amostra:** Fio metálico.

Metais	Resultados obtidos (ppm)
Mg	147,92
Al	71,09
Si	184,15
Cr	4,89
Mn	8713,30
Fe	2025,17
Co	3,25
Ni	259781,48
Cu	316214,94

**Procedimentos utilizados:**

Foi utilizada uma amostra de aproximadamente 100 mg. A amostra foi digerida em vasos de teflon abertos com a adição de 5 mL de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>). Após a digestão a mesma foi avolumada para 50 mL com água ultrapura. Foi feita uma diluição de 100 vezes para posterior determinação dos metais.

**Equipamentos Utilizados:**

Espectrômetro de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado ICP-MS, marca Perkin Elmer, modelo Nexlon 300D, Shelton, USA.

**Observações:**

A amostra foi entregue em nosso laboratório pelo interessado.

Os resultados se referem aos metais majoritários encontrados na amostra, já que esta análise se refere a uma determinação somente semi-quantitativa.

Estes resultados se referem somente à amostra analisada.

---

Responsável técnico  
Jairo Bez Fontana  
Químico Industrial  
CRQ 13200033 – 13ª Região