



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ**  
**PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL**  
**EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

**EVERTON COSTA SANTOS**

**MODELAGEM DE UM SECADOR DE GRÃOS VERTICAL**

**ILHÉUS-BA**  
**2015**

**EVERTON COSTA SANTOS**

**MODELAGEM DE UM SECADOR DE GRÃOS VERTICAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual de Santa Cruz, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Henrique de Oliveira Sales

ILHÉUS-BA  
2015

S237

Santos, Everton Costa.

Modelagem de um secador de grão vertical / Everton Costa Santos. – Ilhéus, BA : UESC, 2015.

73 f. : il.; anexo.

Orientador: Jorge Henrique de Oliveira Sales.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Santa Cruz. Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia.

Inclui referências e apêndices.

1. Sistemas CAD/CAE. 2. Engenharia auxiliada por computador. 3. Energia solar. 4. Estufas para cultivo. 5. Equipamento de secagem. I. Título.

CDD 620.00420285

**EVERTON COSTA SANTOS**

**MODELAGEM DE UM SECADOR DE GRÃOS VERTICAL**

Ilhéus-BA, 15/01/2015

Comissão Examinadora



**Prof. Dr. Jorge Henrique de Oliveira  
Sales**

Universidade Estadual de Santa Cruz  
(Orientador)



**Prof. Dr. Gesil Sampaio Amarante  
Segundo**

Universidade Estadual de Santa Cruz



**Prof. Dr. Romildo Martins Sampaio**  
Universidade Federal do Maranhão

Aos meus pais Euzébio Alves e Elizete Santana, e minhas irmãs Marília Costa e Elaine Moura.

## Agradecimentos

- A toda a minha família em especial aos meus pais e irmãs pelo apoio em todas as áreas da minha vida, e à minha amada Manuela Gomes Bomfim pelo exemplo de pessoa e por também está ao meu lado em todos os momentos.
- A todos aqueles que colaboraram para a realização deste trabalho, em especial:
- Ao Prof. Dr. Jorge Henrique de Oliveira Sales pela orientação, seriedade, motivação, dedicação e por ser uma excelente referência para mim sobre o que é ser um profissional;
- Ao Engenheiro Artur Vieira por ser uma excelente fonte de criatividade, imaginação e inspiração, apoiando o desenvolvimento do projeto de diversas formas e por ter me dado a oportunidade de contribuir com sua invenção através desta dissertação.
- A todos os alunos do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia (PPGMC) em especial a Cássio Almeida Lima, Gislan Silveira Santos, Valdex Santos e Marcelo Santos, e aos acadêmicos não pertencentes ao programa em especial George Nobre Filho, Diana Silveira, Geovana Pires Lima, Virnna Santana, Thamyris Candida e Luciana de Paula, pelas contribuições técnicas e companheirismo.
- A Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia (PPGMC) seus funcionários e professores, em especial:
- Ao Prof. Dr. Francisco Bruno Souza Oliveira pelo suporte computacional;
- Ao Prof. Dr. Gesil Sampaio Amarante Segundo pelo suporte em ferramentas de simulação.
- Ao Núcleo de Biologia Computacional e Gestão de Informações Biotecnológicas (NBCGIB), em especial à todo suporte técnico.
- A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.
- A todos os meus amigos da academia ou não pelo aprendizado e experiência que adquiri de cada um.

## Resumo

Este trabalho apresenta uma modelagem computacional dos campos de temperatura relacionados a dois sistemas desenvolvidos para realizar a secagem de amêndoas de cacau através da energia solar: um sistema tradicional denominado barcaça e uma inovação denominada secador de grãos vertical. Os efeitos convectivos no ar contido no interior do secador de grãos tem expressiva importância na quantidade de energia que é transferida de um ponto para outro, devido a isto, foi calculado os campos de velocidade esperado para este sistema. Este secador de grãos trata-se de uma estufa disposta verticalmente preenchida com bandejas sobrepostas ao longo da sua altura, onde cada uma destas bandejas contém perfurações em sua base, acomodando uma camada de amêndoas de cacau. A ideia de funcionamento é que se alimente este equipamento por sua parte superior com bandejas contendo as amêndoas ainda frescas, e em diferentes intervalos de tempo, através de um mecanismo de fluxo descendente, se retire pela parte inferior as bandejas contendo as amêndoas secas. A partir da utilização das tecnologias de CAD/CAE, foram otimizadas as geometrias, os domínios foram discretizados e as simulações supracitadas foram realizadas através do método dos elementos finitos, tanto para uma barcaça tradicional, com uma área ocupada para a secagem equivalente a  $72m^2$ , quanto para a torre proposta, idealizada para a ocupação de um espaço físico equivalente a  $1m^2$ . Esta estufa verticalizada mostra expressivos benefícios em relação à barcaça, proporcionando melhores condições de trabalho e uma significativa redução da área necessária para a secagem de amêndoas devido a valorização da sua altura na etapa de criação. As simulações mostram que a torre proposta apresenta convenientes respostas térmicas, uma vez que consegue manter picos de temperatura por mais tempo em seu interior (entre 11h e 13h) e rapidamente atinge temperaturas próximas a  $50^{\circ}C$  contra  $36^{\circ}C$  atingidos na barcaça, considerando um mesmo intervalo de tempo de simulação e semelhantes condições iniciais e de contorno.

**Palavras-chave:** Tecnologias cad/cae, Energia solar, Estufa verticalizada, Secador de grãos.

## Abstract

This work presents a computational modeling of the temperature fields related to two systems developed to the drying almonds cocoa through solar energy: a traditional system called barge and an innovation called vertical grain dryer. The convective effects in the air contained in the interior of the grain dryer has a significant importance in the amount of energy that is transferred from one point to another, because of this, it was calculated the velocity field expected for this system. This grain dryer is a vertical kiln filled with trays superimposed along its height, where each trays contains perforations at its base, accommodating a layer of cocoa beans. The operating idea is to insert in this equipment, by its top, trays containing the still fresh almonds, and in different time intervals, through a downflow mechanism, it removes for the part lower trays containing dry beans. Through the use of CAD / CAE technology, the geometries were optimized, the domains were discretized and the simulations were made using the finite element method, to a traditional barge, with an area occupied to drying equal the  $72m^2$ , and to the tower proposal, designed to occupy a physical space equivalent to  $1m^2$ . This vertical kiln shows significant benefits in relation to barge, providing better working conditions and a significant reduction the area required for drying almonds due to the valorization of its height in the creation step. The simulations show that the proposed tower offers convenient thermal responses, it can maintain peak temperatures inside for longer time (between 11h and 13h) and quickly reaches temperatures close  $50^{\circ}C$  against  $36^{\circ}C$  reaches for the barge, considering the same time interval simulation and similar initial and boundary conditions.

**Keywords:** Cad/cae technology, Solar energy, Vertical kiln, Grain dryer.

## Lista de figuras

Figura 1 – Desenvolvimento da camada limite na transferência de calor por convecção. . . . .	6
Figura 2 – Natureza direcional da radiação solar fora da atmosfera terrestre. . .	8
Figura 3 – Volume de controle infinitesimal. . . . .	11
Figura 4 – Barcaça. . . . .	14
Figura 5 – Componentes da barcaça que proporcionam o deslocamento da cobertura de zinco. . . . .	15
Figura 6 – Temperatura ambiente em função do tempo. . . . .	16
Figura 7 – Discretização para a simulação da barcaça. . . . .	17
Figura 8 – Distribuição de temperatura às 10h. . . . .	18
Figura 9 – Distribuição de temperatura às 12h. . . . .	19
Figura 10 – Distribuição de temperatura às 14h. . . . .	20
Figura 11 – Variação da temperatura com o tempo no ponto central da barcaça. .	20
Figura 12 – Estrutura do secador de grãos vertical em vista explodida. . . . .	21
Figura 13 – Detalhes do secador. . . . .	22
Figura 14 – Sistema de fluxo visto isoladamente. . . . .	23
Figura 15 – Interação entre o sistema de fluxo e as bandejas. . . . .	24
Figura 16 – Momento inicial com a torre preenchida. . . . .	24
Figura 17 – Abertura e travamento da alavanca. . . . .	25
Figura 18 – Suspensão das bandejas e retirada da última. . . . .	26
Figura 19 – Posicionamento inicial da alavanca. . . . .	26
Figura 20 – Realimentação da torre com a bandeja retirada. . . . .	27
Figura 21 – Considerações físicas sobre a simulação da torre. . . . .	28
Figura 22 – Discretização para a simulação da torre. . . . .	29
Figura 23 – Discretização para a simulação da torre. . . . .	30
Figura 24 – Malha de cálculo gerada para o campo de velocidade. . . . .	31
Figura 25 – Malha de cálculo gerada para o cálculo do campo de temperatura. .	31
Figura 26 – Distribuição de temperatura da torre sem as bandejas às 14h. . . . .	32
Figura 27 – Corte longitudinal da torre sem as bandejas às 14h. . . . .	33
Figura 28 – Distribuição de temperatura da torre com as bandejas às 14h . . . . .	33
Figura 29 – Corte longitudinal da torre com as bandejas às 14h. . . . .	34
Figura 30 – Variação de temperatura no ponto central da parte superior da torre em relação ao tempo. . . . .	35
Figura 31 – Distribuição de temperatura da torre sem as bandejas. . . . .	35
Figura 32 – Distribuição de temperatura da torre com as bandejas. . . . .	36
Figura 33 – Temperatura máxima em função da altura da torre. . . . .	36

Figura 34 – Distribuição de velocidade em $60s(m/s)$ . . . . .	37
Figura 35 – Distribuição de velocidade após $90s (m/s)$ . . . . .	38
Figura 36 – Distribuição de temperatura após $60s (^{\circ}C)$ . . . . .	39
Figura 37 – Distribuição de temperatura após $4min (^{\circ}C)$ . . . . .	39
Figura 38 – Queda de temperatura no interior da torre. . . . .	40
Figura 39 – Esquema do movimento do operário para a operação da torre de secagem de amêndoas de cacau. . . . .	59
Figura 40 – Comparativo entre os tempos padrões para cada modelo de secagem de sementes adotado . . . . .	62
Figura 41 – Configurações iniciais para o início das simulações. . . . .	63
Figura 42 – Organização dos nós gerados automaticamente em função das confi- gurações iniciais. . . . .	63
Figura 43 – a) Barcaça sobre um bloco de concreto; b) Torre sobre um bloco de concreto. . . . .	65
Figura 44 – Condições físicas expressas em um nó e 11 subnós. . . . .	66
Figura 45 – Opções de elementos de malha. . . . .	67
Figura 46 – a) Sistema da barcaça discretizado; b) Sistema da torre vertical com as bandejas discretizado. . . . .	68
Figura 47 – Geometria criada para a simulação. . . . .	69
Figura 48 – Condição inicial e condições de contorno definidas. . . . .	69
Figura 49 – Malha de cálculo criada automaticamente pelo <i>software</i> . . . . .	70

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Número e tipos de elementos para a discretização da geometria referente à barçaça . . . . .	18
Tabela 2 – Número e tipos de elementos para a discretização da geometria referente à torre . . . . .	29
Tabela 3 – Número e tipos de elementos para a discretização da geometria referente à torre . . . . .	30
Tabela 4 – Número e tipos de elementos para a discretização da geometria referente ao campo de velocidade . . . . .	31
Tabela 5 – Número e tipos de elementos para a discretização da geometria referente à torre . . . . .	32

## Lista de quadros

Quadro 1 – Valores típicos de coeficientes de transferência de calor por convecção.	7
Quadro 2 – Valores típicos de coeficientes de transferência de calor por radiação.	9
Quadro 3 – Propriedades dos materiais para a simulação da barçaça. . . . .	15
Quadro 4 – Quadro explicativo dos elementos do secador. . . . .	22
Quadro 5 – Propriedades dos materiais para a simulação da torre. . . . .	22
Quadro 6 – Elementos da operação e descrição. . . . .	56
Quadro 7 – Folha de observação em centésimos de horas. . . . .	56
Quadro 8 – Distribuição normal. . . . .	57
Quadro 9 – Coeficiente $d_2$ para o número de cronometragens iniciais. . . . .	57
Quadro 10 – Elementos da operação e descrição. . . . .	60
Quadro 11 – Quadro de tempos cronometrados em centésimos de horas. . . . .	60
Quadro 12 – Configurações do sistema utilizadas para realizar as simulações. . .	64

# Sumário

<b>1 – Introdução</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>2 – Transferência de calor e Equação da continuidade</b> . . . . .	<b>4</b>
2.1 Condução térmica . . . . .	4
2.2 Convecção . . . . .	5
2.3 Radiação solar . . . . .	8
2.4 Equação da continuidade . . . . .	10
<b>3 – Técnica tradicional de secagem: Barcaça</b> . . . . .	<b>14</b>
3.1 Definições físicas . . . . .	15
3.2 Discretização do domínio . . . . .	17
3.3 Resultados . . . . .	18
<b>4 – Secador de grãos vertical</b> . . . . .	<b>21</b>
4.1 Movimentação das bandejas . . . . .	23
4.1.1 Descrição do sequenciamento do fluxo das bandejas . . . . .	24
4.2 Sistema físico . . . . .	27
4.3 Discretização do domínio . . . . .	29
4.4 Resultados . . . . .	32
<b>5 – Conclusão</b> . . . . .	<b>41</b>
<b>Anexos</b>	<b>43</b>
<b>ANEXO A – Detalhes das equações diferenciais envolvidas nas simulações</b> . . . . .	<b>44</b>
A.1 Equação do calor . . . . .	44
A.2 Isolamento térmico . . . . .	44
A.3 Radiação solar . . . . .	44
A.4 Radiação entre superfícies . . . . .	45
A.5 Resfriamento convectivo . . . . .	46
A.6 Equações para o cálculo do campo de velocidade . . . . .	46
<b>Apêndices</b>	<b>48</b>
<b>APÊNDICE A – Detalhes das peças que compõem o secador proposto</b> . . . . .	<b>49</b>

A.1	Esqueleto - unidades em milímetros . . . . .	49
A.2	Barra lateral - unidades em milímetros . . . . .	50
A.3	Barra Traseira - unidades em milímetros . . . . .	51
A.4	Braço de alavanca - unidades em milímetros . . . . .	52
A.5	Bandeja - unidades em milímetros . . . . .	53
A.6	Bandejas empilhadas - unidades em milímetros . . . . .	54
<b>APÊNDICE B – Tempo padrão de operação entre a Barcaça e a Torre . . . . .</b>		<b>55</b>
B.1	Método de cálculo . . . . .	55
B.2	Avaliação da operação utilizando a Barcaça tradicional . . . . .	55
B.3	Avaliação da operação utilizando o Secador de Grãos vertical . . . . .	58
B.4	Avaliação da operação utilizando o Secador de grãos vertical com motor . . . . .	61
<b>APÊNDICE C – Simulações Multifísicas . . . . .</b>		<b>63</b>
C.1	Transferência de calor . . . . .	65
C.2	Efeitos convectivos . . . . .	68
<b>Referências . . . . .</b>		<b>71</b>

# 1 Introdução

Este trabalho teve origem na patente "Sol-Ar BR102012029537-7" e na patente "Fogão solar alternativo por reflexão de raios solares BR102012029555-5", produtos desenvolvidos por SALES, J. H. D. O e SANTOS, E. C. As técnicas desenvolvidas para estas patentes foram úteis no desenvolvimento do modelo geométrico simulado computacionalmente para um problema de otimização de secagem de grãos. Modelo este que é a proposta deste trabalho como alternativa à secagem tradicional à cultura cacauífera do sul da Bahia.

A cultura do cacau tem passado por fases de auge, com alta produtividade, mas também por fases de decadência, como a chegada da vassoura-de-bruxa na região, que reduziu em muito a produção, prejudicando também a qualidade das mesmas. Mesmo assim, esta cultura se caracteriza como uma importante atividade no sul da Bahia, tornando este estado o maior produtor do país (SALES et al., 2014b).

O trabalho de Silva et al. (2005) nos mostra a influência da Bahia e também da cidade de Ilhéus na cacauicultura, onde verifica-se que o estado é responsável por toda produção de cacau do Nordeste e por 69,9% da produção total brasileira. No Parque Industrial de Ilhéus processam-se 450 toneladas de amêndoas secas de cacau, o que gera 45 toneladas diárias de farelo.

A proporção aproveitável de subprodutos e resíduos do cacau é bastante expressiva, pois menos de 8% do peso do fruto do cacauífera, em estado normal de maturação, é usado pela indústria beneficiadora, valendo destacar que um fruto com peso médio de 500 g, é constituído de 80% de casca do fruto e 20% de semente (PIRES et al., 2005).

As amêndoas de cacau são secas e destinadas às indústrias processadoras que geram produtos como o liquor (chocolate amargo) e a manteiga de cacau (gordura). A estes produtos são acrescentados açúcar e outros ingredientes para se formar o chocolate que se conhece atualmente. Até chegar à fabricação do chocolate, alguns processos anteriores são necessários e a não padronização na execução das atividades iniciais (como a própria colheita) pode resultar em um chocolate com qualidade abaixo da esperada. Basicamente, após a colheita do cacau, são efetuadas as operações de abertura dos frutos, fermentação das sementes junto à polpa que as envolve, secagem e torração para obtenção da massa ou liquor de cacau, que será utilizado na obtenção de manteiga e pó de cacau, além de chocolates e produtos análogos (EFRAIM et al., 2010 apud BECKETT, 1994).

