



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE  
ESCOLA DE QUÍMICA E ALIMENTOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E  
CIÊNCIA DE ALIMENTOS

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DA CINÉTICA  
DE CONGELAMENTO DO MÚSCULO DE ABRÓTEA  
(*Urophycis brasiliensis*) E DE ANCHOVA (*Pomatomus saltatrix*)**

JARBAS LUIZ LIMA DE SOUZA  
Engenheiro de Alimentos

CARLOS PRENTICE-HERNÁNDEZ, Dr.  
Orientador

CEZAR AUGUSTO DA ROSA, Dr.  
Coorientador

RIO GRANDE, RS

2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE  
ESCOLA DE QUÍMICA E ALIMENTOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E  
CIÊNCIA DE ALIMENTOS

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DA CINÉTICA  
DE CONGELAMENTO DO MÚSCULO DE ABRÓTEA  
(*Urophycis brasiliensis*) E DE ANCHOVA (*Pomatomus saltatrix*)**

JARBAS LUIZ LIMA DE SOUZA  
Engenheiro de Alimentos

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência de Alimentos.

CARLOS PRENTICE-HERNÁNDEZ, Dr.  
Orientador

CEZAR AUGUSTO DA ROSA, Dr.  
Coorientador

RIO GRANDE, RS  
2018

## Ficha catalográfica

S729a Souza, Jarbas Luiz Lima de.  
Avaliação experimental e numérica da cinética de congelamento do músculo de abrótea (*Urophycis brasiliensis*) e de anchova (*Pomatomus saltatrix*) / Jarbas Luiz Lima de Souza. – 2018.  
131 f.

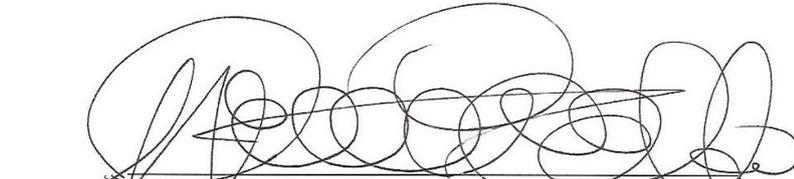
Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, Rio Grande/RS, 2018.  
Orientador: Dr. Carlos Prentice-Hernández.  
Coorientador: Dr. Cezar Augusto da Rosa.

1. Cinética de congelamento 2. Músculo de pescado 3. Entalpia-porosidade I. Prentice-Hernández, Carlos II. Rosa, Cezar Augusto da III. Título.

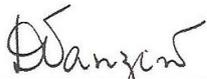
CDU 664.95

## APROVAÇÃO

Tese defendida por Jarbas Luiz Lima de Souza aprovada em 20 de junho de 2018, pela Comissão Examinadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Carlos Prentice-Hernández - FURG



Profa. Dra. Daniele Colombergue da Cunha Vanzin - IFRS



Prof. Dr. Luiz Antonio de Almeida Pinto - FURG



Prof. Dr. Oberdan Carrasco Nogueira - FURG



Profa. Dra. Myriam de las Mercedes Salas Mellado - FURG



## AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente; Aos meus pais Júlio e Maria, por sempre me incentivarem de forma incansável na busca dos meus objetivos e por me concederem todo o estudo ao qual não tiveram oportunidade;

À minha família, em especial a minha irmã Otília, pela confiança que mais esse degrau poderia ser alcançado; Ao primo Eduardo pelo auxílio nos recursos gráficos da tese.

À minha companheira Josiane pelo amor, carinho e compreensão que foram fundamentais durante a realização dessa pesquisa;

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Prentice-Hernández por todo incentivo e confiança para realização da tese de doutorado. Ao meu co-orientador Prof. Dr. Cezar da Rosa pela sua grande contribuição na modelagem computacional do problema analisado;

Ao Técnico Carlos Eduardo do IFRS - Campus Rio Grande pela automação da coleta de dados dos ensaios e também pelo auxílio nas UDFs. Ao Técnico em Informática do IFRS - Campus Rio Grande Fabio Carrir pelo auxílio na instalação do *software* Ansys 18.2;

Ao Professor Diogo do curso técnico em Automação do IFRS - Campus Rio Grande pelo empréstimo e calibração do termopar utilizado na realização dos ensaios de congelamento;

Aos estagiários Monike, Francisca e Cristian do curso técnico em Refrigeração e Climatização do IFRS - Campus Rio Grande pelo desenvolvimento da parte elétrica e automação da câmara fria utilizada no experimento;

Aos colegas do Laboratório de Tecnologia de Alimentos (LTA-FURG), em especial aos estagiários Bruna e Guilherme; e o Químico de Alimentos Douglas e a Dra Michele pelo auxílio nas análises de composição centesimal dos músculos dos pescados;

Aos professores Jeferson, Marcelo, Ivoni e ao Mestrando Andrei Santos, ambos da área de modelagem computacional, pela contribuição na utilização do *software* Fluent;

Os demais amigos e profissionais que contribuíram direta ou indiretamente na realização desse trabalho. Muito obrigado!



## RESUMO

No presente trabalho foi realizado um estudo experimental e numérico da cinética de congelamento dos músculos dos pescados abrótea (*Urophycis brasiliensis*) e anchova (*Pomatomus saltatrix*) em uma câmara fria de convecção a ar forçado, sendo a temperatura do ar  $-20^{\circ}\text{C}$  e os coeficientes de transferência de calor por convecção de  $25,4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  e  $20,8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , respectivamente. A temperatura inicial de ambos os músculos dos pescados foram de  $4^{\circ}\text{C}$  e a final de  $-18^{\circ}\text{C}$ . O objetivo do trabalho foi verificar a melhor concordância entre os perfis de temperatura experimentais *versus* os perfis de temperatura numéricos para os músculos dos pescados, através da ferramenta numérica CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Nesse sentido, utilizaram-se os *softwares* Gambit (v. 2.4.6 - ANSYS, Inc. - USA) e Fluent (v. 18.2.0 – ANSYS Academic, Inc. - USA), sendo o primeiro para a construção da geometria, malha e definição das condições de contorno; já o segundo para solução numérica do problema de transferência de calor, através do método dos volumes finitos. As UDFs (*User Defined Function*) foram elaboradas em linguagem de programação C para determinar a densidade, condutividade térmica e calor específico, a partir de correlações e equações matemáticas de literatura, já o calor latente de fusão foi adaptado ao método da entalpia porosidade. Além disso, buscou-se investigar o efeito do percentual de gordura na cinética de congelamento dos músculos dos pescados. Constatou-se que o músculo de anchova apresentou maior tempo de congelamento (117,6 min) e menor velocidade de congelamento na zona crítica de maior formação de cristais de gelo (0,82 cm/h), em relação ao músculo de abrótea (110,3 min e 0,69 cm/h). Em relação à simulação numérica através do método da entalpia-porosidade, constatou-se que ocorreu uma concordância entre os perfis de temperatura experimental e numérica para o músculo de abrótea. O percentual de erro entre o tempo final de congelamento experimental e numérico foi de 5,6%. Já em relação ao músculo de anchova, a concordância entre os perfis de temperatura experimental e numérico apresentou discrepância na segunda região da curva, porém acarretou baixa influência no tempo final de congelamento, pois o percentual de erro foi de 3,6%. Diante do exposto, pode-se afirmar que a simulação numérica através do método da entalpia-porosidade foi validada através de curva experimental tempo-temperatura para o músculo de abrótea (pescado magro), porém para o músculo de anchova (pescado gordo) apresentou restrições inerentes ao próprio método da entalpia-porosidade.

Palavras-chave: Cinética de congelamento. Músculo de pescado. Entalpia-porosidade.



## ABSTRACT

In the present work, it was carried out an experimental and numerical study of the freezing kinetics of the muscle of Brazilian codling (*Urophycis brasiliensis*) and Bluefish (*Pomatomus saltatrix*), performed in air-blast freezer, air temperature  $-20^{\circ}\text{C}$ , with coefficients of heat transfer of 25.4 and  $20.8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , respectively. The initial temperature of both fish muscles was  $4^{\circ}\text{C}$ , and the final temperature was  $-18^{\circ}\text{C}$ . The objective of the work was to verify the best agreement between the experimental temperature profiles and the numerical temperature profiles for fish muscles, using the CFD (Computational Fluid Dynamics) as numerical tool. In this sense two software: Gambit (v. 2.4.6 - ANSYS, Inc. - USA) and Fluent (v. 18.2.0 - ANSYS Academic, Inc. - USA) were used. The first software, for construction geometry, mesh and definition of boundary conditions, and the second software, for the numerical solution of the heat transfer problem, through the finite volume method. UDF (User Defined Functions) were developed in programming language C to determine the density, thermal conductivity and specific heat, from correlations and mathematical equations of literature, already latent heat of fusion was adapted to the enthalpy porosity method. In addition, it was sought to investigate the effect of lipid percentage on freezing kinetics of fish muscles. It was reported that Bluefish muscle presented higher freezing time (117.6 min), and lower freezing velocity in the critical zone of higher ice crystals formation ( $0.82 \text{ cm/h}$ ), in comparison with the muscle of Brazilian codling fish (with 110.3 min and  $0.69 \text{ cm/h}$ , respectively). In relation to the numerical simulation using the enthalpy-porosity method, it was verified that there was a concordance between the experimental and numerical temperature profiles for the Brazilian codling fish muscle. The error percentage between the experimental and numerical freezing time was 5.6%. Regarding the Bluefish muscle, the agreement between the experimental and numerical temperature profiles showed a discrepancy in the second region of the curve, but it had a low influence on the final freezing time, since the error rate was 3.6%. Considering the above, it can be stated that the numerical simulation using the enthalpy-porosity method was validated through a time-temperature experimental curve for the Brazilian codling (lean fish) muscle, but for Bluefish (fatty fish) presented inherent restrictions to the enthalpy-porosity method itself.

Keywords: freezing kinetics. fish muscle. enthalpy-porosity.



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais soluções utilizadas para congelamento por imersão .....	26
Tabela 2: Modelos das propriedades térmicas dos componentes dos alimentos ( $- 40^{\circ}\text{C} \leq T \leq 150^{\circ}\text{C}$ ).....	27
Tabela 3: Modelos das propriedades térmicas para água e gelo ( $- 40^{\circ}\text{C} \leq T \leq 150^{\circ}\text{C}$ ) .....	27
Tabela 4: Equações para determinação das propriedades termofísicas do alimento .....	28
Tabela 5: Resumo dos métodos para lidar com o calor latente em métodos numéricos.....	38
Tabela 6: Composição química dos músculos de abrótea e anchova utilizados no trabalho ...	53
Tabela 7: Propriedades termofísicas dos músculos dos pescados antes do congelamento .....	54
Tabela 8: Propriedades termofísicas dos músculos de abrótea e anchova após o congelamento .....	54
Tabela 9: Coeficientes de transferência de calor por convecção.....	56
Tabela 10: Resultados experimentais do processo de congelamento dos pescados .....	60
Tabela 11: Velocidade de congelamento (cm/h) dos músculos de abrótea e anchova .....	61
Tabela 12: Percentual de erro entre os tempos de congelamento experimental e numérico....	71



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: A anchova ( <i>Pomatomus saltatrix</i> ) .....	18
Figura 2: Mapa de distribuição da anchova ( <i>Pomatomus saltatrix</i> ) ao redor do mundo .....	18
Figura 3: Mapa de distribuição da abrótea ( <i>Urophycis brasiliensis</i> ) ao redor do mundo.....	20
Figura 4: A abrótea ( <i>Urophycis brasiliensis</i> ) .....	20
Figura 5: Sistema básico de refrigeração .....	23
Figura 6: Curvas de congelamento rápido <i>versus</i> lento, com destaque a zona crítica.....	24
Figura 7: Calor específico aparente de cerejas doces .....	30
Figura 8: A tarefa do método numérico .....	32
Figura 9: Discretização com volumes inteiros na fronteira.....	34
Figura 10: Funções de interpolação no tempo.....	36
Figura 11: Forma de vidro utilizada para o corte .....	45
Figura 12: Câmara de congelamento por convecção de ar forçado .....	45
Figura 13: Vista frontal da câmara fria utilizado no congelamento dos músculos dos pescados .....	46
Figura 14: Painel frontal do aquisitor Fieldloger.....	47
Figura 15: Termopar tipo k ligado ao Fieldloger.....	47
Figura 16: Tela principal do <i>Software</i> Sitrad .....	48
Figura 17: Tela principal do <i>Software</i> Gambit 2.4.6 .....	50
Figura 18: Tela principal do <i>Software</i> Fluent 18.2 .....	50
Figura 19: Geometria do músculo do pescado .....	51
Figura 20: Perfil da temperatura do músculo de abrótea (Ensaio 1) .....	57
Figura 21: Perfil da temperatura do músculo de abrótea (Ensaio 2) .....	57
Figura 22: Perfil da temperatura do músculo de abrótea (Ensaio 3) .....	57
Figura 23: Perfil da temperatura do músculo de anchova (Ensaio 1) .....	58
Figura 24: Perfil da temperatura do músculo de anchova (Ensaio 2) .....	58
Figura 25: Perfil da temperatura do músculo de anchova (Ensaio 3).....	59

Figura 26: Curvas de congelamento dos músculos de abrótea e anchova .....	60
Figura 27: Perfil da temperatura numérica para distintos passos de tempo .....	62
Figura 28: Perfil da temperatura numérica para distintos refinamentos de malha .....	63
Figura 29: Malha computacional utilizada na simulação numérica .....	64
Figura 30: Campos de temperaturas do domínio computacional (músculo de abrótea); a) $t= 0$ min. b) 20 min. c) 40 min.; d) 60 min.; e) 100 min.; f) 104 min. ....	65
Figura 31: Campos de temperaturas do domínio computacional (músculo de anchova). a) $t= 0$ min. b) 20 min. c) 40 min.; d) 60 min.; e) 100 min.; f) 113 min. ....	67
Figura 32: Perfil da temperatura experimental versus numérica do músculo de abrótea .....	69
Figura 33: Perfil da temperatura experimental versus numérica do músculo de anchova .....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS

CFD = Fluidodinâmica computacional  
EDP = Equação diferencial parcial  
EPS = Poliestireno expandido  
MDF = Método das diferenças finitas  
MEF = Método dos elementos finitos  
MVF = Método dos volumes finitos  
NTC = Coeficiente negativo de temperatura  
UDF = Função definida pelo usuário  
USB = Porta universal  
PVC= Policloreto de vinila

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$  = Área de troca térmica do alimento ( $m^2$ )  
 $A_m$  = Constante da região *mushy* ( $kg/m^3 \cdot s$ )  
 $c$  = Calor específico à pressão constante ( $kJ/kg \cdot K$ )  
 $d$  = Menor distância da superfície até o centro da placa plana ou o raio (m)  
 $D$  = Espessura da placa plana ou diâmetro do cilindro/esfera (m)  
 $g$  = Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )  
 $h$  = Entalpia sensível ( $J/kg$ )  
 $H$  = Entalpia total ( $J/kg$ )  
 $hc$  = Coeficiente de transferência de calor por convecção ( $W/m^2 \cdot K$ )  
 $k$  = Condutividade térmica do alimento ( $W/m \cdot K$ )  
 $L$  = Calor latente de fusão ( $kJ/kg$ )  
 $m$  = Massa de alimento (kg)  
 $M$  = Massa dentro do volume elementar (kg)  
 $n$  = Tempo de congelamento do alimento (h)  
 $P$  = Pressão (Pa)  
 $Q$  = Quantidade de calor retirado do alimento (kJ)  
 $q$  = Quantidade de calor transmitido por convecção (kJ)  
 $S$  = Termo fonte de energia ( $W/m^3$ )  
 $T$  = Temperatura ( $^{\circ}C$ )

$t$  = Tempo (min)

$\vec{V}_p$  = Velocidade de arraste do material solidificado para fora do domínio (m/s)

$\vec{V}$  = Velocidade do fluido (m/s)

$x$  = Distância entre os centros dos volumes elementares

$X$  = Fração mássica (g/100g)

### LETRAS GREGAS

$\rho$  = Densidade (kg/m<sup>3</sup>)

$\alpha$  = Difusividade térmica (m<sup>2</sup>/s)

$\partial$  = Derivada parcial

$\Delta$  = Incremento

$\nabla$  = Gradiente

$\nabla \cdot$  = Divergente

$\mu$  = Viscosidade dinâmica (kg/m.s)

$\beta$  = Coeficiente de expansão volumétrica (1/K)

$\gamma$  = Fração de líquido

$\varepsilon$  = Constante (adimensional)

$\theta$  = Fluxo de calor nas faces do volume elementar

$\Sigma$  = Somatório

### SUBSCRITOS

$\perp$  = Perpendicular às fibras musculares do alimento

$\parallel$  = Paralelo às fibras musculares do alimento

$a$  = Água

$A$  = Aparente do alimento

$ac$  = Antes do congelamento

$al$  = Alimento

$alm$  = Alimento para simulação numérica

$ali$  = Água ligada do alimento

$ar$  = Ar interno da câmara fria

$c$  = Carboidrato

$cP$  = Método de Plank

$cp$  = Método de Pham

C = Centro geométrico do alimento  
ci = Cinza  
dc = Depois do congelamento  
E = Centro do volume a direita do volume elementar  
e = Fronteira a direita do volume elementar  
f = Final  
fi = Fibra  
g = Gelo  
i = Componente do alimento  
I = Inicial  
ic = Inicial de congelamento do alimento  
L = Calor latente de fusão  
l = Lipídio  
Liq = Líquido  
mc = Média de congelamento  
nv = Nós vizinhos (E,W)  
P = Pressão (Pa)  
p = Proteína  
ref = Referência  
s = Sólido  
T = Total  
u = Componente da velocidade (eixo x)  
v = Componente da velocidade (eixo y)  
VC = Volume de controle  
W = Centro do volume a esquerda do volume elementar  
w = Fronteira a esquerda do volume elementar  
zc = Zona crítica de congelamento

## **SOBRESCRITOS**

0 = Nível anterior  
j = Malha analisada  
j+1 = Malha mais refinada  
P = Nó do centro do volume analisado  
V = Volume



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	15
2.1 Objetivo Geral.....	15
2.2 Objetivos Específicos.....	15
<b>3. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	17
3.1 Pescado.....	17
3.2 Anchova ( <i>Pomatomus saltatrix</i> ) .....	17
3.3 Abrótea ( <i>Urophycis brasiliensis</i> ).....	19
3.4 Refrigeração.....	21
<b>3.4.1 Histórico</b> .....	21
<b>3.4.2 Considerações sobre refrigeração mecânica por meio de vapor</b> .....	22
<b>3.4.3 Congelamento e armazenamento de alimentos</b> .....	23
<b>3.4.4 Métodos de congelamento de alimentos</b> .....	25
3.4.4.1 Congelamento por ar forçado.....	25
3.4.4.2 Congelamento em placas .....	25
3.4.4.3 Congelamento por imersão .....	25
3.4.4.4 Congelamento Criogênico .....	26
3.5 Propriedades termofísicas dos alimentos .....	26
3.6 Métodos simplificados .....	30
3.7 Métodos numéricos .....	32
3.8 CFD aplicado ao resfriamento e congelamento de alimentos .....	36
3.9 <i>Software</i> Fluent .....	39
<b>3.9.1 Método da entalpia-porosidade</b> .....	39
<b>3.9.2 Propriedades termofísicas definidas em linguagem de programação C</b> .....	42
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	43
4.1 MATERIAIS.....	43
4.2 Metodologia .....	43
<b>4.2.1 Análise química</b> .....	43
<b>4.2.2 Propriedades Termofísicas</b> .....	43
<b>4.2.3 Coeficiente de transferência de calor por convecção</b> .....	44
<b>4.2.4 Perfil da Temperatura de congelamento experimental</b> .....	45
<b>4.2.5 Velocidade de congelamento</b> .....	48

<b>4.2.6 Estudo de independência do tempo</b>	48
<b>4.2.7 Teste de independência de malha</b>	48
<b>4.2.8 Perfil da temperatura de congelamento através da modelagem numérica</b>	49
<b>4.2.9 Formulação físico-matemática do problema</b>	50
<b>4.2.10 Percentual de erro</b>	52
<b>4.2.11 Análise estatística</b>	52
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	53
5.1 Análise físico-química	53
5.2 Propriedades Termofísicas	54
5.3 Coeficiente de transferência de calor por convecção	55
5.4 Perfil da temperatura de congelamento experimental	56
5.5 Velocidade de congelamento	61
5.6 Estudo de independência de passo de tempo	62
5.7 Teste de independência de malha	63
5.8 Perfil da temperatura de congelamento através da modelagem numérica	64
5.9 Percentual de Erro	71
<b>6. CONCLUSÕES</b>	73
<b>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	75
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	77
<b>APÊNDICES</b>	83
<b>ANEXOS</b>	91

## 1. INTRODUÇÃO

O município do Rio Grande concentra mais de 90% do volume desembarcado do pescado no estado do Rio Grande do Sul, constituindo-se como referência estadual para esta atividade. Segundo dados fornecidos pelo Centro de Estudos em Economia e Meio Ambiente (CEEMA) há mais de cinquenta espécies comercializadas comumente no município do Rio Grande (SILVA; HOOD; ABDALLAH, 2008).

O principal método de conservação do pescado é através do congelamento, sendo vastamente utilizado pelos entrepostos pesqueiros. Porém, poucas informações encontram-se na literatura sobre a cinética de congelamento das espécies abrótea e anchova, produtos típicos e de grande importância econômica e cultura para a região sul do Rio Grande do Sul.

Segundo Rahman et al. (2009), para projetar e simular um equipamento de um processo de resfriamento e/ou congelamento, há vários aspectos a serem considerados pelos profissionais da área de alimentos, tais como: a quantidade de energia a ser removida (sensível e latente), composição dos alimentos, forma dos alimentos (homogênea ou heterogênea) e dimensões (altura, comprimento, raio, espessura e largura), propriedades físicas (densidade, ponto de congelamento, calor latente, calor específico e condutividade térmica), e a temperatura de congelamento inicial ou de equilíbrio.

O tempo de congelamento é um parâmetro difícil de obter com precisão, pois as propriedades termofísicas variam com a temperatura e a composição química centesimal do produto, bem como com o estado físico da água de constituição. Além disso, há fatores externos como a velocidade e a temperatura do ar de congelamento, além do tipo de equipamento de refrigeração empregado. Nesse sentido, torna-se relevante o comparativo entre os tempos e a cinética de congelamento dos músculos de abrótea (pescado magro) e de anchova (pescado gordo), matérias-primas com distintas propriedades termofísicas.

A predição do tempo de congelamento pode ser realizada através de modelos teóricos simplificados existentes na literatura ou por meio da modelagem numérica, utilizando pacotes computacionais de CFD, seja para construção de geometrias, malhas, e definição das condições de contorno, ou para resolver numericamente o modelo composto pelas equações de continuidade, quantidade de movimento e energia para a temperatura, entalpia, fração de líquido, etc. Nesse sentido, o objetivo geral do trabalho foi avaliar experimentalmente e numericamente, através do método da entalpia-porosidade, a cinética de congelamento do músculo de abrótea (*Urophycis brasiliensis*) e de anchova (*Pomatomus saltatrix*).



## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar experimentalmente e numericamente, através do método da entalpia-porosidade, a cinética de congelamento do músculo de abrótea (*Urophycis brasiliensis*), pescado magro, e de anchova (*Pomatomus saltatrix*), pescado gordo.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a composição química e as propriedades termofísicas (densidade, condutividade térmica e calor específico) através dos modelos da ASHRAE, e a temperatura inicial de congelamento através das curvas de congelamento experimental para o músculo de abrótea e anchova;
- Obter as curvas de congelamento no centro geométrico do músculo de abrótea e anchova na temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$ ;
- Comparar os efeitos dos diferentes percentuais de água e de lipídios no tempo e na velocidade de congelamento dos músculos de pescado;
- Determinar os perfis de temperatura do músculo de abrótea e anchova, através da simulação numérica, utilizando as propriedades termofísicas;
- Verificar a melhor concordância entre os perfis teóricos de temperatura dos músculos dos pescados obtidos através da modelagem numérica, utilizando as propriedades termofísicas dos modelos da ASHRAE, com o perfil de temperatura experimental;
- Calcular o percentual de erro entre os tempos de congelamento experimental e o teórico (numérico).



### 3. REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 PESCADO

A denominação genérica “pescado” compreende peixes, crustáceos, moluscos, anfíbios, répteis e mamíferos de água doce ou salgada, usados na alimentação humana (ANVISA, 2009).

O pescado é uma das principais fontes de proteínas para a dieta humana. Além de ser um bom alimento, também proporciona lipídios e outros produtos de valor para a indústria. Esse uso tão variado pode ser explicado pelas diversas espécies que existem e pela variada estrutura histológica e composição química de suas partes (ORDÓÑEZ, 2005).

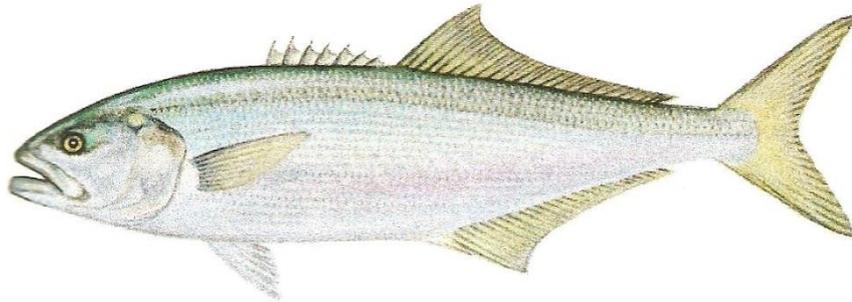
O pescado comercializado *in natura* pode ser: fresco, resfriado e congelado. Entende-se por “fresco” o pescado dado ao consumo sem ter sofrido qualquer processo de conservação, a não ser a ação do gelo. Entende-se por “resfriado” o pescado devidamente acondicionado em gelo e mantido em temperatura entre -0,5 a -2°C. Entende-se por “congelado” o pescado tratado por processos adequados de congelamento, em temperatura não superior a -25°C. Depois de submetido a congelamento, o pescado deve ser mantido em câmara frigorífica a -15°C. O pescado uma vez descongelado não pode ser novamente recolhido a câmaras frigoríficas (BRASIL, 1962).

#### 3.2 ANCHOVA (*Pomatomus saltatrix*)

De acordo com Froese e Pauly (2014), a espécie *Pomatomus saltatrix* é conhecida no Brasil como anchova, enchova ou enchova marisqueira. Ainda na América Latina dispõe de outros nomes comuns, dentre os quais o *bluefish*, *anchoa* de banco e, especificamente no Uruguai, *anchoa del mar* ou *burel* e, na Venezuela, *anchoa*.

A anchova tem corpo alongado, suavemente comprimido lateralmente e recoberto de escamas finas e relativamente pequenas. Sua coloração é esverdeada na parte superior do corpo e levemente prateada lateralmente (Figura 1). A cabeça é grande e achata lateralmente, com mandíbula inferior saliente. Apresentam duas nadadeiras dorsais, a primeira com espinhos duros e a segunda com raios moles, que podem ou não estar unidas por uma membrana. A nadadeira anal é tão alongada quanto a segunda dorsal, enquanto que a nadadeira caudal apresenta-se bifurcada. A nadadeira ventral está localizada abaixo das nadadeiras peitorais e aproximadamente na mesma linha (GONÇALVES, 1998).

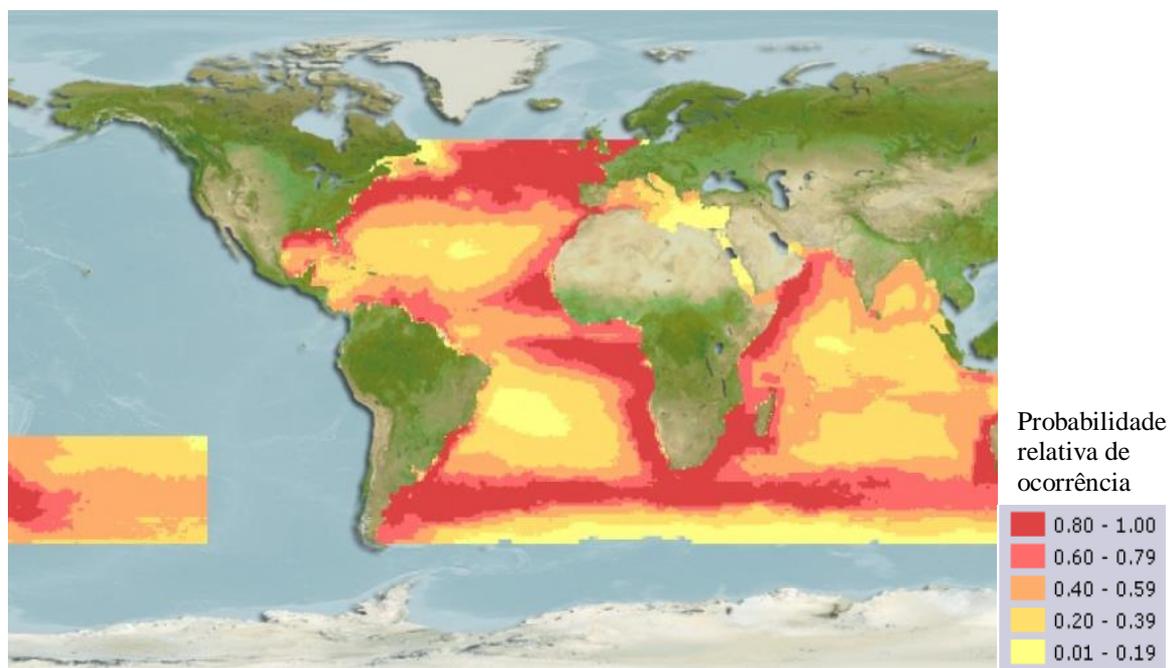
Figura 1: A anchova (*Pomatomus saltatrix*)



Fonte: Gonçalves (1998)

Trata-se de uma espécie cosmopolita, que vive ao redor de quase todo o planeta, habitando principalmente regiões costeiras, desde águas tropicais até subtropicais, exceto o leste do Pacífico (CEPSUL, 2009). A Figura 2 apresenta esta área de distribuição mais especificamente.

Figura 2: Mapa de distribuição da anchova (*Pomatomus saltatrix*) ao redor do mundo



Fonte: Froese e Pauly (2014)

A anchova (*Pomatomus saltatrix*) é peixe pelágico migratório, oceânico ou costeiro, sendo capturados indivíduos de médio porte em regiões costeiras junto às ilhas, pois são peixes que apreciam águas de arrebentação e água com formação de espuma (NUNES, 2010).

Habitam águas com elevada energia, sendo normalmente encontrados em praias com ondas, ilhas e costões, mas podem, os adultos, também serem encontrados em estuários e

águas salobras e os peixes menores em águas rasas de até 2 m de profundidade (CEPSUL, 2009).

É um pescado de tamanho médio, que no Rio Grande do Sul pode alcançar mais de 70 cm de comprimento total e 3 kg de peso. Em Santa Catarina e Rio de Janeiro são desembarcados, com frequência, exemplares de 5 a 6 kg de peso e 100 cm de comprimento. No litoral leste dos Estados Unidos e no Oeste da África, a espécie atinge até 140 cm de comprimento e 13 kg de peso. Esta espécie contribui grandemente para a pesca recreativa em vários países, tais como: EUA, Austrália e Brasil (GONÇALVES, 1998).

A produção nacional de anchova inclui desembarques oriundos nos estados do Pará, Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Os estados do Pará e o Maranhão apresentam uma produção contínua de anchova, entretanto, irrisória (no máximo 1%) em termos de volume quando comparadas aos estados do sudeste e sul do Brasil (CEPSUL, 2009).

### 3.3 ABRÓTEA (*Urophycis brasiliensis*)

A abrótea é um peixe de hábitos demersais, que se alimenta de invertebrados e distribui-se da Argentina ao estado do Rio de Janeiro no Brasil (LUQUE; ALVES; PARAGUASSÚ, 2004; PLAVAN; VEROCAI, 2001). Este gênero é representado no Brasil pelas espécies *Urophycis brasiliensis* e *Urophycis mystaceus*, sendo essa última também denominada de abrótea-de-profundidade. Ambas constituem um importante recurso pesqueiro, não apenas no Brasil, mas também na Argentina e no Uruguai (LUQUE; ALVES; PARAGUASSÚ, 2004; ACUÑA et al., 2000).

Segundo Andrade, Duarte-Pereira e Abreu-Silva (2004), a abrótea (*Urophycis brasiliensis*) é uma das principais espécies capturadas em arrastos de fundo na costa sul e sudeste do Brasil. Destacando-se pelo volume desembarcado, pelo preço de mercado e pela regularidade com que é capturada.