O estudo desenvolvido neste trabalho está diretamente relacionado a um processo específico dentre os supracitados, a secagem das amêndoas de cacau, que pode

ser feita naturalmente (utilizando a energia solar) ou de forma artificial (através da combustão), sendo esta última a forma mais agressiva ao meio ambiente. Um sistema tradicional de secagem, utilizado há anos é a Barcaça que são construções típicas constituídas por um lastro de madeira erguido sobre pilares de alvenaria e uma cobertura que desliza sobre trilhos. A cobertura, geralmente feita de chapas de alumínio corrugado ou de zinco, é afastada para expor as amêndoas ao sol e, quando fechada, protege contra chuva, sereno e calor excessivo. As amêndoas são espalhadas sobre o lastro da barcaça em uma camada uniforme com cerca de 5 cm de espessura. O revolvimento constante é feito com um rodo de madeira, principalmente no início da secagem, a fim de evitar aglomerados (OETTERER et al., 2006).

A motivação inicial para o desenvolvimento deste trabalho consiste no fato dos sistemas tradicionais de secagem de amêndoas de cacau (barcaças ou estufas), ocuparem uma área bastante expressiva para se obter uma produção lucrativa. Sendo assim, propõe-se neste trabalho um sistema alternativo para a secagem de grãos, em especial a secagem de amêndoas de cacau, que resolva o problema supracitado bem como garantir satisfatória eficiência de secagem.

O secador proposto trata-se de uma estufa verticalizada, composta por uma estrutura de aço carbono envolvida pelo chamado plástico agrícola, plástico especial que apresenta a característica de ser opaco para a radiação infravermelha em longos comprimentos de ondas (calor) e ser transparente para radiações mais energéticas (em curtos comprimentos de onda). Assim como no trabalho de Costa et al. (2004), o polietileno foi utilizado como material para representar o plástico agrícola.

Este secador deve ser preenchido por bandejas sobrepostas, cada uma contendo uma camada de amêndoas frescas de cacau, dispondo também de um sistema que torna possível um fluxo destas bandejas de cima para baixo. Este fluxo é possível devido a constante retirada das bandejas contendo amêndoas secas pela parte inferior do secador e a alimentação deste, a partir de uma abertura contida em sua parte superior, com bandejas contendo amêndoas frescas (SANTOS et al., 2013).

Assim os objetivos deste trabalho consistiram em calcular, a partir do Método dos Elementos Finitos, os campos de temperatura esperados para o produto proposto bem como para uma barcaça de dimensões 6m x 12m, com intuito principal de verificar as eficiências de secagem dos sistemas ao submetê-los às mesmas condições físicas. Devido aos efeitos convectivos que são esperados no ar interno à torre, calculou-se também os campos de velocidade esperados para este sistema em função de determinadas condições físicas (SALES et al., 2014c).

Os sistemas de CAD são bastante utilizados no desenvolvimento de projetos de Engenharia e Arquitetura. Os mesmos consistem em *softwares* voltados ao desenho técnico, reunindo diversas ferramentas destinadas aos mais variados fins. Muitos siste-

mas atuais trazem as tecnologias de CAD/CAE (*Computer Aided Design/Engineering*) e estas foram fundamentais em todo o processo de modelagem para alcançar os objetivos supracitados (SALES et al., 2014a).

Estas tecnologias são importantes ferramentas utilizadas pelas empresas, seja na redução de custos com protótipos, ou na garantia de uma melhor confiabilidade dos produtos garantindo que se utilize uma padronização no projeto possibilitando assim uma comunicação mais eficiente entre as diversas áreas (NITSCHKE; FILHO, 2002 apud AMARAL; TOLEDO, 1998).

Assim, ao longo dos capítulos serão abordados cada uma das principais fases de modelagem que se iniciou com a definição das geometrias (barcaça e secador vertical), definições dos modelos físicos utilizando as equações necessárias para cálculos de campos de temperatura e velocidade, criação das malhas de cálculo ou discretização dos domínios, e por último, as análises dos resultados. Dois *software* foram utilizados no desenvolvimento deste trabalho: o ©SolidWorks para a apresentação detalhada dos sistemas de secagem bem como os princípios de funcionamento dos mesmos, e o COMSOL Multiphysics® especificamente para as simulações de campos de temperatura, velocidades e resultados gráficos.

Em termos gerais este trabalho encontra-se apresentado em cinco capítulos, sendo o segundo capítulo uma revisão sobre transferência de calor e equação da continuidade, o terceiro capítulo uma abordagem sobre a técnica tradicional de secagem com o uso do sistema denominado barcaça, seguida dos resultados numéricos, o quarto capítulo a apresentação de um novo sistema de secagem na qual o produto proposto é mostrado partindo de sua definição geométrica, condições físicas, e resultados numéricos, e o último capítulo, reservado para as conclusões.

## 2 Transferência de calor e Equação da continuidade

O entendimento dos principais mecanismos de transferência de calor (condução, convecção e radiação) é fundamental na modelagem de sistemas, onde se deseja obter campos de temperaturas ou realizar estudos conjugados envolvendo calor e fluidos, sendo que, ambas as realidades estão contidas no escopo deste trabalho. Diante disto, este capítulo traz uma explanação sobre estes mecanismos de forma a apresentar definições e equações diretamente relacionadas à modelagem de uma barcaça bem como da torre vertical proposta.

### 2.1 Condução térmica

A condução de calor pode ser vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma determinada substância, devido às interações entre as mesmas. O secador proposto, bem como, as tradicionais barcaças serão submetidos à irradiação solar em um determinado intervalo de tempo. Desta forma, ambas as estruturas receberão energia térmica, seja diretamente do sol ou devido ao contato de uma determinada superfície com uma outra mais aquecida, promovendo o transporte de energia a partir do fenômeno em questão.

A Equação da difusão de calor, obtida a partir de conceitos ligados ao volume de controle, conservação de energia e lei de Fourier, é largamente utilizada para a obtenção de campos de temperatura considerando este fenômeno térmico. A equação 1 mostra sua forma geral em coordenadas cartesianas, considerando  $\rho$  constante.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

onde  $k$  é a condutividade térmica,  $T$  o campo de temperatura,  $q$  a taxa de geração de energia,  $\rho$  a massa específica,  $C_p$  a capacidade térmica e  $t$  o tempo. A condutividade térmica, a difusividade térmica e o calor específico são as propriedades físicas mais importantes para os cálculos térmicos (SANTOS et al., 2004).

Como os sistemas (barcaça e torre) submetidos à irradiação solar apresentam mais de um material, os quais serão descritos mais detalhadamente nos capítulos 3 e 4, tem-se diferentes respostas térmicas em cada um destes sistemas devido às diferentes propriedades físicas existentes. Além da consideração das propriedades termofísicas supracitadas, a Equação da difusão de calor apresenta o termo " $q$ " correspondendo a uma taxa de geração de energia por unidade de volume, energia esta que na realidade

deste trabalho é a gerada pelas faces da torre ou da barcaça expostas à irradiação solar devido ao aquecimento, funcionando então como fontes térmicas que transmitirão esta energia aos domínios adjacentes por condução (INCROPERA, 2003).

## 2.2 Convecção

A transferência de calor por convecção abrange dois mecanismos. Além de transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório (difusão), a energia também é transferida através do movimento global, ou macroscópico, do fluido. Esse movimento de fluido está associado ao fato que, em um instante qualquer, um grande número de moléculas estão se movendo coletivamente ou como agregado de moléculas. Tal movimento, na presença de um gradiente de temperatura, contribui para a transferência de calor. Como as moléculas nos seus agregados mantêm seus movimentos aleatórios, a transferência total de calor é, então, devida a superposição do transporte de energia pelo movimento aleatório das moléculas com o transporte devido ao movimento global do fluido. É comum usar o termo convecção para fazer referência a esse transporte cumulativo e o termo advecção para fazer referência ao transporte devido ao movimento global do fluido.

Considere o escoamento de um fluido sobre a superfície aquecida da figura 1, uma consequência da interação entre o fluido e a superfície é o desenvolvimento de uma região no fluido através da qual sua velocidade varia entre zero, no contato com a superfície  $y = 0$ , e um valor limite  $u_\infty$ , associado ao escoamento global. Essa região do fluido é conhecida como camada limite hidrodinâmica ou de velocidade. Além disso, se as temperaturas da superfície e do fluido forem diferentes, existirá uma região no fluido através da qual a temperatura variará de  $T_s$  em  $y = 0$  até  $T_\infty$ , associada a região do escoamento afastada da superfície. Essa região, conhecida como camada limite térmica, pode ser menor, maior ou ter o mesmo tamanho daquela através da qual a velocidade varia. Em qualquer caso, se  $T_s > T_\infty$ , a transferência de calor por convecção se dará desta superfície para o fluido em escoamento.

A transferência de calor por convecção é mantida pelo movimento molecular aleatório e pelo movimento global do fluido pela camada no interior da camada limite. A contribuição devido ao movimento molecular aleatório (difusão) é dominante próximo à superfície, onde a velocidade de fluido é baixa. Na verdade, na interface entre a superfície e o fluido  $y = 0$ , a velocidade do fluido é nula e o calor é transferido somente através deste mecanismo. A contribuição do movimento global do fluido origina-se no fato de que a espessura da camada limite cresce à medida que o escoamento progride na direção do eixo  $x$ . Nesse sentido o calor que é conduzido para o interior desta camada é arrastado na direção do escoamento, sendo posteriormente transferido para o fluido

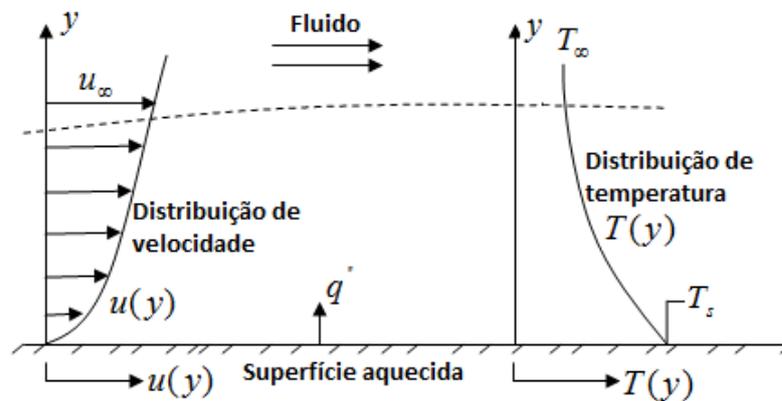


Figura 1 – Desenvolvimento da camada limite na transferência de calor por convecção.

Fonte: Autoria própria.

que se encontra no exterior da camada limite. O estudo e a observação dos fenômenos relacionados com as camadas limites são essenciais para a compreensão da transferência de calor por convecção.

A transferência de calor por convecção pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento do fluido. Refere-se à convecção forçada quando o escoamento é causado por meios externos, tais como um ventilador, uma bomba, ou ventos atmosféricos e a convecção livre (ou natural), quando o escoamento do fluido é induzido por forças de empuxo, que são originadas a partir de diferenças de densidades (massas específicas) causadas por variações de temperatura do fluido.

Independentemente da natureza específica do processo de transferência de calor por convecção, a equação apropriada para o fluxo de calor possui a forma da equação 2.

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

onde  $q''$ , fluxo de calor por convecção ( $W/m^2$ ), é proporcional à diferença entre as temperaturas da superfície e do fluido,  $T_s$  e  $T_\infty$ , respectivamente. A equação 2 é conhecida como lei do resfriamento de Newton, e o parâmetro  $h(W/m^2K)$  é chamado de coeficiente de transferência de calor por convecção. Ele depende das condições da camada limite, as quais por sua vez, são influenciadas pela geometria da superfície, pela natureza do escoamento do fluido e por uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte de fluido. Esta descreve a forma como um reservatório finito de calor (sistema) é resfriado perdendo calor para um reservatório infinito (meio ambiente), ao longo do tempo (SILVA et al., 2003).

A lei do resfriamento de Newton foi aplicada às partes expostas dos sistemas (torre e barça) no sentido de quantificar as perdas de calor devido às forças dos ventos. Neste trabalho os efeitos convectivos estão relacionados a esta perda de calor, onde a

equação 2 foi utilizada para considerar esta condição, com  $h = 25(W/m^2K)$ . O quadro 1 mostra os valores típicos para o coeficiente  $h$  (INCROPERA, 2003).

Quadro 1 – Valores típicos de coeficientes de transferência de calor por convecção.

<b>Processos</b>	$h(W/m^2K)$
Convecção Natural.	
Gases.	2 a 25
Líquidos.	50 a 1000
Convecção forçada.	
Gases.	25 a 250
Líquidos.	100 a 20000
Convecção com mudança de fase.	
Ebulição ou condensação.	2500 a 100000

Fonte: Incropera (2003)

## 2.3 Radiação solar

O sol consiste na principal fonte de energia para que a estufa proposta atinja os objetivos esperados. Trata-se de uma fonte de radiação aproximadamente esférica que tem  $1,39.10^9 m$  de diâmetro e está localizada a  $1,50.10^{11} m$  da terra.

Para uma superfície horizontal fora da atmosfera da terra, a radiação solar se comporta como um feixe de raios aproximadamente paralelos que formam um ângulo  $\theta$ , o ângulo zênite, relativo à superfície normal, como mostra a figura 2. (INCROPERA, 2003).

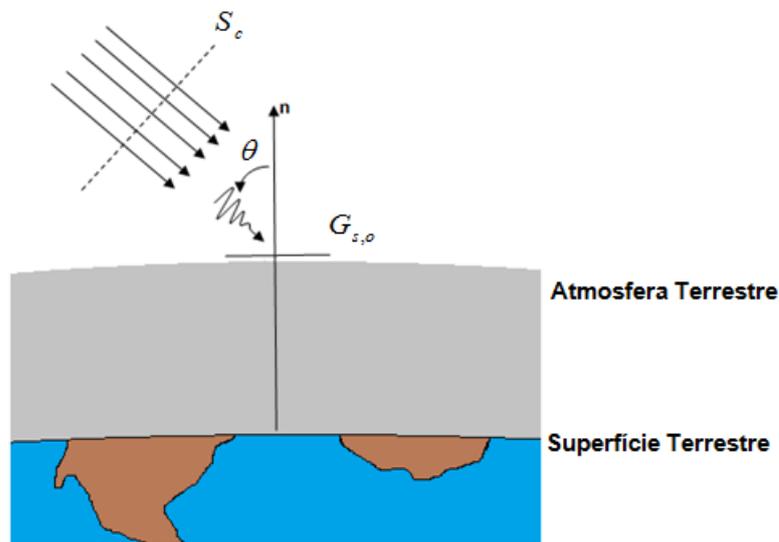


Figura 2 – Natureza direcional da radiação solar fora da atmosfera terrestre.

Fonte: Autoria própria.

A irradiação solar extraterrestre  $G_{s,o}$  depende da latitude geográfica, assim como do período do dia e do ano, dentre outros (CHUERUBIM, 2012). Ela pode ser determinada a partir da equação 3:

$$G_{s,o} = S_c f \cos \theta \quad (3)$$

onde  $S_c = 1353 W/m^2$ , a constante solar, é o fluxo de energia solar incidente sobre uma superfície orientada na direção normal aos raios do sol, quando a terra se encontra em sua distância média do sol. A grandeza  $f$  é um pequeno fator de correção para levar em conta a excentricidade da órbita da terra em torno do sol cujo valor aproximado está entre 0,97 e 1,03 (INCROPERA, 2003).

No trabalho de Neto et al. (2009) pode-se verificar que a radiação solar incidente ao nível do solo em algumas regiões do Brasil pode reduzir drasticamente em relação ao valor de  $S_c$ . No estado do Ceará, por exemplo, foi estimado um valor médio anual de

$215W/m^2$ . Já o trabalho de [Pinto et al. \(2010\)](#) mostra valores mais elevados de radiação solar incidente no Brasil, neste caso variando de  $725W/m^2$  a  $1076W/m^2$ , considerando a variação de nebulosidade em um determinado período.

Formas de comprimentos longos de ondas da radiação ambiental incluem a emissão da superfície da terra, assim como a emissão de certos constituintes atmosféricos. O poder emissivo associado com a superfície da terra pode ser calculado através da Equação de Stefan-Boltzmann:

$$E = \epsilon\sigma T^4 \quad (4)$$

onde  $\epsilon$ ,  $T$  e  $\sigma$  são a emissividade da superfície, a temperatura e a constante de Stefan-Boltzmann= $5,6710^{-8}Wm^{-2}K^{-4}$ , respectivamente. As emissividades são geralmente próximas à unidade, a da água, por exemplo, é aproximadamente 0,97. Uma vez que as temperaturas variam tipicamente na faixa de 250 a 320K, a emissão é concentrada na região espectral de aproximadamente  $4\mu m$  a  $40\mu m$ , com o pico ocorrendo em aproximadamente  $10\mu m$  ([INCROPERA, 2003](#)).

Vale ressaltar que os valores das propriedades espectrais de uma superfície para pequenos comprimentos de ondas podem ser diferentes dos valores para comprimentos de ondas mais altos. Uma vez que a radiação solar é concentrada na região de baixo comprimento de onda do espectro e que a emissão da superfície se encontra em comprimentos de ondas mais elevados, segue que muitas superfícies podem não ser aproximadas como cinzentas em sua resposta a irradiação solar. Em outras palavras, a absorptância solar (energia absorvida) de uma superfície  $\alpha_s$  pode diferir da sua emissividade (emissão de energia)  $\epsilon$  ([INCROPERA, 2003](#)).

Os valores de emissividade a temperaturas moderadas são apresentados no quadro 2 para superfícies representativas.

Quadro 2 – Valores típicos de coeficientes de transferência de calor por radiação.

Superfície	$\alpha_s$	$\epsilon(300K)$	$\alpha/\epsilon$
Filme de alumínio evaporado.	0,09	0,03	3
Quartzo fundido sobre filme de alumínio.	0,19	0,81	0,24
Pintura branca em substrato metálico.	0,21	0,96	0,22
Pintura negra em substrato branco.	0,97	0,97	1
Aço inoxidável, conforme recebido, fosco.	0,5	0,21	2,4
Tijolo vermelho.	0,63	0,93	0,68
Pele branca(raça branca).	0,62	0,97	0,64
Neve.	0,28	0,97	0,29
Palha de milho.	0,76	0,97	0,78

Fonte: [Incropera \(2003\)](#)

Observa-se que a razão  $\alpha/\epsilon$  é um parâmetro importante para a engenharia.

Pequenos valores são desejados se a superfície tiver a finalidade de rejeitar calor; valores maiores são necessários se a superfície for do tipo coletora de energia solar (INCROPERA, 2003).

O fenômeno de "radiações entre as superfícies" também foi considerado na modelagem dos sistemas. A irradiação solar ao incidir nas superfícies expostas da estufa, fornecerá energia principalmente às bandejas contidas na torre, que emitirão também radiação em forma de calor às superfícies próximas. Sendo assim o conceito de fator de forma torna-se uma importante variável a ser considerada no trabalho pois a energia recebida pelas superfícies (oriunda de outras superfícies) depende diretamente das formas geométricas relacionadas. O fator de forma  $F_{ij}$  é definido como a fração da radiação que deixa a superfície  $i$  que é interceptada pela superfície  $j$ , como mostra a equação 5.

$$F_{ij} = \frac{q_{i \rightarrow j}}{A_i J_i} \quad (5)$$

sendo  $q_{i \rightarrow j}$  a taxa total na qual a radiação deixa a superfície  $i$  e é interceptada por  $j$ ,  $A$  a área e  $J$  a radiosidade.

Há uma significativa variação no formato da equação 5 a depender das formas geométricas consideradas, e para os modelos simulados neste trabalho, as equações em sua forma generalizada estão apresentadas no Anexo A.

## 2.4 Equação da continuidade

Esta seção abordará equações ligadas aos cálculos do campo de velocidade esperado no interior da torre, uma vez que espera-se um movimento ascendente de fluido (ar) devido às diferenças de temperatura.

Inicialmente será aplicada a conservação da massa a um volume pequeno de um escoamento. Considerando o fluxo de massa através de cada face do volume de controle fixo infinitesimal mostrado na figura 3, fixando o fluxo de massa líquido que entra no elemento como sendo a taxa de variação da massa do elemento e considerando que não há geração de massa, tem-se

$$\dot{m}_{enter} - \dot{m}_{saida} = \frac{\partial}{\partial t} m_{elemento} \quad (6)$$

Para fazer um balanço de massa identifica-se  $\rho u$ ,  $\rho v$  e  $\rho w$  no centro do elemento  $e$ , então, trata-se cada uma dessas quantidades como uma variável única. A figura 3

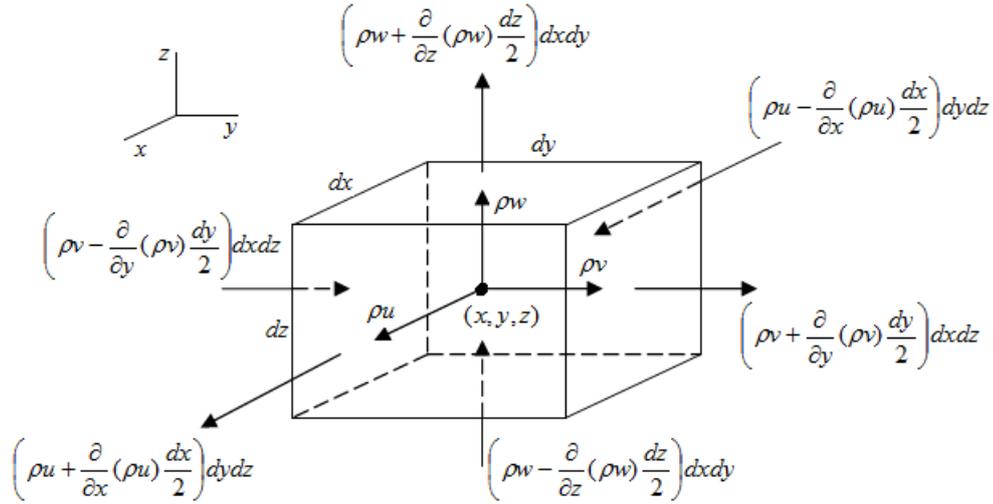


Figura 3 – Volume de controle infinitesimal.

Fonte: Autoria própria.

mostra o fluxo de massa através de cada uma das seis faces. Assim a equação 6 pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} & \left[ \rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{dx}{2} \right] dy dz - \left[ \rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{dx}{2} \right] dy dz \\ & + \left[ \rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{dy}{2} \right] dx dz - \left[ \rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{dy}{2} \right] dx dz \\ & + \left[ \rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{dz}{2} \right] dx dy - \left[ \rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{dz}{2} \right] dx dy \\ & = \frac{\partial}{\partial t}(\rho dx dy dz) \end{aligned} \quad (7)$$

Subtraindo os termos apropriados e dividindo por dx, dy e dz, tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (8)$$

Derivando os produtos tem-se:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (9)$$

ou, em termos de derivada substancial:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (10)$$

Essa é a forma mais geral da Equação da continuidade expressa em coordenadas retangulares. Pode-se introduzir o operador gradiente, que em coordenadas retangulares corresponde a:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{\mathbf{i}} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{\mathbf{j}} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{\mathbf{k}} \quad (11)$$

Essa equação da continuidade pode então ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (12)$$

em que  $\mathbf{V} = u\hat{\mathbf{i}} + v\hat{\mathbf{j}} + w\hat{\mathbf{k}}$  e  $\nabla \cdot \mathbf{V}$  é chamado divergente de velocidade.

Essa forma da equação da continuidade não se refere a nenhum sistema de coordenadas particular. É a forma usada para expressar a equação da continuidade em diferentes sistemas de coordenadas.

Muitos fluidos exibem uma relação linear entre as componentes da tensão e o gradiente de velocidade. Tais fluidos são chamados fluidos Newtonianos e incluem os fluidos comuns tais como água, óleo e ar. Se, além da linearidade, requer-se que o fluido seja isotrópico, é possível relacionar as componentes da tensão e os gradientes de velocidade usando apenas duas propriedades do fluido, a viscosidade  $\mu$  e o segundo coeficiente de viscosidade,  $\lambda$ . As relações tensão-gradiente da velocidade, muitas vezes chamadas equações constitutivas, são enunciadas como segue:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= -p + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \nabla \cdot \mathbf{V} & \tau_{xy} &= \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \sigma_{yy} &= -p + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \nabla \cdot \mathbf{V} & \tau_{xz} &= \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \sigma_{zz} &= -p + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \nabla \cdot \mathbf{V} & \tau_{yz} &= \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

Para muitos gases e principalmente para os gases monoatômicos, o segundo coeficiente da viscosidade é relacionado à viscosidade por:

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu \quad (14)$$

uma condição conhecida como a hipótese de Stokes. Com essa relação, a média negativa das três tensões normais é igual à pressão, isto é:

$$-\frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) = p \quad (15)$$

Usando as equações 13 pode-se mostrar que isso é sempre verdade para um líquido no qual  $\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$  e, com a hipótese de Stokes, também é verdade para um gás.

Substituindo as equações constitutivas nas equações diferenciais da quantidade de movimento, usando a hipótese de Stokes, tem-se:

$$\begin{aligned} \rho \frac{Du}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ \rho \frac{Dv}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ \rho \frac{Dw}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

em que considera-se um fluido homogêneo, isto é, as propriedades do fluido (por exemplo, a viscosidade) são independentes da posição.

As equações 12 e 16 foram resolvidas discretamente no intuito de se estimar o campo de velocidade previsto no interior da torre (POTTER et al., 2004).

### 3 Técnica tradicional de secagem: Barcaça

Esta seção apresentará as funcionalidades e a definição geométrica de uma barcaça típica a partir do uso de ferramenta de CAD/CAE, discretização dos domínios relacionados, bem como, realização das simulações para a estimativa do campo de temperatura no sistema através do Método dos Elementos Finitos.

Após a etapa de fermentação, as amêndoas são secas devido a exposição à radiação solar, e as barcaças estão incluídas entre os mais tradicionais equipamentos destinados a esta etapa. A estrutura é composta de um lastro de madeira (que pode ser Paparaíba, Pequi amarelo, Pau d'arco dentre outras), onde as amêndoas são acondicionadas, e de uma cobertura móvel de zinco. Nos horários de sol forte (das 10h às 14h) a cobertura deve ser fechada para que o cacau fique na sombra, possibilitando uma secagem mais prolongada e eficiente (FERREIRA et al., 2013). A figura 4 mostra detalhes de uma barcaça típica.

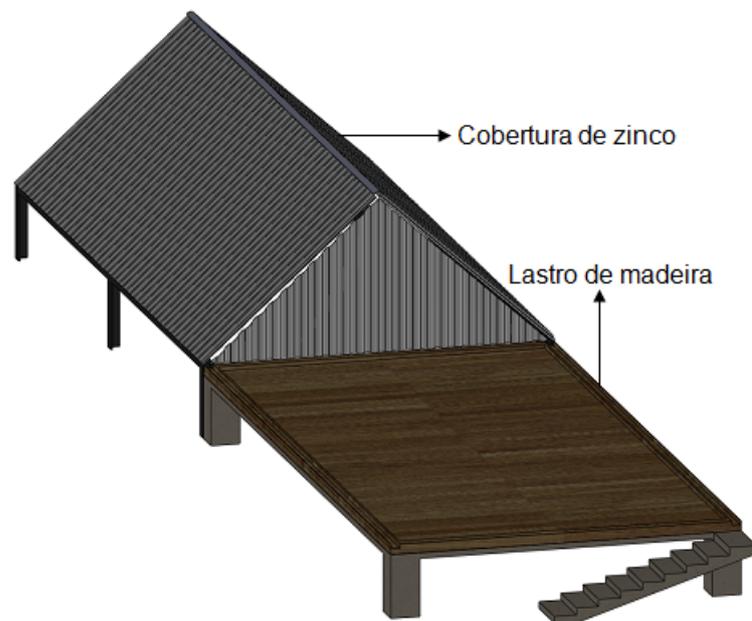


Figura 4 – Barcaça.

Fonte: Autoria própria.

Para a realização das simulações referentes à barcaça, foram considerados os materiais do quadro 3 com suas respectivas propriedades físicas.

A mobilidade da cobertura de zinco também é importante em dias chuvosos, protegendo as amêndoas e garantindo a manutenção da produção. Este deslocamento é possível graças aos trilhos nas laterais da barcaça bem como a própria extensão da

Quadro 3 – Propriedades dos materiais para a simulação da barçaça.

Propriedades	Madeira de pinheiro	Concreto
Capacidade térmica [ $J/(kg.K)$ ].	2000	900
Densidade [ $kg/m^3$ ].	930	2300
Condutividade térmica [ $W/(m.K)$ ].	0,13	1,8
Emissividade.	0,5	0,95

Fonte: [Incropera \(2003\)](#)

mesma como mostra a figura 5.



Figura 5 – Componentes da barçaça que proporcionam o deslocamento da cobertura de zinco.

Fonte: Autoria própria.

As barçaças podem ter dimensões de 3m x 6m, 8m x 8m ou 6m x 12m, sua altura do solo pode variar bastante em função das conveniências do proprietário do sistema, e o revolvimento das amêndoas é realizado com rodo de madeira, afim de promover a secagem homogênea e evitar a aglomeração das mesmas. Na barçaça, o cacau é espalhado em camadas de 3 a 6 mm de espessura, a depender da quantidade colhida e das condições climáticas. Isto equivale a uma carga que varia de 25kg a 40kg de cacau úmido por metro quadrado ([BEGIATO et al., 2009](#)).

### 3.1 Definições físicas

Este tópico se refere aos dados de entrada exigidos pelo *software* de simulação para que seja possível a resolução das equações diferenciais considerando as definidas condições iniciais e de contorno. Para a simulação da barçaça foram consideradas

informações relacionadas a localização de Ilhéus, como segue: latitude 14,789 sul, longitude 39,0494 oeste e fuso horário -3 horas. O dia considerado foi 16 de Março de 2014. Com estas informações o *software* utilizado calculou a posição solar fornecendo assim o campo de temperatura que se quer no momento desejado. A irradiância solar foi considerada, hipoteticamente, equivalente a  $400(W/m^2)$ . Esta irradiação solar promove o aquecimento do sistema e funciona como entrada para as equações relacionadas a troca de radiações entre as superfícies, assunto já abordado na seção 2.3.

A barcaça foi submetida a uma temperatura ambiente que varia ao longo do dia de acordo com a equação 17 cujo gráfico da função é mostrado na figura 6.

$$T = 27 + 3\cos\left[\frac{\pi}{12}(t - 14)\right] \quad (17)$$

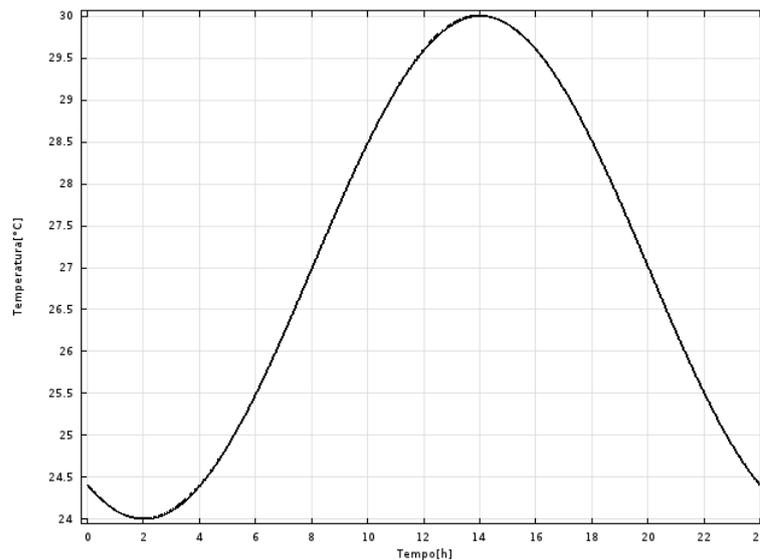


Figura 6 – Temperatura ambiente em função do tempo.

Fonte: Autoria própria.

A condição de isolamento térmico foi definida nas 4 faces equivalentes à espessura do bloco de concreto, que consiste em um paralelepípedo que sustenta a barcaça, o qual esta ilustrado com mais detalhes na figura 7.

O fluxo de calor convectivo também foi considerado na modelagem do sistema, ou seja, o resfriamento das superfícies expostas oriundo da força dos ventos. Este fluxo de calor consiste na aplicação da lei do Resfriamento de Newton abordado no tópico 2.2.

Na geometria submetida à simulação (figura 7), a temperatura 1m abaixo do solo no plano oposto ao plano em que se encontra a barcaça foi definida como  $25^{\circ}C$  (COMSOL, 2015).

## 3.2 Discretização do domínio

Com a geometria concluída bem como a definição do sistema físico relacionado, é necessário a criação da malha de cálculo (discretização do domínio), como mostra a figura.7, para que as equações diferenciais parciais sejam resolvidas a partir do método dos elementos finitos que consiste em um método matemático, no qual um meio contínuo é discretizado (subdividido) em elementos que mantêm as propriedades de quem os originou. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos para que sejam obtidos os resultados desejados (LOTT et al., 2006 apud MCGUINNESS et al., 1992).

O método dos elementos finitos foi introduzido por engenheiros para aplicações específicas, restritas ao cálculo estrutural. Porém, o conceito se expandiu, hoje é usado extensivamente (frequentemente integrado à sistemas CAD/CAE) para problemas de mecânica dos fluidos, engenharia nuclear, eletromagnetismo, propagação de ondas, espalhamento, condução de calor, processo de convecção e difusão, circuitos integrados e muitas outras áreas (JOHNSON, 1987).

Houve a necessidade de aumentar o número de nós no domínio referente ao concreto, devido a limitações de recursos computacionais e pelo motivo da superfície de interesse para a análise do campo de temperatura ser aquela onde as amêndoas são acondicionadas. A malha de todo o sistema foi gerada automaticamente e está ilustrada na figura 7.

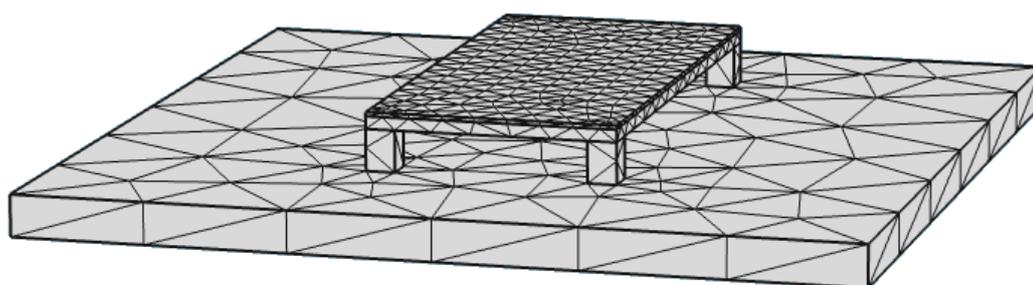


Figura 7 – Discretização para a simulação da barcaça.

Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado na figura 7 a geometria considerada para a simulação da barcaça foi simplificada, ou seja, houve a remoção do teto e da extensão do sistema para a redução de esforço computacional. Esta simplificação foi necessária também pelos dois motivos supracitados, ligados aos princípios objetivos das simulações e a redução de esforços computacionais.

As características da malha para a geometria referida se encontram na tabela 1.

Tabela 1 – Número e tipos de elementos para a discretização da geometria referente à barcaça.

Tipo de elemento	Número de elementos
Tetraédrico	2242
Triangular	1422
Aresta	248
Vértice	49

### 3.3 Resultados

Esta seção apresentará os resultados para a barcaça em função das definições anteriores, ou seja, consiste nas plotagens dos campos de temperatura gerado pelo sistema nos períodos de interesse. Estes resultados são fundamentais no sentido de permitir a comparação das respostas térmicas entre os dois equipamentos simulados (torre e barcaça) submetidos a semelhantes condições físicas. O tempo total de processamento para a plotagem dos campos foi equivalente a 7 minutos e 55 segundos.

Definidas as condições iniciais e de contorno para a barcaça, vistas anteriormente, foram calculados numericamente os campos de temperatura às 10 horas, ao meio-dia e às 14 horas, como mostram as figuras 8, 9 e 10, utilizando um controle de erro absoluto a uma tolerância de  $10^{-3}$  para as variáveis temperatura e radiossidade.

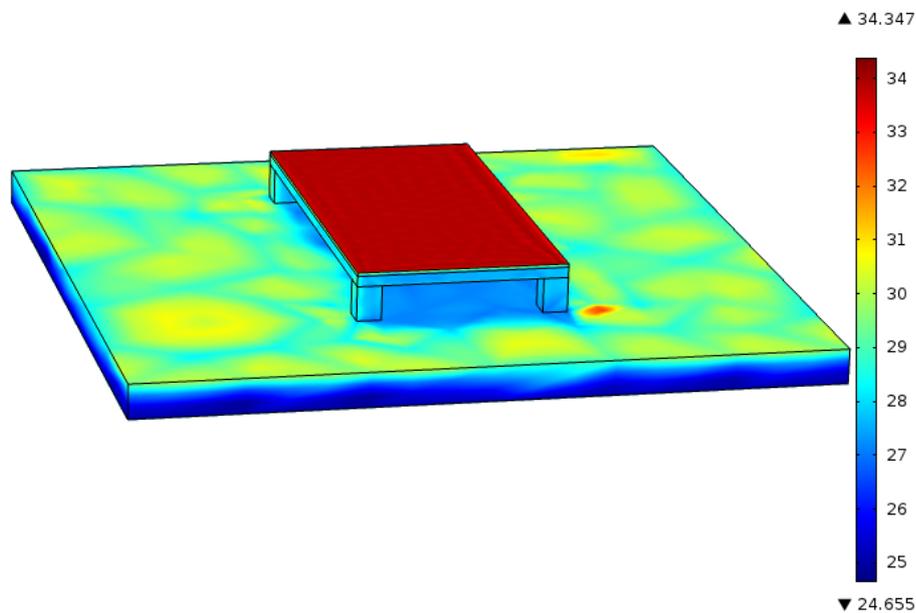


Figura 8 – Distribuição de temperatura às 10h.

Fonte: Autoria própria.

A figura 8 mostra o campo de temperatura obtidos pela barcaça às 10h da manhã. Nela pode-se verificar que um pico de temperatura de  $34^{\circ}\text{C}$  é atingido na região onde

as amêndoas são espalhadas, mostrando que o material equivalente retém uma maior quantidade de energia em relação ao concreto.

A madeira de pinheiro apresenta uma capacidade térmica maior e como esta propriedade física se relaciona de forma inversamente proporcional à variação de temperatura, pode-se verificar a coerência do resultado que mostra uma retenção maior de energia da madeira em relação ao concreto.

O fato da madeira de pinheiro estar exposta a irradiação solar também intensifica o campo de temperatura e pode-se perceber a queda da mesma na parte oposta a superfície referida, mostrando ainda os efeitos de sombreamentos na plotagem.

O campo de temperaturas obtido ao meio-dia apresenta um significativo aumento em relação ao campo obtido às 10h na face cujo material é a madeira de pinheiro, chegando a um pico de  $36^{\circ}\text{C}$ , como mostra a figura 9, uma diferença de aproximadamente  $2^{\circ}\text{C}$ .

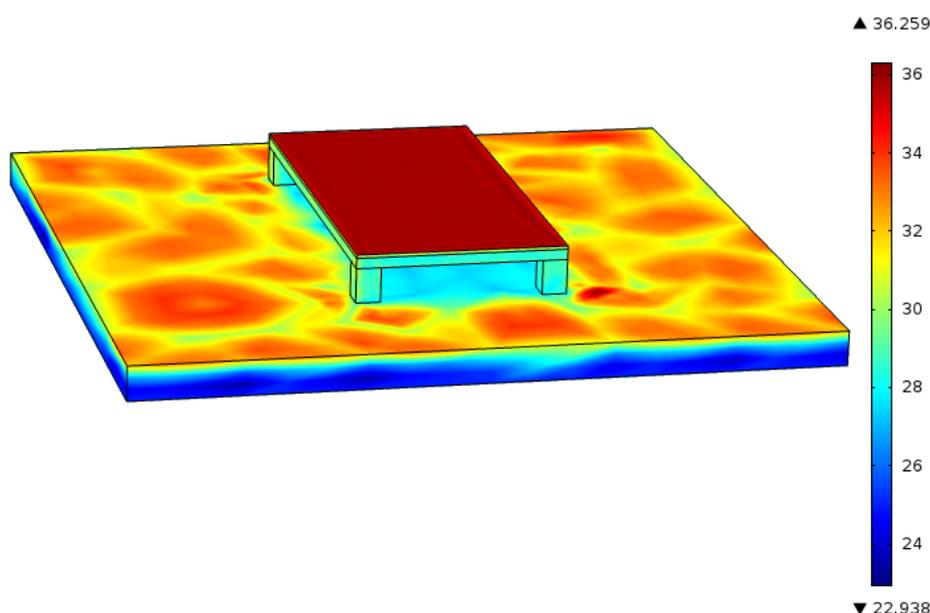


Figura 9 – Distribuição de temperatura às 12h.

Fonte: Autoria própria.

O campo de temperatura apresentado na figura 9 apresenta as mesmas características do apresentado na figura 8, no que diz respeito à exposição a radiação solar e às diferenças de capacidade térmica, porém, percebe-se nesta simulação temperaturas maiores no sistema, bem como uma distribuição de temperatura mais uniforme no bloco de concreto no qual a barcaça é acondicionada.

A figura 10 mostra uma variação praticamente insignificante nos picos de temperatura de 12h para às 14h, onde verifica-se uma uniformização da temperatura ao longo dos domínios ainda melhor em relação à plotagem da figura 9.

Este resultado mostra uma estabilidade de temperatura em relação a plotagem anterior. Percebe-se que o sistema atinge máximas temperaturas, cerca de 36°C, aproximadamente entre 12 e 14 horas. A figura 11 apresenta um perfil gráfico de variação de temperatura ao longo do dia no ponto central da barcaça, e percebe-se uma queda de temperatura a partir de aproximadamente 12h, com um pico próximo de 36°C.

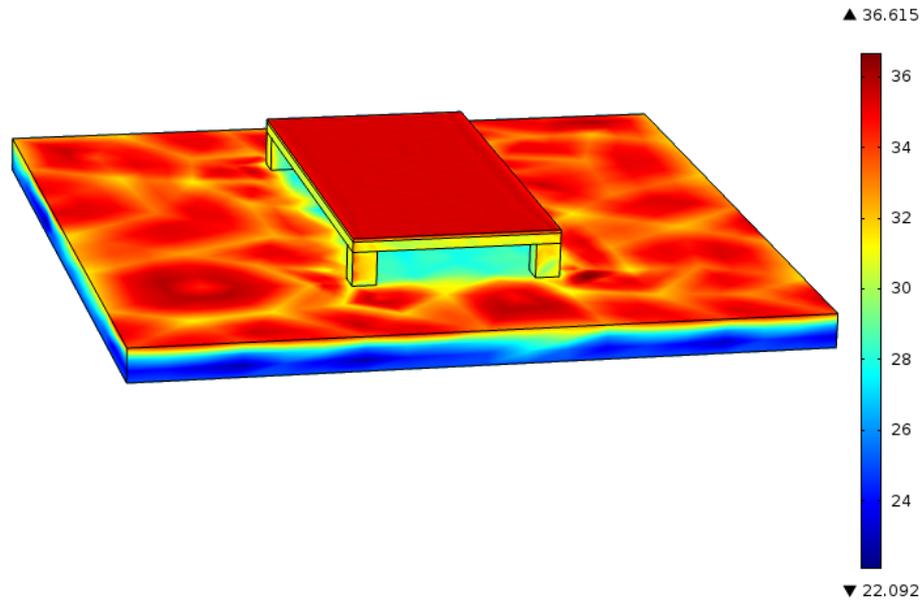


Figura 10 – Distribuição de temperatura às 14h.

Fonte: Autoria própria.

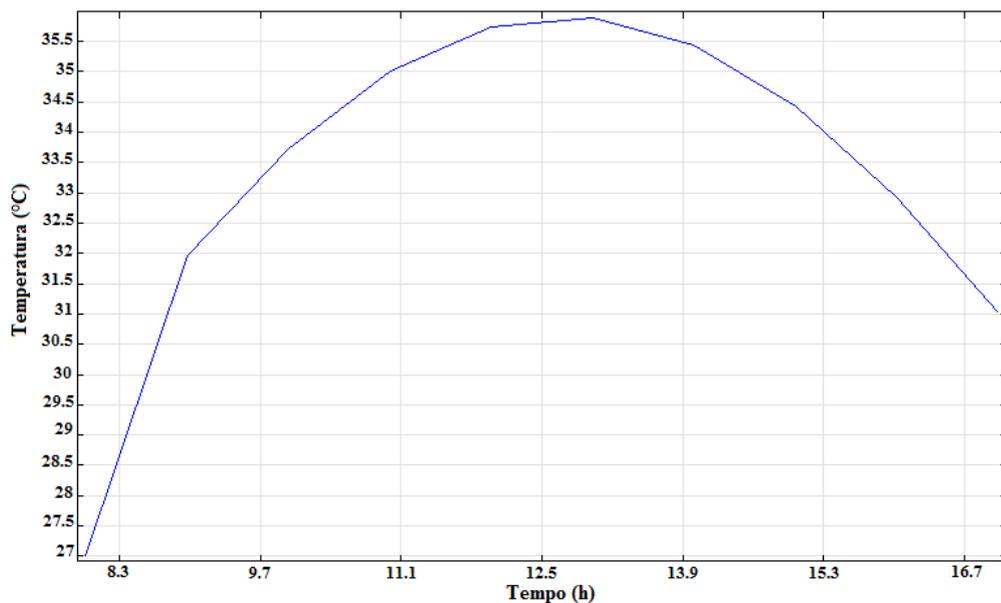


Figura 11 – Variação da temperatura com o tempo no ponto central da barcaça.

Fonte: Autoria própria.

## 4 Secador de grãos vertical

Esta seção apresentará a definição geométrica do secador proposto, bem como seus subsistemas a partir do uso de ferramenta de CAD/CAE. Com a mesma foi possível discretizar os domínios relacionados, bem como realizar as simulações para a estimativa do campo de temperatura no sistema. A abordagem que será dada ao produto neste capítulo não abrangerá aprofundados estudos mecânicos ligados a análise numérica de tensões ou deformações, mas sim à estrutura do mesmo, seu princípio de funcionamento e resposta térmica que este pode atingir quando submetido a determinadas condições físicas.

O modelo proposto é uma estufa especial disposta verticalmente, como mostram as figura 12 e 13 em escala 1:20 com as dimensões em metros, e se encontra em processo de patente cujo número de postagem é SK 101014998 BR. A figura 12 em especial mostra a estrutura da torre, em sua vista explodida, da forma em que foi concebida, identificando a posição de cada elemento que faz parte da mesma, e o quadro 4 mostra os nomes dados a cada elemento para que seja possível explicar mais claramente mecanismos importantes de funcionamento do sistema.

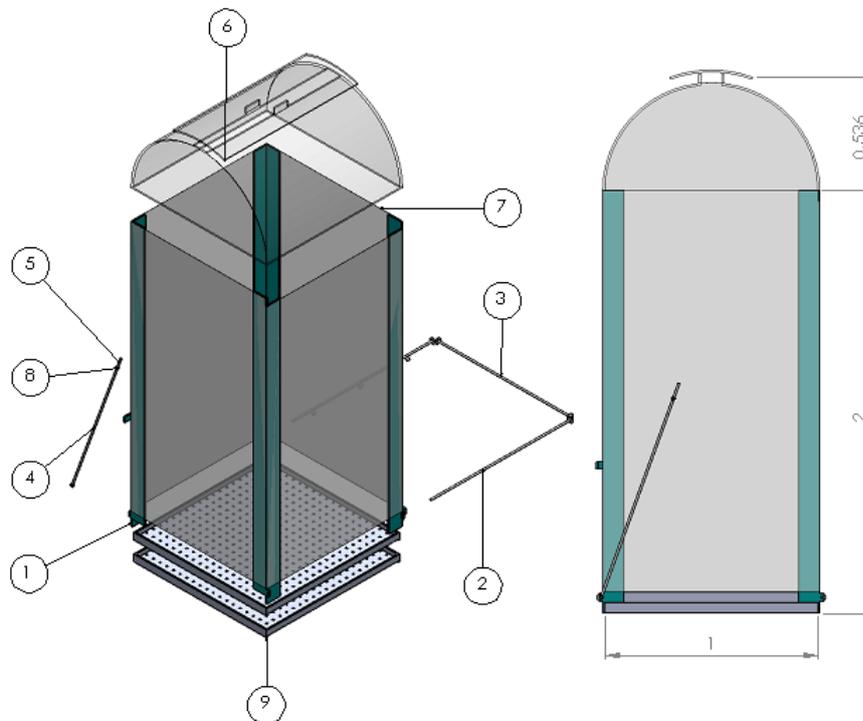


Figura 12 – Estrutura do secador de grãos vertical em vista explodida.

Fonte: Autoria própria.

Quadro 4 – Quadro explicativo dos elementos do secador.

Número do ítem	Nome da peça
1	Esqueleto
2	Barra lateral
3	Barra de transmissão do movimento
4	Braço de alavanca
5	Mão de alavanca
6	Teto do secador
7	Filme de Polietileno
8	Pino
9	Bandeja

Fonte: Autoria própria.

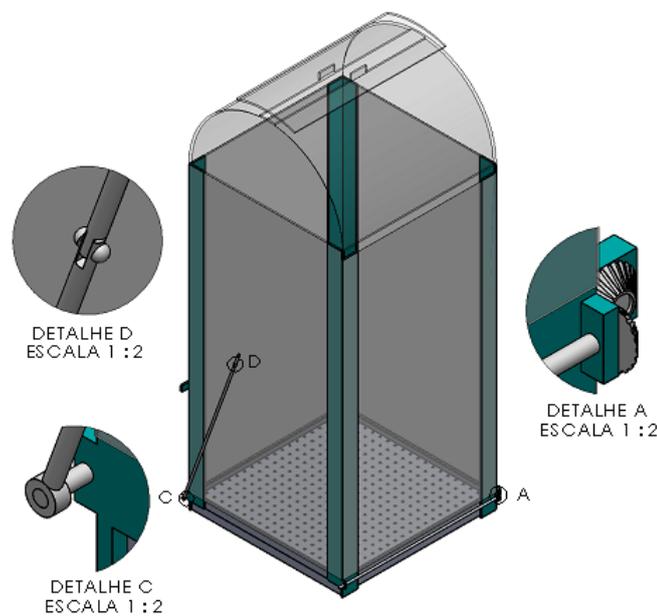


Figura 13 – Detalhes do secador.

Fonte: Autoria própria.

Para a realização das posteriores simulações referente a estufa proposta considerou-se os materiais do quadro 5 com suas respectivas propriedades:

Quadro 5 – Propriedades dos materiais para a simulação da torre.

Propriedades	Polietileno	Concreto	Alumínio
Capacidade térmica [ $J/(kg.K)$ ].	1900	900	900
Densidade [ $kg/m^3$ ].	930	2300	2700
Condutividade térmica [ $W/(m.K)$ ].	0,38	1,8	160
Emissividade.	0,5	0,95	0,05

Fonte: [Incropera \(2003\)](#).

As propriedades do material "Ar" variam de acordo com a mudança de outras variáveis, como pressão e temperatura.

A estufa foi preenchida com bandejas contendo amêndoas de cacau, e em sua parte inferior existia um sistema que permite o fluxo destas bandejas de cima para baixo, composto por uma alavanca, duas barras laterais rotativas, e uma outra barra na parte traseira da torre para proporcionar a sincronização do movimento.

A alavanca é presa em uma das barras laterais da torre, como mostra a figura 13 detalhe C, e quando aberta, estas barras giram nos sentidos horário ou anti-horário e em sincronia devido à contribuição do eixo de transmissão de movimento que contém duas engrenagens tipo cônica em suas extremidades.