De acordo com Froese e Pauly (2014), as áreas de maior probabilidade de ocorrência da abrótea (*Urophycis brasiliensis*) ao redor do mundo, ocorre a sudoeste do oceano atlântico, correspondendo a região sul do Brasil, região norte da Argentina e Uruguai. Entretanto, foi encontrado a presença de abrótea no Golfo de San Jorge, estendendo a distribuição dessa espécie também ao sul da Argentina (Figura 3).

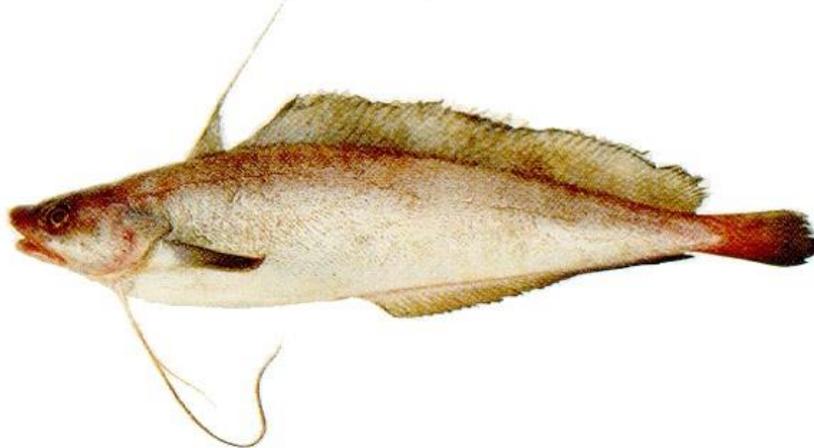
Figura 3: Mapa de distribuição da abrótea (*Urophycis brasiliensis*) ao redor do mundo



Fonte: Froese e Pauly (2014)

A abrótea é um peixe de água salgada, possuindo escamas diminutas, médio porte e tamanho máximo em torno de 75 cm e 2,5 kg. Normalmente, não se tem encontrado exemplares maiores que 50 cm e 2 kg. (Figura 4). As fêmeas atingem tamanhos e idades maiores que os machos. No Brasil, a reprodução ocorre no outono em toda a região sul, e no sudeste nos meses de fevereiro a junho, com picos entre abril e maio. O crescimento é relativamente lento, com mortalidade natural e longevidade moderada (BOUÇAS, 2015).

Figura 4: A abrótea (*Urophycis brasiliensis*)



Fonte: Perrotta e Cousseau (1998)

## 3.4 REFRIGERAÇÃO

### 3.4.1 Histórico

A utilização da refrigeração na conservação de alimentos representou um dos mais importantes avanços da civilização moderna. A possibilidade de armazenamento e distribuição de alimentos em regiões de climas adversos permitiu a humanidade perspectivas muito maior do que aquelas anteriormente possíveis, conforme exposto por Smith (2003).

Historicamente, atribui-se a Francis Bacon, em 1626, o feito de utilizar a refrigeração para conservar alimentos de forma científica. Ele realizou experiências com galinhas enterradas na neve. Apenas com o descobrimento do microscópio, em 1683, é que se pôde conhecer em detalhes o mecanismo de deterioração dos alimentos (SILVA, 2010).

No fim do século XIII, foram criadas as primeiras máquinas de expansão, as quais reduzem a pressão do vapor da água e apressavam sua evaporação. No início do século XIX, foram inventados os sistemas de compressão de vapor, sendo testados diferentes fluidos como refrigerante, como a amônia, o dióxido de carbono, o dióxido de enxofre, o cloreto de metila e hidrocarbonetos (SMITH, 2003).

O dióxido de enxofre é muito corrosivo e tóxico, e o cloreto de metila é tóxico, explosivo e pode dissolver o óleo lubrificante do compressor. Esses fluidos não são mais utilizados, fazendo parte do passado. A amônia, introduzida em 1875 em sistemas de refrigeração, ainda é bastante utilizada hoje em dia em instalações industriais. É relativamente barata, facilmente identificada em vazamentos, possui baixo ponto de ebulição e alto calor latente de vaporização. Porém, é um gás irritante, podendo causar asfixia em pequenas quantidades (GAVA; SILVA; FRIAS, 2008). Os hidrocarbonetos são fluidos classificados como altamente inflamáveis, sendo, portanto, a minimização da carga essencial para a aceitação razoável (ALMEIDA, 2010).

O emprego da refrigeração mecânica nos lares determinou a pesquisa de novos fluidos refrigerante que levaram a descoberta dos hidrocarbonetos halogenados, sintetizados a partir dos hidrocarbonetos da série metano e etano (COSTA, 1982).

Os refrigerantes à base de cloro, flúor e carbono (CFC) haviam se tornado, desde a década de 1920, o padrão da indústria devido às suas características termodinâmicas e químicas. No entanto, desde que, em 1974, foi apresentado um modelo teórico que previa a destruição de moléculas de ozônio na atmosfera por átomos de cloro oriundos da

decomposição de moléculas de CFCs, a comunidade científica passou a expressar preocupação com a continuada liberação desses fluidos na atmosfera (SILVA, 2010).

O protocolo de Montreal, assinado em 16 de setembro de 1987 por 184 nações, foi concebido para fazer a camada de ozônio voltar à normalidade, ao determinar a eliminação paulatina do uso dos CFCs e outra centena de produtos químicos que destroem as moléculas de ozônio atmosférico (GAVA; SILVA; FRIAS, 2008).

Desse modo, a indústria desenvolveu alternativas como a substância hidrofluorcarbono (HFC) R-134a (1,1,1,2-tetrafluoretano) para equipamentos novos. Devido à necessidade de adaptar os equipamentos para o uso dos novos fluidos, também foi criada a tecnologia do *retrofit*, que define um processo para a conversão de antigos equipamentos à base de CFCs para a operação com fluidos HCFCs (R-401A, R-409A, R-401B, etc). Outros fluidos HFCs (R-422D, R-413A, etc) encontram-se também disponíveis para o uso em refrigeração (SILVA, 2013).

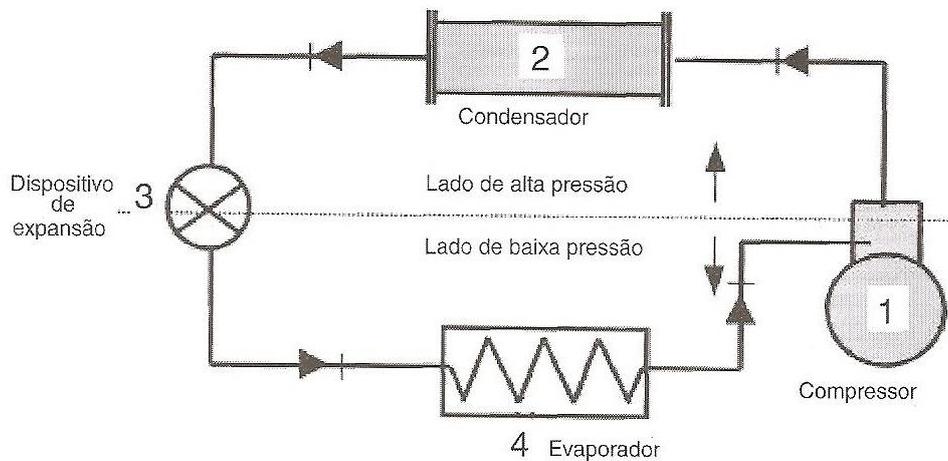
### **3.4.2 Considerações sobre refrigeração mecânica por meio de vapor**

A refrigeração mecânica por meio de vapor consiste na produção contínua de líquido frigorígeno, o qual, por vaporização, fornece a desejada retirada de calor do meio a refrigerar. Dessa forma, uma instalação de refrigeração trata-se de um conjunto de elementos ligados em um circuito fechado, destinado a liquefazer um líquido frigorígeno e possibilitar a sua vaporização contínua em condições de pressão adequada (COSTA, 1982).

O sistema é composto essencialmente por cinco componentes básicos: compressor, condensador, dispositivo de expansão, evaporador e fluido refrigerante. O compressor (1) promove a circulação do fluido refrigerante, por todo o sistema e, com o auxílio do dispositivo de expansão (3), eleva a pressão no condensador (2) e reduz a pressão no evaporador (4) (SILVA, 2013).

O condensador tem a função de transferir o calor absorvido pelo evaporador, somado ao calor promovido pela compressão do compressor para o meio externo. Com essa eliminação de calor, o fluido refrigerante que penetra no condensador, no estado físico de “vapor”, transforma-se em “líquido”. O dispositivo de expansão (3) restringe ou dificulta a passagem do fluido refrigerante “líquido” que vem do condensador para o evaporador e, com essa restrição, provoca uma elevação de pressão no condensador e uma redução brusca de pressão e temperatura no evaporador (SILVA, 2013). A Figura 5 representa o sistema básico de refrigeração por compressão mecânica de vapores.

Figura 5: Sistema básico de refrigeração



Fonte: SILVA (2013)

### 3.4.3 Congelamento e armazenamento de alimentos

O congelamento é um dos métodos mais amplamente utilizados de preservação de alimentos devido a dois motivos principais. O primeiro é por que muitos microrganismos não podem crescer às baixas temperaturas usadas no congelamento. Além disso, quando um alimento é congelado, parte da água é transformada em gelo, diminuindo assim a atividade de água do alimento. Esta redução influencia no crescimento de muitos microrganismos, uma vez que não podem se desenvolver em condições de baixa atividade de água (IBARZ; BARBOSA-CANOVAS, 2002).

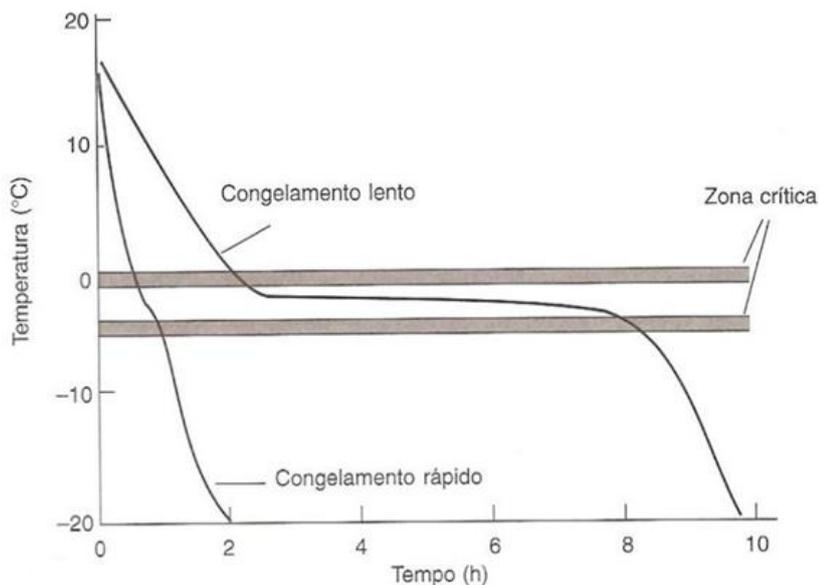
A temperatura recomendada para o armazenamento é de  $-18^{\circ}\text{C}$ . Temperaturas inferiores a essa podem ser utilizadas, porém, elevam bastante o custo de manutenção do produto. As flutuações de temperatura devem ser evitadas, uma vez que poderão provocar recristalizações, com o aumento do tamanho do cristal de gelo, o que é muito prejudicial para a textura do produto (PARDI et al., 2007).

O ponto inicial de congelamento de um alimento pode ser descrito como “a temperatura na qual um cristal de gelo minúsculo existe em equilíbrio com a água ao seu redor”. Contudo, antes que um cristal de gelo possa formar-se, um núcleo de moléculas de água deve estar presente. Portanto, a nucleação precede a formação de cristais de gelo. Existem dois tipos de nucleação: a homogênea (na qual a orientação e a combinação de moléculas de água são casuais) e a nucleação heterogênea (formação de um núcleo ao redor

de partículas suspensas ou em uma parede celular), sendo a heterogênea mais provável de acontecer em alimentos (FELLOWS, 2006).

De acordo com Bainy (2014), as curvas de congelamento são utilizadas para determinar o ponto inicial de congelamento, temperatura final de congelamento, velocidade e tempo de congelamento dos alimentos. Além disso, podem ser utilizadas para caracterizar o congelamento como rápido ou lento dependendo do perfil da curva obtida. As curvas apresentam perfis distintos entre os dois tipos de congelamento, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6: Curvas de congelamento rápido *versus* lento, com destaque a zona crítica



Fonte: FELLOWS (2006)

De acordo com Fellows (2006), o tempo que transcorre para que um determinado alimento seja congelado, passar pela sua zona crítica (0 a -5°C), determina o número e o tamanho dos cristais de gelo e, conseqüentemente, o tipo de congelamento associado a esse processo.

Segundo Singh e Heldman (2014), para alguns produtos é necessário um congelamento rápido (curto período de congelamento) para garantir a formação de pequenos cristais de gelo dentro da estrutura do produto e danos mínimos à textura do produto. Outros produtos, não são influenciados por mudanças estruturais e não justificam os custos adicionais associados ao congelamento rápido. Ainda há produtos que apresentam configurações geométricas e tamanhos que não permitem o congelamento rápido. Nestes casos, as condições

de temperatura de estocagem influenciam a qualidade desses alimentos congelados de forma significativa.

### **3.4.4 Métodos de congelamento de alimentos**

#### **3.4.4.1 Congelamento por ar forçado**

Diversos tipos de congeladores por ar forçado são amplamente utilizados na indústria do pescado devido a sua alta versatilidade. O ar frio circula a uma velocidade de 3 a 5 m/s. A temperatura de evaporação é de  $-45^{\circ}\text{C}$  e a temperatura média no túnel de congelamento é de  $-35^{\circ}\text{C}$ , com uma umidade relativa do ar entre 60 e 70% (BEVILACQUA; D'ALMORE; POLONARA, 2004).

De acordo com Fellows (2006), a alta velocidade do ar reduz a espessura da camada ou filme limite ao redor do alimento, aumentando o coeficiente de transferência de calor na superfície do produto.

Uma velocidade de circulação de ar acima de 5 m/s não diminui significativamente o tempo de congelamento, e ainda pode favorecer a dessecação e a perda de peso do produto, além de aumentar o gasto de energia (OGAWA, 1999).

#### **3.4.4.2 Congelamento em placas**

Trata-se de um método no qual o produto é prensado entre placas refrigeradas para aumentar a rapidez do congelamento, devido à transmissão de calor ocorrer por condução. A superior é geralmente fixa e a inferior pode elevar-se por meio de um pistão hidráulico até exercer uma leve pressão sobre o produto a congelar (COSTA, 1982).

As placas recebem diretamente o refrigerante e/ou salmoura já refrigerada a uma temperatura de  $-25^{\circ}\text{C}$  a  $-40^{\circ}\text{C}$ . A taxa de congelamento é de 1 a 1,5 cm de espessura do produto por hora (OGAWA, 1999).

#### **3.4.4.3 Congelamento por imersão**

O congelamento por imersão é o processo que consiste em colocar um produto em contato direto com uma solução aquosa à baixa temperatura. O congelamento por imersão pode ser feito de duas maneiras: direto, quando o alimento é colocado em contato direto com

a solução à baixa temperatura, ou indireto, quando o produto a ser congelado é protegido por uma embalagem ou acondicionantes que impedem a entrada do meio refrigerante (CARNEIRO, 1999). A Tabela 1 apresenta as principais soluções utilizadas para o congelamento por imersão.

Tabela 1: Principais soluções utilizadas para congelamento por imersão

Soluções	Concentração (%)	Ponto de congelamento (°C)
NaCl	21,2	-19,4
CaCl <sub>2</sub>	30,3	-50,6
Propilenoglicol	45,0	-25,0

Fonte: Bevilacqua; D'Almore; Polonara (2004)

#### 3.4.4.4 Congelamento Criogênico

O congelamento de produtos pode ser também feito com o uso de refrigerantes criogênicos, quais sejam, gás carbônico, sólido ou líquido e nitrogênio líquido. O gás carbônico sublima a  $-78,5^{\circ}\text{C}$ , enquanto o nitrogênio líquido vaporiza a  $-195,8^{\circ}\text{C}$ . Gás carbônico sólido pode ser usado na forma de pedras (gelo seco) ou por injeção da forma líquida no ar para produzir pequenas partículas da forma sólida, que rapidamente sublimam para gás. O nitrogênio líquido é injetado em compartimentos isolados em aço inoxidável onde o alimento é armazenado e vaporiza-se imediatamente, sendo o gás frio distribuído por ventiladores (FELLOWS, 2006).

### 3.5 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS ALIMENTOS

As propriedades termofísicas são muitas vezes necessárias para os cálculos de transferência de calor, tais como: densidade, calor específico e condutividade térmica. Essas propriedades podem ser preditas através da utilização da composição do produto, em conjunto com os modelos matemáticos dependentes da temperatura e das propriedades térmicas dos componentes individuais do alimento (ASHRAE, 2014).

Segundo Geankoplis (2003), uma solução analítica completa da taxa de congelamento de alimentos e materiais biológicos é muito difícil devido a variação das propriedades termofísicas com a temperatura, a quantidade do congelamento variar com a temperatura, e outros fatores.

Em geral, as propriedades termofísicas dos alimentos comportam-se bem quando a temperatura está acima de seu ponto de congelamento inicial. No entanto, abaixo do ponto de

congelamento inicial, as propriedades termofísicas variam muito por causa dos processos complexos envolvidos durante o congelamento (ASHRAE, 2014).

Choi e Okos (1986 apud ASHRAE, 2014) desenvolveram modelos matemáticos para prever as propriedades termofísicas dos componentes do alimento como uma função da temperatura, na faixa de  $-40^{\circ}\text{C}$  até  $150^{\circ}\text{C}$  (Tabela 2). Os autores também desenvolveram modelos para prever as propriedades térmicas de água e gelo (Tabela 3).

Segundo a ASHRAE (2014), as propriedades termofísicas dos alimentos podem ser determinadas relacionando as propriedades dos seus componentes (Tabelas 2 e 3), e suas respectivas frações mássicas de composição (Tabela 4).

Tabela 2: Modelos das propriedades térmicas dos componentes dos alimentos ( $-40^{\circ}\text{C} \leq T \leq 150^{\circ}\text{C}$ )

Propriedades termofísicas	Componentes do alimento	Modelos das propriedades termofísicas
Condutividade térmica (W/m.k)	Proteína	$k_p = 1.7881 \times 10^{-1} + 1.1958 \times 10^{-3}T - 2.7178 \times 10^{-6}T^2$
	Lipídios	$k_l = 1.8071 \times 10^{-1} - 2.7604 \times 10^{-4}T - 1.7749 \times 10^{-7}T^2$
	Carboidrato	$k_c = 2.0141 \times 10^{-1} + 1.3874 \times 10^{-3}T - 4.3312 \times 10^{-6}T^2$
	Fibras	$k_{fi} = 1.8331 \times 10^{-1} + 1.2497 \times 10^{-3}T - 3.1683 \times 10^{-6}T^2$
	Cinzas	$k_{ci} = 3.2962 \times 10^{-1} + 1.4011 \times 10^{-3}T - 2.9069 \times 10^{-6}T^2$
Densidade ( $\text{kg/m}^3$ )	Proteína	$\rho_p = 1.3299 \times 10^3 - 5.1840 \times 10^{-1}T$
	Lipídios	$\rho_l = 9.2559 \times 10^2 - 4.1757 \times 10^{-1}T$
	Carboidrato	$\rho_c = 1.5991 \times 10^3 - 3.1046 \times 10^{-1}T$
	Fibras	$\rho_{fi} = 1.3115 \times 10^3 - 3.6589 \times 10^{-1}T$
	Cinzas	$\rho_{ci} = 2.4238 \times 10^3 - 2.8063 \times 10^{-1}T$
Calor específico (kJ/kg.K)	Proteína	$c_p = 2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3}T - 1.3129 \times 10^{-6}T^2$
	Lipídios	$c_l = 1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3}T - 4.8008 \times 10^{-6}T^2$
	Carboidrato	$c_c = 1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3}T - 5.9399 \times 10^{-6}T^2$
	Fibras	$c_{fi} = 1.8459 + 1.8306 \times 10^{-3}T - 4.6509 \times 10^{-6}T^2$
	Cinzas	$c_{ci} = 1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3}T - 3.6817 \times 10^{-6}T^2$

Fonte: (CHOI; OKOS, 1986 apud ASHRAE, 2014)

Tabela 3: Modelos das propriedades térmicas para água e gelo ( $-40^{\circ}\text{C} \leq T \leq 150^{\circ}\text{C}$ )

	Propriedades termofísicas	Modelos das propriedades termofísicas
Água	Condutividade térmica (W/m.K)	$k_a = 5.7109 \times 10^{-1} + 1.7625 \times 10^{-3}T - 6.7036 \times 10^{-6}T^2$
	Densidade, $\text{kg/m}^3$	$\rho_a = 9.9718 \times 10^2 + 3.1439 \times 10^{-3}T - 3.7574 \times 10^{-3}T^2$
	Calor específico (kJ/kg.K) (temperaturas na faixa de $-40^{\circ}\text{C}$ a $0^{\circ}\text{C}$ )	$c_a = 4.0817 - 5.3062 \times 10^{-3}T + 9.9516 \times 10^{-4}T^2$
	Calor específico (kJ/kg.K) (temperaturas na faixa de $0^{\circ}\text{C}$ a $150^{\circ}\text{C}$ )	$c_a = 4.1762 - 9.0864 \times 10^{-5}T + 5.4731 \times 10^{-6}T^2$
Gelo	Condutividade térmica (W/m.K)	$k_g = 2.2196 - 6.2489 \times 10^{-3}T + 1.0154 \times 10^{-4}T^2$
	Densidade ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho_g = 9.1689 \times 10^2 - 1.3071 \times 10^{-1}T$
	Calor específico (kJ/kg.K)	$c_g = 2.0623 + 6.0769 \times 10^{-3}T$

Fonte: (CHOI; OKOS, 1986 apud ASHRAE, 2014)

Tabela 4: Equações para determinação das propriedades termofísicas do alimento

Condutividade (W/m.K)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (kJ/kg.K)		Difusividade Térmica (m <sup>2</sup> /s)		Calor latente (kJ/kg)
		Acima T <sub>ic</sub>	Abaixo T <sub>ic</sub>	Acima T <sub>ic</sub>	Abaixo T <sub>ic</sub>	
$k_{=} = \sum X_i^v k_i$						
(1)						
$k_{\perp} = \frac{1}{\sum (X_i^v / k_i)}$						
(2)						
$k_{al} = \frac{k_{=} + k_{\perp}}{2}$						
(3)						
$X_i^v = \frac{X_i / \rho_i}{\sum (X_i / \rho_i)}$						
(4)						
	$\rho_{al} = \frac{1}{\sum X_i / \rho_i}$	$c_{al} = \sum c_i X$	$c_A = 1,55 + 1,26x_s - \frac{(X_a - X_{ali})L_a T_{ic}}{T^2}$	$\alpha_{al} = \frac{k_{al}}{\rho_{al} c_{al}}$	$\alpha_{al} = \frac{k_{al}}{\rho_{al} c_A}$	$L_{al} = X_{al} L_a$
	(5)	(6)	(7)	(9)	(10)	(11)
			$X_{ali} = 0,4X_p$			
			(8)			

Fonte: ASHRAE (2014)

De acordo com a ASHRAE (2014), para determinar as propriedades termofísicas do alimento abaixo da temperatura inicial de congelamento, torna-se necessário o cálculo da fração mássica de gelo, através da Equação 12.

$$X_g = \frac{1,105X_a}{1 + \frac{0,7138}{\ln(T_{ic} - T + 1)}} \quad (12)$$

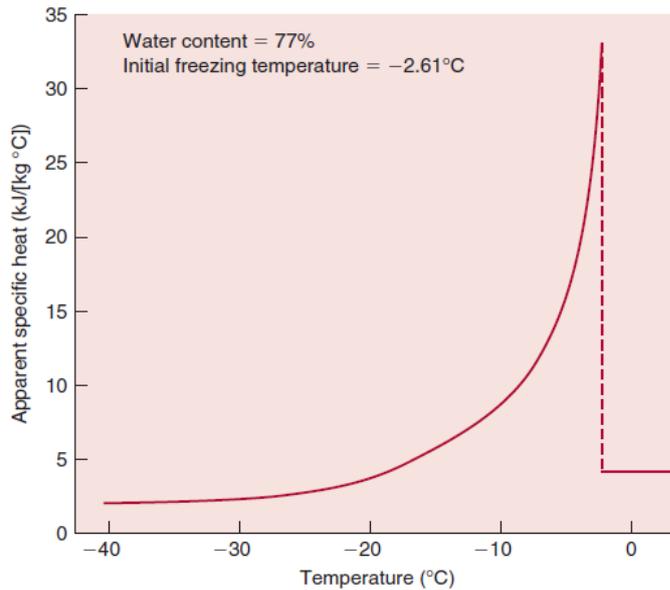
O processo de congelamento tem uma influência drástica sobre as propriedades térmicas dos alimentos. Por causa da quantidade significativa de água na maioria dos alimentos e a influência da mudança de fase nas propriedades da água, as propriedades dos alimentos mudam de forma proporcional. À medida que a água no interior do produto altera de líquido para sólido, a densidade, condutividade térmica, o conteúdo térmico (entalpia), calor específico aparente do produto alteram gradualmente à medida que a temperatura diminui abaixo do ponto de congelamento inicial de água no alimento (SINGH; HELDMAN, 2014).

O ponto de congelamento inicial de um alimento é um pouco menor do que o ponto de congelamento da água pura devido às substâncias dissolvidas na água dos alimentos. No ponto de congelamento inicial, uma parte da água cristaliza no alimento, e a solução restante torna-se mais concentrado. Assim, o ponto de congelamento da porção descongelada da fração alimentar é ainda mais reduzido. A temperatura continua a diminuir à medida que a separação dos cristais de gelo aumenta a concentração de solutos em solução e reduz o ponto de congelamento ainda mais. Por isso, as propriedades termofísicas de gelo e água são bastante diferentes, e as propriedades termofísicas dos alimentos congelados variam drasticamente com a temperatura (ASHRAE, 2014).

De acordo com Rao, Rizvi e Datta (2005), a Equação (6) é válida na faixa de temperatura onde não há mudança de fase. Se existir mudança de fase, como no congelamento, então o calor latente envolvido durante a mudança de fase deve ser incorporado. Isso é realizado usando um termo chamado calor específico aparente (Equação 7). É obtido diferenciando a entalpia dos alimentos congelados (incluindo calor latente e sensível) em relação à temperatura.

Segundo Heldman e Lund (2007 apud Singh e Heldman, 2014), o calor específico aparente em função da temperatura, aumenta drasticamente próximo a temperatura inicial de congelamento de -2,61°C para cerejas doces com o conteúdo de água de 77% (Figura 7).

Figura 7: Calor específico aparente de cerejas doces



Fonte: (HELDMAN; LUND, 2007 apud SINGH; HELDMAN, 2014)

### 3.6 MÉTODOS SIMPLIFICADOS

Segundo Geankoplis (2003), Plank obteve uma solução aproximada para determinar o tempo de congelamento de alimentos e materiais biológicos, na qual geralmente é suficiente para propósitos de engenharia.

De acordo com a ASHRAE (2014), um dos métodos simples mais conhecidos para estimar os tempos de congelamento de alimentos e bebidas foi desenvolvido por Plank. Espera-se que a transferência de calor convectiva ocorra entre o alimento e o meio de resfriamento circundante. A estimativa do tempo de congelamento é dada pela Equação 13:

$$t_{cP} = \frac{\rho_{dc} L_{al}}{T_{ic} - T_{ar}} \left( \frac{PD}{h_c} + \frac{RD^2}{k_{dc}} \right) \quad (13)$$

Onde: P e R são os fatores geométricos das geometrias: placa infinita: P = 1/2 e R = 1/8; esfera: P = 1/6 e R = 1/24; cilindro infinito: P = 1/4 and R = 1/16.

Segundo ASHRAE (2014), o método de Plank não prevê com precisão os tempos de congelamento de alimentos e bebidas. Isso porque, o método pressupõe que os alimentos congelam a uma temperatura constante e não em uma faixa de temperatura, como é o caso nos processos reais de congelamento. Além disso, a condutividade térmica dos alimentos

congelados é assumida como constante, mas varia muito durante o congelamento. Outra limitação é que a equação negligencia o pré-resfriamento e o sub-resfriamento, a remoção do calor sensível acima e abaixo do ponto de congelamento.

De acordo com Singh e Heldman (2014), numerosas tentativas foram feitas para melhorar a estimativa do tempo de congelamento de alimentos usando equações analíticas. Dentre esses métodos, destaca-se o método de Pham (1986) para prever o tempo de congelamento e descongelamento de alimentos. Esse método pode ser usado para objetos finos de formato irregular, aproximando-os a geometria de um elipsoide, fornecendo respostas com precisão razoável. Os pressupostos utilizados no desenvolvimento deste método foram: condições ambientais e as temperaturas inicial e final do produto foram consideradas constantes; a transferência de calor convectivo na superfície do produto é descrita pela lei de resfriamento de Newton. O tempo de congelamento é determinado através das Equações 14, 15, 16, 17, 18, 19 e 20.

$$t_{cp} = \frac{d}{Eh_c} \left( \frac{h}{\Delta T_{ac}} + \frac{H}{\Delta T_{dc}} \right) \left( 1 + \frac{Bi_s}{2} \right) \quad (14)$$

$$Bi_s = \frac{h_c d}{k_{dc}} \quad (15)$$

$$T_{mc} = 1,8 + 0,263T_f + 0,105T_{ar} \quad (16)$$

$$h = \rho_{ac} c_{ac} (T_i - T_{mc}) \quad (17)$$

$$H = \rho_{dc} [L_{al} + c_{dc} (T_{mc} - T_f)] \quad (18)$$

$$\Delta T_{ac} = \frac{T_i + T_{mc}}{2} - T_{ar} \quad (19)$$

$$\Delta T_{dc} = T_{mc} - T_{ar} \quad (20)$$

Onde: E é o fator de forma das geometrias: placa infinita: E = 1; cilindro infinito: E=2; esfera: E=3.

### 3.7 MÉTODOS NUMÉRICOS

Os métodos numéricos são técnicas pelas quais os problemas matemáticos são formulados de modo que possam ser resolvidos com operações aritméticas. Embora existam muitos tipos de métodos numéricos, eles têm uma característica em comum: invariavelmente envolvem grande número de cálculos aritméticos tediosos. Com o desenvolvimento de computadores digitais rápidos e eficientes, o papel dos métodos numéricos na solução de problemas de engenharia aumentou representativamente (CHAPRA; CANALE, 2008).

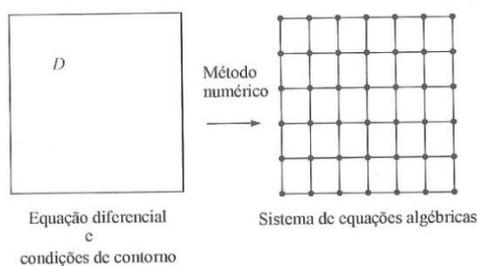
De acordo com Benta (2001), o objetivo de um método numérico consiste na resolução de um conjunto de equações diferenciais, nas quais as derivadas presentes são substituídas por expressões algébricas contendo as incógnitas. A solução desta aproximação numérica resulta em um número discreto de pontos, uma vez que as derivadas da função foram substituídas por valores discretos (discretização).

A escolha do método mais eficiente para resolver um problema numérico deve envolver os seguintes aspectos: precisão desejada para os resultados, capacidade do método em conduzir aos resultados desejados (velocidade de convergência), e esforço computacional despendido (tempo de processamento, economia de memória necessária para a resolução) (SPERANDIO; MENDES; SILVA, 2003).

Segundo Maliska (2012), a tarefa de um método numérico é resolver equações diferenciais, substituindo as derivadas por expressões algébricas. Quando não é possível a solução analítica e precisa-se fazer a aproximação numérica da equação diferencial, se aceita ter a solução para um número discreto de pontos, com um determinado erro, porém, o aumento no número de pontos, além de conduzir a uma melhor aproximação da solução, fará com que o esforço computacional também cresça.

A Figura 8 elucida a tarefa do método numérico, que é transformar uma equação diferencial, definida no domínio  $D$ , em um sistema de equações algébricas.

Figura 8: A tarefa do método numérico



Fonte: Maliska (2012)

Existem vários métodos de discretização dos modelos matemáticos, sendo os mais conhecidos: Método das Diferenças Finitas (MDF), Método dos Volumes Finitos (MVF) e Método dos Elementos Finitos (MEF). Todos os tipos de métodos produzem o mesmo resultado se a malha utilizada for suficientemente boa, entretanto, alguns métodos são mais adequados para determinadas classes de problemas do que outros (GONÇALVES, 2007). Neste trabalho, o MVF será o método para a discretização da equação da energia, nesse sentido será abordado com mais detalhes.

### **3.6.1 Método dos Volumes Finitos (MVF)**

O MVF foi aparentemente introduzido no campo da Dinâmica dos Fluidos Numérico independentemente por McDonald (1971) e Mac-Cormack e Paullay (1972) para a solução de equações de Euler dependente do tempo em duas dimensões e estendido por Rizzi e Inouye (1973) para fluxos em três dimensões (HIRSCH, 2007).

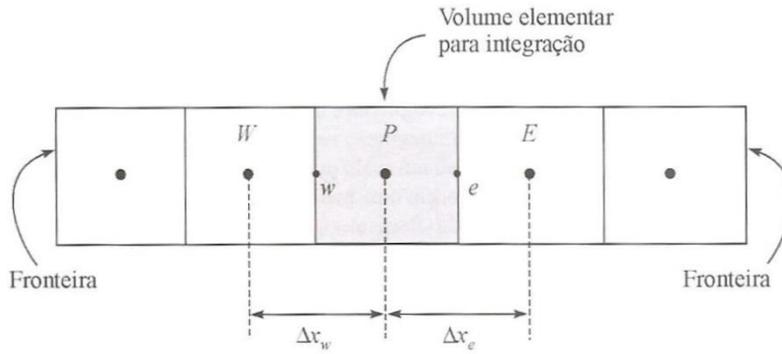
De acordo com Maliska (2012), o método de volumes finitos é todo aquele que, para obter as equações aproximadas, satisfaz conservação da propriedade em nível de volumes elementares. Existem duas maneiras neste método de obter equações aproximadas. A primeira é a realização de balanços da propriedade em questão nos volumes elementares, ou volumes finitos, e a segunda é integrar sobre o volume elementar, no espaço e no tempo, as equações na forma conservativa.

O MVF é um método numérico utilizado para a solução aproximada de EDP's e se comparado com o MDF, possui as seguintes vantagens: discretização espacial flexível, permitindo condições da malha acomodar-se a fronteiras irregulares reduzindo erros oriundos da geometria do domínio e realizar refinamento local melhorando a resolução em regiões potencialmente interessantes para o estudo; e a conservação das propriedades físicas quando se aplica as leis de conservação a duas células vizinhas com fronteira comum, sendo o fluxo total de uma quantidade física saindo de uma célula e entrando na adjacente constante (CORRÊA, 2013).

A desvantagem do MVF em relação ao MDF deve-se ao fato que os métodos de ordem superior à segunda serem mais difíceis de desenvolver em três dimensões, com malhas não estruturadas. Isto é por que a aproximação por volumes finitos requer três níveis de aproximação: interpolação, diferenciabilidade e integração (GONÇALVES, 2007).

Maliska (2012) descreve a sequência de passos para a discretização da equação de condução de calor unidirecional transiente com o termo fonte (Equação 21), adotando uma malha que possui volumes inteiros em todo o domínio (Figura 9).

Figura 9: Discretização com volumes inteiros na fronteira



Fonte: Maliska (2012)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k}{C} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + S \quad (21)$$

Realizando a integração no tempo e no espaço da Equação 22:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial t}(\rho T) dx dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k}{C} \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e S dx dt \quad (22)$$

resulta em:

$$\int_w^e (\rho T - \rho^0 T^0) dx = \int_t^{t+\Delta t} \left( \frac{k}{C} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e - \frac{k}{C} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w \right) dt + \int_t^{t+\Delta t} (S_P T_P + S_C) \Delta x dt \quad (23)$$

Considerando o que termo fonte foi expandido em uma função linear da temperatura, a Equação 23, torna-se:

$$M_P T_P - M_P^0 T_P^0 = \int_t^{t+\Delta t} \left( \frac{k}{C} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e - \frac{k}{C} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w \right) dt + \int_t^{t+\Delta t} (S_P T_P + S_C) \Delta x dt \quad (24)$$

Dessa forma, a Equação 24 adquire a seguinte forma:

$$M_P T_P - M_P^0 T_P^0 = \left[ \frac{k}{C} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e - \frac{k}{C} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w \right] \Delta t + (S_P T_P^\theta + S_C) \Delta x \Delta t \quad (25)$$

Como esse problema físico apresenta apenas os efeitos da difusão, será escolhida uma função linear entre os pontos nodais. Logo, as derivadas nas faces serão expressas por:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_e = \frac{T_E^\theta - T_P^\theta}{\Delta x_e} \quad (26)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w = \frac{T_P^\theta - T_W^\theta}{\Delta x_w} \quad (27)$$

Com as Equações 26 e 27, a Equação 24 apresenta a seguinte forma:

$$\frac{M_P T_P - M_P^0 T_P^0}{\Delta t} = \frac{k}{C} \Big|_e \frac{T_E^\theta - T_P^\theta}{\Delta x_e} - \frac{k}{C} \Big|_w \frac{T_P^\theta - T_W^\theta}{\Delta x_w} + S_P T_P^\theta \Delta x + S_C \Delta x \quad (28)$$

Rearranjando a Equação 28, temos a Equação geral de transferência de calor unidirecional transiente discretizada.

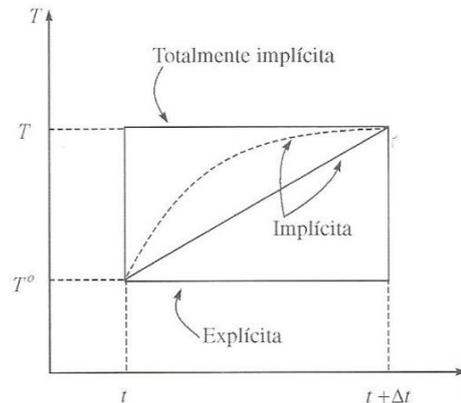
$$\frac{M_P T_P}{\Delta t} = \frac{k}{C} \Big|_e \frac{T_E^\theta}{\Delta x_e} + \frac{k}{C} \Big|_w \frac{T_W^\theta}{\Delta x_w} + \left[ \frac{k}{C \Delta x} \Big|_e - \frac{k}{C \Delta x} \Big|_w \right] T_P^\theta + \frac{M_P^0 T_P^0}{\Delta t} + S_P T_P^\theta \Delta x + S_C \Delta x \quad (29)$$

A solução da Equação 29 requer a definição da função de interpolação no tempo (linearização). A Figura 10 apresenta três funções de interpolação possíveis: explícita, totalmente implícita e implícita, que podem ser representadas pela Equação 30.

$$T^\theta = \theta T + (1 - \theta) T^0 \quad (30)$$

Definindo  $\theta = 0$ , a formulação será totalmente explícita, em que todas as temperaturas vizinhas a P são avaliadas no instante anterior e, portanto, já são conhecidas. Para formulação totalmente implícita o valor de  $\theta = 1$ . Já para formulação implícita, os valores das temperaturas que entram no cálculo do fluxo difusivo são tomados como uma média dos valores dessas temperaturas no começo e no fim do intervalo de tempo. O mais conhecido método nessa classe é o de Crank-Nicolson, em que a temperatura é tomada como uma média aritmética entre as temperaturas  $T_P^0$  e  $T_P$ .

Figura 10: Funções de interpolação no tempo



Fonte: Maliska (2012)

### 3.8 CFD APLICADO AO RESFRIAMENTO E CONGELAMENTO DE ALIMENTOS

A sigla CFD refere-se à ferramenta de simulação numérica chamada *Computational Fluid Dynamics*. Aplicada à simulação de processos industriais, a CFD é capaz de prever fenômenos em escala global ou local relacionado ao processo. Utiliza a rapidez de processamento dos computadores aliada ao desenvolvimento matemático de métodos numéricos para modelar situações envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e massa (FRANCESCHINI, 2002).

Segundo Sun (2011), a modelagem matemática do congelamento de alimentos e fenômenos associados representam desafios especiais. Em torno do ponto de congelamento, há variações grandes e súbitas nas propriedades termofísicas, como calor específico e condutividade térmica. Isso leva a uma equação diferencial parcial altamente não linear que é difícil de resolver. Em objetos de forma complexa, o progresso da frente de congelamento pode ser altamente imprevisível.

Mannapperuma e Singh (1989) descobriram a previsão de tempos de congelamento/descongelamento de alimentos usando um método numérico baseado sobre a formulação de entalpia de condução de calor com mudança de fase gradual, na qual proporcionou uma boa concordância com os resultados experimentais.

Corrêa (1998) determinou as propriedades termofísicas (calor específico aparente, densidade e condutividade térmica) dos filés de linguado (*Paralichthys brasiliensis*), e em seguida, utilizou-as para estimar o tempo de congelamento por meio da simulação numérica, através do método das diferenças finitas com um programa escrito em linguagem Pascal.

Obteve desvios menores que 3%, ao comparar o tempo de congelamento teórico com o experimental.

Pirozzi e Amendola (2005), em estudo do resfriamento rápido de morango com ar forçado por simulação numérica, utilizaram o modelo matemático escrito em coordenadas esféricas de forma unidimensional. Neste trabalho, concluíram que a metodologia de simulação numérica através do *software* de CFD MATLAB 6.1, foi capaz de determinar o tempo de resfriamento da fruta.

Amendola e Teruel (2005) desenvolveram um estudo teórico (numérico) para obtenção das curvas e do tempo de resfriamento de frutas esféricas, utilizando um modelo matemático baseado na equação de Fourier, em uma dimensão e em coordenadas esféricas. Os autores utilizaram, para a solução da equação matemática, o MDF e o esquema implícito, tendo concluído que o modelo e o método aplicado mostraram-se aptos para caracterizar o processo de resfriamento das frutas.

Trujillo e Pham (2006) modelaram o processo de transferência de calor e massa durante o resfriamento de carcaças de carne bovina em estado não estacionário. Uma geometria de carcaça tridimensional foi utilizada para a modelagem. Concluíram que o CFD fornece previsões de temperatura que concordam com dados experimentais, e que a perda de peso tende a ser superestimada, provavelmente devido ter sido negligenciado a resistência causada pela gordura de cobertura.

Tan e Fok (2009) investigaram os fatores que afetaram o processo de congelamento dos filés de tilápia, tais como: geometria do produto (placa plana, elipse, disco, esfera e cilindro), temperaturas e velocidades do ar do congelamento, através dos *softwares* de CFD Gambit e Fluent.

Wang e Zou (2014) realizaram a simulação numérica do congelamento de alimentos através da CFD, e analisaram os efeitos das condições de processo sobre a cinética de congelamento. O modelo foi validado, através do congelamento experimental dos produtos alimentícios em diferentes embalagens.

Segundo Scheerlinck et al. (2001), a simulação numérica do congelamento ou descongelamento de alimentos em estado não estacionário, trata-se de um problema de transferência de calor altamente não linear, devido a relação das propriedades termofísicas com a temperatura. Medidas especiais devem ser realizadas para evitar saltar o pico do calor específico aparente, o que acarretaria oscilações numéricas. Os autores aplicaram simultaneamente a formulação entálpica (entalpia específica volumétrica) e a transformação de Kirchhoff para simular o congelamento de um recipiente cilíndrico com gel de metil-

hidroxi-etilcelulose (23% tylose e 77% de água). Dessa forma, as não-linearidades causadas pelas propriedades termofísicas dependentes da temperatura são eliminadas das matrizes. Os autores encontraram uma boa concordância entre os resultados encontrados através do modelo preditivo e o experimental.

Sartori, Amarante e Mariani (2006), combinaram a formulação entálpica e a função Kirchhoff para simular numericamente o congelamento do purê de cenoura. O método numérico de diferenças finitas usando um esquema explícito foi empregado. Os resultados numéricos foram validados com os experimentais, apresentando razoável precisão da evolução da temperatura no interior do alimento quando submetido ao processo de congelamento.

Sun (2011) classifica e descreve os métodos numéricos aplicados ao congelamento de alimentos. A Tabela 5 apresenta os diferentes métodos que abordam a mudança de fase em métodos numéricos.

Tabela 5: Resumo dos métodos para lidar com o calor latente em métodos numéricos

Método	Passo de tempo	Aplicabilidade	Dificuldade de programação	Precisão	Velocidade
Grade móvel		Faixa de congel. bem definida	Não considerada		
Grade fixa					
Fonte		Faixa de congel. bem definida	Não considerada		
Calor espec. aparente					
	Euler	Gradual mudança de fase	Muito fácil	Pobre	Lento
	Implícito não interativo	Gradual mudança de fase	Fácil	Pobre	Lento
	Implícito interativo	Gradual mudança de fase	Fácil	Pobre	Lento
Método da entalpia					
	Euler	Todos os materiais	Muito fácil	Boa	Lento
	Implícito interativo	Todos os materiais	Difícil	Boa	*
Quase entalpia de Pham					
	Implícito não interativo	Todos os materiais	Fácil	Boa	Rápido

\* De lento para rápido, dependendo do método de interação.

Fonte: Sun (2011)

### 3.9 SOFTWARE FLUENT

O Fluent é um *software* de CFD usado para simular diferentes problemas de engenharia. Para iniciar a simulação no *software*, o problema de engenharia é desenhado e discretizado em uma modelagem geométrica específica usando ferramentas de geração de malha que incluem os *softwares* Gambit ou Workbench (AL-ABIDI et al. 2013).

As ferramentas de geração de malha podem ser importadas de outros *softwares* como o Auto CAD (*Computer Aided Design*). Depois que a configuração física é desenhada e discretizada, as condições de contorno e os tipos de zona são definidos e a malha é exportada para o *software* Fluent. Diferentes tamanhos de malha e intervalos de tempo devem ser aplicados ao modelo numérico para garantir que os resultados numéricos sejam independentes dos parâmetros. Pequenos tamanhos de malha e intervalos de tempo são preferíveis para um tempo curto de simulação no computador (AL-ABIDI et al. 2013).

Ansys é um dos maiores fornecedores mundiais de *software* CFD comercial. Oferecendo além do Fluent, o Fidap e o Polyflow (para processos de polímero), códigos para uma ampla gama de aplicações industriais (SUN; XIA, 2002).

Segundo Fluent (2016a), há dois tipos de solucionadores de algoritmos para métodos numéricos: baseado na pressão ou na densidade. Ambos empregam o processo de discretização através do método dos volumes finitos, mas a abordagem utilizada para linearizar e resolver as equações discretizadas é diferente. Historicamente, a abordagem à base de pressão foi desenvolvida para escoamentos incompressíveis a baixa velocidade, enquanto que a abordagem à base de densidade foi utilizada principalmente para escoamentos compressíveis de alta velocidade. Somente o solucionador baseado na pressão pode ser usado para simular problemas de fusão e a solidificação.

#### 3.9.1 Método da entalpia-porosidade

No método da entalpia-porosidade, a interface líquido-sólido ou a região que contém a interface (conhecida como zona *mushy*) é modelada como um meio pseudo-poroso, com a porosidade sendo definida como função de uma quantidade chamada fração líquida. Este método, é implementado através da adição de termos fonte nas equações de conservação da quantidade de movimento, baseado na lei de Darcy e na equação de Carman-Kozeny (Brent et al, 1988) para escoamentos em meios porosos, cuja vantagem é funcionar adequadamente tanto no caso de mudança de fase isotérmica (envolvendo materiais puros) quanto para o caso

de mudança de fase ocorrendo dentro de uma faixa de temperaturas (envolvendo misturas ou ligas e dando origem à zona *mushy*), na qual coexistem partes solidificadas junto com a fase líquida (BRENT; VOLLER; REID, 1988; VOLLER; BRENT; PRAKASH, 1989; ODONE, 2014).

Segundo Odone (2014), o conjunto de equações diferenciais governantes que compõem o método da entalpia-porosidade: conservação da massa, quantidade de movimento e da energia, podem ser escritas de acordo com as Equações 31, 32, 33, e 34.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (31)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} u) - \nabla \cdot (\mu \nabla u) = -\frac{\partial P}{\partial x} - A_m \frac{(1-\gamma)^2}{(\gamma^3 + \epsilon)} u \quad (32)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} v) - \nabla \cdot (\mu \nabla v) = -\frac{\partial P}{\partial y} - A_m \frac{(1-\gamma)^2}{(\gamma^3 + \epsilon)} v + \rho g \beta (h - h_{ref}) / c \quad (33)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} h) - \nabla \cdot (\alpha \nabla h) = -\frac{\partial}{\partial t} (\rho \Delta H) - \nabla \cdot (\rho \vec{V} \Delta H) \quad (34)$$

A discretização da equação da energia (Equação 34) permite escrever a seguinte equação algébrica (Equação 35):

$$a_p h_p = \sum a_{nv} h_{nv} + a_p^0 h_p^0 + [S] \quad (35)$$

Os coeficientes  $a_{nv}$  formam combinações dos termos convectivos e difusivos discretizados e dependem dos esquemas de discretização usados, e o coeficiente  $a_p$  inclui as contribuições de todos vizinhos e o termo transiente.

O termo fonte da equação da energia é dado pela Equação 36 e é constituído de duas parcelas: um termo transiente e um termo convectivo. Integração do termo transiente sobre um volume de controle escalar e sobre o intervalo de  $t$  a  $t + \Delta t$  fornece:

$$\int_{VC} \int_t^{t+\Delta t} \left( -\frac{\partial(\rho \Delta H)}{\partial t} \right) dt dV = a_p^0 (\Delta H_p^0 - \Delta H_p) \quad (36)$$

$$a_p^0 = \frac{\rho \Delta V}{\Delta t} \quad (37)$$

As equações matemáticas usadas para resolver os modelos de solidificação e fusão pelo *software* Fluent dependem da técnica da entalpia-porosidade e do método do volume finito. Na primeira, a interface de fusão não é controlada de forma explícita. Uma quantidade

chamada fração de líquido, o que indica a fração do volume das células na forma líquida, é associado com cada uma das células no domínio. A fração líquida é calculada em cada iteração baseada no balanço de entalpia. A zona de interfase é uma região na qual a fração de líquido encontra-se entre 0 e 1, sendo modelada como um meio pseudo-poroso, na qual a porosidade decresce de 1 para 0, quando o material se solidifica. Quando o material estiver totalmente sólido na célula, a porosidade torna-se zero, resultando na queda da velocidade para zero (AL-ABIDI et al. 2013).

Segundo Fluent (2016a), para problemas de solidificação/fusão, a equação da energia é escrita como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (38)$$

$$\text{onde: } H = h + \Delta L \quad (39)$$

$$\Delta L = \gamma L \quad (40)$$

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T c dt \quad (41)$$

A fração de líquido ( $\gamma$ ) é definida como:

$$\gamma = 0 \text{ se } T < T_s$$

$$\gamma = 1 \text{ se } T > T_{\text{Liq}}$$

$$\gamma = \frac{T - T_s}{T_{\text{Liq}} - T_s} \text{ se } T_s < T < T_{\text{Liq}} \quad (42)$$

O termo fonte ( $S$ ) é definido como:

$$S = \frac{(1 - \gamma)^2}{(\gamma^3 + \epsilon)} A_m (\vec{V} - \vec{V}_p) \quad (43)$$

O termo fonte é adicionado à equação da quantidade de movimento devido ao efeito da mudança de fase sobre a convecção. A constante ( $\epsilon$ ) é um pequeno valor adotado para evitar dividir por zero, sendo o valor adotado 0,001. Já a constante da zona *mushy* ( $A_m$ ), descreve a cinética do processo na zona de interfase líquido-sólido normalmente entre  $10^4$  e  $10^7$  (AL-ABIDI et al., 2013).

De acordo com Fluent (2016a), a solução para a temperatura é essencialmente uma iteração entre a equação de energia (Equação 38) e a equação da fração líquida (Equação 42). O uso direto da Equação 42 para atualizar a fração líquida, geralmente resulta em baixa convergência da equação de energia. O método sugerido por Voller e Swaminathan (1991) é usado para atualizar a fração líquida.

### 3.9.2 Propriedades termofísicas definidas em linguagem de programação C

Segundo Fluent (2016b), uma função definida pelo usuário, ou UDF, é uma função em linguagem de programação C que pode ser carregada dinamicamente com o solucionador do Fluent para melhorar seus recursos padrão. Por exemplo, uma UDF pode ser utilizada para:

- Personalizar as condições de contorno, definição das propriedades dos materiais, taxas de reação de superfície e volume, termos fonte em equações de transporte e funções de difusividade;
- Ajustar os valores calculados sobre uma base de uma iteração por vez;
- Inicializar uma solução;
- Executar no final de uma iteração, após a saída do Fluent, ou no carregamento de uma biblioteca UDF compilada;
- Melhorar o pós-processamento;
- Melhorar os modelos existentes no Fluent.

Os arquivos de origem que contêm UDFs podem ser interpretados ou compilados no Fluent. Para UDFs interpretadas, os arquivos de origem são interpretados e carregados diretamente no tempo de execução em um processo de um único passo. Já para UDFs compiladas, o processo envolve duas etapas separadas. Uma biblioteca de código de objeto compartilhado é construída pela primeira vez, sendo depois carregada no Fluent. Depois de serem interpretados ou compilados, as UDFs se tornaram visíveis e selecionáveis nas caixas de diálogo Fluent e podem ser conectados a um solucionador escolhendo o nome da função na caixa de diálogo apropriada (FLUENT, 2016b).

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado nos laboratórios de Sistemas de Refrigeração de Pequeno e Médio Porte (SRPMP) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) - Campus Rio Grande, e de Tecnologia de Alimentos (LTA) da Escola de Química e Alimentos (EQA)/FURG.

### 4.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados neste trabalho foram os músculos frescos de abrótea (*Urophycis brasiliensis*) e de anchova (*Pomatomus saltatrix*) oriundos do entreposto de pescado local, município de Rio Grande, provenientes da safra 2016/2017. Os músculos frescos dos pescados foram transportados para os laboratórios de Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal de Rio Grande e de Sistemas de Refrigeração de Pequeno e Médio Porte do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Rio Grande.

### 4.2 METODOLOGIA

#### 4.2.1 Análise química

A composição química dos músculos de abrótea e de anchova: umidade, proteínas, lipídios e cinzas foram determinados pelo método do IAL (2008).

#### 4.2.2 Propriedades Termofísicas

As propriedades termofísicas dos músculos dos pescados (densidade, condutividade térmica, calor específico, difusividade térmica e calor latente de fusão) foram determinadas através de modelos e equações matemáticas (Tabelas 2, 3 e 4). Além disso, estes modelos e equações foram utilizados para a elaboração das UDFs para a simulação numérica da cinética de congelamento dos músculos dos pescados (Apêndices 10 e 11).

O calor latente de fusão dos músculos de abrótea e anchova, utilizados na simulação numérica, foram determinados através da Equação 44. A fração de gelo dos músculos de

abrótea e anchova, foram determinadas nas temperaturas  $-5^{\circ}\text{C}$  e  $-3,5^{\circ}\text{C}$  (final da zona crítica), respectivamente.

$$L_{als} = X_g L_a \quad (44)$$

A temperatura inicial de congelamento foi determinada pela curva de congelamento experimental como sendo o ponto onde a inclinação ( $dT/dt$ ) da curva é igual a zero (Equação 45), segundo Rahman et al. (2002).

$$\frac{dT}{dt} \cong \frac{T(t+\Delta t) - T(t)}{\Delta t} \quad (45)$$

#### 4.2.3 Coeficiente de transferência de calor por convecção

Os valores médios coeficientes de transferência de calor por convecção ( $h_c$ ), utilizados nas simulações numéricas foram estimados através do balanço de energia entre as Equações 46, 47, 48 e 49 e a lei de resfriamento de Newton (Equação 49). A massa média dos músculos de abrótea e anchova utilizada nos ensaios de congelamento foram 121 g e 123 g, respectivamente.

$$Q_{ac} = mc_{ac}(T_I - T_{ic}) \quad (46)$$

$$Q_L = mL_{al} \quad (47)$$

$$Q_{dc} = mc_{dc}(T_{ic} - T_f) \quad (48)$$

$$Q_T = \frac{Q_{ac} + Q_L + Q_{dc}}{3600n} \quad (49)$$

$$q = h_c A (T_s - T_{ar}) \quad (50)$$

Na superfície do músculo do pescado temos:  $q = Q_T$ , portanto:

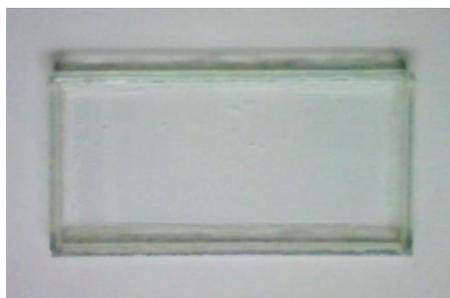
$$h_c = \frac{Q_T}{A(T_s - T_{ar})} \quad (51)$$

#### 4.2.4 Perfil da Temperatura de congelamento experimental

As amostras tiveram suas dimensões padronizadas para os ensaios de congelamento, através da utilização de uma forma de vidro de 7 cm x 14 cm x 1,5 cm (Figura 11). O excesso do músculo foi cortado com faca de aço inoxidável. Em seguida, as amostras foram embaladas em filme de PVC com o intuito de evitar a desidratação e contaminação dos produtos durante o processo de congelamento, de acordo com Corrêa (2009).

Antecedendo os ensaios de congelamento, as amostras permaneceram na câmara fria durante 24 h, visando atingir o equilíbrio térmico, padronizando a temperatura inicial de todos os produtos em 4°C.

Figura 11: Forma de vidro utilizada para o corte



Os ensaios de congelamento dos músculos de abrótea e anchova foram realizados em uma câmara de congelamento por convecção de ar forçado à temperatura de -20°C (Figuras 12 e 13). Devido a restrição da capacidade de refrigeração do equipamento, foi utilizado a temperatura do ar de -20°C, atingindo dessa forma a temperatura no centro térmico do produto de -18°C, ao invés de -25°C ou inferior, conforme recomendado por Brasil (1962).

Figura 12: Câmara de congelamento por convecção de ar forçado



Fonte: Laboratório de SRPMP

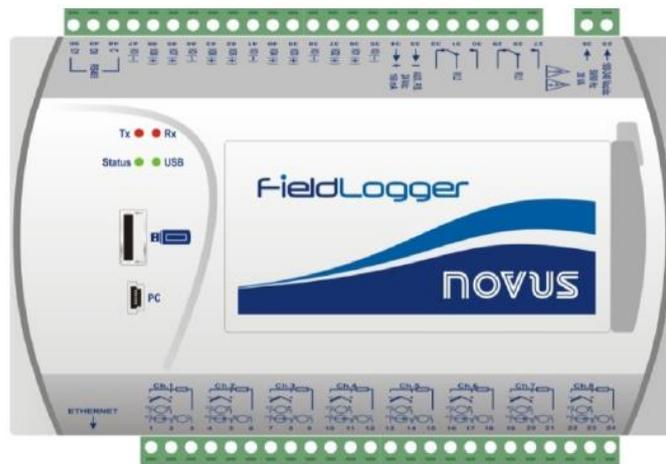
Figura 13: Vista frontal da câmara fria utilizado no congelamento dos músculos dos pescados



Essa câmara fria é formada por isopainéis de EPS, apresentando um volume interno de 729 L. O sistema de refrigeração utilizado é composto de uma unidade condensadora da empresa Elgin modelo TUM - 2053-E, evaporador da empresa Mipal modelo MMI015AHI e válvula de expansão termostática da empresa Danfoss modelo TX2-0.3. O fluido refrigerante utilizado pelo sistema de refrigeração foi o R-22 (monoclorodifluometano).

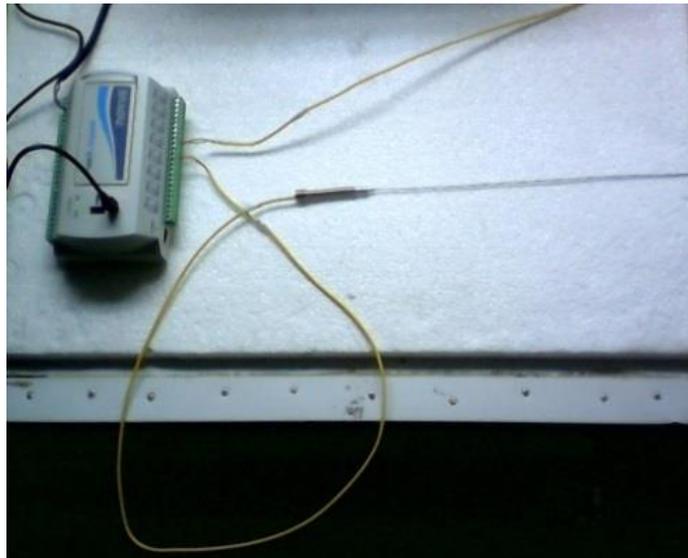
O experimento constou de três ensaios de congelamento (temperatura x tempo) para a determinação dos perfis de temperatura dos músculos de abrótea e anchova. Utilizou-se um aquisitor/registrador de dados (Figura 14) onde um termopar do tipo K (diâmetro de 1,48 mm e faixa de utilização  $-200^{\circ}\text{C}$  a  $1260^{\circ}\text{C}$ ) foi inserido no centro geométrico da amostra (Figuras 13 e 15), na qual ficou disposta sobre uma prateleira, apresentando as seguintes dimensões: 29 cm x 29 cm x 0,8 mm (largura x comprimento x altura). Durante o congelamento, o aquisitor de dados forneceu leituras de temperatura a cada 5 min., sendo o experimento interrompido quando o centro geométrico do músculo do peixe atingiu a temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$ . Os experimentos foram realizados em triplicata (uma amostra por vez, repetidos três vezes com amostras diferentes, dentro do período de safra de cada peixe).

Figura 14: Painel frontal do aquisitor Fieldlogger



Fonte: FieldLogger (2016)

Figura 15: Termopar tipo k ligado ao Fieldlogger



Fonte: Laboratório de SRPMP

O controlador eletrônico TC 900Ri *clock* (Anexo 7) possui dois sensores de temperatura tipo NTC, sendo o primeiro, utilizado para o controle da temperatura do ar no interior da câmara fria, localizado a 10 cm atrás da amostra, e o segundo para controle da temperatura na superfície do evaporador. Os dados coletados são transferidos via conexão USB para um computador instalado próximo a câmara fria. Esse computador, por sua vez, possui instalado *software* Sitrad (Figura 16), utilizado para gerenciamento de instalações de refrigeração, permitindo o armazenamento contínuo dos dados de tempo e temperatura durante os ensaios de congelamento (Anexos 1, 2, 3, 4, 5 e 6).

Figura 16: Tela principal do *Software* Sitrad

Fonte: Sitrad (2012)

#### 4.2.5 Velocidade de congelamento

A velocidade de congelamento (cm/h) das amostras foi determinada segundo Bainy (2014) *apud* Chen e Pan (1997), como sendo a metade da espessura dos músculos de pescado (cm) dividido pelo tempo de congelamento (h). Foi obtida a velocidade de congelamento para a temperatura no centro geométrico do músculo de abrótea e anchova, reduzindo de 0 até -5°C (zona crítica).

#### 4.2.6 ESTUDO DE INDEPENDÊNCIA DO TEMPO

O estudo de independência de tempo foi realizado com o intuito de atingir um equilíbrio entre a precisão e o tempo computacional da simulação numérica do congelamento dos músculos dos pescados. Os passos de tempo (*time steps*) avaliados foram de 0,1 s e 0,05 s.

#### 4.2.7 TESTE DE INDEPENDÊNCIA DE MALHA

Visando garantir que a malha utilizada no problema de simulação numérica de congelamento dos músculos de pescados seja adequada, foram realizadas simulações com três diferentes refinamentos: 5832, 6859 e 9261 células hexaédricas.

Os critérios adotados para definição da malha a ser utilizada, foram os resultados da temperatura no centro do domínio computacional (centro térmico) em diferentes tempos de processo, e a menor diferença relativa entre os diferentes refinamentos de malha.

A diferença relativa foi calculada através da Equação 52.