## 4.1 Movimentação das bandejas

A ideia é que inicialmente a torre esteja preenchida completamente com as bandejas, (total de 40) estando somente a bandeja do topo preenchida com os grãos a serem secos, e o restante das bandejas vazias. Através do sistema formado pela alavanca, barras laterais, e barra de transmissão, haverá um fluxo das bandejas de cima para baixo, acionado quando se abre a alavanca. Este mecanismo permite que a primeira bandeja que contém os grãos ainda úmidos, desça paulatinamente até o nível mais baixo do secador para então ser retirada deste. A figura 14 mostra detalhadamente a estrutura do sistema que proporcionará o fluxo das bandejas em escala 1:10.

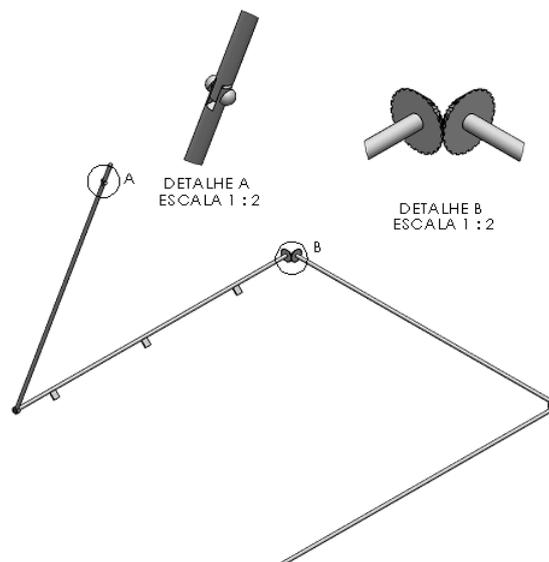


Figura 14 – Sistema de fluxo visto isoladamente.

Fonte: Autoria própria.

Em cada uma das barras laterais existem 3 placas soldadas para que seja possível

a suspensão de todas as bandejas, detalhe que será explicado posteriormente. A figura 15 apresenta a interação deste sistema com as bandejas.

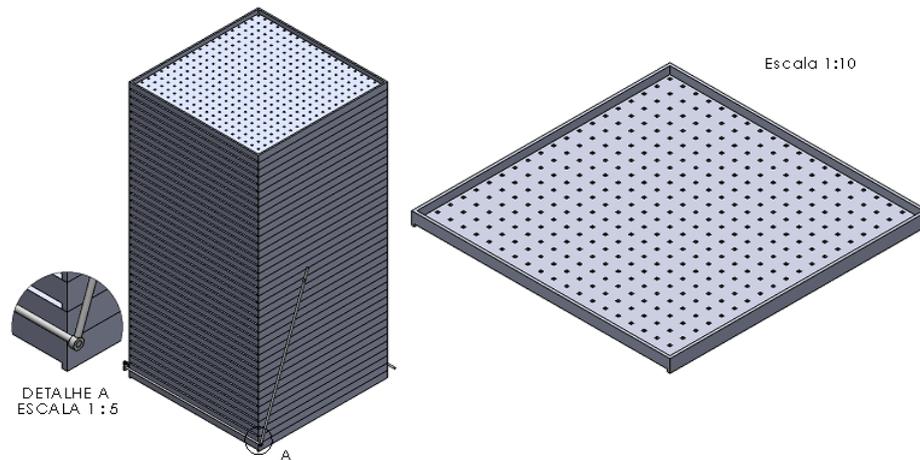


Figura 15 – Interação entre o sistema de fluxo e as bandejas.

Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.1 Descrição do sequenciamento do fluxo das bandejas

A figura 16 mostra o momento inicial do sistema, ou seja, o momento em que a torre está completamente preenchida por bandejas. Neste momento somente a bandeja do topo contém as amêndoas frescas.

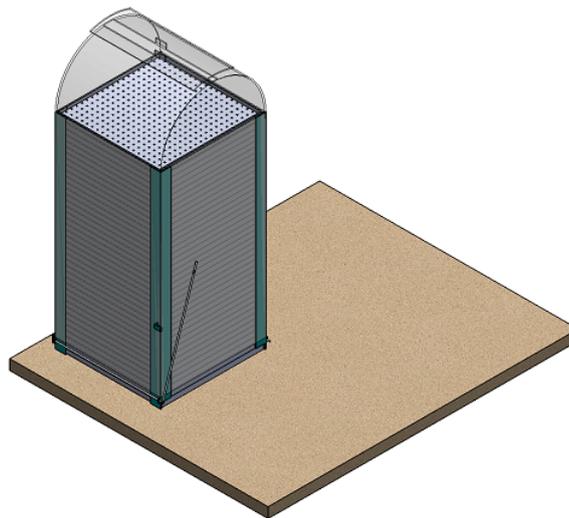


Figura 16 – Momento inicial com a torre preenchida.

Fonte: Autoria própria.

A figura 17 mostra o momento em que a alavanca é aberta, e o posterior travamento (detalhe E). A intenção é que este travamento mantenha as bandejas suspensas

para que o operador possa retirar aquela que se encontra na parte mais inferior da torre, neste caso aquela que sairá depois de um tempo com as amêndoas secas. A abertura da alavanca e a suspensão das bandejas são processos que ocorrem simultaneamente (detalhe D).

Como visto na figura 14, as barras laterais contém pequenas placas metálicas soldadas nas mesmas (3 placas em cada barra), e estas placas em suas posições de equilíbrio se encontram num espaço existente entre a primeira e a segunda bandeja (sentido de baixo para cima) tornando possível esta suspensão. Esta suspensão é bastante sutil, pois a intenção é somente reduzir o atrito entre as bandejas supracitadas.

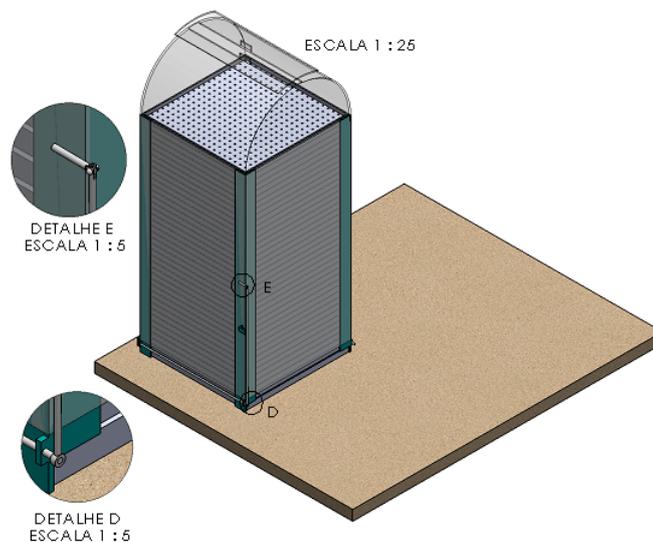


Figura 17 – Abertura e travamento da alavanca.

Fonte: Autoria própria.

Neste momento o atrito entre a primeira e a segunda bandejas é reduzido, sendo assim a primeira bandeja pode ser retirada da torre para sua posterior alimentação com as amêndoas frescas como mostra a figura 18.

Para a alimentação da torre com as bandejas contendo as amêndoas frescas, a depender da altura, um sistema formado por plataforma e escada deve ser acoplado à torre levando em consideração fatores ergonômicos e de segurança do trabalho necessários (Apêndice C). Porém, estes detalhes serão suprimidos desta abordagem uma vez que estes não pertencem ao escopo de modelagem proposta para este trabalho. Como visto anteriormente o objetivo principal é resolver numericamente um sistema de equações diferenciais parciais considerando condições iniciais e de contorno para cálculos de campos de temperatura e velocidade.

Após a alimentação da bandeja retirada da torre, com as amêndoas frescas, a alavanca é então fechada, voltando para a posição de inicial. A medida que se posiciona

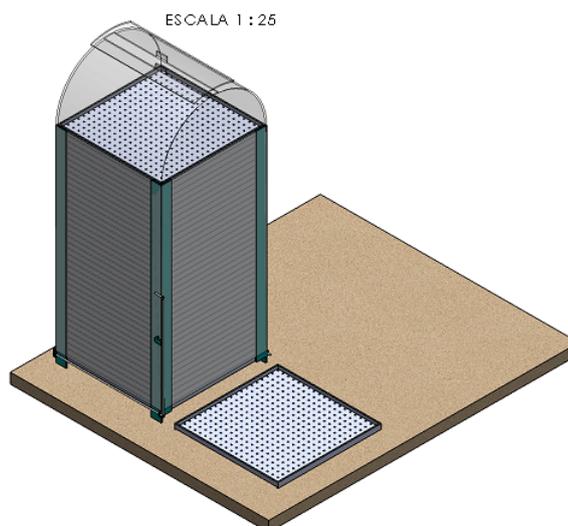


Figura 18 – Suspensão das bandejas e retirada da última.

Fonte: Autoria própria.

a alavanca nesta posição, todas as bandejas descem um nível simultaneamente, proporcionando o surgimento de vaga para uma bandeja na parte do topo da torre, como mostra a figura 19.

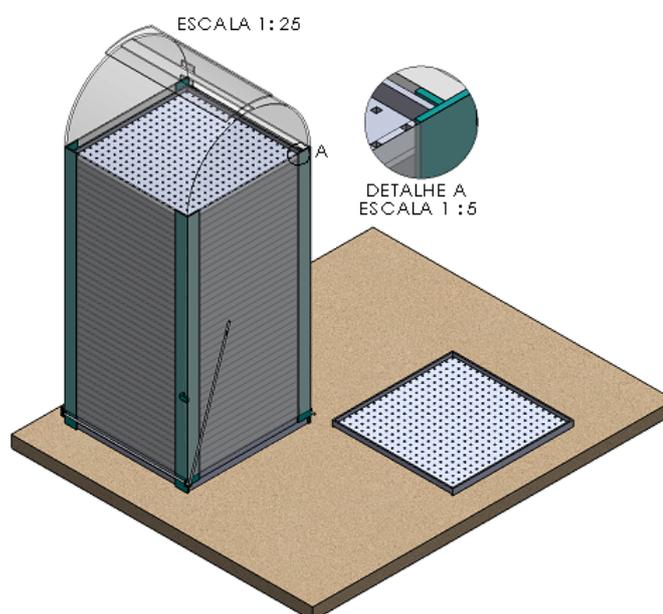


Figura 19 – Posicionamento inicial da alavanca.

Fonte: Autoria própria.

Com o surgimento de vaga para uma bandeja na parte superior da torre, a bandeja retirada contendo as amêndoas frescas é posta neste local como mostra figura 20.

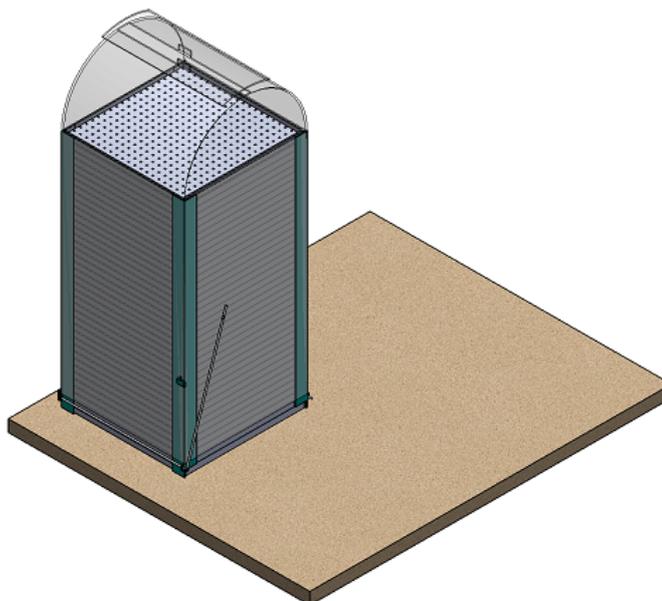


Figura 20 – Realimentação da torre com a bandeja retirada.

Fonte: Autoria própria.

E assim o sistema volta à configuração inicial e o ciclo reinicia de tempo em tempo. Como o sistema consiste em uma estufa, espera-se que bandejas contendo as amêndoas frescas entrem na estufa pela parte superior, e então pela parte inferior da mesma, as bandejas contendo amêndoas secas sejam retiradas.

## 4.2 Sistema físico

Para a simulação da torre foram também consideradas as mesmas informações utilizadas para a simulação da barcaça (tópico 3.1), relacionadas à localização de Ilhéus: latitude 14,789 sul, longitude 39,0494 oeste e fuso horário -3 horas; o mesmo período do dia com a mesma irradiação solar incidente. A torre foi submetida à temperatura ambiente, que varia de acordo com a equação 17.

A condição de isolamento térmico foi definida na espessura do polietileno (1mm) e nas 4 faces equivalentes à espessura do bloco de concreto.

O fluxo de calor convectivo também foi considerado na modelagem do sistema, ou seja, o resfriamento das superfícies expostas oriundo da força dos ventos.

A temperatura 1m abaixo do solo (plano oposto ao plano em que se encontra a torre) foi definida como  $25^{\circ}C$ .

A estufa com a estrutura geométrica vista anteriormente, deve ser exposta a irradiação solar ao longo do dia, irradiação esta que é composta por vários comprimentos de onda, desde luz visível (comprimentos de onda entre  $0,4 \mu m$  e  $0,7 \mu m$ ),

até a radiação infravermelha que atinge comprimentos de onda próximos de  $10^2 \mu m$  (INCROPERA, 2003).

Todo o sistema a princípio é submetido a uma temperatura ambiente que varia ao longo do tempo de acordo com a equação 17. Durante a exposição à irradiação solar, o sistema foi modelado de maneira a permitir que os raios, cujo comprimento de onda sejam menores que  $2,5 \mu m$ , atravessem o plástico agrícola que envolve a estrutura metálica. Esta radiação é então absorvida principalmente pelas bandejas, que emitirão radiações em comprimentos de ondas acima de  $2,5 \mu m$  que ficam em grande parte presas no interior da estufa devido às propriedades térmicas do plástico agrícola, opaco para este tipo de irradiação.

Outras condições importantes que são consideradas é a opacidade da terra e os efeitos dos ventos sobre a estufa, onde considera-se a condição de convecção forçada. A figura 21 mostra as condições consideradas na simulação.

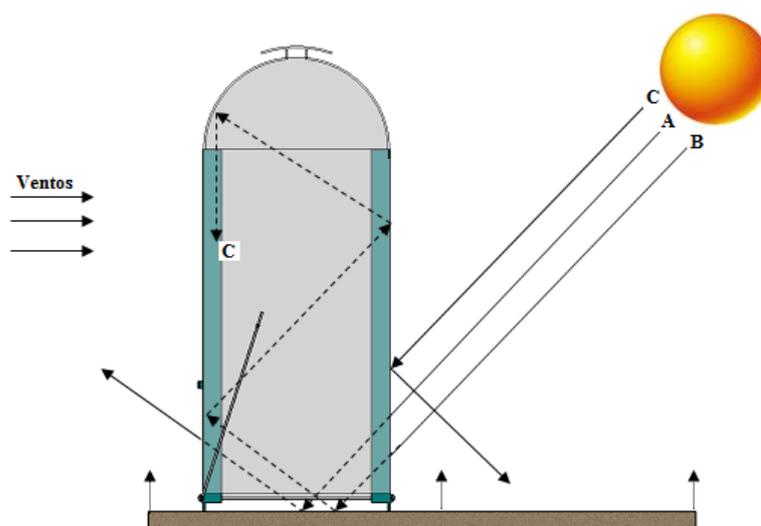


Figura 21 – Considerações físicas sobre a simulação da torre.

Fonte: Autoria própria.

O sistema representa as radiações solares de incidência A, B e C que são as predominantes no espectro solar. Elas respectivamente representam luz visível, infravermelho em curtos comprimentos de ondas e infravermelho a longos comprimentos de onda. A luz visível atravessa o plástico agrícola tanto na incidência de radiação quanto na reflexão, o infravermelho em curtos comprimentos de onda é absorvido pelo solo fornecendo energia ao mesmo. O solo libera esta energia em forma de infravermelho a longos comprimentos de ondas (radiação C), e esta radiação então permanece em grande parte presa no interior da estufa devido às propriedades térmicas do plástico agrícola. Devido a esta característica, as radiações em forma de calor vindas diretamente do sol não penetram livremente para o interior da estufa, as mesmas são parcialmente

refletidas e absorvidas (DAVOLOS; CORREA, 2007).

### 4.3 Discretização do domínio

Para a discretização do sistema em que a torre se encontra a forma de criação da malha de cálculo foi muito diferente da anterior. A geometria em questão é mais complexa, contendo domínios que são melhor discretizados por elementos de volume e outros por elementos de superfícies. Sendo assim a malha foi customizada para cada tipo de domínio, havendo a necessidade de aumentar ao máximo o número de nós devido ao grande esforço computacional exigido para resolver o problema.

Em caso de se escolher criar a malha automaticamente, todos os domínios são constituídos por elementos de volume. Até mesmo os elementos de superfícies (de finas espessuras como filmes plásticos) são criados pelo *software* a partir de elementos de volume, o que geralmente resulta numa malha finíssima e um grande esforço computacional é necessário para a realização das plotagens. As características da malha para a geometria referida se encontra na tabela 2, considerando a torre sem as bandejas.

Tabela 2 – Número e tipos de elementos para a discretização da geometria referente à torre sem as bandejas.

Tipo de elemento	Número de elementos
Tetraédrico	4928
Prismático	166
Triangular	1644
Quadrilateral	94
Aresta	340
Vértice	60

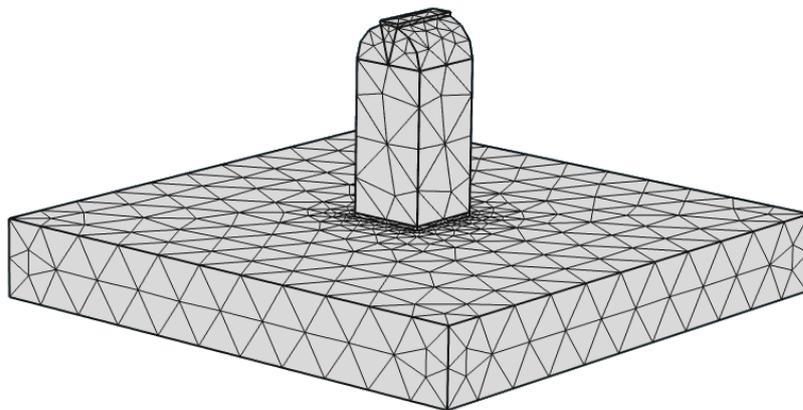


Figura 22 – Discretização para a simulação da torre.

Fonte: Autoria própria.

Como pode-se perceber na figura 22, houve uma simplificação na geometria para a simulação da torre proposta. O objetivo nesta simulação é identificar principalmente o campo de temperatura esperado no interior da torre; por este motivo, foi removido o sistema de fluxo de bandejas, trazendo ainda o benefício de reduzir o esforço computacional necessário para resolver o problema.

Para a simulação da torre considerando as bandejas no interior houve a necessidade de aumentar expressivamente o número de nós em alguns, como podemos verificar na figura 23, e a tabela 3 mostra as quantidades e tipos de elementos de malha envolvidos.

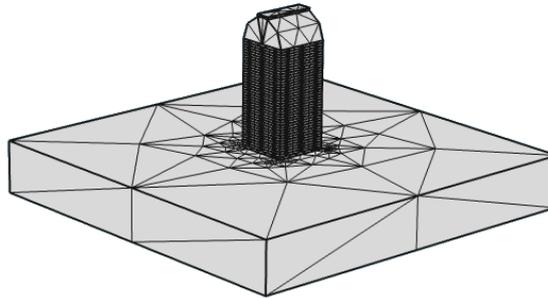


Figura 23 – Discretização para a simulação da torre.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 – Número e tipos de elementos para a discretização da geometria referente à torre com as bandejas.

Tipo de elemento	Número de elementos
Tetraédrico	3991
Prismático	998
Triangular	3434
Quadrilateral	376
Aresta	1134
Vértice	219

Foram realizadas simulações para se estimar o campo de velocidade no interior da torre. A discretização do domínio para o campo de velocidade foi realizada automaticamente pela ferramenta de CAD/CAE utilizada. A tabela 4 mostra características quantitativas da malha gerada.

Pode-se observar na figura 24 que a malha, criada automaticamente, para este tipo de fenômeno tem um padrão mais refinado em relação aos cálculos de campos de temperatura, devido principalmente às altas taxas de variação de velocidade do fluido ao longo do deslocamento.

Dentro dos resultados procurou-se também realizar simulações que mostrassem a saída do excesso de calor pela parte superior da torre. A figura 25 mostra a malha como

Tabela 4 – Número e tipos de elementos para a discretização da geometria referente ao campo de velocidade.

Tipo de elemento	Número de elementos
Triangular	13756
Quadrilateral	486
Aresta	4893
Vértice	17

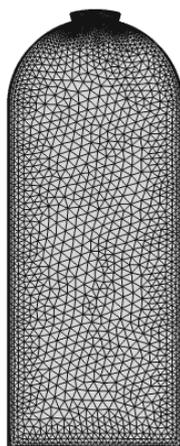


Figura 24 – Malha de cálculo gerada para o campo de velocidade.

Fonte: Autoria própria.

uma malha de cálculo, criada automaticamente, se distribui ao longo da geometria, e a tabela 5 mostra as quantidades de elementos e tipos.

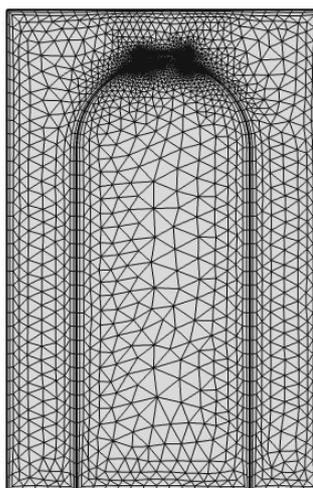


Figura 25 – Malha de cálculo gerada para o cálculo do campo de temperatura.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 – Número e tipos de elementos para a discretização da geometria.

Tipo de elemento	Número de elementos
Triangular	5236
Quadrilateral	780
Aresta	478
Vértice	22

## 4.4 Resultados

Partindo da geometria proposta procurou-se realizar simulações considerando a estufa com e sem as bandejas para a verificação dos campos de temperatura obtidos na mesma, em função das condições iniciais, desprezando o sistema que possibilita o fluxo de bandejas (figura 14). Para as simulações seguintes, desprezando as bandejas no interior da torre, o tempo total de processamento para a plotagem dos campos foi equivalente a 3 minutos e 39 segundos.

A figura 24 mostra que a torre apresenta predominância de temperaturas próximas à temperatura ambiente. A estrutura em si não apresenta ganhos significativos de temperatura o que pode ser verificado quando comparamos a plotagem com o gráfico ilustrado na figura 6.

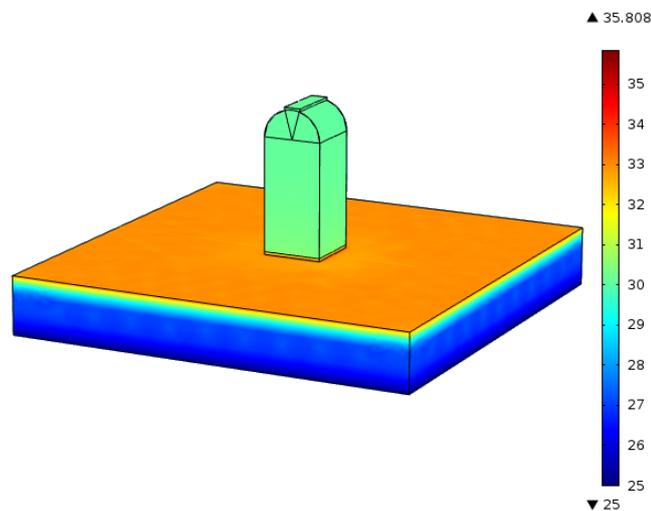


Figura 26 – Distribuição de temperatura da torre sem as bandejas às 14h.

Fonte: Autoria própria.

A figura 27 ilustra um corte longitudinal da torre na ausência de bandejas, mostrando que as temperaturas atingem um pico de 35°C na base da torre. Esta temperatura é mais acentuada nesta região devido à emissividade do bloco de concreto que sustenta a torre.

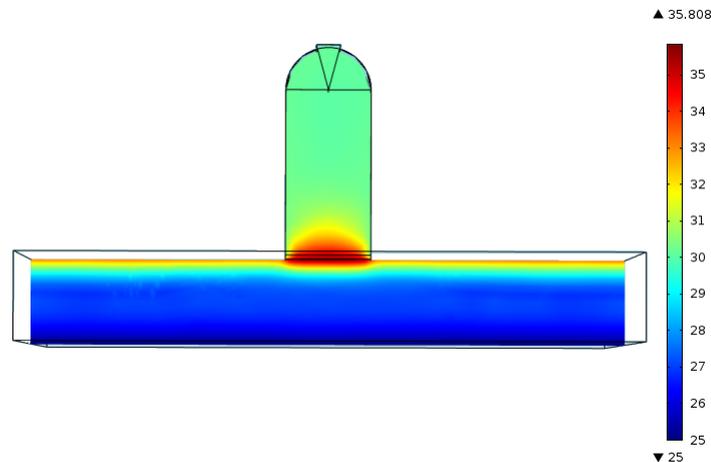


Figura 27 – Corte longitudinal da torre sem as bandejas às 14h.

Fonte: A autoria própria.

A figura 28 apresenta a principal contribuição deste trabalho que consistiu na verificação da resposta térmica da torre com as 40 bandejas de acordo com o projeto inicial. Observa-se altas temperaturas com um pico de 55°C às 14h, e toda a superfície exposta à temperaturas próximas de 35°C devido ao resfriamento causado pelas forças dos ventos. O tempo total de processamento para a plotagem dos campos, considerando as bandejas no interior da torre, foi equivalente a 5 dias, 7 horas, 24 minutos e 30 segundos.

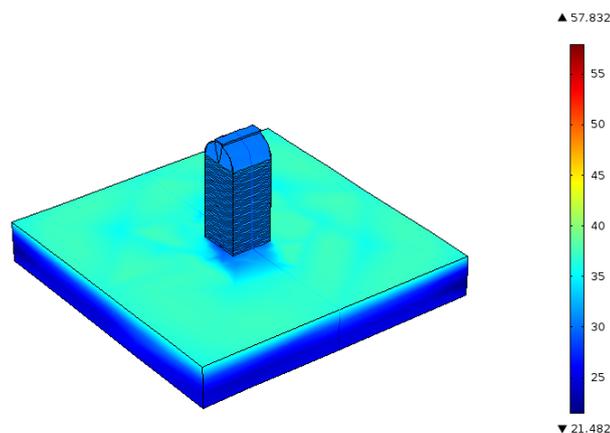


Figura 28 – Distribuição de temperatura da torre com as bandejas às 14h

Fonte: A autoria própria

A figura 29 mostra um corte longitudinal da torre com as bandejas sobrepostas, expondo o campo de temperatura internamente onde se verifica os locais de maiores temperaturas, mas especificamente na primeira bandeja e na lateral esquerda da torre devido ao período do dia considerado, que reflete diretamente na posição solar. A temperatura ao longo do corpo da torre apresenta uma variação entre 40°C e 45°C.

A torre apresenta em seu teto uma abertura para a saída de ar e, com isso, espera-se que haja correntes ascendentes de convecção no interior da mesma retirando umidade e calor. Com os recursos disponíveis não foi possível realizar para os modelos em 3D da torre as plotagens considerando acoplamento de físicas, no intuito de calcular em uma mesma simulação os campos de temperatura juntamente com os campos de velocidade, mesmo aumentando ao máximo o número de nós na malha de cálculo nos domínios. Esta situação implica na desconsideração da saída do calor excessivo no modelo físico devido aos efeitos convectivos, e consiste em um dos principais fatores que justificam o atingimento de picos de temperaturas tão altos no interior da torre, como mostra a figura 29, seguida da importante contribuição das radiações entre superfícies bem como da forma em que foram configuradas as bandas de irradiação solar.

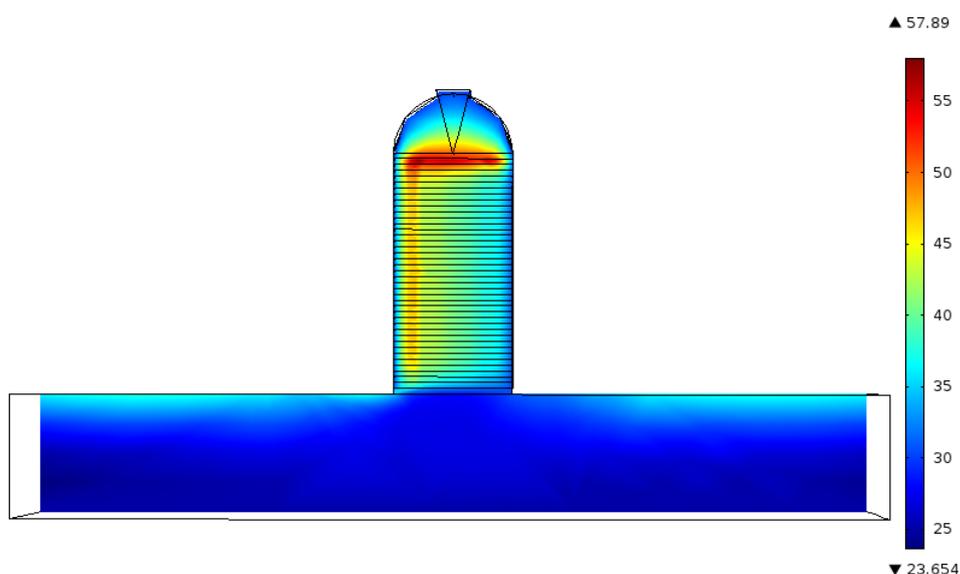


Figura 29 – Corte longitudinal da torre com as bandejas às 14h.

Fonte: Autoria própria.

A figura 30 mostra a variação de temperatura na parte superior da torre, no centro da mesma ao longo do dia. Observa-se que inicialmente a temperatura aumenta a uma taxa maior em relação a barcaça (figura 11). Outro ponto a ser considerado, é o fato da torre manter melhor a temperatura em seu interior, onde verifica-se pouca variação de temperatura principalmente no intervalo entre 11h e 13h.

Algumas simulações em 2D foram realizadas considerando as mesmas condições

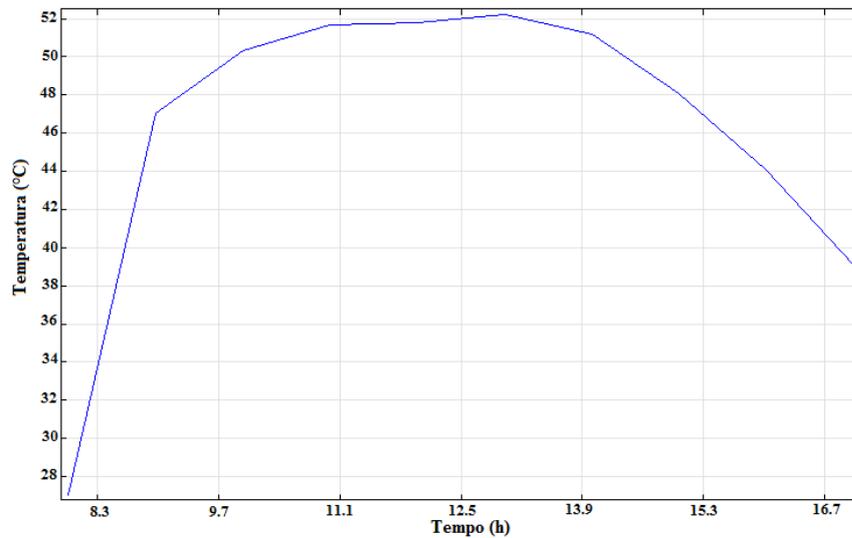


Figura 30 – Variação de temperatura no ponto central da parte superior da torre em relação ao tempo.

Fonte: Autoria própria.

de contorno, porém com uma radiação incidente constante igual a  $215W/m^2$  e em regime estacionário. Estas simulações auxiliaram na verificação da variação da temperatura máxima atingida pela torre em função do aumento da altura da mesma através de sucessivas plotagens criadas a partir da ferramenta de simulação utilizada. A figura 31 mostra o campo de temperatura interno à torre sem as bandejas, com um tempo total de processamento para a plotagem do campo equivalente a 1 minuto e 44 segundos.

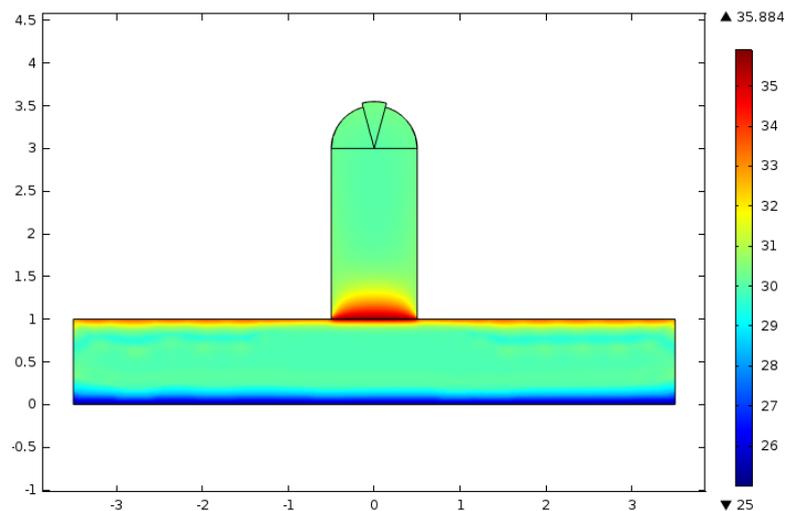


Figura 31 – Distribuição de temperatura da torre sem as bandejas.

Fonte: Autoria própria.

A figura 32 ilustra o campo de temperatura sob as mesmas condições supracita-

das, porém considerando as bandejas no interior da torre. O tempo total de processamento para plotagem do campo de temperatura relacionado foi equivalente a 2 minutos e 40 segundos.

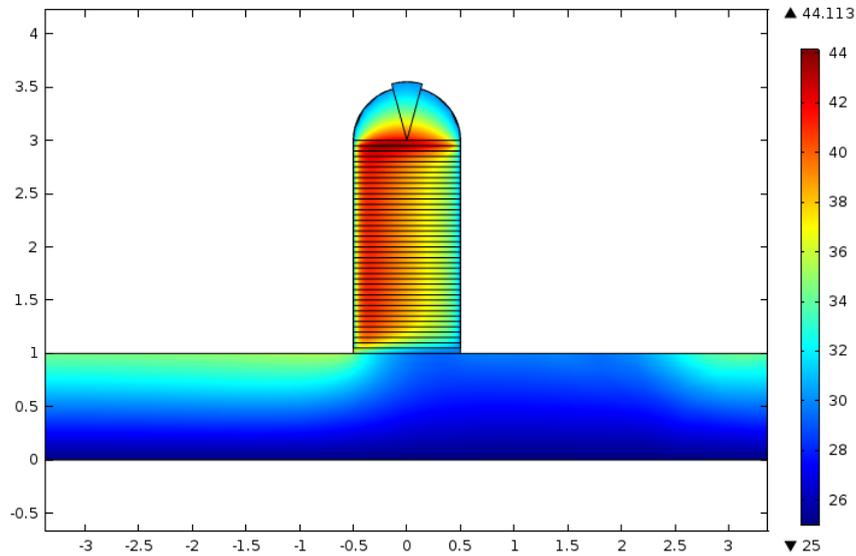


Figura 32 – Distribuição de temperatura da torre com as bandejas.