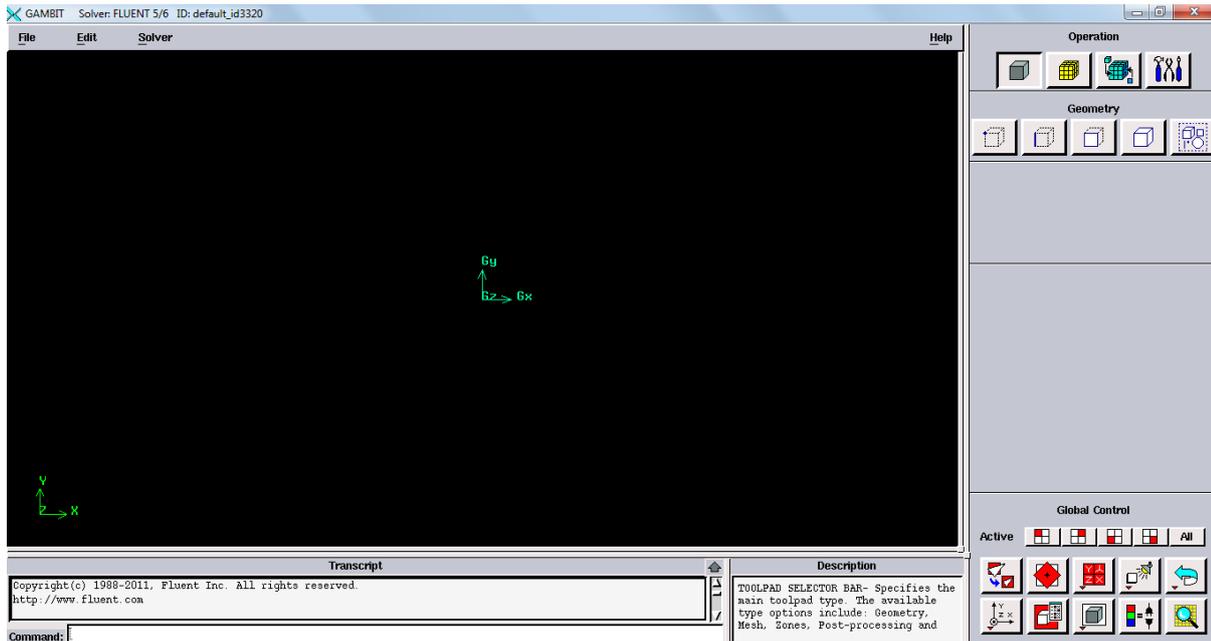
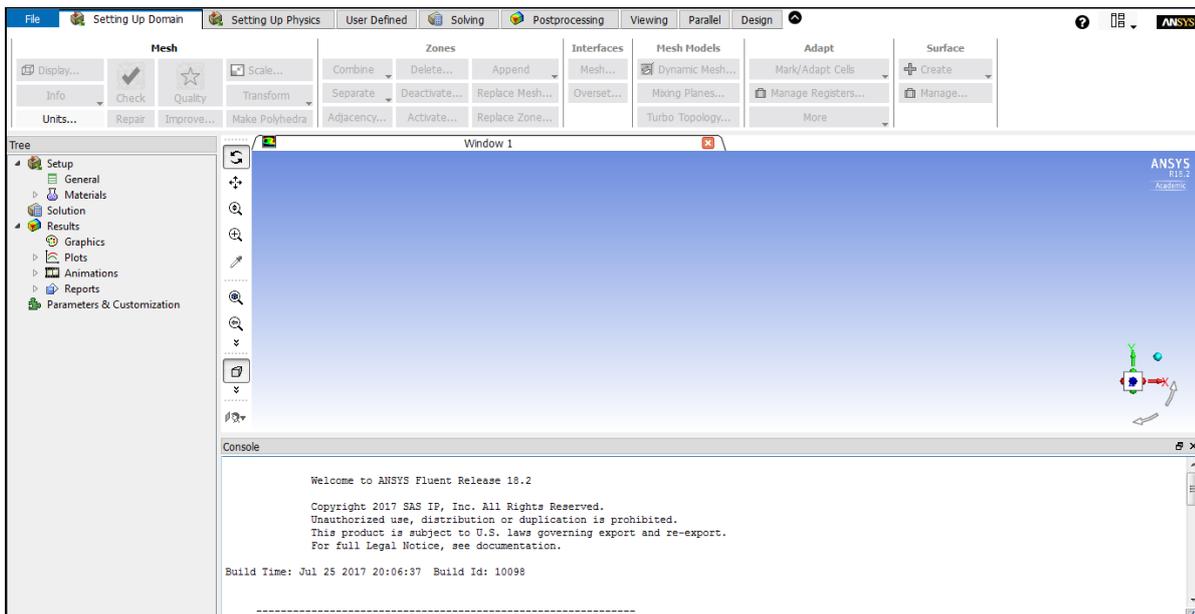
$$\text{Diferença relativa} = 100 \times \left[ \frac{(T_c^j - T_c^{j+1})}{T_c^j} \right] \quad (52)$$

#### 4.2.8 Perfil da temperatura de congelamento através da modelagem numérica

Os *softwares* Gambit (v. 2.4.6 - ANSYS, Inc. - USA) (Figura 17) e Fluent (v. 18.2 – ANSYS Academic, Inc. - USA) (Figura 18), foram utilizados para a simulação numérica da cinética de congelamento dos músculos de anchova e abrótea. O primeiro foi utilizado para construção da geometria, geração da malha e definição das condições de contorno. Já o segundo, para a solução numérica do problema de transferência de calor transiente com mudança de fase, discretizando as equações do método da entalpia-porosidade, através do Método dos Volumes Finitos (MVF).

Devido à variação das propriedades termofísicas ao longo do processo de congelamento dos músculos de abrótea e anchova, foram desenvolvidas UDFs para personalizar a densidade, condutividade térmica e o calor específico (Apêndices 10 e 11). O calor específico foi determinado nas temperaturas de referência de 5°C e -40°C, através das Equações 6 e 7, mas devido à descontinuidade da função próxima a temperatura inicial de congelamento (Figura 7), foi utilizado a regra da alavanca para determinação aproximada dessa propriedade.

O método da entalpia-porosidade utilizado para a solução do problema do congelamentos dos pescados, contemplou a liberação do calor latente na segunda região da curva de congelamento. Porém nos alimentos, essa liberação de energia também ocorre na terceira região da curva. Nesse sentido, o calor latente de fusão dos músculos de abrótea e anchova adotado nas simulações numéricas foram: 205816 J/kg e 149670,4 J/kg (Equação 44), respectivamente, correspondendo a uma redução percentual de 25,06% e 34,47% em relação ao valor real (Equação 11).

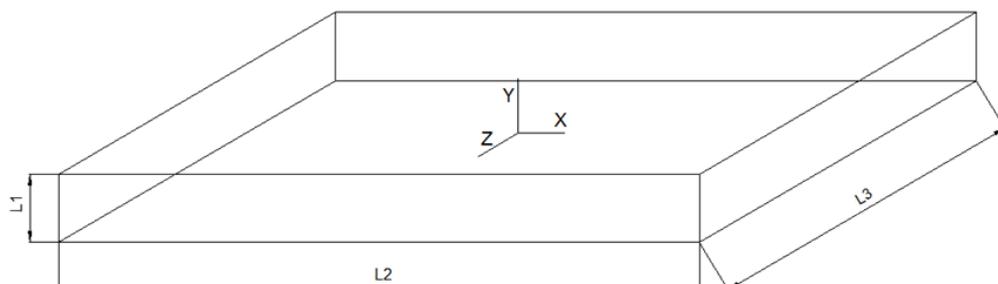
Figura 17: Tela principal do *Software* Gambit 2.4.6Figura 18: Tela principal do *Software* Fluent 18.2

#### 4.2.9 Formulação físico-matemática do problema

Visando resolver o problema de transferência de calor nos músculos dos pescados durante o congelamento em convecção de ar forçada (Figura 19), através do método da entalpia-porosidade (Equação 35), algumas considerações e simplificações foram definidas para a resolução do modelo físico-matemático:

- Geometria cartesiana: 7 cm x 14 cm x 1,5 cm;
- Estado não estacionário (transiente);
- Variação de volume desprezível durante o congelamento;
- Resistência térmica desprezível da prateleira (espessura de 0,8 mm);
- Termos convectivos e de fonte nulos no domínio computacional ( $\nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = 0$  e  $S = 0$ );
- Propriedades termofísicas ( $k$ ,  $\rho$ ,  $c$ ) variáveis, definidas pelas UDFs (Apêndice 10 e 11), sendo utilizadas no domínio computacional e nas condições de contorno (paredes);
- Métodos de solução numérica
  - Esquema: *SIMPLE*;
  - Discretização espacial (gradiente): *least squares cell based*;
  - Discretização espacial (equação da energia): *upwind* de segunda ordem;
  - Formulação transiente: implícito de segunda ordem;
  - Critério de convergência adotado: resíduo menor  $10^{-6}$ ;
- $T_{liq} = -1,5^\circ\text{C}$  e  $T_{sol} = -5^\circ\text{C}$  (zona crítica de congelamento do músculo de abrótea);
- $T_{liq} = -1,7^\circ\text{C}$  e  $T_{sol} = -3,5^\circ\text{C}$  (zona crítica de congelamento do músculo de anchova);
- Condição inicial:  $T(t=0) = T_0(y)$ ,  $0 < y < L_1$ ;
  - $T_0(y) = 4,2^\circ\text{C}$  (músculos de abrótea e anchova) no centro térmico.
- Condições de contorno convectiva nas superfícies  $zx$  ( $t > 0$ ):
  - $h_{zx} T_y = k_y \frac{\partial}{\partial y} (T_y)$ ,  $y = L_1$ ;
- Condições de contorno nas superfícies  $yx$  e  $yz$  ( $t > 0$ ):
  - Paredes consideradas adiabáticas.
- Condições de contorno no centro ( $t > 0$ ):  $-k_y \frac{\partial}{\partial y} (T_y) = 0$ ,  $y = 0$ .

Figura 19: Geometria do músculo do pescado



Nesse sentido, a Equação 38, a partir das considerações e simplificações definidas tornou-se a Equação 53.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (53)$$

#### 4.2.10 Percentual de erro

A percentagem de erro entre os tempos de congelamento dos músculos dos pescados preditos pela modelagem numérica e o procedimento experimental foram determinados pela Equação 54.

$$\% \text{ Erro} = \frac{(\text{valor numérico} - \text{valor experimental})}{\text{valor experimental}} \times 100 \quad (54)$$

#### 4.2.11 Análise estatística

As análises estatísticas dos parâmetros da cinética de congelamentos dos músculos de abrótea e anchova, foram realizadas através do teste *t-student*, ao nível de significância de 5% ( $p < 0,05$ ). Utilizou-se o programa statistica versão 5.0 do sistema operacional Windows.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos da composição química dos músculos de abrótea e anchova utilizados nos ensaios de congelamento.

Tabela 6: Composição química dos músculos de abrótea e anchova utilizados no trabalho

	Abrótea		Anchova	
	Base Úmida	Base Seca	Base Úmida	Base Seca
Umidade (%)	82,33±0,67	-	68,75±0,18	-
Proteína (%)	15,42±0,34	87,41±4,94	21,27±0,41	67,89±2,05
Lipídios (%)	1,25±0,07	7,07±0,46	8,05±0,29	27,98±3,18
Cinzas (%)	0,85±0,07	4,78±0,36	1,03±0,04	3,30±0,14

\* Média das análises em triplicata ±desvio padrão

Os resultados do músculo de abrótea apresentados na Tabela 6 foram semelhantes aos encontrados por Beirão et al. (1996) para a composição química do músculo, correspondendo a 79,44% de umidade, 17,77% de proteína, 1,76% de lipídios, exceto a análise de cinzas que o autor não realizou em sua pesquisa.

A composição química do músculo de anchova (Tabela 6), também apresentou similaridade ao encontrado por Gonçalves e Prentice-Hernández (1999) para a composição química, correspondendo a 69,38% de umidade, 16,80% de proteína, 12,43% de lipídios e 1,09% cinzas.

Ackman (1989) classificou os pescados em quatro categorias quanto ao seu teor de lipídios: magros (menor que 2% de gordura); baixo teor de gordura (2-4% de gordura); semigordo (4-8% de gordura); e altamente gordo (maior que 8% de gordura). Nesse sentido, podemos classificar a abrótea como pescado magro e a anchova como gordo.

Independente dos valores obtidos é preciso levar em consideração que outros fatores afetam a composição química, tais como: o sexo, que pode levar a variação na composição proteica devido ao estado fisiológico; a época do ano e hábitos alimentares.

## 5.2 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

As propriedades termofísicas determinadas para os músculos de abrótea e anchova, encontram-se nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7: Propriedades termofísicas dos músculos dos pescados antes do congelamento

Amostra *	Condutividade térmica (W/m.K)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (kJ/kg.K)	Difusividade Térmica (m <sup>2</sup> /s)
* Abrótea	0,48	1042,84	3,78	1,23x10 <sup>-7</sup>
Anchova	0,41	1062,51	3,47	1,13x10 <sup>-7</sup>

\* As propriedades termofísicas foram determinadas na temperatura de referência de 5°C.

Tabela 8: Propriedades termofísicas dos músculos de abrótea e anchova após o congelamento

Amostra *	Condutividade térmica (W/m.K)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico aparente (kJ/kg.K)	Difusividade Térmica (m <sup>2</sup> /s)	Calor latente (J/Kg)
Abrótea	1,35	916,34	2,01	6,71x10 <sup>-7</sup>	273880
Anchova	1,21	1011,3	2,16	5,87x10 <sup>-7</sup>	227120

\* A condutividade térmica, densidade, calor específico aparente e a difusividade térmica foram determinadas na temperatura de referência de -40°C.

Devido à ausência das propriedades termofísicas para o músculo de abrótea, e para o músculo de anchova abaixo do ponto de congelamento na literatura, e os resultados encontrados foram comparados com outras espécies de pescados com percentual de umidade e/ou lipídios semelhantes. Segundo Singh e Heldman (2014), a condutividade térmica do músculo de pescado é de 0,557 W/m.K para a faixa de temperatura de 0 a 10°C. Para o Salmão, a condutividade térmica é de 0,502 W/m.K, na temperatura de 4°C e 73% umidade.

De acordo com Singh e Heldman (2014), a difusividade térmica do bacalhau é 1,22x10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>/s, na temperatura de 5°C e 81% de umidade. O calor específico acima do ponto inicial de congelamento para pescado fresco é de 3,5 kJ/kg.K, determinado através de correlações matemáticas, e de 3,6 kJ/kg.K determinado experimentalmente. Esse pescado apresenta 76 % de umidade, 19 % de proteína e 1,4 % de cinzas.

Segundo ASHRAE (2014) as propriedades termofísicas do bacalhau com 81,22% de umidade, 17,81 % de proteína, 0,67 % de lipídios e 1,16 % de cinzas, são: 3,78 kJ/kg.K, 2,14 kJ/kg.K (calor específico acima e abaixo do ponto inicial de congelamento, nas temperaturas de referências de 5°C e -40°C), 0,56 W/m.K, 1,69 W/m.K (condutividade térmica nas temperaturas de 1°C e -15°C) e o calor latente de fusão de 271000 J/kg. Já as propriedades termofísicas do atum com 68,09% de umidade, 23,33% de proteína, 4,90% de lipídios e 1,18% de cinzas, são: 3,43 kJ/kg.K, 2,19 kJ/kg.K (calor específico acima e abaixo do ponto inicial de congelamento, nas temperaturas de referências de 5°C e -40°C) e o calor latente de fusão de 227000 J/kg.

De acordo com Geankoplis (2003), as propriedades termofísicas do bacalhau com 70% de umidade, são: 3,18 kJ/kg.K e 1,72 kJ/kg.K (calor específico antes e após o congelamento), porém não menciona a temperatura de determinação da propriedade. Já o salmão, com 67% de umidade, apresenta a condutividade térmica de 0,50 W/m.K e 1,675 W/m.K, nas temperaturas de 3,9°C e -24,9°C, respectivamente.

Segundo Radhakrishnan (1997), postas de anchova com 73,12 % de umidade e 3,74 % de lipídios, apresenta as seguintes propriedades termofísicas: condutividade térmica de 0,5082 W/m.K (temperatura de 6,5°C), difusividade térmica de  $1,3433 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s (temperatura de 6,5°C), calor específico acima do ponto inicial de congelamento: 3,44 kJ/kg.K (temperatura de 5°C). O autor não realizou a determinação dessas propriedades abaixo do ponto inicial de congelamento.

Nesse sentido, é possível afirmar que os valores encontrados para o músculo de abrótea e anchova (Tabelas 7 e 8) são semelhantes aos mencionados na literatura, diferindo ligeiramente em função da diferente composição centesimal, temperatura e método de determinação: experimental ou correlação matemática. Além disso, fica evidenciado a influência da composição química nas propriedades termofísicas dos músculos dos pescados analisados, ou seja, entre diferentes espécies de pescados com as mesmas dimensões submetidos ao congelamento, haverá taxas de transferência de calor distintas.

### 5.3 COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO

A Tabela 9 apresenta os valores médios dos coeficientes de transferência de calor por convecção de ar forçado envolvidos no processo de congelamento dos músculos de abrótea e anchova.

Tabela 9: Coeficientes de transferência de calor por convecção

Músculos	$h_c$ (W/m <sup>2</sup> .K)
abrótea	25,4
anchova	20,8

Os resultados encontrados dos coeficientes de transferência de calor por convecção encontram-se dentro da faixa de valores mencionada por Pham (2014). O autor apresenta valores para resfriadores e *freezers* a convecção a ar forçado, situando-se entre 15 a 30 W/m<sup>2</sup>.K.

Segundo a ASHRAE (2014), o resfriamento da carne com 23 mm de espessura, através da convecção de ar forçada com a velocidade de 1,4 m/s, apresentou o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção de 20 W/m<sup>2</sup>.K.

Clark, Jung e Lamsal (2014), apresentam os valores típicos dos coeficientes de transferência de calor por convecção em diferentes sistemas de resfriamento/congelamento: ar forçado em diferentes velocidades, imersão em líquido (repouso ou sob alta agitação), contato direto entre placas e imersão direta em substância criogênica. Os autores apresentam valores de  $h_c$  de 10 W/m<sup>2</sup>.K, para uma faixa de velocidade do ar de 0,5 a 1 m/s, e de 21 W/m<sup>2</sup>.K para uma faixa de velocidade do ar de 1 a 2 m/s.

#### 5.4 PERFIL DA TEMPERATURA DE CONGELAMENTO EXPERIMENTAL

As curvas de congelamento dos músculos de abrótea (Figuras 20, 21 e 22; Apêndices 1, 2 e 3) e anchova (Figuras 23, 24 e 25; Apêndices 3, 4 e 5) apresentaram a forma geral típica da literatura, sendo compostas basicamente por três regiões. A primeira região consiste entre o trecho da temperatura inicial do filé e a sua inflexão acentuada, até o início de um platô de temperatura aproximadamente constante. A segunda região corresponde ao platô de temperatura, ou seja, ao congelamento propriamente dito. Este trecho tenderia a horizontalização, mas devido ao aumento da concentração dos solutos celulares com o acréscimo do percentual de água congelada, acarretando em diminuição constante do ponto crioscópico, gerando um trecho com ligeira inclinação. Já o terceiro trecho, a curva cai bruscamente, sendo que o congelamento da água é simultâneo com o declínio da temperatura (CORRÊA, 1998).

Figura 20: Perfil da temperatura do músculo de abrótea (Ensaio 1)

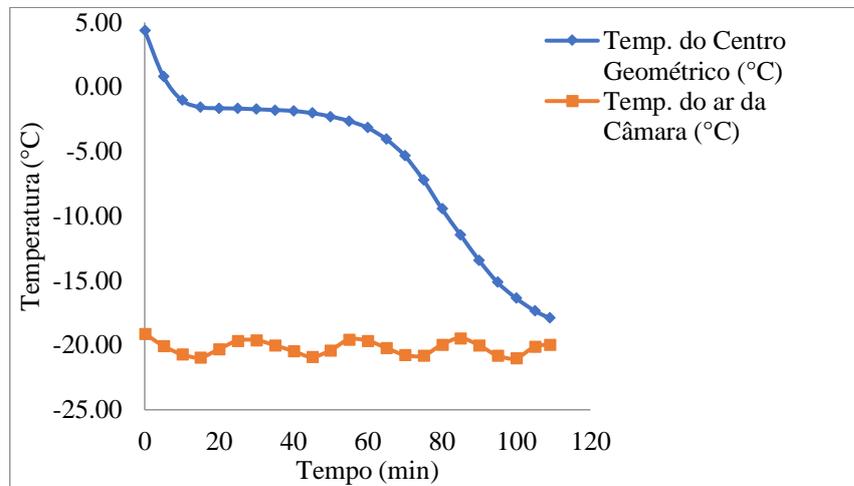


Figura 21: Perfil da temperatura do músculo de abrótea (Ensaio 2)

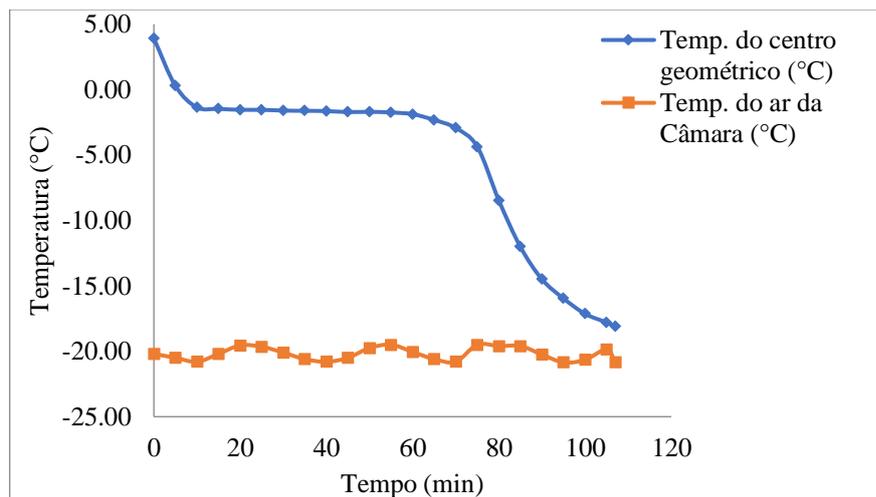
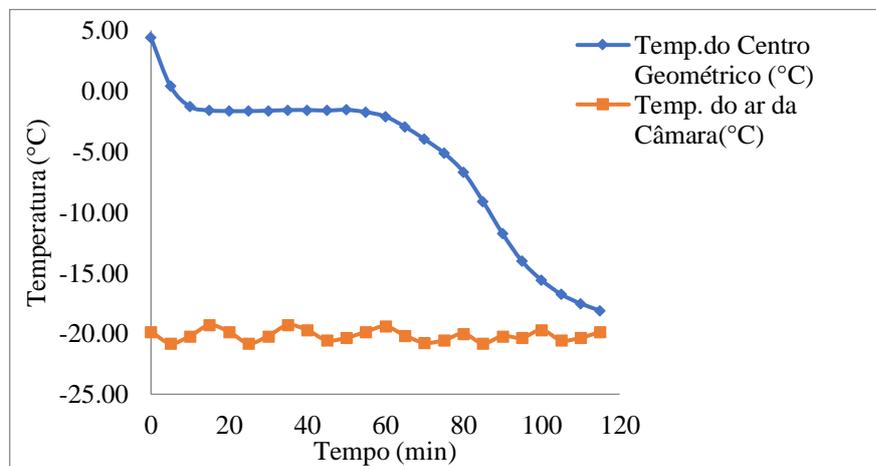


Figura 22: Perfil da temperatura do músculo de abrótea (Ensaio 3)



Analisando as curvas apresentadas nas Figuras 20, 21 e 22, observa-se que as temperaturas de início de congelamento das amostras dos músculos de abrótea foram  $-1,6^{\circ}\text{C}$ ,  $-1,4^{\circ}\text{C}$  e  $-1,6^{\circ}\text{C}$ , perfazendo uma temperatura média de início de congelamento de  $-1,5^{\circ}\text{C}$ , em um tempo médio de 15 min.

Os tempos de congelamento obtido nos ensaios de congelamento dos músculos de abrótea foram: 109 min, 107 min, e 115 min, respectivamente, perfazendo um tempo de congelamento médio de 110,3 min.

Figura 23: Perfil da temperatura do músculo de anchova (Ensaio 1)

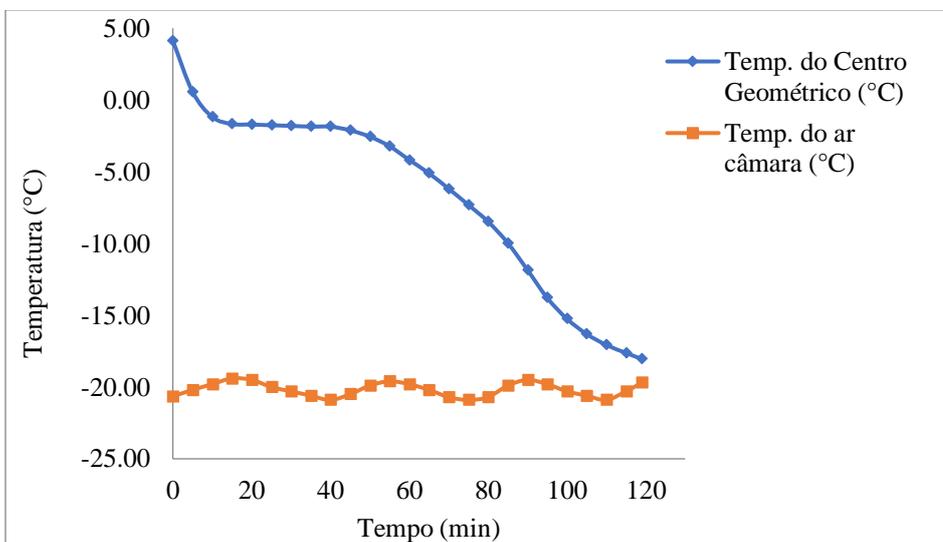


Figura 24: Perfil da temperatura do músculo de anchova (Ensaio 2)

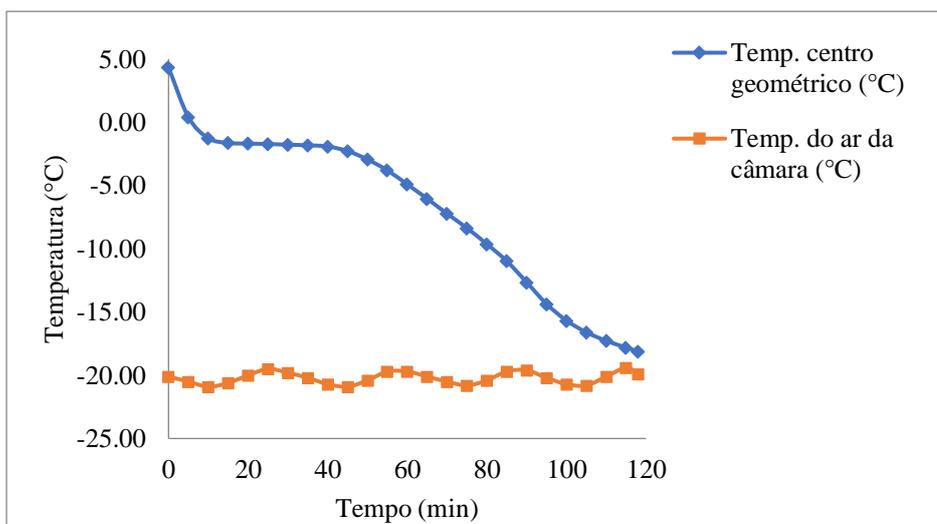
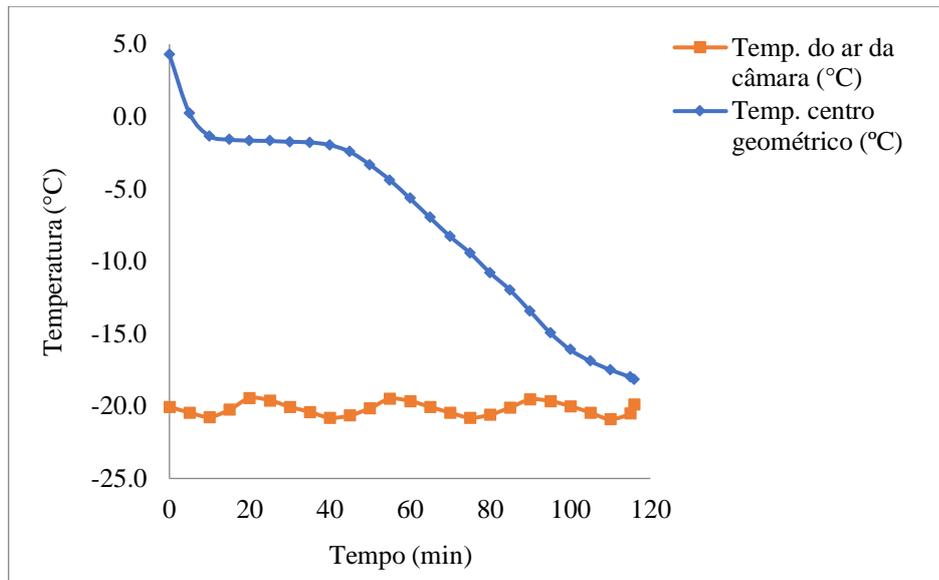


Figura 25: Perfil da temperatura do músculo de anchova (Ensaio 3)



Analisando as curvas apresentadas nas Figuras 23, 24 e 25 observa-se que as temperaturas de início de congelamento das amostras dos músculos de anchova foram  $-1,9^{\circ}\text{C}$ ,  $-1,7^{\circ}\text{C}$  e  $-1,7^{\circ}\text{C}$ , perfazendo uma temperatura média de início de congelamento de  $-1,7^{\circ}\text{C}$ , em um tempo médio de 28,3 min.

Os tempos de congelamento obtido nos ensaios de congelamento de músculo de anchova foram: 119 min, 118 min e 116 min, respectivamente (Figuras 23, 24 e 25), perfazendo a um tempo de congelamento médio de 117,6 min.

Os resultados encontrados para os músculos de abrótea e anchova nos ensaios experimentais, estão de acordo com Boonsupthip e Heldman (2007), na qual, a temperatura inicial de congelamento obtida experimentalmente para 200 produtos alimentícios com alto teor de umidade ( $>70\%$  água), como vegetais, carnes, frutos do mar e laticínios, variaram entre  $-0,1$  a  $-3,0^{\circ}\text{C}$ .

De acordo com Rahman et al. (2009), em pescados com conteúdo de umidade entre 50-81%, a temperatura inicial de congelamento relatada situa-se entre  $-0,6$  a  $-3,6^{\circ}\text{C}$ . Nesse sentido, o autor relaciona o ponto inicial de congelamento com a fração mássica de água presente nas diferentes espécies pescados.

A Tabela 10 apresenta um comparativo dos resultados obtidos nos ensaios de congelamento dos músculos de abrótea e anchova.

Tabela 10: Resultados experimentais do processo de congelamento dos pescados

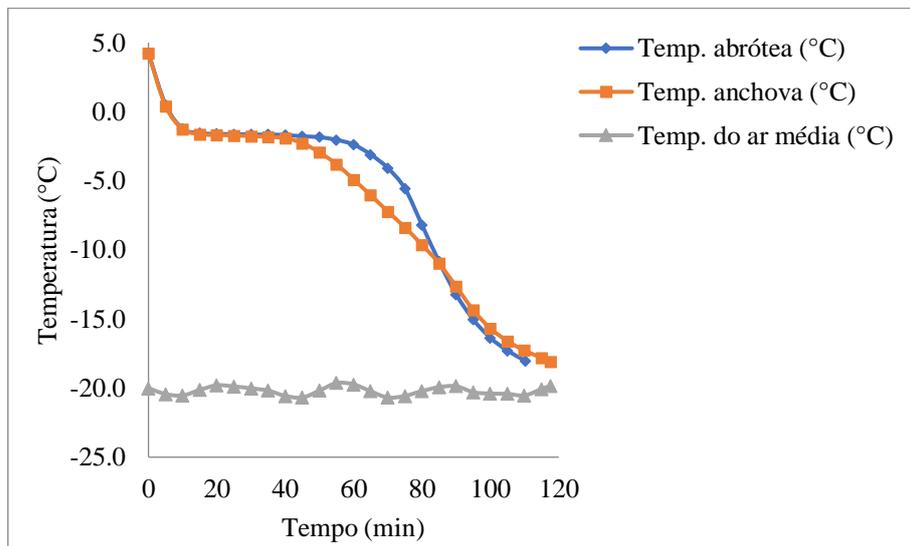
Parâmetros do ensaio de congelamento	Músculo de Pescado	
	Abrótea	Anchova
Tempo de congelamento (min)	110,3± 4,16 <sup>b</sup>	117,6± 1,53 <sup>a</sup>
Temperatura inicial do músculo (°C)	4,22± 0,27 <sup>b</sup>	4,25±0,11 <sup>b</sup>
Temperatura final do músculo (°C)	-18,04±0,12 <sup>c</sup>	-18,11±0,06 <sup>c</sup>
Temperatura inicial de congelamento (°C)	-1,57±0,09 <sup>d</sup>	-1,76±0,09 <sup>d</sup>
Temperatura média do ar da câmara (°C)	-20,17±0,05 <sup>e</sup>	-20,20±0,01 <sup>e</sup>

\* Média de três repetições ±desvio padrão. Médias na mesma linha, seguidas por letras iguais, não diferem entre si pelo teste *t-student* ao nível de significância de 5% ( $p < 0,05$ ).

Analisando a Tabela 10, pode-se observar que ocorreu diferença estatística significativa entre os tempos de congelamento final dos músculos de abrótea e anchova. Esse acréscimo no tempo necessário para o congelamento do músculo de anchova pode estar associado ao efeito do percentual de lipídios sobre as propriedades termofísicas do músculo de anchova (Tabelas 7 e 8). Além disso, pode-se afirmar que outros parâmetros do ensaio de congelamento mantiveram-se sobre controle, pois não apresentaram diferença estatisticamente significativa.