Fonte: Autoria própria.

A figura 33 ilustra graficamente uma sutil queda de temperatura no interior da torre, considerando as bandejas presentes na mesma (figura 30). Esta perda sutil de temperatura (décimos de  $^{\circ}C$ ) pode ser influenciada por pelo menos dois fatores que ocorrem simultaneamente: o aumento da superfície de contato entre a torre e o ar atmosférico, que influencia na taxa de perda de calor, e o fato do calor demorar mais tempo para se propagar no interior da torre devido a maior massa de ar existente.

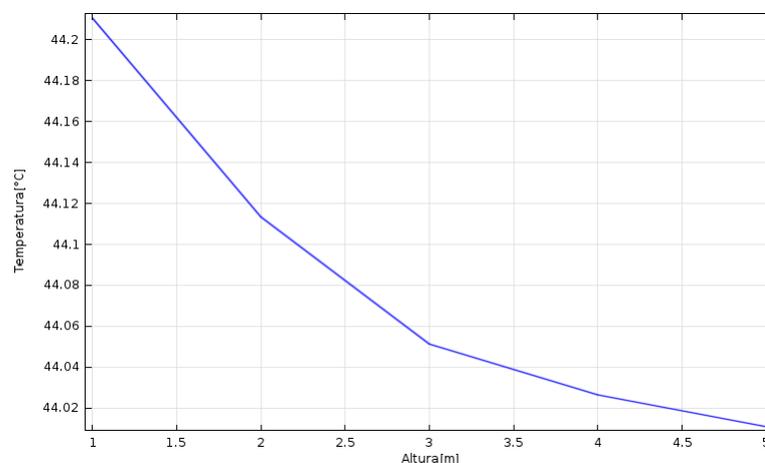


Figura 33 – Temperatura máxima em função da altura da torre.

Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado, a temperatura que a torre consegue atingir e manter em seu interior é muito maior em relação à capacidade da barçaça. A barçaça está sujeita diretamente à força dos ventos, logo sua perda de calor é muito mais rápida em relação à torre que possui o plástico agrícola em volta o que reduz este efeito.

A seguir serão ilustradas as simulações referentes a campos de velocidades máximas esperados no interior da torre, utilizando um controle de erro absoluto a uma tolerância de  $10^{-3}$  para as variáveis temperatura e velocidade e pressão. de  $5.10^{-4}$ . Os *inputs* desta etapa foram obtidos a partir dos dados fornecidos das simulações anteriores referentes ao cálculo do campo de temperatura.

Com os recursos computacionais disponíveis para realizar as simulações dos campos de velocidade, foi conveniente que as bandejas fossem desprezadas do interior do equipamento proposto. Tomando como base a figura 31, ou seja, considerando a temperatura do solo igual a  $35^{\circ}C$ , a temperatura do sistema inicialmente igual a  $30^{\circ}C$  e um regime *Time dependent* para a simulação, calculou-se os campos de velocidades plotados nas figuras 34 e 35, considerando a equações 12 e 16. O tempo total de processamento para a plotagem dos campos foi equivalente a 4 minutos e 46 segundos. A figura 34 mostra o campo de velocidade após 60s. Pode-se verificar uma corrente de convecção ascendente com velocidades próximas a  $0,12m/s$ .

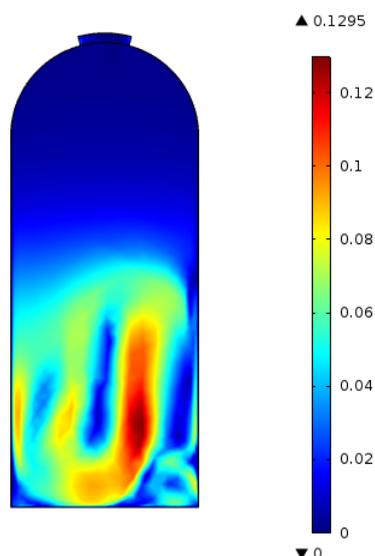


Figura 34 – Distribuição de velocidade em  $60s(m/s)$ .

Fonte: Autoria própria.

Considerando as mesmas condições, aumentando somente o passo, a figura 35 mostra o campo de velocidade após 90s. Pode-se verificar um significativo aumento no campo de velocidade, atingindo velocidades próximas a  $0,14m/s$ .

Esta corrente de convecção no interior da torre, como já citado antes, é funda-

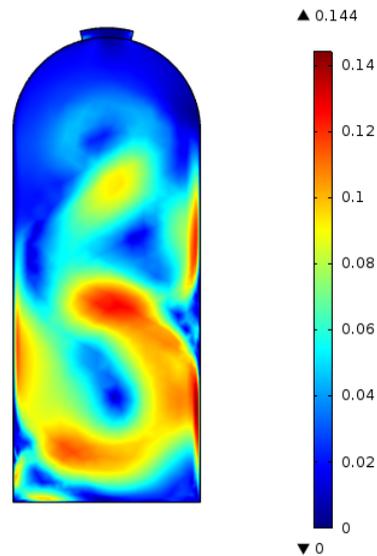


Figura 35 – Distribuição de velocidade após 90s ( $m/s$ ).

Fonte: Autoria própria.

mental neste processo de secagem, pois deste modo o calor se propagará pelos grãos de baixo para cima contribuindo de uma maneira bastante conveniente para o processo de secagem, proporcionando uma melhor qualidade às amêndoas.

Houve um grande interesse em realizar as simulações para o cálculo do campo de velocidade considerando também as bandejas no interior do sistema. Houve porém, dificuldades em representar geometricamente as perfurações na base de cada uma das 40 bandejas para a posterior simulação.

Com o intuito de explicitar a saída do calor devido as correntes naturais ascendentes de convecção esperadas, foram plotados os campos de temperatura mostrados nas figuras 36 e 37, supondo a temperatura ambiente a  $30^{\circ}\text{C}$ , o interior da torre com  $50^{\circ}\text{C}$  e o chão a uma temperatura de  $48^{\circ}\text{C}$ .

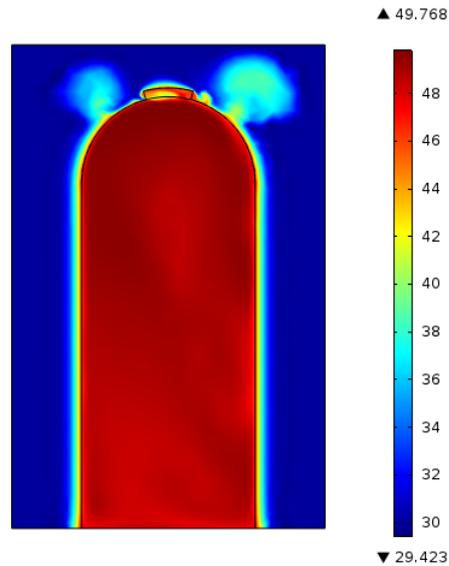


Figura 36 – Distribuição de temperatura após 60s ( $^{\circ}C$ ).

Fonte: Autoria própria.

A figura 37 mostra uma distribuição de temperatura após 4 minutos de simulação, mostrando mais expressivamente a saída do calor do interior da torre.

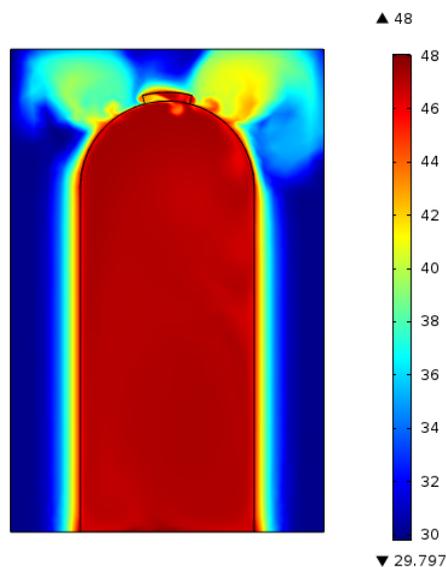


Figura 37 – Distribuição de temperatura após 4min ( $^{\circ}C$ ).

Fonte: Autoria própria.

A figura 38 mostra a variação de temperatura no ponto central da torre, em regime *Time Dependent*, com um tempo final de simulação de 5h. O gráfico mostra que a temperatura inicial, de 50°C, reduz para aproximadamente 43°C.

O gráfico da figura 38 ilustra claramente a saída do excesso de calor, mostrando que as temperaturas atingidas devido aos efeitos convectivos ascendentes apresentam-

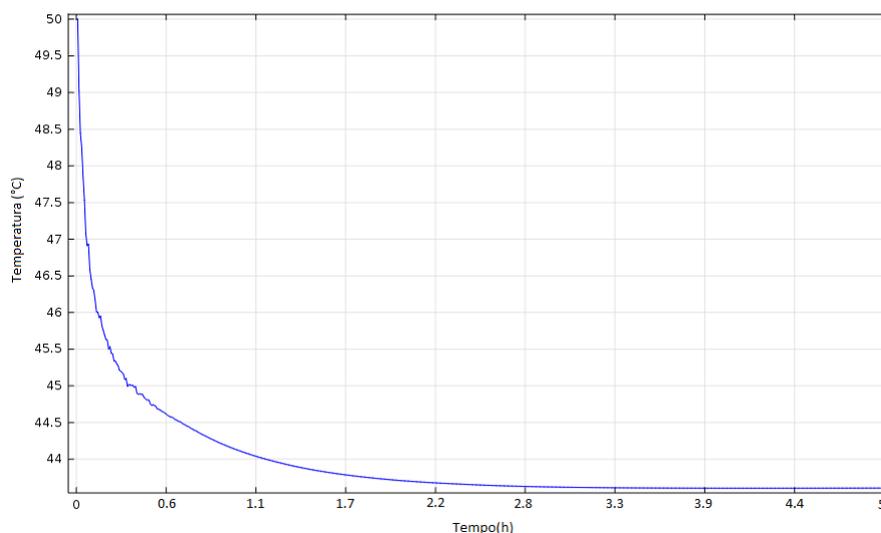


Figura 38 – Queda de temperatura no interior da torre.

Fonte: Autoria própria.

se próximas do ideal. Segundo [OETTERER et al. \(2006\)](#) durante a secagem, as enzimas presentes atuam no interior da amêndoa e promovem as reações químicas de cura, estabilizando o sabor, e a cor característicos do chocolate, com acidez reduzida. Deste modo, a temperatura da secagem é importante na qualidade final das amêndoas. O ideal está na faixa de 35° a 40°, porque é ótima para as enzimas. O uso de temperaturas mais baixas ou mais altas leva à perda na qualidade, pois as enzimas agem mais lentamente ou são destruídas.

## 5 Conclusão

O produto proposto neste trabalho apresenta expressiva vantagem na eficiência de secagem em relação à barcaça. Os resultados dos cálculos ligados às condições iniciais e de contorno consideradas, tanto para a barcaça quanto para a torre, mostram que uma barcaça de dimensões 6m x 12m atinge temperaturas próximas de  $36^{\circ}C$ . Enquanto a torre proposta, sob mesmas condições, é capaz de atingir temperaturas próximas de  $50^{\circ}C$ .

Os valores supracitados são resultados também de algumas simplificações, pois nas simulações não se considerou a variação da irradiação solar ao longo do dia em uma determinada superfície, bem como a variação do coeficiente de convecção mas, mesmo diante deste cenário, as simulações forneceram informações relevantes sobre a torre de secagem proposta.

O interior da torre atinge altas temperaturas em relação aos produtos tradicionais, uma vez que o "esqueleto" desta se encontra envolvido por um plástico agrícola que tem a função de reduzir significativamente a perda de calor para o meio externo, além de amenizar os efeitos convectivos, pois os ventos não irão agir diretamente nas bandeja e amêndoas. Neste âmbito, as simulações mostram ainda que o calor consegue ficar mais tempo contido no interior da torre, onde percebe-se uma temperatura que se mantém em torno de  $51^{\circ}C$  por aproximadamente 3h (de 10h às 13h), enquanto na barcaça praticamente não se observa este efeito.

Na etapa de concepção do produto se procurou simplicidade e eficiência com o objetivo de reduzir os custos, bem como, simplificar o processo de fabricação. O sistema que proporciona o fluxo das bandejas em particular, assim como as próprias, foram os sistemas que passaram por várias modificações, justamente para alcançar este propósito. Um dos reflexos diretos foram os resultados das simulações para a determinação do tempo padrão de operação, em que, com base em modelos presentes na literatura, se chegou a um tempo padrão de operação para a torre igual a 57 minutos contra 2 horas e trinta minutos relativos à operação de secagem em barcaças (Apêndice B). Sendo assim, o produto proposto é de simples operação e ainda reduz drasticamente os problemas causados pela salubridade, pois não é necessário entrar no mesmo e se submeter a altos níveis de temperaturas como ocorre nas operações em sistemas tradicionais.

Uma outra característica importante a ser destacada, é a enorme redução da área necessária para secagem. Esta é umas das principais vantagem do produto em relação aos mais tradicionais, pois nem todos os cacauicultores dispõe de extensas áreas para uma lucrativa atividade de secagem.

Em termos de apresentação do produto e de simulações, a altura da torre apresentada neste trabalho é de  $2m$  devido as facilidades de operações, porém esta altura pode ser ajustada de acordo com as conveniências de produção, desde que se tenha os devidos cuidados com a estabilidade do sistema. Um sistema de torres (operação com mais de uma torre) pode ser criado de acordo com o quanto o cacauicultor deseja produzir ou caso o mesmo não queira operar com torres altas em demasia.

Pesquisas futuras estão baseadas no fornecimento de energia para a torre no período noturno a partir de aplicações de conceitos sustentáveis. Deste modo haverá uma melhoria na qualidade das amêndoas, evitando ainda a proliferação de fungos nas mesmas, garantindo uma otimização no processo de secagem.

Uma análise de tensões pode ser feita no secador vertical no sentido de verificar os pontos críticos de tensões, concluindo deste modo se o equipamento deve ser redimensionado ou não, ou quais materiais podem ser substituídos, dentre outros. Estudos ergonômicos podem ser feitos para que seja definida a melhor maneira de operação da torre de forma a evitar doenças de trabalho, e outro estudo necessário está relacionado a possível instabilidade da torre em função da altura no momento de operação.

## Anexos

## ANEXO A – Detalhes das equações diferenciais envolvidas nas simulações

### A.1 Equação do calor

A equação do calor foi utilizada para calcular o campo de temperatura no domínio proposto, considerando as propriedades físicas necessárias para a realização dos estudos. Devido a presença de fluido no sistema (ar) a mesma pode ser expressa no seguinte formato geral:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + q \quad (18)$$

onde  $\rho$  = densidade,  $C_p$  = capacidade térmica,  $T$  = temperatura,  $t$  = tempo,  $\mathbf{u}$  = campo de velocidade,  $k$  = condutividade térmica e  $q$  = fonte térmica.

### A.2 Isolamento térmico

A condição de isolamento térmico diz respeito à ausência de fluxo de calor cruzando uma determinada superfície. Esta característica é bastante conveniente no que diz respeito à simplificação dos cálculos no domínio.

$$-\mathbf{n} \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad (19)$$

onde  $\mathbf{n}$  = vetor normal,  $k$  = condutividade térmica e  $T$  = temperatura.

### A.3 Radiação solar

Para a radiação oriunda de uma fonte externa (sol), considerando os cálculos de fator de vista, destaca-se a seguinte equação em seu formato geral:

$$G_{ext,Bi} = F_{ext,Bi}(\mathbf{i}_s) \cdot q_{0,s} \cdot FEP_{Bi}(T_{sun}) \quad (20)$$

onde  $G_{ext,Bi}$  = fluxo de calor incidente de radiação,  $F_{ext,Bi}$  = fator de vista da fonte,  $q_{0,s}$

= radiosidade da fonte,  $FEP_{Bi}(T_{sun})$  = fração do poder emissivo do corpo negro com  $T_{sun} = 5780K$ .

O subíndice  $Bi$  se refere às bandas espectrais ligadas à irradiação solar de incidência. O termo  $i_s$  é a irradiância solar ( $W/m^2$ ), representando o fluxo de calor vindo do sol recebido por uma superfície perpendicular aos raios solares.