A Figura 26 apresenta o comparativo entre as médias das curvas de congelamento dos músculos de abrótea e anchova.

Figura 26: Curvas de congelamento dos músculos de abrótea e anchova



Observa-se o efeito dos diferentes percentuais de água e de lipídios na cinética de congelamento dos músculos dos pescados. Realizando um comparativo entre a primeira região das curvas, pode-se afirmar que praticamente não há diferença entre os perfis de temperatura.

Já a segunda região, apresentou diferença no perfil de temperatura devido a maior fração de gelo formada pelos músculos de abrótea em relação ao de anchova. O percentual de gelo dos músculos de abrótea e anchova na temperatura de  $-5^{\circ}\text{C}$  (final da zona crítica) correspondem a 61,7% e 51,3% (Equação 12), respectivamente. Dessa forma, o trecho tornou-se mais extenso em relação ao apresentado pelo músculo de anchova, na qual apresentou menor formação de fração de gelo em função de menor percentual de água na sua composição.

Já em relação ao terceiro trecho, observa-se que o músculo de anchova apresentou maior extensão em relação ao músculo de abrótea. Isto se deve ao maior percentual de gordura, e ao menor teor de água, que influenciou nas propriedades termofísicas do produto.

O valor da difusividade térmica encontrado para o músculo da anchova nas temperaturas de  $-5^{\circ}\text{C}$  e  $-18^{\circ}\text{C}$  foram  $4,03 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  e  $5,12 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , respectivamente. Já para os músculos de abrótea, nas mesmas temperaturas, os valores calculados foram  $4,50 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  e  $5,80 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  (Equação 10). Observa-se que o músculo de anchova apresentou valores de difusividade menores em relação ao músculo da abrótea, influenciando na rapidez com que o músculo do pescado se ajustará a temperatura do ar de resfriamento da câmara.

## 5.5 VELOCIDADE DE CONGELAMENTO

A Tabela 11 apresenta os valores de velocidade de congelamento (cm/h) para os músculos de abrótea e anchova correspondente à zona crítica (0 a  $-5^{\circ}\text{C}$ ).

Tabela 11: Velocidade de congelamento (cm/h) dos músculos de abrótea e anchova

Músculo dos pescados	Espessura (cm)	Velocidade de congelamento (cm.h <sup>-1</sup> ) (0 a $-5^{\circ}\text{C}$ )
Abrótea	1,5	0,69±0,04a
Anchova	1,5	0,82±0,04b

\* Média das leituras em triplica  $\pm$ desvio padrão. Médias na mesma coluna, seguidas por letras iguais, não diferem entre si pelo teste t- *student* ao nível de significância de 5%.

Analisando a Tabela 11, pode-se afirmar que ocorreu diferença estatística entre as velocidades de congelamento dos músculos de abrótea e anchova na zona crítica. A velocidade de congelamento do músculo de anchova na zona crítica foi superior, estando associado ao menor percentual de água livre e maior percentual de lipídios em relação ao

músculo de abrótea, reduzindo dessa forma o número de cristais de gelo formados e o tempo de congelamento na segunda região da curva (zona de mudança de fase).

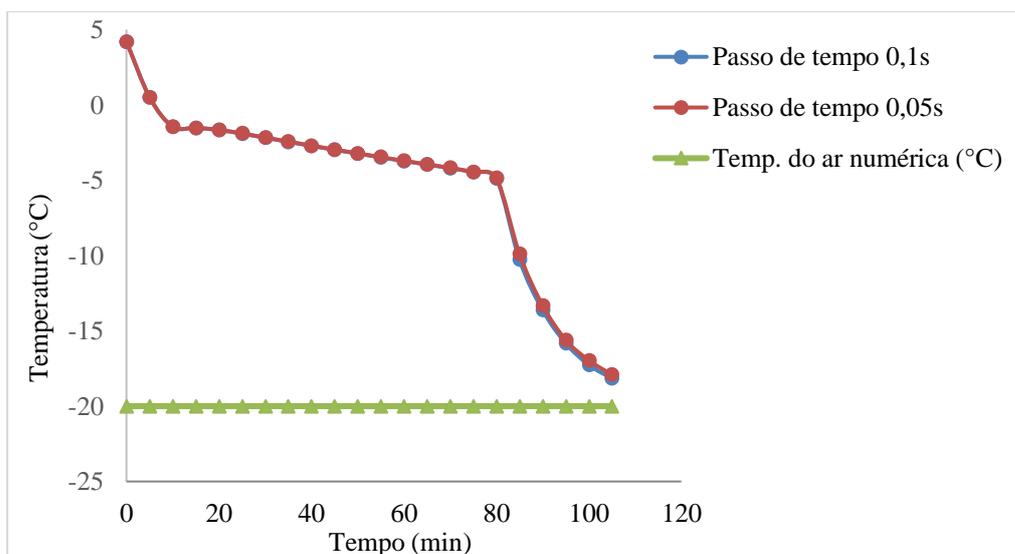
Plank (1963 apud Cordeiro et al., 2007) caracterizou o tipo de congelamento em 0,1 cm/h para congelamento lento; 1-5 cm/h para o congelamento de velocidade média e maior de 5 cm/h para congelamento rápido. Portanto, a velocidade de congelamento dos músculos de abrótea e anchova em câmara de ar forçado, enquadraram-se próximo a faixa de congelamento de velocidade média.

Porém, de acordo com Instituto Internacional do Frio (1990 apud FELLOWS, 2006), as velocidades de congelamento do músculo de anchova e abrótea, podem ser classificadas como congelamento rápido, pois define as seguintes faixas de velocidade de congelamento em seus respectivos processos: 0,2 cm/h (lento) para congelamento a granel em câmaras frias ventiladas, 0,5 a 3 cm/h (rápido) para produtos embalados e congelados em câmaras de ar forçado ou em congeladores de placas, 5 a 10 cm/h (rápido) para congelamento individual com produtos de pequenas dimensões como no sistema de leito fluidizado, e 10 a 100 cm/h (congelamento ultra-rápido) para congelamento em *spray* e/ou imersão em gases liquefeitos.

## 5.6 ESTUDO DE INDEPENDÊNCIA DE PASSO DE TEMPO

A Figura 27 e o Apêndice 8 apresentam a avaliação dos passos de tempo durante a simulação numérica do problema proposto.

Figura 27: Perfil da temperatura numérica para distintos passos de tempo



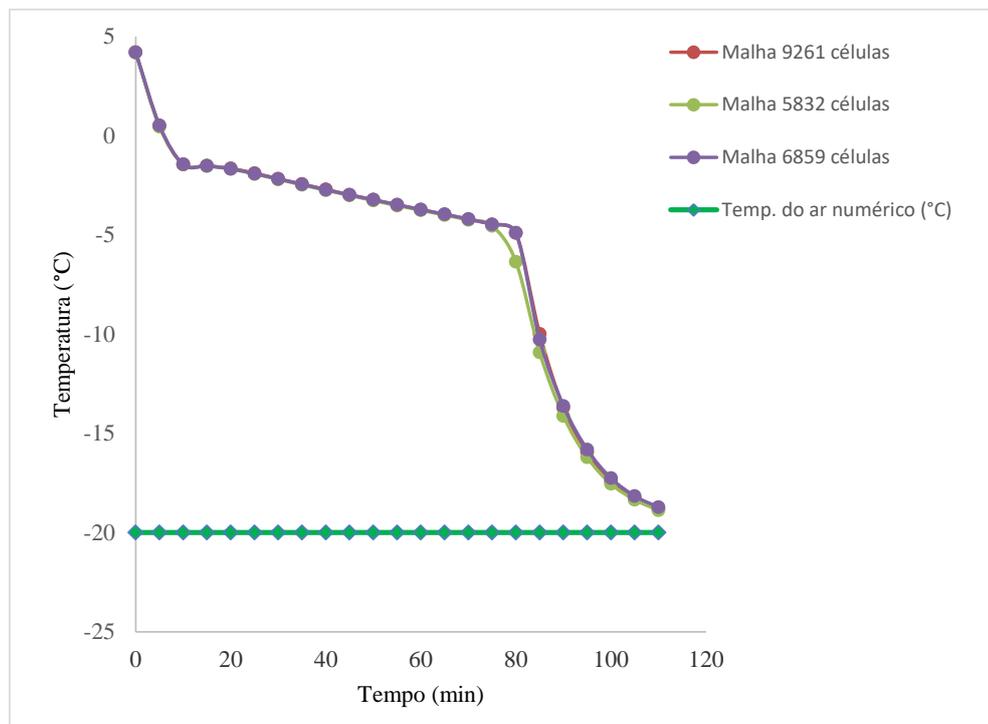
Analisando a Figura 27 e o Apêndice 8 pode-se afirmar que o passo de tempo de 0,1 s pode ser utilizado na simulação numérica do congelamento dos músculos dos pescados, pois produz um balanço entre a precisão entre os resultados da simulação numérica e o tempo computacional requerido.

Os autores Tan e Fok (2009) realizaram estudo de independência de passo de tempo durante a simulação numérica do tempo de congelamento de filé de tilápia com 250 mm de comprimento, 140 mm de largura e 16 mm de altura, através do método da entalpia-porosidade com o *software* Fluent 6.2, visando comparar com os métodos analíticos preditivos de tempo de congelamento de Pham (1986) e Campanone, Salvadori e Mascheroni (2005). De acordo com os autores, o passo de tempo considerado adequado foi 0,1 s para simulação numérica.

### 5.7 TESTE DE INDEPENDÊNCIA DE MALHA

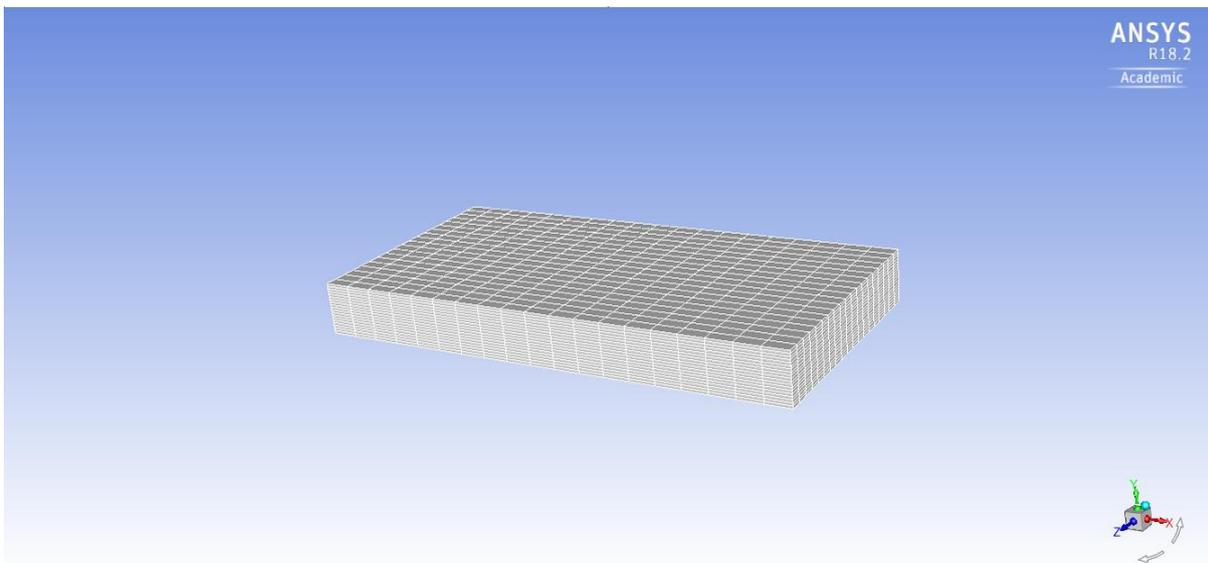
A Figura 28 apresenta os valores da temperatura no centro do domínio computacional *versus* tempo de congelamento numérico para as três diferentes malhas analisadas.

Figura 28: Perfil da temperatura numérica para distintos refinamentos de malha



Analisando a Figura 28 e o Apêndice 7, pode-se afirmar que a malha computacional de 6859 células (Figura 29), apresentou um bom balanço entre a precisão obtida nos resultados da simulação numérica e o tempo computacional demandado, dessa forma, o resultado da solução numérica do modelo da entalpia-porosidade, não seria alterando significativamente com a alteração para uma malha menos refinada (5832 células), ou para outra mais refinada (9261 células).

Figura 29: Malha computacional utilizada na simulação numérica



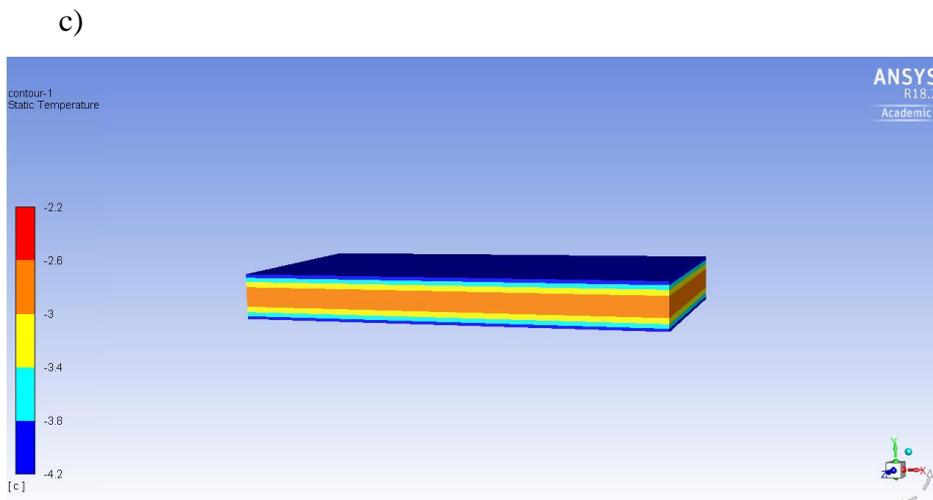
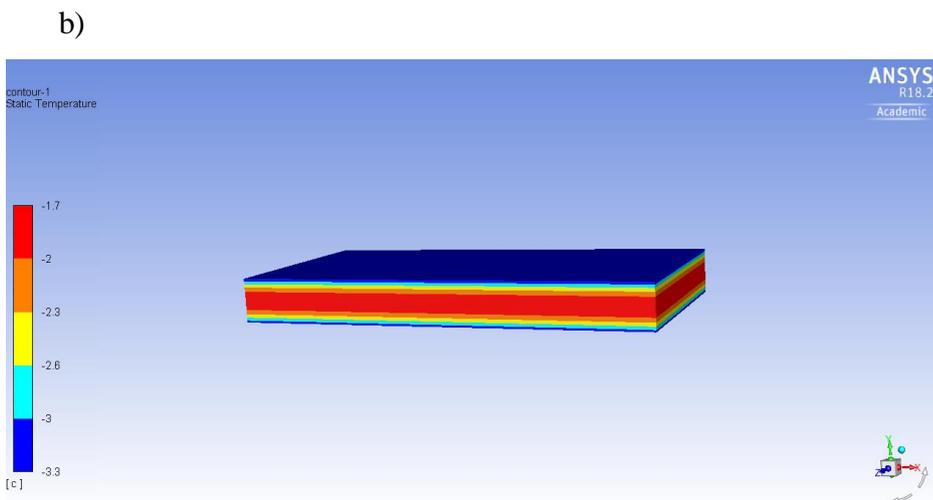
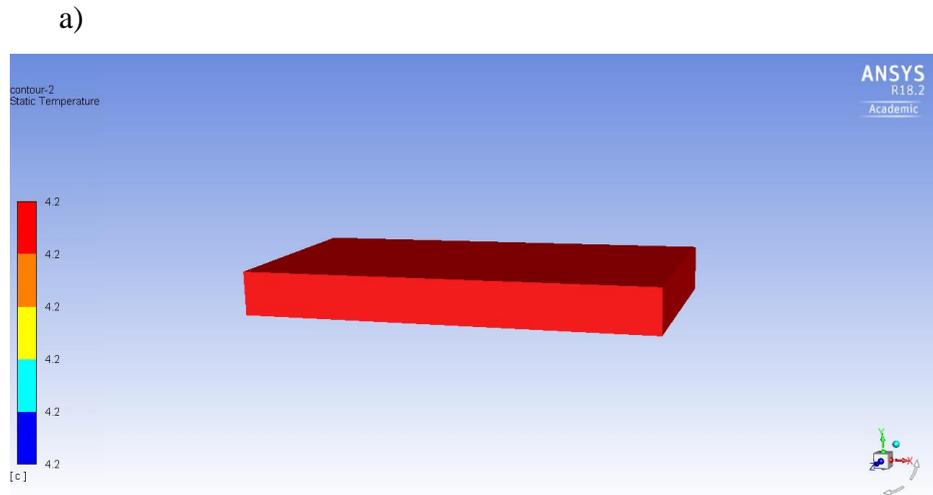
## 5.8 PERFIL DA TEMPERATURA DE CONGELAMENTO ATRAVÉS DA MODELAGEM NUMÉRICA

A simulação numérica da cinética de congelamento dos músculos de abrótea e anchova permitiu a determinação do perfil de temperatura numérico (Apêndice 9; Anexos 9 e 10; Figuras 32 e 33), e os campos de temperatura dos domínios computacionais analisados em diferentes tempos de processo.

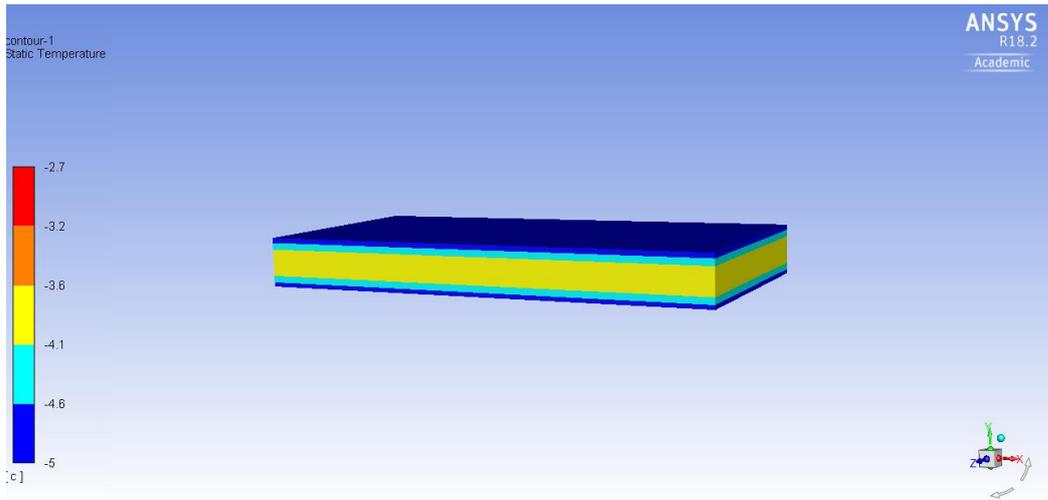
Os resultados obtidos levaram em consideração as hipóteses simplificadas adotadas para os distintos músculos de pescado, nas quais foram apresentadas anteriormente.

As Figuras 30 e 31 apresentam os campos de temperatura obtidos após a modelagem numérica do processo de congelamento dos músculos de abrótea e de anchova, na etapa conhecida como pós-processamento do *software* Fluent.

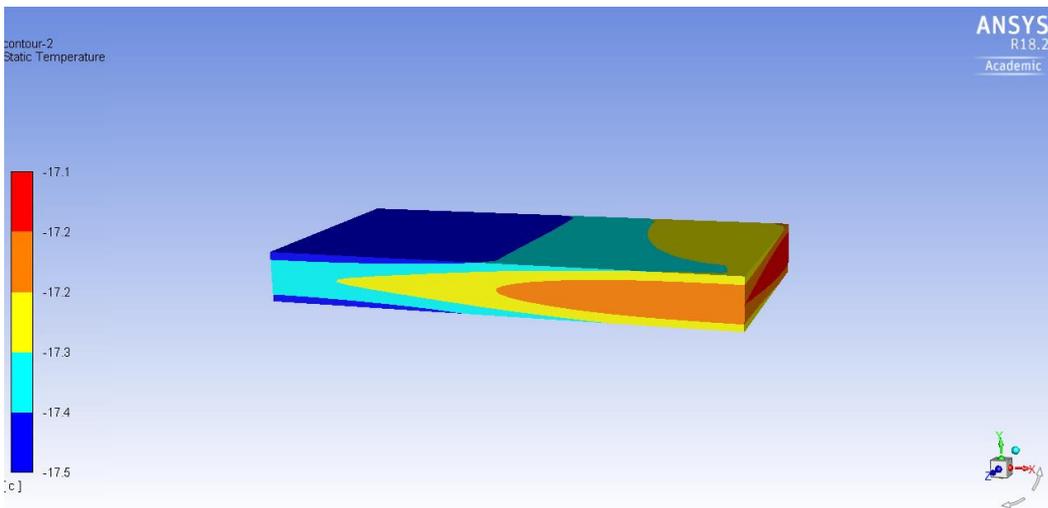
Figura 30: Campos de temperaturas do domínio computacional (músculo de abrótea); a)  $t = 0$  min. b) 20 min. c) 40 min.; d) 60 min.; e) 100 min.; f) 104 min.



d)



e)



f)

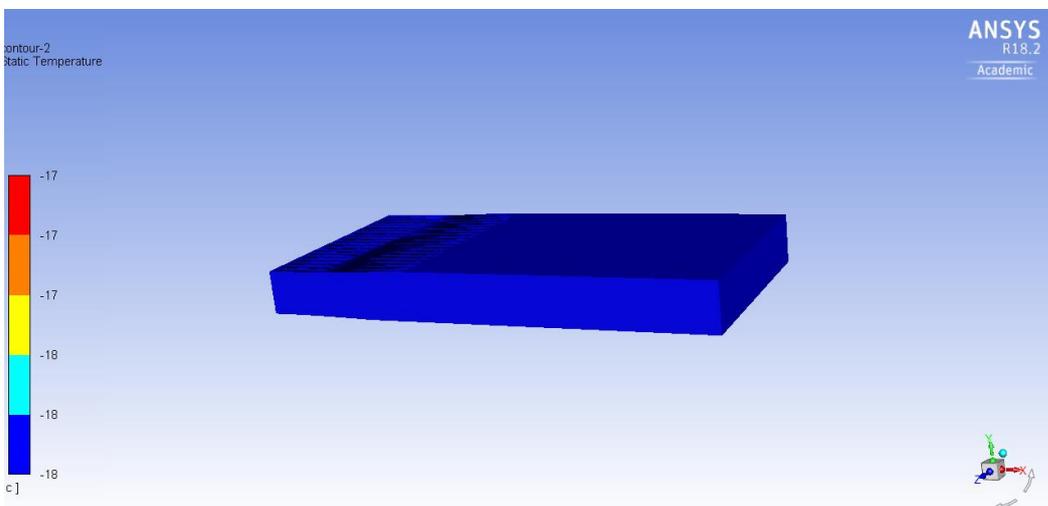
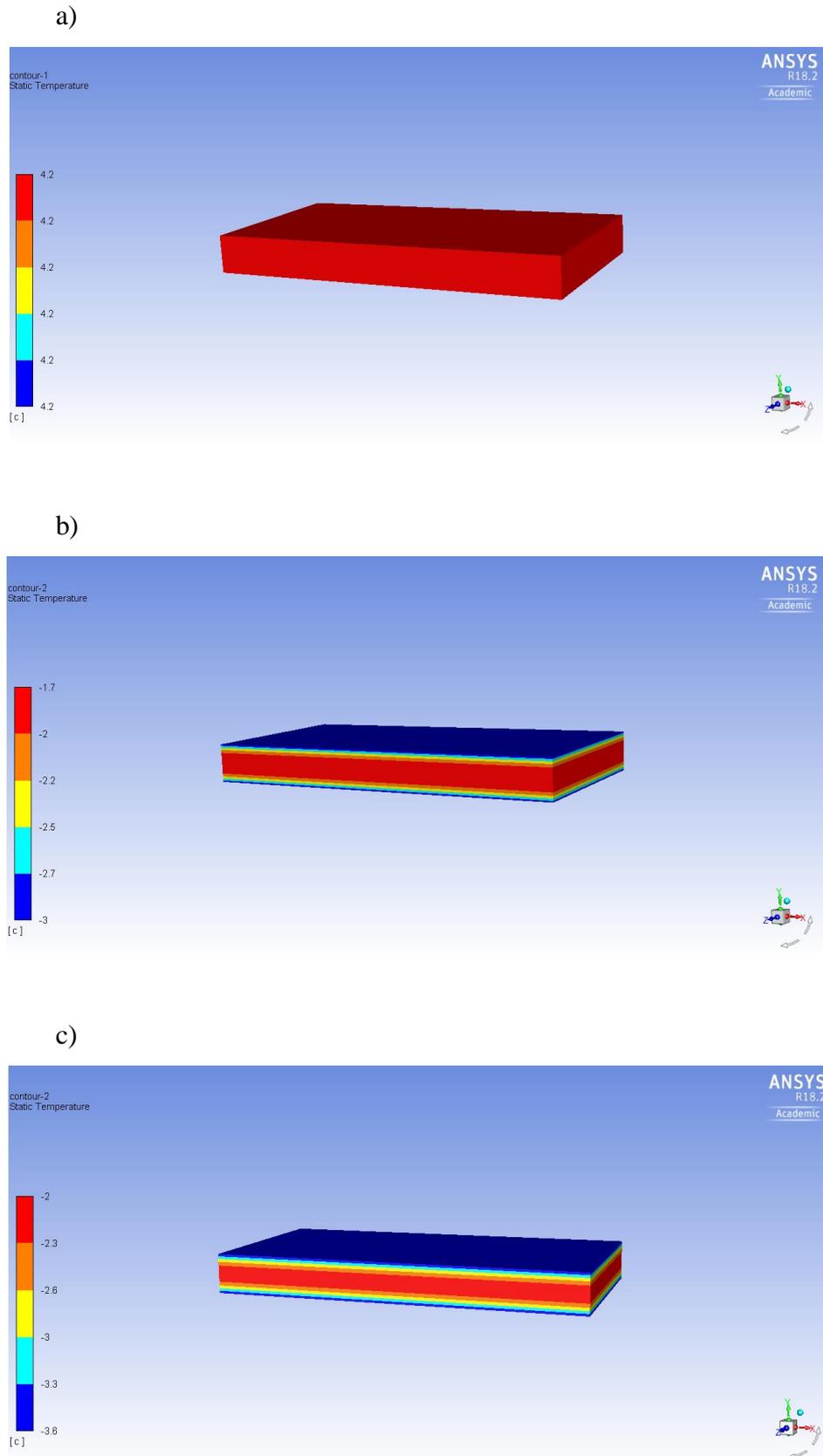
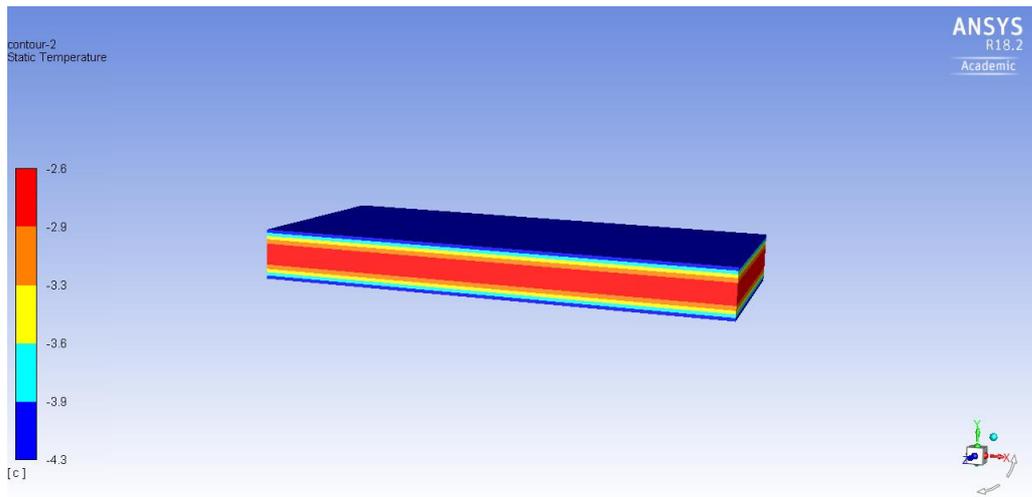


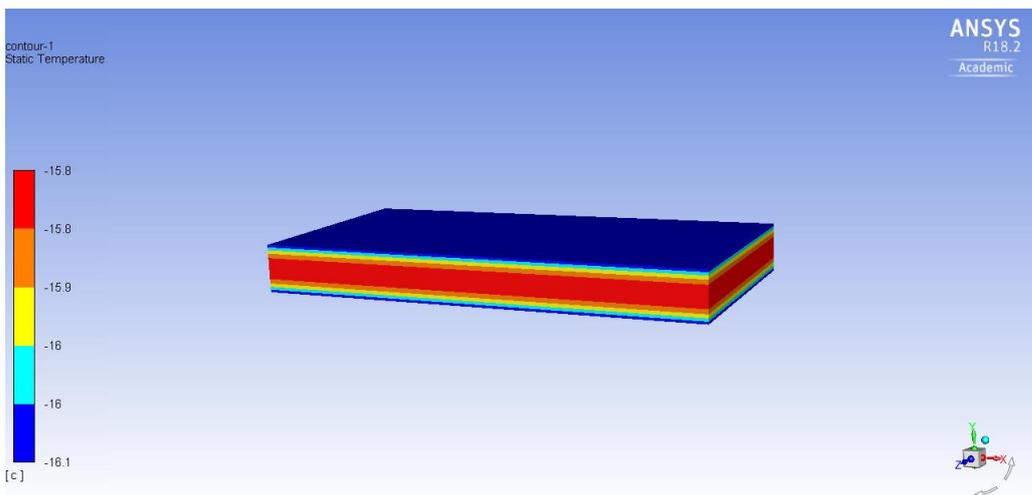
Figura 31: Campos de temperaturas do domínio computacional (músculo de anchova). a)  $t=0$  min. b) 20 min. c) 40 min.; d) 60 min.; e) 100 min.; f) 113 min.



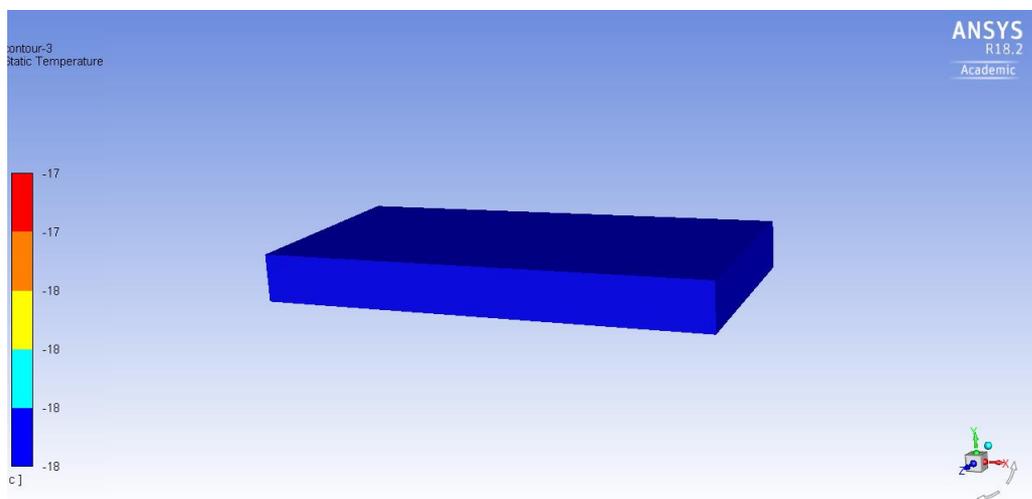
d)



e)



f)



Analisando os campos de temperaturas das Figuras 30 e 31, observa-se o fluxo de calor do centro do domínio computacional (centro térmico dos músculos dos pescados) para as extremidades superior e inferior, caracterizando o fluxo de calor unidirecional transiente, devido a hipótese simplificada adotada das laterais frontal, trazeira, esquerda e direita como adiabáticas, em função da área reduzida de troca térmica.

Observaram-se diferenças entre os campos de temperaturas dos músculos de abrótea e anchova (Figuras 30 e 31) no mesmo tempo do processo de congelamento, devido as diferentes propriedades termofísicas, nas quais influenciaram diretamente na taxa de transferência de calor com o meio externo, e também as considerações pré-estabelecidas para a simulação numérica. As diferentes faixas de temperaturas definidas na zona de mistura líquido-sólido, para a simulação do músculo de abrótea foi entre  $-1,5^{\circ}\text{C}$  e  $-5^{\circ}\text{C}$ , enquanto que para o músculo de anchova foi de  $-1,7^{\circ}\text{C}$  e  $-3,5^{\circ}\text{C}$ . Além disso, os valores de calor latente de fusão adotados na simulação numérica para os músculos de abrótea e anchova,  $205816 \text{ J/kg}$  e  $149670,4 \text{ J/kg}$ , também contribuíram para a diferença entre os campos de temperatura obtidos para os músculos dos pescados.

As curvas de congelamento numéricas *versus* experimental dos músculos de abrótea e anchova são apresentadas nas Figuras 32 e 33.

Figura 32: Perfil da temperatura experimental versus numérica do músculo de abrótea

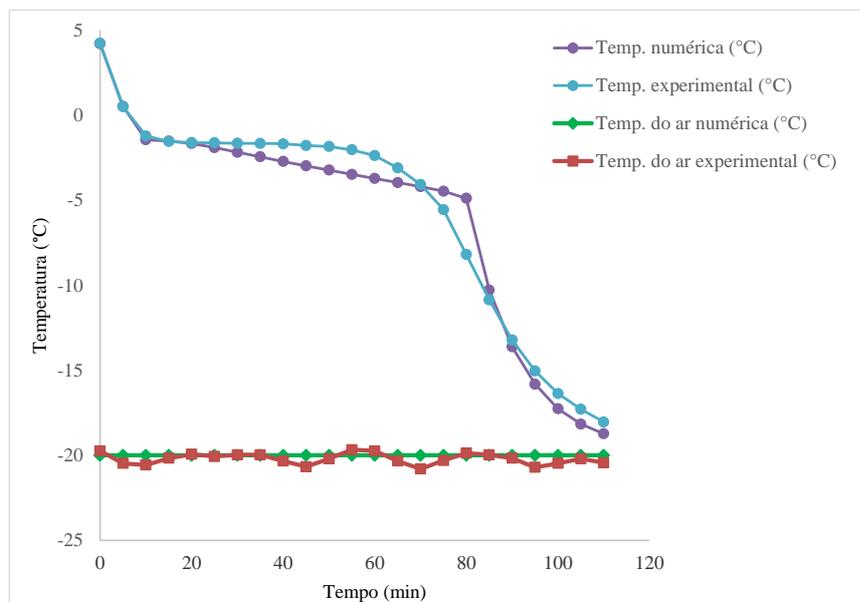
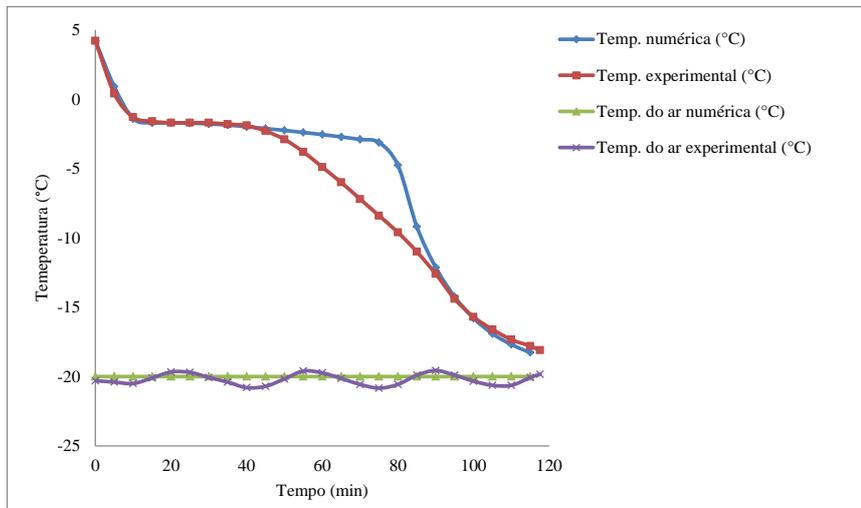


Figura 33: Perfil da temperatura experimental versus numérica do músculo de anchova



Observa-se uma concordância entre os valores de temperatura experimental e numérico, onde a curva numérica apresentou os três trechos característicos de uma curva experimental de congelamento de alimentos. Entretanto, observam-se algumas diferenças no segundo e terceiro trecho (Figuras 32 e 33). Isso se deve ao fato do método da entalpia-porosidade considerar apenas troca de calor sensível no terceiro trecho, ou seja, temperaturas menores ou iguais à temperatura do sólido adotada nas simulações numéricas ( $T_{sol} = -5^{\circ}\text{C}$  e  $T_{sol} = -3,5^{\circ}\text{C}$ ) a troca de calor considerada pelo método é apenas sensível. Porém, conforme destaca Singh e Heldman (2014), na temperatura final de congelamento dos alimentos, o alimento congelado ainda pode ter um pouco de água no estado líquido, na verdade, até 10% do percentual de água pode estar no estado líquido para alimentos congelados a  $-18^{\circ}\text{C}$ , dessa forma, ainda havendo uma pequena troca de calor latente no terceiro trecho da curva de congelamento.

Em relação ao segundo trecho, a diferença deve-se ao método da entalpia-porosidade considerar linear a relação à fração de líquido com a temperatura (Equação 42), entretanto, no congelamento de alimentos a redução da fração de água é exponencial (Equação 12). Em função dessa diferença, o segundo trecho da curva numérica do músculo de anchova, apresenta-se maior do que o segundo trecho da curva experimental.

O segundo trecho da curva numérica do músculo de anchova, também apresentou maior extensão em relação ao da curva experimental. Esse distanciamento acentuando, além de estar atribuído a relação linear da fração de líquido com a temperatura considerada pelo método da entalpia-porosidade, conforme mencionado anteriormente, também se deve as

considerações adotadas na simulação numérica e as UDFs, nas quais não conseguem prever com exatidão as propriedades termofísicas do produto, principalmente o calor específico.

A redução percentual do calor latente de fusão do músculo de abrótea em 25,06% mostrou-se uma estratégia promissora de adequar o calor latente do alimento a somente a segunda região da curva de congelamento. Entretanto, a redução percentual do calor latente de fusão do músculo de anchova em 34,47%, não contribuiu para uma boa concordância entre o perfil de temperatura numérico em relação ao experimental.

## 5.9 PERCENTUAL DE ERRO

A Tabela 12 apresenta a comparação entre os tempos de congelamento experimental e numérico, bem como percentual de erro obtido em ambos os casos.

Tabela 12: Percentual de erro entre os tempos de congelamento experimental e numérico

Músculos	Tempo de congelamento experimental (min)	Tempo de congelamento numérico (min)	% Erro
Abrótea	110,3	104,1	5,6
Anchova	117,6	113,3	3,6

É possível observar que o percentual de erro foi 5,6% e 3,6% entre os tempos de congelamento experimental e numérico para os músculos de abrótea e anchova, respectivamente. Logo se pode afirmar que a solução numérica do método da entalpia-porosidade com as UDFs, apresentou uma boa concordância com o tempo de congelamento experimental dos músculos de abrótea e anchova.

Pham (1996) determinou as seguintes propriedades para os alimentos a partir de sua composição química: entalpia, temperatura de congelamento, calor específico antes e após o congelamento, e também o percentual de água não congelável. A utilização dessas propriedades calculadas geraram bons resultados na predição de tempos de congelamento, tendo erros aceitáveis (aproximadamente de 10%) para carnes, peixes, frutas e queijos. Já sorvetes e gorduras tiveram grandes erros nos tempos.

Tan e Fok (2009) realizaram a simulação numérica do congelamento de filé de tilápia em diferentes geometrias, através do método da entalpia-porosidade com o *software* Fluent 6.2, sem a utilização de UDFs e com as propriedades termofísicas (densidade, calor específico e condutividade térmica) constantes. Logo após, realizaram a comparação entre o tempo de

congelamento predito pela simulação numérica com os obtidos pelos modelos analíticos de Pham (1986) e Campanone, Salvadori e Mascheroni (2005). Para filés de tilápia com 250 mm de comprimento, 140 mm de largura e 16 mm de altura, os autores encontraram um tempo de congelamento de 1,58h para atingir a temperatura de -20°C no centro térmico. Enquanto que Pham (1986) e Campanone, Salvadori e Mascheroni (2005) encontraram 1,69 h e 1,72 h, respectivamente. O percentual de erro entre os tempos preditos pela simulação e os modelos analíticos foram 6,5% e 8,1%, respectivamente.

## 6. CONCLUSÕES

O presente estudo sobre a cinética de congelamento dos músculos de abrótea e anchova em uma câmara fria com convecção de ar forçada, levou a conclusão que o músculo de pescado magro (abrótea) apresentou um tempo de congelamento menor em relação ao músculo de pescado gordo (anchova), devido às propriedades termofísicas dos produtos (densidade, condutividade térmica, calor específico e calor latente de fusão) apresentarem diferenças, em função composição química centesimal, sobretudo pelos diferentes percentuais de água e de lipídios.

A velocidade de congelamento dos músculos de abrótea e anchova na zona crítica foram, respectivamente, 0,69 cm/h e 0,82 cm/h. Ou seja, o pescado gordo (anchova) atinge temperaturas inferiores em relação ao magro (abrótea) dentro da zona crítica e realiza o congelamento a água livre com maior velocidade.

Em relação ao perfil de temperatura experimental, observou-se que há diferença entre músculos de abrótea e anchova, onde o tempo final de congelamento a  $-18^{\circ}\text{C}$  do músculo de anchova (117,6 min) foi superior ao de abrótea (110,3 min). Entretanto, a segunda região da curva de congelamento do músculo de abrótea apresentou maior extensão. Tais diferenças estão associadas às diferentes propriedades termofísicas dos músculos dos pescados, sendo fortemente influenciadas pela diferença do percentual de água e de lipídios.

No que tange à simulação numérica do congelamento dos músculos dos pescados, o método da entalpia-porosidade mostrou-se válido para prever o tempo final de congelamento dos músculos de abrótea e anchova, apresentando percentuais de erro entre ensaio experimental e a simulação numérica de 5,6% e 3,6%, respectivamente. Em relação à comparação entre os perfis de temperatura experimental e numérico, o método da entalpia-porosidade descreveu a cinética de congelamento dos músculos dos pescados, porém apresentou discrepância em relação ao segundo trecho da curva de congelamento, sendo que esse distanciamento foi menor para o músculo de abrótea.

Acredita-se pelos resultados encontrados na simulação numérica, através do método da entalpia-porosidade acrescido das funções definidas pelo usuário em linguagem C para a condutividade térmica, densidade e calor específico, e adotando uma redução percentual aproximada de 25% do calor latente de fusão do alimento, que o método pode contribuir para prever o tempo de congelamento de alimentos de alto teor de água com baixo percentual de erro, pois, dessa forma, o método estaria mais próximo de sua característica original, ou seja, simular o congelamento de substâncias puras ou mistura de dois líquidos.



## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Seguindo a linha de trabalho de simulação numérica de resfriamento ou congelamento de alimentos, podem-se sugerir algumas ideias para trabalhos futuros na área de Engenharia de Alimentos:

- Analisar o efeito de diferentes coeficientes de troca de calor por convecção na cinética de resfriamento ou congelamento de alimentos;
- Avaliar o efeito de diferentes condições de contorno na cinética de resfriamento ou congelamento de alimentos;
- Verificar o efeito da variação da geometria do produto no tempo de congelamento dos alimentos;
- Comparar o efeito da composição centesimal de diferentes alimentos com a mesma geometria no tempo de congelamento;
- Comparar a influência de diferentes UDFs para as propriedades termofísicas na simulação numérica do resfriamento/ congelamento de alimentos;
- Realizar a simulação numérica de mais de um produto, avaliando o efeito de diferentes velocidades do ar, e o contato entre os produtos;
- Realizar a simulação numérica da cinética de congelamento de alimentos, considerando a ausência de simetria no processo de transferência de calor;
- Elaborar UDFs específica para o calor latente de fusão, visando uma nova possibilidade de adaptação do método da entalpia-porosidade para alimentos.



## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKMAN, R. G. Nutritional composition of fats in seafood. **Progress in Food and Nutrition Science**, v. 13, p. 161-241, 1989.

ACUÑA, A.; VIANA, D.; VIZZIANO, D.; DANULAT, E. Reproductive cycle of female Brazilian codling *Urophycis brasiliensis* (Kaup 1858), caught off the Uruguayan coast. **Journal of Applied Ichthyology**, v. 16, n. 1, p. 48-55, 2000.

AL-ABIDI, A. A.; MAT, S. B.; SOPIAN, K.; SULAIMAN M. Y.; MOHAMMED, A. TH. CFD applications for latent heat thermal energy storage: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 20, p. 353–363, 2013.

ALMEIDA, I. M. G. **Performance comparativa entre R-290/R-600a (50:50) e R-134a para drop-in em refrigerador doméstico**. 2010. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

AMENDOLA, M.; TERUEL, B. Uso de um esquema implícito e de splines para a simulação numérica do processo de resfriamento de frutas esféricas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 1, p. 78-82, 2005.

ANDRADE, H.A; DUARTE-PEREIRA, M; ABREU-SILVA, J. L. Idade e crescimento da abrótea (*Urophycis brasiliensis*) capturada no sul do Brasil. **NOTAS TÉCN. FACIMAR**, v. 8, p. 107-117, 2004.

ANVISA - AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Informe Técnico, n. 41, de 28 de julho de 2009**. Esclarecimentos sobre a comercialização de pescado congelado. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/wps/portal/anvisa/anvisa/home/alimentos>. Acesso em: 10 out. 2014.

ASHRAE, **ASHRAE Handbook Refrigeration** - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, 2014.

BAINY, E. M. **Processamento de Fishburger: Estudo teórico - experimental do congelamento e cocção**. 2014. 118f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal do Paraná, 2014.

BEIRÃO, L. H.; TEIXEIRA, E.; NORT, E.; BOING, S. M. C. Salga de cação (*Squatina argentina*) e abrótea (*Urophycis brasiliensis*). **Boletim do Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos**. Universidade Federal do Paraná – Curitiba, v. 14, n. 1, p. 25-32, 1996.

BENTA, E. S. **Estudo experimental e numérico da solidificação da água ao redor de tubos curvos**. 2001. 158f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, 2001.

BEVILACQUA, M.; D'AMORE, A.; POLONORA, F. A multi-criteria decision approach to choosing the optimal blanching-freezing system. **Journal of Food Engineering**, v. 63, p. 253-263, 2004.

BOONSUPTHIP, W.; HELDMAN, D. R. Prediction of Frozen Food Properties during Freezing Using Product Composition. **Journal of Food Science**, v. 72, n. 5, p. 254-263, 2007.

BOUÇAS, A. **Abrótea**. 2015. Disponível em: [www.pescanapraia.com/abrotea](http://www.pescanapraia.com/abrotea). Acesso em: 05 jan. 2016.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Decreto N. 1.255, de 25 de Junho de 1962. Altera o decreto n. 30.691, de 29 de março de 1952, que aprovou o Regulamento da Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal. **Diário oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 4 jul. 1962. Disponível em: <http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis>. Acesso em: 07 set. 2014.

BRENT, A. D.; VOLLER, V. R.; REID, K. J. Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of pure metal. **Numerical Heat Transfer**, v.13, p. 297-318, 1988.

CAMPANONE, L. A.; SALVADORI, V.O.; MASCHERONI, R. H. Food freezing with simultaneous surface dehydration: an approximate prediction of freezing time. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 48, p. 1205–1213, 2005.

CARNEIRO, M. J. M. **Congelamento de filés de sardinha por imersão e avaliação física e sensorial de sua qualidade durante a estocagem**. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, 1999.

CEPSUL - CENTRO DE PESQUISA E GESTÃO DOS RECURSOS PESQUEIROS DO LITORAL SUDESTE E SUL. **Relatório sobre a reunião técnica para o ordenamento da pesca de anchova (*Pomatomus saltatrix*) nas regiões sudeste e sul do Brasil**, 2009. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/cepsul>. Acesso em: 04 out. 2014.

CHAPRA, C. S.; CANALE, R. P. **Métodos Numéricos para Engenharia**. 5. ed. Tradução de Helena Castro. São Paulo: McGraw-Hill, 2008. Título original: Numerical methods for engineers.

CHEN, Y-L.; PAN, B. S. Morphological changes in tilapia muscle following freezing by airblast and liquid nitrogen methods. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 32, p. 159–168, 1997.

CLARK, S.; JUNG, S.; LAMSAL, B. **Food Processing: Principles and Applications**, 2 ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2014, 592p.

CORDEIRO, D.; LOPES, T. G. G.; OETTERER, M.; GALVÃO, J. A. Qualidade do Mexilhão (*Perna perna*) submetido ao processo combinado de cocção, congelamento e armazenamento. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 25, n. 1, p. 165-179, 2007.

CORRÊA, C. **Métodos de Diferenças Finitas e Volumes Finitos para Problemas Convectivos Difusivos**. 2013. 141f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal Fluminense, 2013.

CORRÊA, G. A. **Congelamento de filés de linguado em processo de transmissão de calor unidirecional com mudança de fase**. 1998. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) - Universidade Federal do Rio Grande, 1998.

\_\_\_\_\_. **Avaliação de sistemas integrados de refrigeração e sua aplicação na indústria pesqueira**. 2009. 139f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos) - Universidade Federal do Rio Grande, 2009.

COSTA, E. C. **Refrigeração**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982. 322p.

FELLOWS, P. J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora Artmed, 2006, 602p.

FIELDLOOGER. **Manual de instruções V1.6x B**. Novus produtos eletrônicos LTDA, Disponível em: <https://www.novus.com.br/downloads/downloads.asp?FileID=737483>. Acesso em: 20 de fev. 2016.

FLUENT. **Theory Guide**. Ansys Inc., Canonsburg, 2016a. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/316554319/ANSYS-Fluent-Tutorial-Guide-r170>. Acesso em: 12 fev. 2017.

\_\_\_\_\_. **UDF manual**. Ansys Inc., Canonsburg, 2016b. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/342816712/ANSYS-Fluent-UDF-Manual>. Acesso em: 03 abr. 2017.

FRANCESCHINI, F. S. **Modelagem mecânica e aproximação por métodos estabilizados de escoamentos multicomponentes**. 168f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

FROESE, R.; PAULY, D. **FishBase**. Disponível em: <http://www.fishbase.org>. Acesso em: 08 out. 2014.

GAMBIT. **Use's guide**, v. 2.4, Fluent Inc., New Hampshire, 2007.

GAVA, A. J.; SILVA, C. A. B.; FRIAS, J. R. G. **Tecnologia de alimentos: princípios e aplicações**. São Paulo: Nobel, 2008. 511p.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Processes and Separation Process Principles** 4. ed. Nova Jersey: Prentice Hall, 2003, 1056p.

GONÇALVES, A. A. **Estudo do processamento da anchova, *Pomatomus saltatrix* (Pisces: Pomatomidae) utilizando aroma natural de fumaça**. 1998. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos)- Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 1998.

\_\_\_\_\_; PRENTICE-HERNÁNDEZ, C. Defumação líquida de anchova (*Pomatomus saltatrix*): estabilidade lipídica durante o processamento e o armazenamento. **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, v. 58, n. 1, p. 69-78, 1999.

GONÇALVES, N. D. F. **Método dos volumes finitos em malhas não-estruturadas**. 2007. 71f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto, 2007.

HIRSCH, C. **Numerical Computation of Internal and External Flows: Fundamentals of Numerical Discretization**. v. 1, 2. ed. Amsterdam: Elsevier Inc, 2007. 696p.

IAL - INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4. ed., 1. ed. digital. São Paulo, 2008. 1020p. Disponível em: <http://www.ial.sp.gov.br>. Acesso em: 15 abr. 2015.

IBARZ, A.; BARBOSA-CANOVAS, G. V. **Unit Operations in Food Engineering**. New York: CRC Press, 2002, 920p.

LUQUE, J. L.; ALVES, D. R.; PARAGUASSÚ, A. R. Metazoários parasitos da abrótea, *urophycis brasiliensis* (kaup, 1858), (*osteichthyes: phycidae*) do litoral do estado do Rio de Janeiro, Brasil. **Rev. Bras. Parasitol. Vet.**, v. 13, p. 49-55, 2004.

MACCORMACK, R. W.; PAULLAY, A. J. Computational efficiency achieved by time splitting of finite difference operators. **AIAA paper**, p. 1-8, 1972.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacionais**, LTC, 2. ed., Rio de Janeiro, 2012. 453p.

MANNAPPERUMA, J. D.; SINGH, R. P. A computer-aided method for the prediction of properties and freezing/thawing times of foods. **F. Food Eng**, v. 9, p. 275 - 304, 1989.

MCDONALD, P.W. The computation of transonic flow through two-dimensional gas turbine cascades. **ASME paper**, p.1-7, 1971.

NUNES, D. M. **Pesca, etnoictiologia e biologia de peixes no sul do Brasil**. 2010. 175f. Tese (Doutorado em Ciências com ênfase em Ecologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ODONE, M. W. N. **Estudos numéricos na solução de problemas de mudança de fase**. 2014. 132f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) - Universidade Federal de Juiz de Fora, 2014.

OGAWA, M.; MAIA, E. L. **Manual de Pesca - Ciência e Tecnologia do Pescado**. v. 1. São Paulo: Varela, 1999. 430p.

ORDÓÑEZ, J. **Tecnologia de alimentos - Alimentos de origem animal**. v. 2. São Paulo: Artmed, 2005. 279 p.

PARDI, M. C.; SANTOS, I. F.; SOUZA, E. R.; PARDI, H. S. **Ciência, higiene e tecnologia da carne**. 2. ed. Goiânia: UFG, 2007. p. 1152.

PERROTTA, R. G.; COUSSEAU, B. **Peces marinos de Argentina. Biología, distribución, pesca**. Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP), Mar del Plata, Argentina. 1998, 163 p.

PHAM, Q. T. Simplified equation for predicting the freezing time of foodstuffs. **Journal of Food Technology**, v. 21, p. 209-219, 1986.

\_\_\_\_\_. Prediction of Calorimetric Properties and Freezing Time of Foods from Composition Data. **Journal of Food Engineering**, v. 30, p. 95-107, 1996.

\_\_\_\_\_. **Food Freezing and Thawing Calculations**. v. 1. New York, Springer, 2014. p. 153.

PIROZZI, D. C. Z.; AMENDOLA, M. Modelagem matemática e simulação numérica do resfriamento rápido de morango com ar forçado. **Engenharia Agrícola**, v. 254, n. 1, p. 222-230, 2005.

PLAVAN, A. A.; VEROCAI, J. E. Importancia de la pesquería artesanal y biología de la brotóla, *Urophycis brasiliensis* (Kaup 1858) (Phycidae, Gadiformes) en la costa uruguaya. **Investigaciones Marinas**, v. 29, n. 1, p. 47-58, 2001.

RADHAKRISHNAN, S. **Measurement of thermal properties of seafood**. Department of Biological Systems Engineering. 1997. 83f. Dissertation (Masters in Biological Systems Engineering) - Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 1997.

RAHMAN, M. S.; GUIZANI, N.; AL-KHASEIBI, M.; AL-HINAI, S. A.; AL-MASKRI, S. S.; AL-HAMHAMI, K. Analysis of cooling curve to determine the end point of freezing. **Food Hydrocolloids**, v. 16, p. 653-659, 2002.

\_\_\_\_\_; MACHADO-VELASCO, K. M.; SOSA-MORALES, M. E., VELEZ-RUIZ, J.F. Freezing Point: Measurement, Data and Prediction. In: RAHMAN, M. S. **Food properties handbook**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, p. 154-192, 2009.

RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H.; DATTA, A. K. **Engineering Properties of Foods**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2005, 738p.

RIZZI, A.W.; INOUYE, M. Time split finite volume method for three-dimensional blunt-body flows. **AIAA jornal**, v. 11, p. 1478-1485, 1973.

SARTORI, A.A; AMARANTE, A.C.C; MARIANI, V.C. Estudo experimental e numérico da transferência de calor no congelamento do purê de cenoura. In: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING, 11, 2006, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABCM, 2006.

SCHEERLINCK, N.; VERBOVEN, P.; FIKIIN, K. A.; BAERDEMAEKER, J.; NICOLAI, B.M. Finite element computation of unsteady phase change heat transfer during freezing or thawing of food using a combined enthalpy and kirchhoff transform method. **American Society of Agricultural Engineers**, v. 44, n. 2, p. 429-438, 2001.

SILVA, F. M.; HOOD, A. S. S.; ABDALLAH, P. R. Estudo econômico da anchova (*Pomatomus Saltatrix*) comercializada no Município de Rio Grande/RS - 2004 a 2008. In: IX SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2008, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: PUCRS, 2008. Disponível em: <http://www.pucrs.br/research/salao/2008-IXSalaoIC>. Acesso em: 25 set. 2014.

SILVA, J. C. **Refrigeração comercial e climatização industrial**. 2. ed. São Paulo: Leopardo, 2013. 265p.

SILVA, J. G. **Introdução à Tecnologia de Refrigeração e da Climatização**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2010. 263p.

SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. **Introduction to Food Engineering**. 5. ed. Amsterdam: Elsevier Inc, 2014. 867p.

SITRAD. **User Guide**. Full Gauge Controls, versão 4.13, 2012. Disponível em: [http://sitrad413.sitrad.com.br/user\\_guide/index.html](http://sitrad413.sitrad.com.br/user_guide/index.html). Acesso em: 22 de fev. 2016.

SMITH, P. G. **Introduction to Food Process Engineering**. New York: Kluwer Academic, 2003. 466 p.

SPERANDIO, D.; MENDES, J.T.; SILVA, L. H. M. **Cálculo Numérico: Características Matemáticas e Computacionais dos Métodos Numéricos**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003. 354p.

SUN, Dan-Wen. **Handbook of frozen food processing and packaging**. 2. ed. CRC PRESS, 2011. 936p

\_\_\_\_\_; XIA, B. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 34, p. 5–24, 2002.

TAN, F.; FOK, S-CH. Freezing of tilapia fillets in an air blast freezer. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 44, p. 1619–1625, 2009.

TRUJILLO, F. J.; PHAM, Q. T. A computational fluid dynamic model of the heat and moisture transfer during beef chilling. **International Journal of Refrigeration**, v. 26, p. 998-1009, 2006.

VOLLER, V. R.; BRENT, A. D.; PRAKASH, C. The modeling of heat, mass and solute transport in solidification systems. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 32, p. 1719-1731, 1989.

\_\_\_\_\_; SWAMINATHAN, C. R. Generalized Source-Based Method for Solidification Phase Change. **Numer. Heat Transfer B**, v. 19, n. 2, p.175-189, 1991.

WANG, G.; ZOU, P. Mathematical Modeling of Food Freezing in Air-Blast Freezer. **International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing**, v. 2, n. 4, p. 278-281, 2014.

## APÊNDICES

### APÊNDICE 1 – Medidas da temperatura em relação ao tempo de congelamento do músculo de abrótea (ensaio 1)

Data	Horário (h)	Tempo (min)	Temperatura do produto (°C)	Temperatura do ar (°C)
29/04/2016	11:23	0	4,38	-19,1
29/04/2016	11:28	5	0,83	-20,1
29/04/2016	11:33	10	-1,03	-20,7
29/04/2016	11:38	15	-1,57	-21,0
29/04/2016	11:43	20	-1,65	-20,3
29/04/2016	11:48	25	-1,67	-19,7
29/04/2016	11:53	30	-1,73	-19,6
29/04/2016	11:58	35	-1,79	-20,0
29/04/2016	12:03	40	-1,86	-20,5
29/04/2016	12:08	45	-2,03	-20,9
29/04/2016	12:13	50	-2,28	-20,4
29/04/2016	12:18	55	-2,63	-19,6
29/04/2016	12:23	60	-3,16	-19,7
29/04/2016	12:28	65	-4,04	-20,2
29/04/2016	12:33	70	-5,33	-20,8
29/04/2016	12:38	75	-7,19	-20,8
29/04/2016	12:43	80	-9,43	-20,0
29/04/2016	12:48	85	-11,44	-19,5
29/04/2016	12:53	90	-13,42	-20,0
29/04/2016	12:58	95	-15,13	-20,8
29/04/2016	13:03	100	-16,36	-21,0
29/04/2016	13:08	105	-17,33	-20,1
29/04/2016	13:12	109	-17,90	-20,0



APÊNDICE 2 – Medidas da temperatura em relação ao tempo de congelamento do músculo de abrótea (ensaio 2)

Data	Horário (h)	Tempo (min.)	Temperatura do produto (°C)	Temperatura do ar (°C)
05/05/2016	11:17	0	3,91	-20,2
05/05/2016	11:22	5	0,28	-20,5
05/05/2016	11:27	10	-1,36	-20,8
05/05/2016	11:32	15	-1,47	-20,2
05/05/2016	11:37	20	-1,54	-19,6
05/05/2016	11:42	25	-1,55	-19,7
05/05/2016	11:47	30	-1,60	-20,1
05/05/2016	11:52	35	-1,62	-20,6
05/05/2016	11:57	40	-1,64	-20,8
05/05/2016	12:02	45	-1,72	-20,5
05/05/2016	12:07	50	-1,70	-19,8
05/05/2016	12:12	55	-1,75	-19,5
05/05/2016	12:17	60	-1,88	-20,1
05/05/2016	12:22	65	-2,32	-20,6
05/05/2016	12:27	70	-2,93	-20,8
05/05/2016	12:32	75	-4,36	-19,5
05/05/2016	12:37	80	-8,47	-19,6
05/05/2016	12:42	85	-12,02	-19,6
05/05/2016	12:47	90	-14,50	-20,3
05/05/2016	12:52	95	-15,96	-20,9
05/05/2016	12:57	100	-17,14	-20,7
05/05/2016	13:02	105	-17,80	-19,9
05/05/2016	13:04	107	-18,11	-20,9



APÊNDICE 3 – Medidas da temperatura em relação ao tempo de congelamento do músculo de abrótea (ensaio 3)

Data	Horário (h)	Tempo (min)	Temperatura do produto (°C)	Temperatura do ar (°C)
09/05/2016	10:50:00	0	4,39	-19,9
09/05/2016	10:55:00	5	0,40	-20,8
09/05/2016	11:00:00	10	-1,28	-20,2
09/05/2016	11:05:00	15	-1,60	-19,3
09/05/2016	11:10:00	20	-1,65	-19,9
09/05/2016	11:15:00	25	-1,65	-20,8
09/05/2016	11:20:00	30	-1,62	-20,2
09/05/2016	11:25:00	35	-1,57	-19,3
09/05/2016	11:30:00	40	-1,56	-19,7
09/05/2016	11:35:00	45	-1,60	-20,6
09/05/2016	11:40:00	50	-1,55	-20,4
09/05/2016	11:45:00	55	-1,73	-19,9
09/05/2016	11:50:00	60	-2,10	-19,4
09/05/2016	11:55:00	65	-2,94	-20,2
09/05/2016	12:00:00	70	-3,97	-20,8
09/05/2016	12:05:00	75	-5,11	-20,6
09/05/2016	12:10:00	80	-6,67	-20,0
09/05/2016	12:15:00	85	-9,10	-20,8
09/05/2016	12:20:00	90	-11,75	-20,2
09/05/2016	12:25:00	95	-14,03	-20,4
09/05/2016	12:30:00	100	-15,59	-19,7
09/05/2016	12:35:00	105	-16,75	-20,6
09/05/2016	12:40:00	110	-17,52	-20,4
09/05/2016	12:45:00	115	-18,10	-19,9



APÊNDICE 4 – Medidas da temperatura em relação ao tempo de congelamento do músculo de anchova (ensaio 1)

Data	Horário (h)	Tempo (min)	Temperatura do produto (°C)	Temperatura do ar (°C)
27/07/2016	09:55:00	0	4,13	-20,7
27/07/2016	10:00:00	5	0,58	-20,2
27/07/2016	10:05:00	10	-1,18	-19,8
27/07/2016	10:10:00	15	-1,67	-19,4
27/07/2016	10:15:00	20	-1,71	-19,5
27/07/2016	10:20:00	25	-1,76	-20,0
27/07/2016	10:25:00	30	-1,81	-20,3
27/07/2016	10:30:00	35	-1,86	-20,6
27/07/2016	10:35:00	40	-1,86	-20,9
27/07/2016	10:40:00	45	-2,12	-20,5
27/07/2016	10:45:00	50	-2,56	-19,9
27/07/2016	10:50:00	55	-3,23	-19,6
27/07/2016	10:55:00	60	-4,18	-19,8
27/07/2016	11:00:00	65	-5,11	-20,2
27/07/2016	11:05:00	70	-6,19	-20,7
27/07/2016	11:10:00	75	-7,31	-20,9
27/07/2016	11:15:00	80	-8,48	-20,7
27/07/2016	11:20:00	85	-9,97	-19,9
27/07/2016	11:25:00	90	-11,85	-19,5
27/07/2016	11:30:00	95	-13,79	-19,8
27/07/2016	11:35:00	100	-15,25	-20,3
27/07/2016	11:40:00	105	-16,31	-20,6
27/07/2016	11:45:00	110	-17,07	-20,9
27/07/2016	11:50:00	115	-17,63	-20,3
27/07/2016	11:54:00	119	-18,04	-19,7



APÊNDICE 5 – Medidas da temperatura em relação ao tempo de congelamento do músculo de anchova (ensaio 2)

Data	Horário (h)	Tempo (min)	Temperatura do produto (°C)	Temperatura do ar (°C)
29/07/2016	12:32:00	0	4,34	-20,1
29/07/2016	12:37:00	5	0,42	-20,5
29/07/2016	12:42:00	10	-1,25	-20,9
29/07/2016	12:47:00	15	-1,63	-20,6
29/07/2016	12:52:00	20	-1,68	-20,0
29/07/2016	12:57:00	25	-1,71	-19,5
29/07/2016	13:02:00	30	-1,77	-19,8
29/07/2016	13:07:00	35	-1,81	-20,2
29/07/2016	13:12:00	40	-1,91	-20,7
29/07/2016	13:17:00	45	-2,27	-20,9
29/07/2016	13:22:00	50	-2,93	-20,4
29/07/2016	13:27:00	55	-3,80	-19,7
29/07/2016	13:32:00	60	-4,91	-19,7
29/07/2016	13:37:00	65	-6,04	-20,1
29/07/2016	13:42:00	70	-7,22	-20,5
29/07/2016	13:47:00	75	-8,36	-20,8
29/07/2016	13:52:00	80	-9,63	-20,4
29/07/2016	13:57:00	85	-10,97	-19,7
29/07/2016	14:02:00	90	-12,64	-19,6
29/07/2016	14:07:00	95	-14,36	-20,2
29/07/2016	14:12:00	100	-15,67	-20,7
29/07/2016	14:17:00	105	-16,60	-20,8
29/07/2016	14:22:00	110	-17,28	-20,1
29/07/2016	14:27:00	115	-17,80	-19,4
29/07/2016	14:32:00	118	-18,11	-19,9



APÊNDICE 6 – Medidas da temperatura em relação ao tempo de congelamento do músculo de anchova (ensaio 3)

Data	Horário (h)	Tempo (min)	Temperatura do produto (°C)	Temperatura do ar (°C)
23/08/2016	11:32:00	0	4,27	-20,1
23/08/2016	11:37:00	5	0,23	-20,5
23/08/2016	11:42:00	10	-1,34	-20,8
23/08/2016	11:47:00	15	-1,60	-20,3
23/08/2016	11:52:00	20	-1,66	-19,5
23/08/2016	11:57:00	25	-1,68	-19,6
23/08/2016	12:02:00	30	-1,74	-20,1
23/08/2016	12:07:00	35	-1,78	-20,4
23/08/2016	12:12:00	40	-1,97	-20,8
23/08/2016	12:17:00	45	-2,43	-20,7
23/08/2016	12:22:00	50	-3,32	-20,2
23/08/2016	12:27:00	55	-4,38	-19,5
23/08/2016	12:32:00	60	-5,65	-19,7
23/08/2016	12:37:00	65	-6,98	-20,1
23/08/2016	12:42:00	70	-8,27	-20,5
23/08/2016	12:47:00	75	-9,43	-20,8
23/08/2016	12:52:00	80	-10,79	-20,6
23/08/2016	12:57:00	85	-11,99	-20,1
23/08/2016	13:02:00	90	-13,45	-19,6
23/08/2016	13:07:00	95	-14,94	-19,7
23/08/2016	13:12:00	100	-16,11	-20,0
23/08/2016	13:17:00	105	-16,90	-20,5
23/08/2016	13:22:00	110	-17,50	-20,9
23/08/2016	13:27:00	115	-17,99	-20,5
23/08/2016	13:28:00	116	-18,15	-19,9



## APÊNDICE 7 – Teste de independência de malha

Malha	Elementos	Temp. no centro térmico(°C)	Diferença relativa (%)
0	5832	4,20	0,00
1	6859	4,20	0,00
2	9261	4,20	-
0	5832	0,46	13,04
1	6859	0,52	7,69
2	9261	0,48	-
0	5832	-1,46	0,68
1	6859	-1,45	0,69
2	9261	-1,44	-
0	5832	-1,53	0,65
1	6859	-1,52	0,00
2	9261	-1,52	-
0	5832	-1,68	0,60
1	6859	-1,67	1,20
2	9261	-1,65	-
0	5832	-1,93	1,04
1	6859	-1,91	1,05
2	9261	-1,89	-
0	5832	-2,20	0,91
1	6859	-2,18	0,46
2	9261	-2,17	-
0	5832	-2,48	1,21
1	6859	-2,45	0,41
2	9261	-2,44	-
0	5832	-2,75	1,09
1	6859	-2,72	0,37
2	9261	-2,71	-
0	5832	-3,01	1,00
1	6859	-2,98	1,00
2	9261	-2,98	-
0	5832	-3,27	1,22
1	6859	-3,23	0,00
2	9261	-3,23	-
0	5832	-3,52	1,14
1	6859	-3,48	0,00
2	9261	-3,48	-
0	5832	-3,76	1,06
1	6859	-3,72	0,27
2	9261	-3,73	-
0	5832	-4,00	1,00
1	6859	-3,96	0,25
2	9261	-3,97	-
0	5832	-4,25	1,18
1	6859	-4,20	1,18
2	9261	-4,21	-
0	5832	-4,54	1,54
1	6859	-4,47	1,54
2	9261	-4,48	-
0	5832	-6,36	23,11
1	6859	-4,89	0,41
2	9261	-4,91	-
0	5832	-10,93	5,95
1	6859	-10,28	2,82
2	9261	-9,99	-
0	5832	-14,13	3,61
1	6859	-13,62	0,66
2	9261	-13,71	-
0	5832	-16,21	2,41
1	6859	-15,82	2,41
2	9261	-15,97	-
0	5832	-17,55	1,65
1	6859	-17,26	1,65
2	9261	-17,40	-
0	5832	-18,35	1,04
1	6859	-18,16	0,50
2	9261	-18,25	-



## APÊNDICE 8 – Avaliação do passo de tempo para a malha de 6859 células

Tempo (min)	Passo de tempo 0,1s	Passo de tempo 0,05s
0	4,2	4,2
5	0,52	0,52
10	-1,45	-1,43
15	-1,52	-1,52
20	-1,67	-1,65
25	-1,91	-1,89
30	-2,18	-2,16
35	-2,45	-2,43
40	-2,72	-2,7
45	-2,98	-2,96
50	-3,23	-3,21
55	-3,48	-3,46
60	-3,72	-3,71
65	-3,96	-3,94
70	-4,2	-4,18
75	-4,47	-4,45
80	-4,89	-4,85
85	-10,28	-9,9
90	-13,62	-13,31
95	-15,82	-15,6
100	-17,26	-16,96
105	-18,16	-17,91



APÊNDICE 9 – Simulação numérica dos músculos dos pescados

Temperatura da abrótea (°C)	Temperatura da anchova (°C)	Tempo (min)
4,2	4,2	0
0,52	0,9	5
-1,45	-1,4	10
-1,52	-1,7	15
-1,67	-1,7	20
-1,91	-1,73	25
-2,18	-1,78	30
-2,45	-1,87	35
-2,72	-1,98	40
-2,98	-2,12	45
-3,23	-2,25	50
-3,48	-2,4	55
-3,72	-2,55	60
-3,96	-2,72	65
-4,2	-2,9	70
-4,47	-3,12	75
-4,89	-4,77	80
-10,28	-9,19	85
-13,62	-12,13	90
-15,82	-14,25	95
-17,26	-15,79	100
-18,16	-16,91	105
-	-17,69	110
-	-18,27	115



APÊNDICE 10 – UDFs utilizadas na simulação numérica do músculo de abrótea  
 #include "udf.h"

#define Tic -1.50

#define xa 0.8233

#define La 333.6

#define xp 0.1542

#define xl 0.0125

#define xc 0.0085

#define xal 0.06168

#define xs 0.1767

DEFINE\_PROPERTY (condutividade\_termica,c,t)

{

real Temp,K,ka,kg,kp,kl,kc,pa,pg,pp,pl,pc,xg,xad,scp,fva, fvg, fvp, fvl, fvc, kpa, kpe;

Temp= C\_T(c,t)-273.15;

ka=0.57109+0.0017625\*(Temp)-0.0000067036\*(Temp\*Temp);

kg=2.2196-0.0062489\*(Temp)+0.00010154\*(Temp\*Temp);

kp= 0.17881+0.0011958\*(Temp)-0.0000027178\*(Temp\*Temp);

kl=0.18071-0.0027604\*(Temp)-0.00000017749\*(Temp\*Temp);

kc=0.32962+0.0014011\*(Temp)-0.0000029069\*(Temp\*Temp);

pa=997.18+0.0031439\*(Temp)-0.0037574\*(Temp\*Temp);

pg=916.89-0.13071\*(Temp);

pp=1329.9-0.51840\*(Temp);

pl=925.59-0.41757\*(Temp);

pc=2423.8-0.28063\*(Temp);

if (Temp>=Tic)

{

xg=0;

}

else

{

```

        xg=1.105*xa/(1+0.7138/log(Tic-Temp+1));
    }

    xad=xa-xg;
    scp=(xad/pa)+(xg/pg)+(xp/pp)+(xl/pl)+(xc/pc);
    fva=(xad/pa)/scp;
    fvg=(xg/pg)/scp;
    fvp=(xp/pp)/scp;
    fvl=(xl/pl)/scp;
    fvc=(xc/pc)/scp;
    kpa=(fva*ka)+(fvg*kg)+(fvp*kp)+(fvl*kl)+(fvc*kc);
    kpe=1/((fva/ka)+(fvg/kg)+(fvp/kp)+(fvl/kl)+(fvc/kc));
    K= (kpa+kpe)/2;

    return K;
}
DEFINE_PROPERTY (densidade,c,t)
{
    real d,Temp,pa,pg,pp,pl,pc,xg,xad,scp;
    Temp= C_T(c,t)-273.15;
    pa=997.18+0.0031439*(Temp)-0.0037574*(Temp*Temp);
    pg=916.89-0.13071*(Temp);
    pp=1329.9-0.51840*(Temp);
    pl=925.59-0.41757*(Temp);
    pc=2423.8-0.28063*(Temp);

    if (Temp>=Tic)
    {
        xg=0;
    }
    else
    {
        xg=1.105*xa/(1+0.7138/log(Tic-Temp+1));
    }
}

```

```

    xad=xa-xg;
    scp=(xad/pa)+(xg/pg)+(xp/pp)+(xl/pl)+(xc/pc);
    d=1/scp;
    return d;
}

DEFINE_SPECIFIC_HEAT (calor_especifico, T, Tref ,h, yi)
{
    real Cp,Temp,Cpa,Cpd,xg;

    Temp=T-273.15;
    Cpa=3780;
    Cpd=2011;

    if (Temp>=Tic)
    {
        xg=0;
    }

    else
    {
        xg=1.105*xa/(1+0.7138/log(Tic-Temp+1));
    }

    T=Temp+273.15;
    Cp=xg*Cpd+(1-xg)*Cpa;

    *h= Cp*(T-Tref);
    return Cp;
}

```



## APÊNDICE 11 – UDFs utilizadas na simulação numérica do músculo de anchova

```
#include "udf.h"
```

```
#define Tic -1.70
```

```
#define xa 0.6875
```

```
#define La 333.6
```

```
#define xp 0.2127
```

```
#define xl 0.0805
```

```
#define xc 0.0103
```

```
#define xal 0.08508
```

```
#define xs 0.3125
```

```
DEFINE_PROPERTY (condutividade_termica,c,t)
```

```
{
```

```
    real Temp,K,ka,kg,kp,kl,kc,pa,pg,pp,pl,pc,xg,xad,scp,fva,fvg,fvp,fvl,fvc,kpa,kpe;
```

```
    Temp= C_T(c,t)-273.15;
```

```
    ka=0.57109+0.0017625*(Temp)-0.0000067036*(Temp*Temp);
```

```
    kg=2.2196-0.0062489*(Temp)+0.00010154*(Temp*Temp);
```

```
    kp= 0.17881+0.0011958*(Temp)-0.0000027178*(Temp*Temp);
```

```
    kl=0.18071-0.0027604*(Temp)-0.00000017749*(Temp*Temp);
```

```
    kc=0.32962+0.0014011*(Temp)-0.0000029069*(Temp*Temp);
```

```
    pa=997.18+0.0031439*(Temp)-0.0037574*(Temp*Temp);
```

```
    pg=916.89-0.13071*(Temp);
```

```
    pp=1329.9-0.51840*(Temp);
```

```
    pl=925.59-0.41757*(Temp);
```

```
    pc=2423.8-0.28063*(Temp);
```

```
    if (Temp>=Tic)
```

```
    {
```

```
        xg=0;
```

```
    }
```

```
    else
```

```
    {
```

```

        xg=1.105*xa/(1+0.7138/log(Tic-Temp+1));
    }
    xad=xa-xg;
    scp=(xad/pa)+(xg/pg)+(xp/pp)+(xl/pl)+(xc/pc);
    fva=(xad/pa)/scp;
    fvg=(xg/pg)/scp;
    fvp=(xp/pp)/scp;
    fvl=(xl/pl)/scp;
    fvc=(xc/pc)/scp;
    kpa=(fva*ka)+(fvg*kg)+(fvp*kp)+(fvl*kl)+(fvc*kc);
    kpe=1/((fva/ka)+(fvg/kg)+(fvp/kp)+(fvl/kl)+(fvc/kc));
    K=(kpa+kpe)/2;
    return K;
}
DEFINE_PROPERTY(densidade,c,t)
{
    real d,Temp,pa,pg,pp,pl,pc,xg,xad,scp;
    Temp= C_T(c,t)-273.15;
    pa=997.18+0.0031439*(Temp)-0.0037574*(Temp*Temp);
    pg=916.89-0.13071*(Temp);
    pp=1329.9-0.51840*(Temp);
    pl=925.59-0.41757*(Temp);
    pc=2423.8-0.28063*(Temp);

    if (Temp>=Tic)
    {
        xg=0;
    }
    else
    {
        xg=1.105*xa/(1+0.7138/log(Tic-Temp+1));
    }
    xad=xa-xg;
    scp=(xad/pa)+(xg/pg)+(xp/pp)+(xl/pl)+(xc/pc);

```

```
d=1/scp;
return d;
}

DEFINE_SPECIFIC_HEAT (calor_especifico, T, Tref ,h, yi)
{
    real Cp,Temp,Cpa,Cpd,xg;
    Temp=T-273.15;
    Cpa=3471;
    Cpd=2160;

    if (Temp>=Tic)
    {
        xg=0;
    }

    else
    {
        xg=1.105*xa/(1+0.7138/log(Tic-Temp+1));
    }

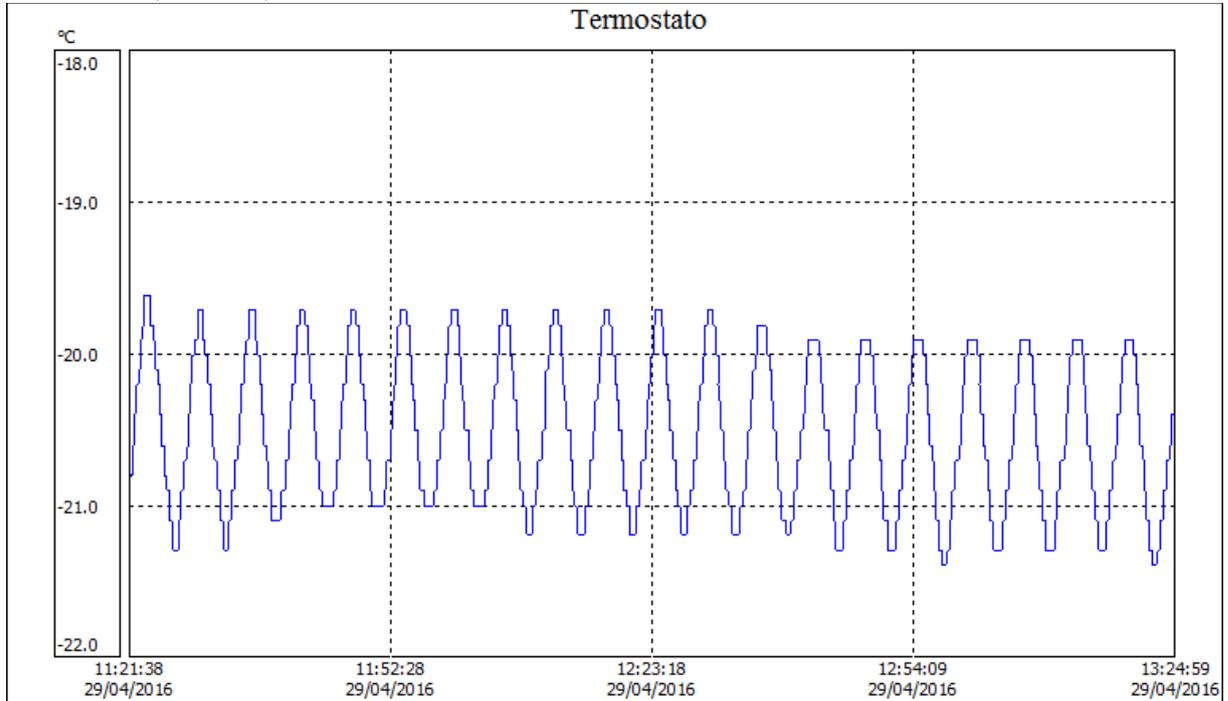
    T=Temp+273.15;
    Cp=xg*Cpd+(1-xg)*Cpa;

    *h= Cp*(T-Tref);
    return Cp;
}
```

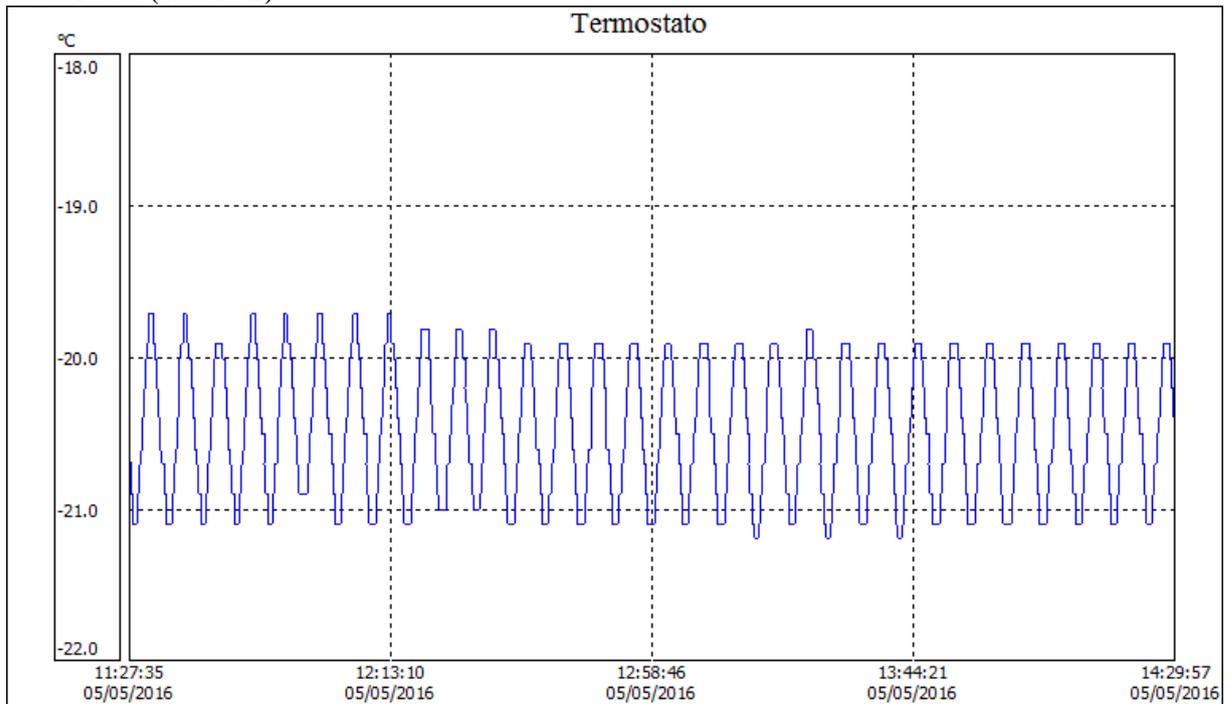


## ANEXOS

ANEXO 1 - Controle da temperatura do ar da câmara fria durante o congelamento do músculo de abrótea (ensaio 1)

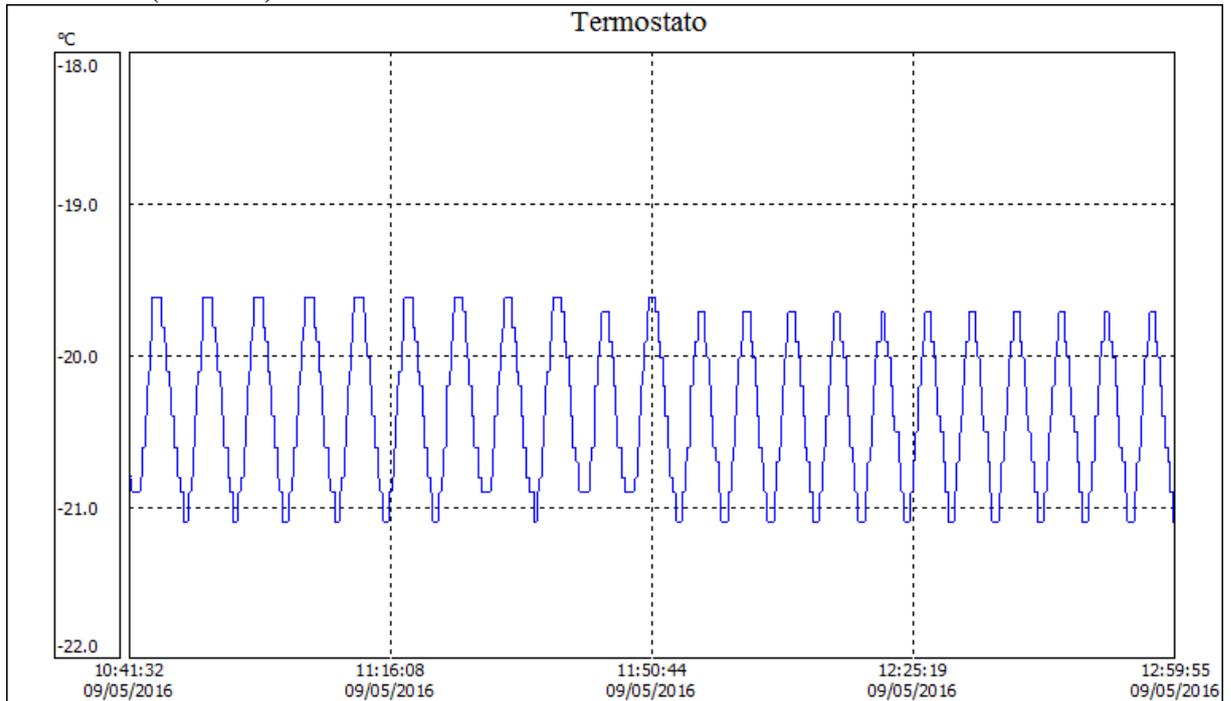


ANEXO 2 - Controle da temperatura do ar da câmara fria durante o congelamento do músculo de abrótea (ensaio 2)

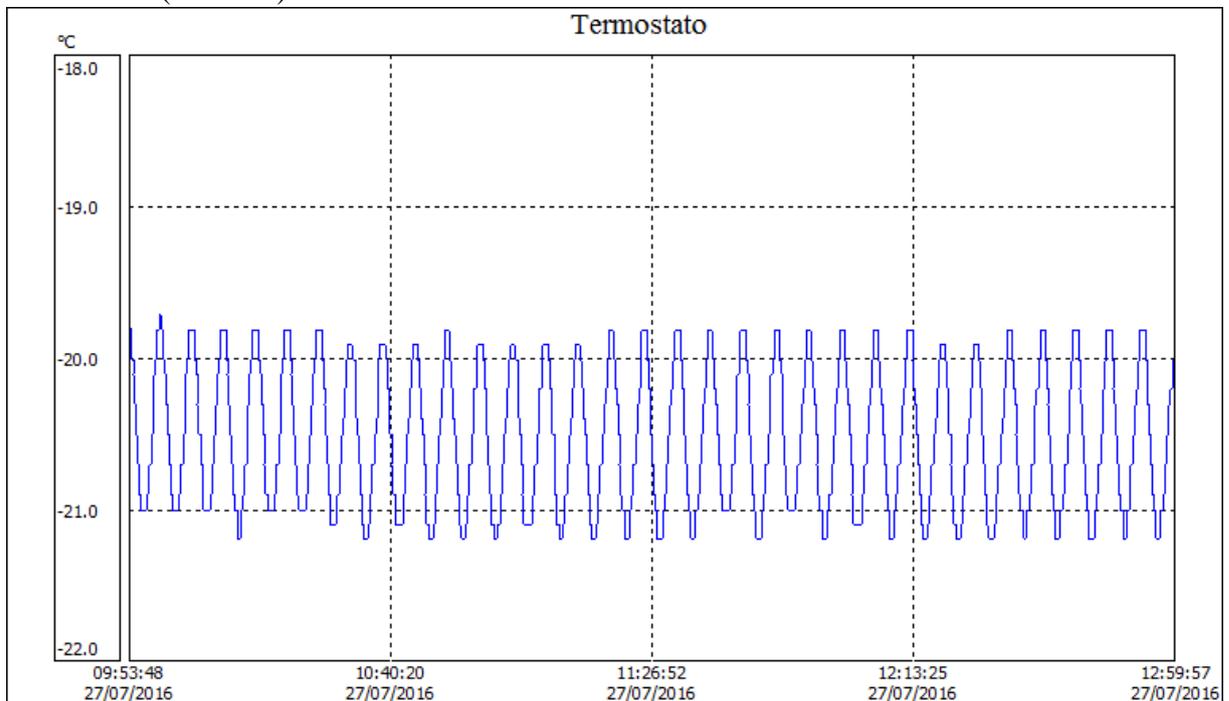




ANEXO 3 - Controle da temperatura do ar da câmara fria durante o congelamento do músculo de abrótea (ensaio 3)

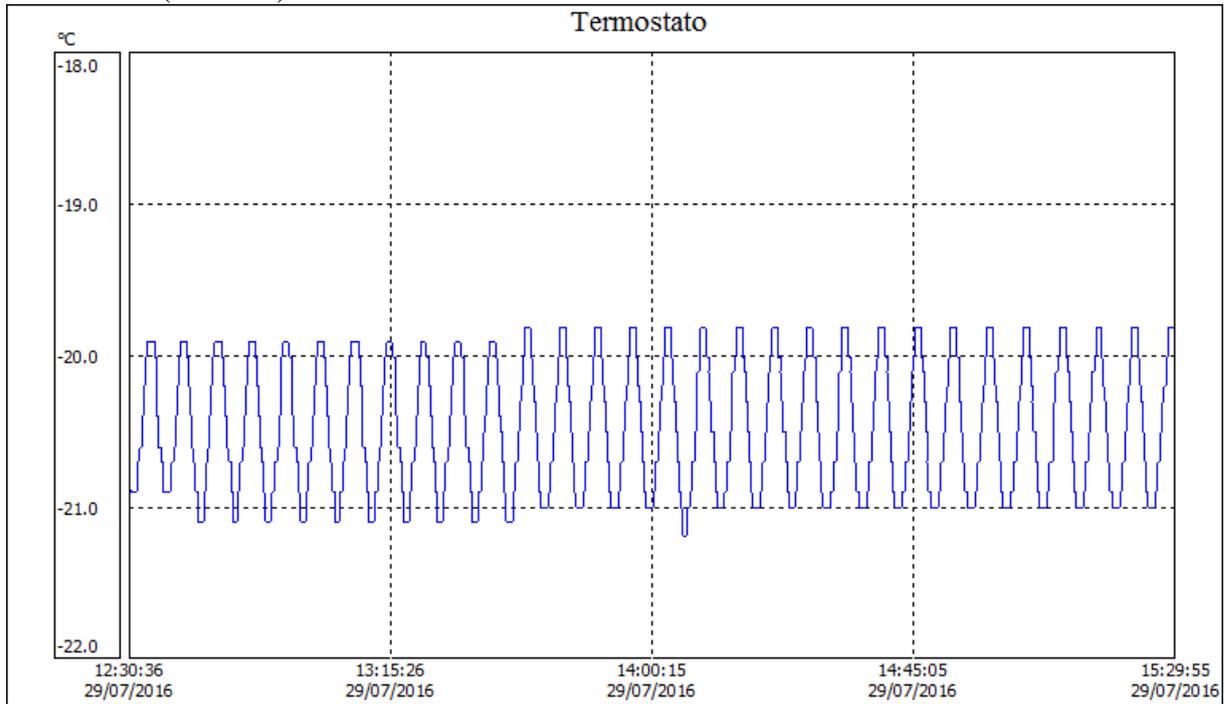


ANEXO 4 - Controle da temperatura do ar da câmara fria durante o congelamento do músculo de anchova (ensaio 1)

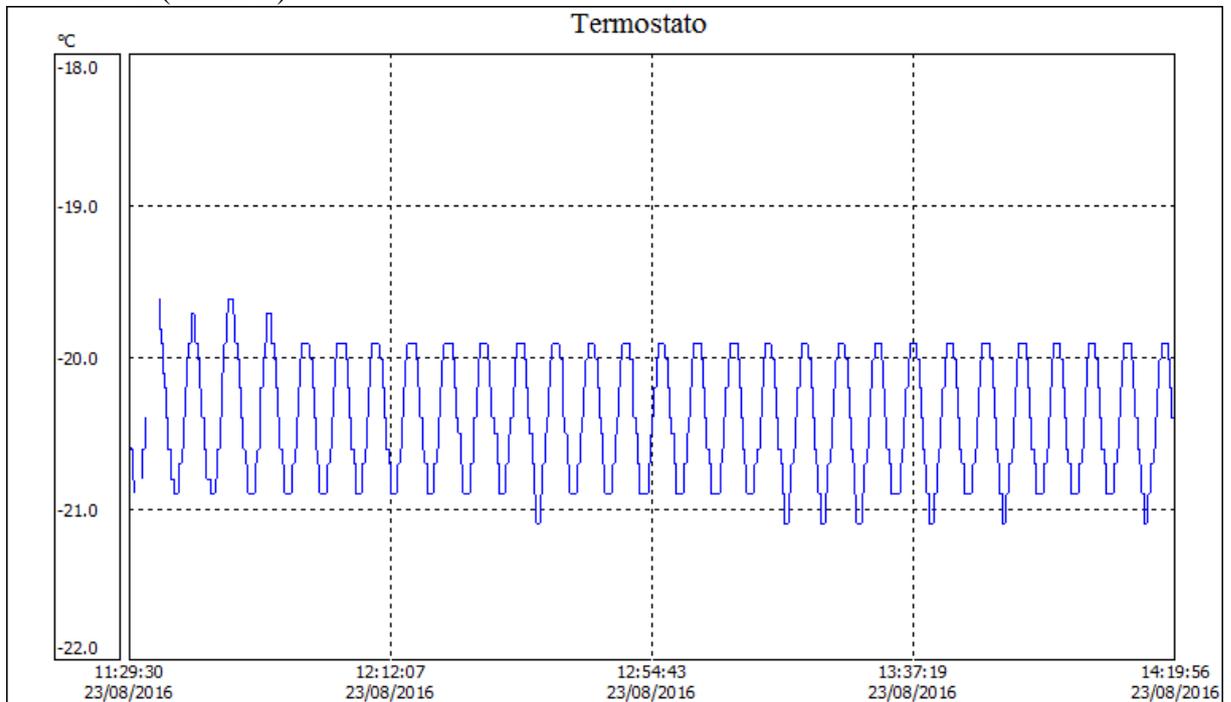




ANEXO 5 - Controle da temperatura do ar da câmara fria durante o congelamento do músculo de anchova (ensaio 2)



ANEXO 6 - Controle da temperatura do ar da câmara fria durante o congelamento do músculo de anchova (ensaio 3)





# ANEXO 7 – Manual do controlador eletrônico utilizado para o monitoramento da temperatura interna da câmara fria



### 1. DESCRIÇÃO

O **TC-900R i clock** é um controlador de temperatura para congelados. Ele automatiza os processos de degelo de acordo com a necessidade da instalação, proporcionando economia de energia. Possui dois sensores, um para temperatura ambiente e outro que, fixado no evaporador, comanda o final do degelo e o retorno dos ventiladores. Além disso, possui um relógio interno em tempo real que permite a criação de uma agenda com até oito degelos diários para cada dia da semana. A bateria interna do controlador garante seu sincronismo, mesmo na falta de energia, por muitos anos. Possui saída para comunicação serial, podendo ser gerenciado remotamente através do Sitrad® via internet. Produto em conformidade com CE (União Européia), NSF (Estados Unidos) e UL Inc. (Estados Unidos Canadá).

### 2. APLICAÇÕES

- Câmaras
- Balcões de congelados

### 3. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

- Alimentação: TC-900R i clock -115/230 Vac ±10% (50/60 Hz)  
TC-900R i clock -12/24 Vac/dc
- Temperatura de controle: -50 a 75 °C / -58 a 167 °F
- Resolução: 0.1 °C entre -10 e 75.0 °C e 1 °C fora desta faixa / 1 °F em toda a faixa
- Temperatura de operação: 0 a 50 °C / 32 a 122 °F
- Umidade de operação: 10 a 90% UR (sem condensação)
- Dimensões: 71 x 28 x 71 mm
- Corrente máxima:  
REFR: 5(3)A / 250Vac 1/8HP (compressor, válvula solenóide ou contatora)  
FANS: 5(3)A / 250Vac 1/8HP (ventilador do evaporador)  
DEFER: 5(3)A / 250Vac (degelo-resistência ou gás quente)
- Sensores:  
S1: Sensor do ambiente (preto)  
S2: Sensor do evaporador (cinza)
- CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A NORMA IEC60730-2-9:  
- Limite de temperatura da superfície de instalação: 50 °C
- Tipo de construção: Controlador eletrônico incorporado
- Ação automática: Tipo 1
- Controle de poluição: Grau 2
- Tensão de impulso: 1,5kV
- Temperatura para o teste de pressão de esfera: 75°C e 125°C
- Isolação: Classe II

### 4. CONFIGURAÇÕES

#### 4.1 - Ajuste da temperatura de controle (SETPOINT):

- Pressione **SET** por 2 segundos até aparecer **SEt**, soltando em seguida. Aparecerá a temperatura de trabalho ajustada. Utilize as teclas **↓** e **▲** para modificar o valor e, quando pronto, pressione **SET** para gravar.

#### 4.2 - Tabela de parâmetros

Fun	Descrição
F01	Degelos por programação horária (agenda semanal)
F02	Diferencial de controle (histerese)
F03	Mínimo setpoint permitido ao usuário final
F04	Máximo setpoint permitido ao usuário final
F05	Retardo na partida (energização) deste instrumento
F06	Ponto de atuação do alerta de temperatura ambiente baixa (S1)
F07	Ponto de atuação do alerta de temperatura ambiente alta (S1)
F08	Tempo de refrigeração (intervalo entre degelos)
F09	Tempo mínimo de compressor ligado
F10	Tempo mínimo de compressor desligado
F11	Situação do compressor com sensor ambiente (S1) desativado
F12	Degelo na partida do instrumento
F13	Temperatura no evaporador (S2) para determinar fim de degelo
F14	Duração máxima do degelo (por segurança)
F15	Ventilador ligado durante o degelo
F16	Tipo de degelo
F17	Indicação de temperatura (S1) travada durante o degelo
F18	Tempo de drenagem (gotejamento da água do degelo)
F19	Temper. do evaporador (S2) p/ retorno do ventilador após drenagem
F20	Tempo máximo p/ retorno do ventilador após drenagem (fan-delay)
F21	Ventilador ligado com compressor desligado (em refrigeração)
F22	Parada do ventilador por temperatura alta no evaporador (S2)
F23	Deslocamento de indicação da temper. ambiente- offset (S1)
F24	Endereço do equipamento na rede RS - 485 (comunicação serial)

### 4.2.1 - Descrição dos parâmetros

#### F01 - Degelos por programação horária (agenda semanal)

Esta função permite que se habilite a agenda de degelos por horários.  
\*O\* = Os degelos acontecem normalmente após o término do estágio de refrigeração.  
\*1\* = Os degelos acontecem em horários programados de acordo com a agenda semanal.

#### F02 - Diferencial de controle (histerese)

É a diferença de temperatura (histerese) entre LIGAR e DESLIGAR a refrigeração.

Exemplo: Deseja-se controlar a temperatura em 4.0 °C com diferencial de 1.0 °C. Logo, a refrigeração será desligada em 4.0 °C e religada em 5.0 °C (4.0 + 1.0).

#### F03 - Mínimo setpoint permitido ao usuário final

#### F04 - Máximo setpoint permitido ao usuário final

Bateria eletrônica cuja finalidade é evitar que, por engano, regule-se temperaturas exageradamente altas ou baixas.

#### F05 - Retardo na partida (energização) deste instrumento

Quando o instrumento é ligado, este pode permanecer um tempo com seu controle desabilitado, retardando o início do processo. Durante esse tempo ele funciona apenas como indicador de temperatura. Serve para evitar picos de demanda de energia elétrica, em caso de falta e retorno da mesma, quando existirem vários equipamentos conectados na mesma rede elétrica. Para isso, basta ajustar tempos diferentes para cada equipamento. Esse retardo pode ser do compressor ou do degelo (quando configurado degelo na partida).

#### F06 - Ponto de atuação do alerta de temperatura ambiente baixa (S1)

#### F07 - Ponto de atuação do alerta de temperatura ambiente alta (S1)

Se a temperatura ambiente (S1) atingir esse ponto durante a refrigeração, isso será sinalizado visualmente através da indicação piscando no visor.

#### F08 - Tempo de refrigeração (intervalo entre degelos)

É o tempo durante o qual o compressor ligará e desligará pela temperatura ambiente, e começa a ser contado a partir da entrada do ventilador, após o estágio de fan-delay (retorno do ventilador após drenagem). **Atenção:** O degelo somente iniciará se a temperatura no sensor do evaporador for menor do que a ajustada em F13 e a duração do degelo F14 for diferente de "0".

#### F09 - Tempo mínimo de compressor ligado

É o tempo mínimo em que o compressor permanecerá ligado, ou seja, espaço de tempo entre a última partida e a próxima parada. Serve para evitar surtos de alta tensão na rede elétrica.

CELSIUS				FAHRENHEIT			
Min	Máx	Unid	Padrão	Min	Máx	Unid	Padrão
0 - não	1 - sim	-	1 - sim	0 - não	1 - sim	-	1 - sim
0.1	20.0	°C	2.0	1	36	°F	4
-50	F04	°C	-50.0	-58	F04	°F	-58
F03	75.0	°C	75.0	F03	167	°F	167
0	30	min.	0	0	30	min.	0
-50.0	75.0	°C	-50.0	-58	167	°F	-58
-50.0	75.0	°C	75.0	-58	167	°F	167
1	999	min.	240	1	999	min.	240
0	999	seg.	0	0	999	seg.	0
0	999	seg.	0	0	999	seg.	0
0 - deslig.	1 - lig.	-	1 - lig.	0 - deslig.	1 - lig.	-	1 - lig.
0 - não	1 - sim	-	0 - não	0 - não	1 - sim	-	0 - não
-50.0	75.0	°C	40.0	-58	167	°F	104
0=inativo	90	min.	45	0=inativo	90	min.	45
0 - não	1 - sim	-	0 - não	0 - não	1 - sim	-	0 - não
0 - resist.	1 - gás q.	-	0 - resist.	0 - resist.	1 - gás q.	-	0 - resist.
0 - não	1 - sim	-	0 - não	0 - não	1 - sim	-	0 - não
0	30	min.	10	0	30	min.	10
-50.0	75.0	°C	0.0	-58	167	°F	32
0	30	min.	1	0	30	min.	1
0 - não	1 - sim	-	1 - sim	0 - não	1 - sim	-	1 - sim
-50.0	75.0	°C	50.0	-58	167	°F	122
-20.0	20.0	°C	0.0	-36	36	°F	0
001	247	-	001	001	247	-	001

**F10 - Tempo mínimo de compressor desligado**

É o tempo mínimo em que o compressor permanecerá desligado, ou seja, espaço de tempo entre a última parada e a próxima partida. Serve para aliviar a pressão de descarga e aumentar o tempo de vida útil do compressor.

**F11 - Situação do compressor com sensor (S1) desativado**

Se o sensor ambiente estiver em curto-circuito, desconectado ou fora da faixa de medição, o compressor assume o estado configurado nesta função.

**Exemplo:** Para câmaras que estocam frutas, é recomendável que o compressor fique desligado (F11 = 0); já em câmaras que estocam carnes, recomenda-se que o compressor permaneça ligado (F11 = 1).

**F12 - Degelo na partida do instrumento**

Possibilita a realização de um degelo no momento em que o controlador é energizado, como por exemplo, no retorno da energia elétrica (em caso de falta de energia).

**F13 - Temperatura no evaporador (S2) para determinar fim de degelo**

Se a temperatura no evaporador (S2) atingir o valor ajustado, o fim de degelo acontecerá por temperatura, que é o desejável. Com isso, otimiza-se o processo de degelo, retornando à refrigeração tão logo o evaporador esteja limpo.

**F14 - Duração máxima do degelo (por segurança)**

Por segurança, caso a temperatura no evaporador não atinja o valor ajustado em F13 ou o sensor S2 esteja desconectado, o fim de degelo acontecerá por tempo. Sempre que isso acontecer, um ponto ficará piscando no canto inferior direito do visor, indicando que a temperatura ajustada na função F13 foi muito alta ou o tempo limite ajustado foi insuficiente.

**F15 - Ventilador ligado durante o degelo**

Possibilita o funcionamento do ventilador durante o degelo.

**Exemplo:** Degelo natural ou por resistências aletadas instaladas fora do evaporador.

**F16 - Tipo de degelo**

"0" = Degelo elétrico (por resistências), onde é acionada somente a saída de degelo.

"1" = Degelo por gás quente, onde são acionadas as saídas do compressor e do degelo.

**F17 - Indicação de temperatura (S1) travada durante o degelo**

Esta função tem por finalidade evitar que seja visualizada a elevação de temperatura ambiente durante o degelo, permanecendo a última indicação antes do início de degelo. A indicação é liberada novamente no início do ciclo de refrigeração, após o fan-delay (atraso para retorno do ventilador).

**F18 - Tempo de drenagem (gotejamento da água do degelo)**

Tempo necessário para gotejamento, ou seja, para escorrerem as últimas gotas de água do evaporador. Todas as saídas permanecem desligadas. Se não for desejável esta etapa, ajuste esse tempo para "zero" (F18=0).

**F19 - Temperatura do evaporador (S2) para retorno do ventilador após drenagem (fan-delay)**

Após a drenagem inicia o ciclo de fan-delay. A refrigeração (REFR) é acionada imediatamente, pois a temperatura ambiente está alta, mas o ventilador só é acionado após a temperatura no evaporador baixar do valor ajustado. Esse processo é necessário para remover o calor que ainda existe no evaporador por causa do degelo, evitando jogá-lo no ambiente.

**F20 - Tempo máximo para retorno do ventilador após a drenagem (fan-delay)**

Por segurança, caso a temperatura no evaporador não atinja o valor ajustado em F19 ou o sensor do degelo (S2) esteja desconectado, o retorno do ventilador acontecerá no tempo ajustado nesta função.

**F21 - Ventilador ligado com compressor desligado (em refrigeração)**

Durante a refrigeração, o acionamento do ventilador pode estar condicionado ao do compressor.

"0" = O ventilador permanece ligado somente enquanto o compressor estiver ligado (esta alternativa, em alguns casos, possibilita grande economia de energia elétrica).

"1" = O ventilador permanece ligado durante todo o ciclo de refrigeração.

**F22 - Parada do ventilador por temperatura alta no evaporador (S2)**

Tem por finalidade ciclar a ventilação do evaporador até que a temperatura ambiente se aproxime daquela prevista no projeto da instalação frigorífica, evitando assim altas temperatura e pressão de descarga que podem danificar o compressor. Se a temperatura no evaporador ultrapassar o valor ajustado, o ventilador é desligado, religando com uma histerese fixa de 2° C abaixo desse valor. Valioso recurso quando, por exemplo, coloca-se em operação um equipamento frigorífico que esteve parado por dias ou quando se reabastece câmaras ou balcões com mercadoria quente.

**F23 - Deslocamento de indicação da temperatura ambiente - offset (S1)**

Permite compensar eventuais desvios na leitura da temperatura ambiente, provenientes da troca do sensor.

**F24 - Endereço do equipamento na rede RS - 485 (comunicação serial)**

Cada equipamento conectado à rede RS - 485 deve possuir um único endereço, diferente dos demais, de modo que o computador possa identificá-lo.

**Atenção:** Para evitar problemas na comunicação, certifique-se que não existem equipamentos com o mesmo endereço.

**4.2.2 - Ajuste das funções avançadas**

a) Pressione simultaneamente as teclas  $\swarrow$  e  $\searrow$  por 2 segundos até aparecer **5EL**, saltando em seguida. Logo, aparecerá **Code** solicitando que seja inserido o código de acesso.

b) Dê um toque na tecla  $\rightarrow$  e utilize as teclas  $\swarrow$  e  $\searrow$  para selecionar o código de acesso (123) confirmando com a tecla  $\rightarrow$ . Aparecerá novamente **Code**.

c) Pressione a tecla  $\rightarrow$  uma vez. Aparecerá a mensagem **Fun**.

d) Pressione rapidamente a tecla  $\rightarrow$  para entrar no menu de funções avançadas. Aparecerá então **FD**.

e) Utilize as teclas  $\swarrow$  e  $\searrow$  para acessar a função desejada.

f) Após selecionar a função, pressione  $\rightarrow$  para visualizar o valor configurado para aquela função.

g) Utilize as teclas  $\swarrow$  e  $\searrow$  para alterar o valor e, quando pronto, pressione  $\rightarrow$  para memorizar o valor configurado e retornar ao menu das funções.

h) Para sair do menu das funções, pressione  $\rightarrow$  por 2 segundos até aparecer **Fun**.

i) Para retornar à operação normal (indicação de temperatura), pressione novamente a tecla  $\rightarrow$  por 2 segundos até aparecer **---**.

**Nota:** Para somente visualizar os valores configurados nas funções (sem alterá-los), não é necessário inserir o código de acesso.

**4.3 - Agenda de degelos**

**1P1, 1P2, ..., 1P8 >>** Programação dos degelos de Domingo

**2P1, 2P2, ..., 2P8 >>** Programação dos degelos de Segunda-feira

**3P1, 3P2, ..., 3P8 >>** Programação dos degelos de Terça-feira

**4P1, 4P2, ..., 4P8 >>** Programação dos degelos de Quarta-feira

**5P1, 5P2, ..., 5P8 >>** Programação dos degelos de Quinta-feira

**6P1, 6P2, ..., 6P8 >>** Programação dos degelos de Sexta-feira

**7P1, 7P2, ..., 7P8 >>** Programação dos degelos de Sábado

**OBS:** Para que os degelos sejam realizados pela agenda (horários programados), é obrigatória a programação de pelo menos 1 (um) degelo para cada dia da semana. Caso contrário, os degelos serão realizados pelo processo normal (após concluído o tempo de refrigeração), e a função F01 será automaticamente configurada para "0".

\* O código que aparece no visor é formado da seguinte forma:

Dia da semana	P	Número do programa de degelo
1-Domingo	1	1 - 1º programa do dia
2-Segunda-feira	2	2 - 2º programa do dia
3-Terça-feira	3	3 - 3º programa do dia
4-Quarta-feira	4	4 - 4º programa do dia
5-Quinta-feira	5	5 - 5º programa do dia
6-Sexta-feira	6	6 - 6º programa do dia
7-Sábado	7	7 - 7º programa do dia
	8	8 - 8º programa do dia

Ex.: 4P2 { Quarta-feira  
Programa 2

**4.3.1 - Ajuste da agenda de degelos**

a) Pressione simultaneamente  $\swarrow$  e  $\searrow$  por 2 segundos até aparecer **5EL**, saltando em seguida. Aparecerá, agora **Code**, solicitando que seja inserido o código de acesso.

b) Dê um toque na tecla  $\rightarrow$  e insira, através das teclas  $\swarrow$  e  $\searrow$  o código 123 (cento e vinte e três), confirmando, com  $\rightarrow$ . Aparecerá novamente **Code**.

c) Pressione a tecla  $\rightarrow$  duas vezes. Aparecerá a mensagem **Pca**.

d) Dê um toque na tecla  $\rightarrow$  para entrar no menu de programação dos degelos. Aparecerá **IP**.

e) Utilize as teclas  $\swarrow$  e  $\searrow$  para acessar o programa desejado.

f) Após selecionar o programa, pressione  $\rightarrow$  para visualizar o horário ajustado para aquele degelo.

g) Utilize as teclas  $\swarrow$  e  $\searrow$  para alterar o horário ajustado e, quando pronto, pressione  $\rightarrow$  para gravar o horário e retornar ao menu da programação dos degelos.

h) Para sair do menu da programação dos degelos, pressione  $\rightarrow$  por 2 segundos até aparecer **Pca**.

i) Para retornar à operação normal (indicação de temperatura) pressione novamente  $\rightarrow$  por 2 seg. até aparecer **---**.

**Notas:**

1) Para desabilitar as programações de degelos indesejados, basta deslocar o ajuste para o máximo, até aparecer **OFF**.

2) Para somente visualizar os horários programados na agenda de degelos (sem alterá-los), não é necessário inserir o código de acesso.

**4.4 - Ajuste do relógio e dia da semana**

a) Pressione simultaneamente  $\swarrow$  e  $\searrow$  por 2 segundos até aparecer **5EL**, saltando em seguida. Aparecerá, agora **Code**, solicitando que seja inserido o código de acesso.

b) Dê um toque na tecla  $\rightarrow$  e insira o código de acesso 123 (cento e vinte e três) através das teclas  $\swarrow$  e  $\searrow$ , confirmando com  $\rightarrow$ . Aparecerá novamente **Code**.

c) Pressione a tecla  $\rightarrow$  três vezes. A mensagem **CLo** ficará disponível no visor.

d) Dê um toque na tecla  $\rightarrow$ . Aparecerão os ajustes na seguinte ordem:

**HORAS → MINUTOS → DIADA SEMANA**

Ex.: 12h43min - Sexta-feira

**12h** Horas

**43** Minutos

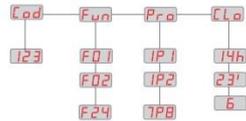
**6** Dia da semana

#### 4.5 - Diagrama dos parâmetros de configuração

Pressione **↵** e **↵** por 2 seg. até aparecer **5EL**, soltando em seguida.  
 Através das setas **↵** e **↵** é possível alternar entre **Cod** ↔ **Fun** ↔ **Pro** ↔ **CLo**

**Cod** Código de acesso (123)  
**Fun** Menu das funções do processo (F01 a F24)  
**Pro** Programação semanal dos horários dos degelos (1P1 a 7P8)  
**CLo** Ajuste do relógio (horas e minutos) e dia da semana (1 a 7)

**↵** **↵** por 2 segundos = **5EL**



#### 5. FUNÇÕES COM ACESSO FACILITADO

##### 5.1 - Estágio do processo, tempo transcorrido e temperatura no Evaporador (S2)

Pressionando a tecla **↵**. Aparecerá o estágio em que o processo se encontra e o tempo (em minutos) já transcorrido neste estágio. Em seguida, aparecerá a temperatura no evaporador (S2).  
 Em caso de sensor desconectado ou temperatura fora da faixa especificada, aparecerá **Err2** no visor.  
 Estágios do processo: **dEL** Delay inicial (retardo na partida do instrumento)  
**FAn** Fan-delay (atraso para retorno do ventilador)  
**rEF** Refrigeração  
**dEF** Degelo  
**dRE** Drenagem



##### 5.2 - Degelo manual (instantâneo)

Para realizar um degelo manual, independentemente da programação, mantenha pressionada a tecla **↵** por 4 segundos, até aparecer a indicação **dEFF Dn**.  
 Caso o instrumento esteja em degelo e seja necessário interrompê-lo, proceda conforme as instruções acima, até aparecer a indicação **dEFF DFF**.

##### 5.3 - Registro de temperaturas máximas e mínimas

Pressione **↵**. Aparecerá **k=1** e as temperaturas mínima e máxima do sensor S1 (temperatura ambiente). Logo após aparecerá **k=2** e as temperaturas mínima e máxima do sensor S2 (evaporador).

**Nota:** Para reinicializar os registros, basta manter pressionada a tecla **↵** durante a visualização das temperaturas mínimas e máximas até aparecer **rSE**.

##### 5.4 - Visualização do horário e dia da semana atuais

Pressione rapidamente a tecla **↵**. Aparecerão:  
**HORAS** → **MINUTOS** → **DIADA SEMANA**

##### 5.5 - Como determinar o final do degelo por temperatura

- Ajuste as seguintes funções com valores máximos:
  - Tempo de refrigeração (F08 = 999 min)
  - Temperatura no evaporador para fim de degelo (F13 = 75.0°C)
  - Duração máxima do degelo (F14 = 90 min)
- Aguarde até formar alguma camada de gelo no evaporador.
- Faça um degelo manualmente, pressionando a tecla **↵** por 4 segundos, até aparecer **dEF**.
- Acompanhe visualmente o derretimento.
- Esperre até que derreta todo o gelo no evaporador para que se possa considerar finalizado o degelo.
- Verifique a temperatura no evaporador lida pelo sensor S2 neste momento, pressionando a tecla **↵** e configure esse valor na função F13 - Temperatura no evaporador para fim de degelo.
- Como segurança, reajuste a função F14 - Duração máxima do degelo, que e depende do tipo de degelo realizado. *Exemplo: Degelo elétrico (por resistências) = 45 minutos como máximo*  
*Degelo por gás quente = 20 minutos como máximo*
- Agora ajuste a função F08 - Tempo de refrigeração com o valor desejado.

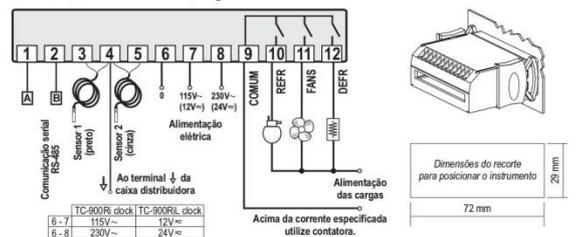
#### 6. SINALIZAÇÕES

Os sinais luminosos indicam o estado das saídas de controle:  
**REFR:** Compressor ou solenóide do gás líquido  
**FANS:** Ventiladores do evaporador  
**DEFR:** Degelo (aquecimento)  
**Err1** Sensor ambiente desconectado ou fora da faixa.  
**Err2** Sensor do evaporador desconectado ou fora da faixa.  
**AlH1** Alarme de temperatura ambiente alta.  
**AlLo** Alarme de temperatura ambiente baixa.  
 Sempre que o degelo terminar por tempo e não por temperatura, um ponto situado no canto inferior direito do visor ficará piscando até o próximo degelo e indicará as seguintes possibilidades:  
 - O intervalo entre degelos está muito longo;  
 - Existem resistências queimadas;  
 - O gás quente não está circulando;  
 - Há algum forçador (ventilador) inoperante ou o tempo ajustado é curto para duração máxima do degelo;  
**PPP** Parâmetros de configuração inválidos;  
 - Verifique qual dos parâmetros possui dados inválidos e corrija-os para retornar a operação normal.

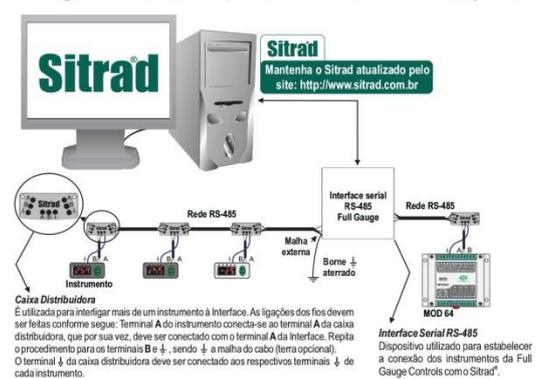
#### 7. SELEÇÃO DE UNIDADE (°C / °F)

Para definir a unidade em que o instrumento irá operar entre no menu de funções **Cod** com o código de acesso "231" e confirme com a tecla **↵**. Aparecerá a indicação **Un1**, pressione **↵** ou **↵** para escolher entre **°C** ou **°F** e confirme com a tecla **↵**. Após selecionar a unidade aparecerá **FAC** e o instrumento voltará para a função **Cod**. Toda vez que a unidade for alterada os parâmetros devem ser reconfigurados, pois eles assumem os valores "padrão".

#### 8. ESQUEMA DE LIGAÇÃO



#### Interligando Controladores, Interface Serial RS-485 e Computador



**Caixa Distribuidora**  
 É utilizada para interligar mais de um instrumento à Interface. As ligações dos fios devem ser feitas conforme segue: Terminal A do instrumento conecta-se ao terminal A da caixa distribuidora, que por sua vez, deve ser conectado com o terminal A da Interface. Repita o procedimento para os terminais B e G, sendo G a malha do cabo (opcional). O terminal G da caixa distribuidora deve ser conectado aos respectivos terminais G de cada instrumento.

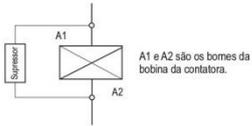
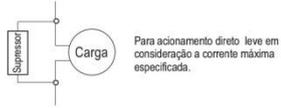
**Interface Serial RS-485 Full Gauge**  
 Dispositivo utilizado para estabelecer a conexão dos instrumentos da Full Gauge Controls com o Sitrad®.

- O sensor S1 (preto) deve estar no ambiente.
- O sensor S2 (cinza) deve ser fixado ao evaporador com um grampo metálico.
- O comprimento do cabo dos sensores pode ser aumentado pelo próprio usuário até 200 metros, utilizando cabo PP2 x 24AWG.

**IMPORTANTE**

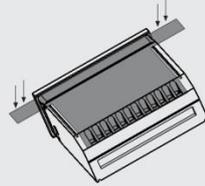
Conforme capítulos da norma NBR 5410:

- 1: Instale protetores contra sobretensões na alimentação
- 2: Cabos de sensores e de comunicação serial podem estar juntos, porém não no mesmo eletroduto por onde passam alimentação elétrica e acionamento de cargas.
- 3: Instale supressores de transientes (filtros RC) em paralelo às cargas, como forma de aumentara vida útil dos relés. *Mais informações contate o departamento de eng. de aplicação através do e-mail [eng-aplicacao@fullgauge.com.br](mailto:eng-aplicacao@fullgauge.com.br) ou pelo fone/fax +55 51 3475. 3308.*

**Esquema de ligação de supressores em contadoras****Esquema de ligação de supressores em cargas acionamento direto****VINIL PROTETOR:**

Protege os instrumentos instalados em locais sujeitos a respingos d'água, como em balcões frigoríficos, por exemplo. Este vinil adesivo acompanha o instrumento, dentro da sua embalagem. Faça a aplicação somente após concluir as conexões elétricas.

Retire o papel protetor e aplique o vinil sobre toda a parte superior do aparelho, dobrando as abas conforme indicado pelas setas.



## ANEXO 8 – Certificado de calibração do termopar tipo K

Laboratório de Metrologia CTAI – Curso Técnico em Automação Industrial  
 REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO  
 Laboratório de Calibração  
**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO**  
 Número 0212345.2017



<b>CLIENTE:</b> Diogo Ortiz Machado						
<b>ENDEREÇO:</b> Rua Engenheiro Alfredo Huch, 475 – Bairro Centro – Rio Grande/RS						
<b>INSTRUMENTO:</b> Termopar			<b>FABRICANTE:</b> Chenco			
<b>MODELO:</b> Tipo K			<b>Nº DE SÉRIE:</b> 2			
<b>TAG:</b> TT			<b>OSC:</b> 0212345/2017			
<b>CARACTERÍSTICAS DO INSTRUMENTO:</b> Medição de temperatura através da variação de tensão.						
<b>CONDIÇÕES AMBIENTAIS DO LABORATÓRIO:</b> 20°C e 55ur						
<b>PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO:</b> Repetitividade em três vezes na medição da faixa de valores entre -20°C e 80°C com variação de 20°C por medição.						
<b>PADRÕES UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO:</b> Banho térmico tipo bloco seco						
ATIVO FIXO	FABRICANTE	Nº DE SÉRIE	MODELO	DESCRIÇÃO	PRÓX. CALIBR.	Nº DO CERTIFICADO
-	Presys	Cal 0193	-	Resolução 0,01°C	NBR ISO/IEC 17025	R2104.09.09

**DATA DA CALIBRAÇÃO:** 11/07/17

**DATA DA EMISSÃO:** 30/08/17

**RESPONSÁVEL:**

- **NOME COMPLETO:** Guilherme Gautério Graboski.

- **ASSINATURA:** Guilherme Graboski

- Os resultados apresentados referem-se exclusivamente ao instrumento calibrado, nas condições especificadas, não sendo extensivos a quaisquer lotes, mesmo que similares.

- A utilização do documento para outros fins depende de prévia autorização do Laboratório de Metrologia CTAI – Curso Técnico em Automação Industrial. A reprodução do mesmo para outros fins só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

**Laboratório de Metrologia CTAI – Curso Técnico em Automação Industrial**  
**REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO**  
 Laboratório de Calibração



**RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO:**

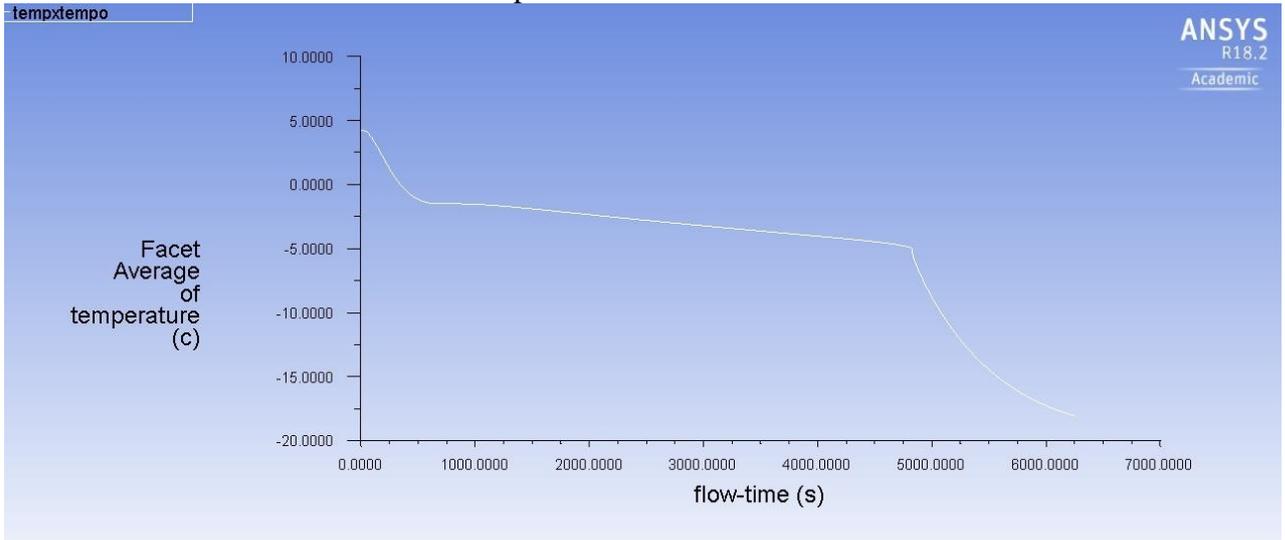
Os resultados de calibração estão contidos(s) na(s) tabela(s) a seguir. O campo Valor Indicado corresponde à indicação do instrumento sob calibração e o campo Valor Padrão corresponde ao Valor Verdadeiro Convencional. A incerteza da Medida está associada ao Valor Indicado no modo Medidor e ao Valor Padrão no modo Fonte.

VALOR DE REFERÊNCIA (°C)	VALORES DO OBJETO(°C)	INCERTEZA DA MEDIDA (°C)	ERRO(°C)	FATOR DE ABRANGÊNCIA
-20	-18,7; -18,5; -18,5; -18,7; -18,7; -18,7.	3,00	-1,5	2,00
0	0,4; 0,6; 0,2; 0,4; 0,1; 0,2.	0,78	-0,6	2,00
20	19,7; 19,9; 19,8; 20,0; 19,7; 19,9.	0,44	0,3	2,00
40	39,2; 39,5; 39,2; 39,5; 39,1; 39,7.	1,46	0,9	2,00
60	58,6; 59; 58,7; 58,8; 58,6; 58,9.	2,72	1,4	2,00
80	78,6; 78,6; 78,5; 78,5; 78,5; 78,5	3,21	1,5	2,00

**OBSERVAÇÕES:**

- a) A incerteza expandida foi calculada para um nível de confiança de 95,45%.  
 b) Este certificado é utilizado em atividades didáticas no ensino/aprendizagem e não atende aos requisitos de acreditação pela Cgcre/Inmetro. Não se avaliou a competência do laboratório ou comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.

ANEXO 9 – Perfil da temperatura numérica no músculo de abrótea



ANEXO 10 – Perfil da temperatura numérica no músculo de anchova