## A.4 Radiação entre superfícies

Quando uma superfície é aquecida a mesma emite radiação, que por sua vez é interceptada por outra superfície. Este fenômeno de ganho de energia leva em consideração os tipos de geometrias envolvidas e a seguinte equação diz respeito a esta condição de contorno.

$$-\mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = \sum_{i=1}^N \epsilon_{Bi,u}(G_{Bi,u} - e_b(T)FEP_{Bi,u}(T)) + \sum_{i=1}^N \epsilon_{Bi,d}(G_{Bi,d} - e_b(T)FEP_{Bi,d}(T)) \quad (21)$$

onde  $\mathbf{n}$  = vetor normal,  $k$  = condutividade térmica,  $T$  = temperatura,  $\epsilon$  = emissividade da superfície,  $G$  = irradiação,  $FEP_{Bi,u}(T)$  = fração de poder emissivo. O índice  $Bi$ , como dito antes, refere-se a cada uma das bandas de radiação consideradas, e  $u$  refere-se à direção da radiação.

$$(1 - \epsilon_{Bi,u})G_{Bi,u} = J_{Bi,u} - \epsilon_{Bi,u}e_b(T)FEP_{Bi,u}(T) \quad (22)$$

$$(1 - \epsilon_{Bi,d})G_{Bi,d} = J_{Bi,d} - \epsilon_{Bi,d}e_b(T)FEP_{Bi,d}(T) \quad (23)$$

onde  $J_{Bi,u}$  e  $J_{Bi,d}$  são as radiosidades das superfícies consideradas.

$$FEP_{Bi}(T) = \frac{15}{\pi^4} \int_{C2/(\lambda_i T)}^{C2/(\lambda_{i-1} T)} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \quad (24)$$

$$C2 = hc_0/k \quad (25)$$

onde  $\lambda_i$  = limite de uma determinada banda espectral  $h$  = constante de Planck,  $k$  =

constante de Boltzmann e  $c_0 =$  velocidade da luz no vácuo

$$e_b(T) = n^2 \sigma T^4 \quad (26)$$

onde  $e_b(T)$  = poder emissivo total do corpo negro hemisférico,  $n$  = índice de refração do meio e  $\sigma$  = constante de Boltzmann =  $5,670400 \cdot 10^{-8} (W/(m^2 \cdot t^4))$ .

$$G_{Bi,u} = G_{m,Bi,u}(J_{Bi,u}) + G_{amb,Bi,u} + G_{ext,Bi,u} \quad (27)$$

$$G_{Bi,d} = G_{m,Bi,d}(J_{Bi,d}) + G_{amb,Bi,d} + G_{ext,Bi,d} \quad (28)$$

onde  $G$  = irradiação ou fluxo de calor radiativo de entrada,  $G_m$  = irradiação mútua vinda de outras fronteiras do domínio,  $G_{amb}$  = irradiação ambiente e  $G_{ext}$  = irradiação de fontes externas

$$G_{amb,Bi,u} = F_{amb,Bi,u} e_b(T_{amb,Bi,u}^4) FEP_{Bi,u}(T_{amb,Bi,u}) \quad (29)$$

$$G_{amb,Bi,d} = F_{amb,Bi,d} e_b(T_{amb,Bi,d}^4) FEP_{Bi,d}(T_{amb,Bi,d}) \quad (30)$$

## A.5 Resfriamento convectivo

A geometria considerada é exposta às forças dos ventos. Logo, deve-se considerar os efeitos convectivos e efeitos de perda de calor, onde a seguinte equação pode ser destacada:

$$-\mathbf{n} \cdot (-k \nabla T) = h \cdot (T_{ext} - T) \quad (31)$$

onde  $\mathbf{n}$  = vetor normal,  $k$  = condutividade térmica,  $T$  = temperatura,  $h$  = coeficiente de convecção e  $T_{ext}$  = temperatura externa.

## A.6 Equações para o cálculo do campo de velocidade

As equações 32, 33 e 34 representam, respectivamente, a equação da quantidade de movimento, equação da continuidade e a equação da difusão de calor, todas em seus formatos vetoriais.

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu(\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I}] + \mathbf{F} \quad (32)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (33)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + q \quad (34)$$

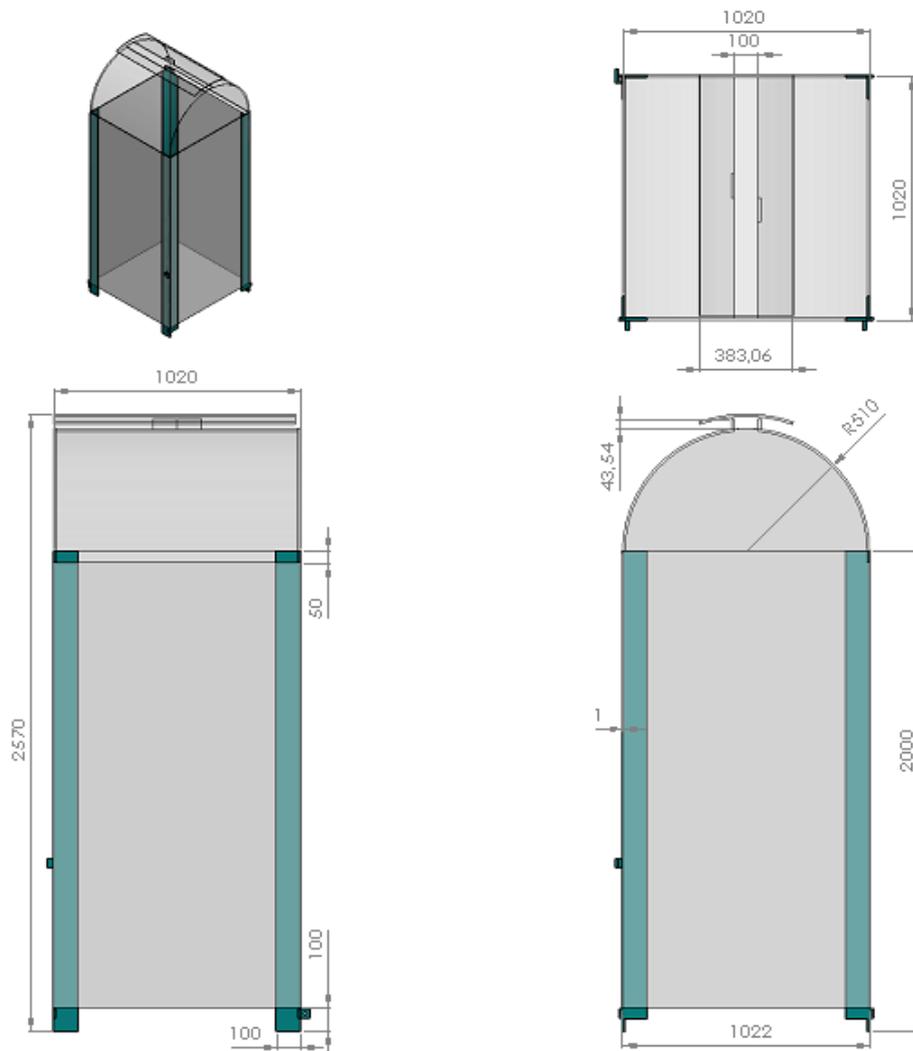
onde  $\rho$  = densidade,  $C_p$  = capacidade térmica,  $T$  = temperatura,  $t$  = tempo,  $\mathbf{u}$  = campo de velocidade,  $\mathbf{I}$  = Matriz identidade,  $k$  = condutividade térmica e  $q$  = fonte térmica,  $p$  = pressão,  $\mu$  = viscosidade e  $\mathbf{F}$  = força de volume.

## Apêndices

## APÊNDICE A – Detalhes das peças que compõem o secador proposto

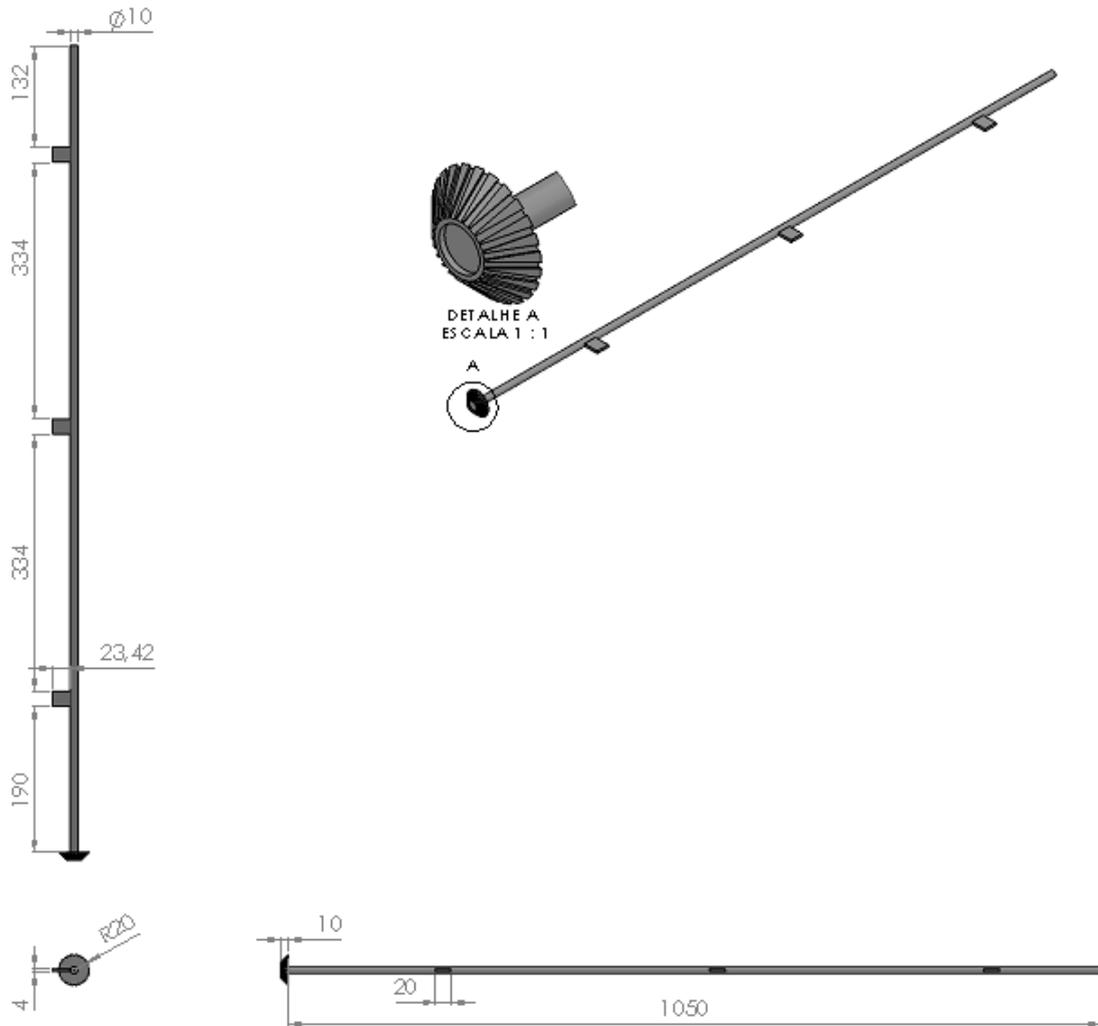
### A.1 Esqueleto - unidades em milímetros

Esta estrutura é metálica, envolvida por um plástico agrícola, a responsável por dar estabilidade à torre quando a mesma estiver em operação.



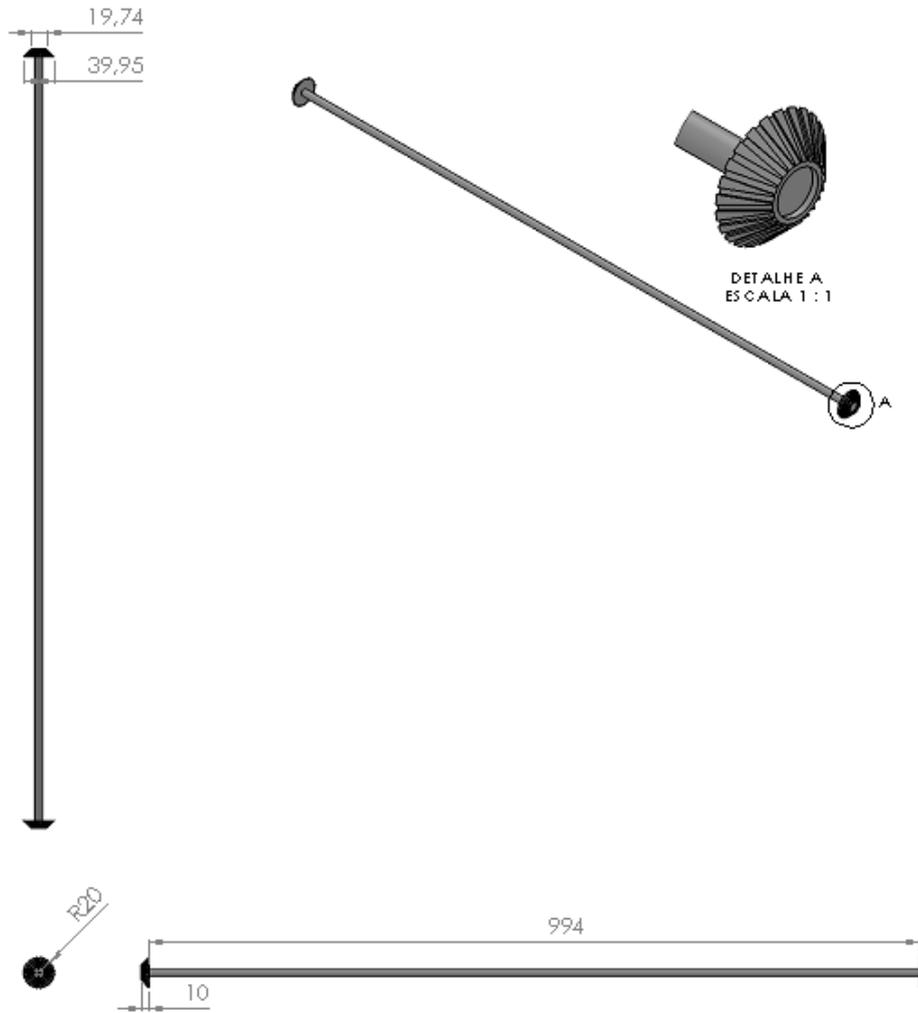
## A.2 Barra lateral - unidades em milímetros

Estas barras (duas barras) localizadas nas laterais da torre tem a função de promover a suspensão das bandejas com a ajuda das três placas soldadas. Cada uma das barras contém uma engrenagem tipo cônica em sua extremidade.



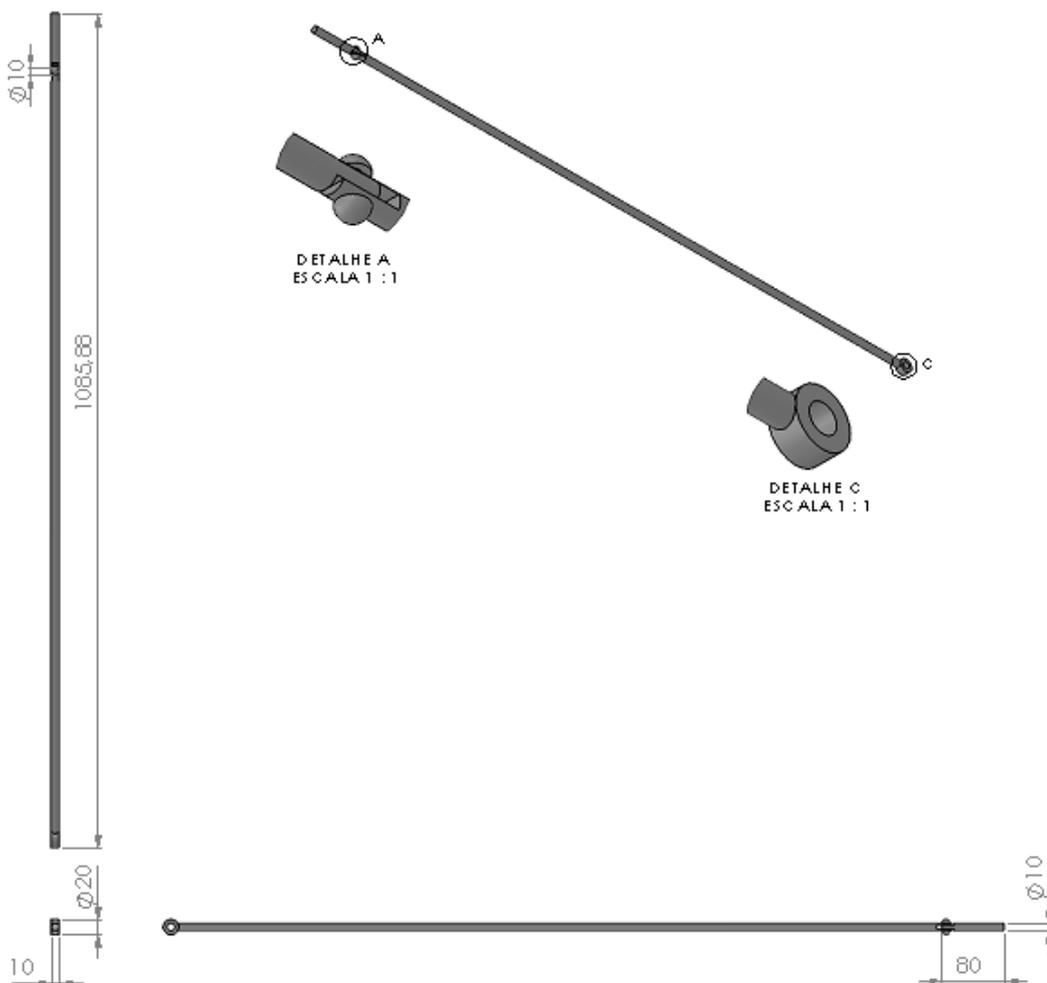
### A.3 Barra Traseira - unidades em milímetros

Tem a função de transmitir o movimento entre as duas barras laterais proporcionando a sincronização do movimento. Esta barra contém duas engrenagens tipo cônica em suas extremidades.



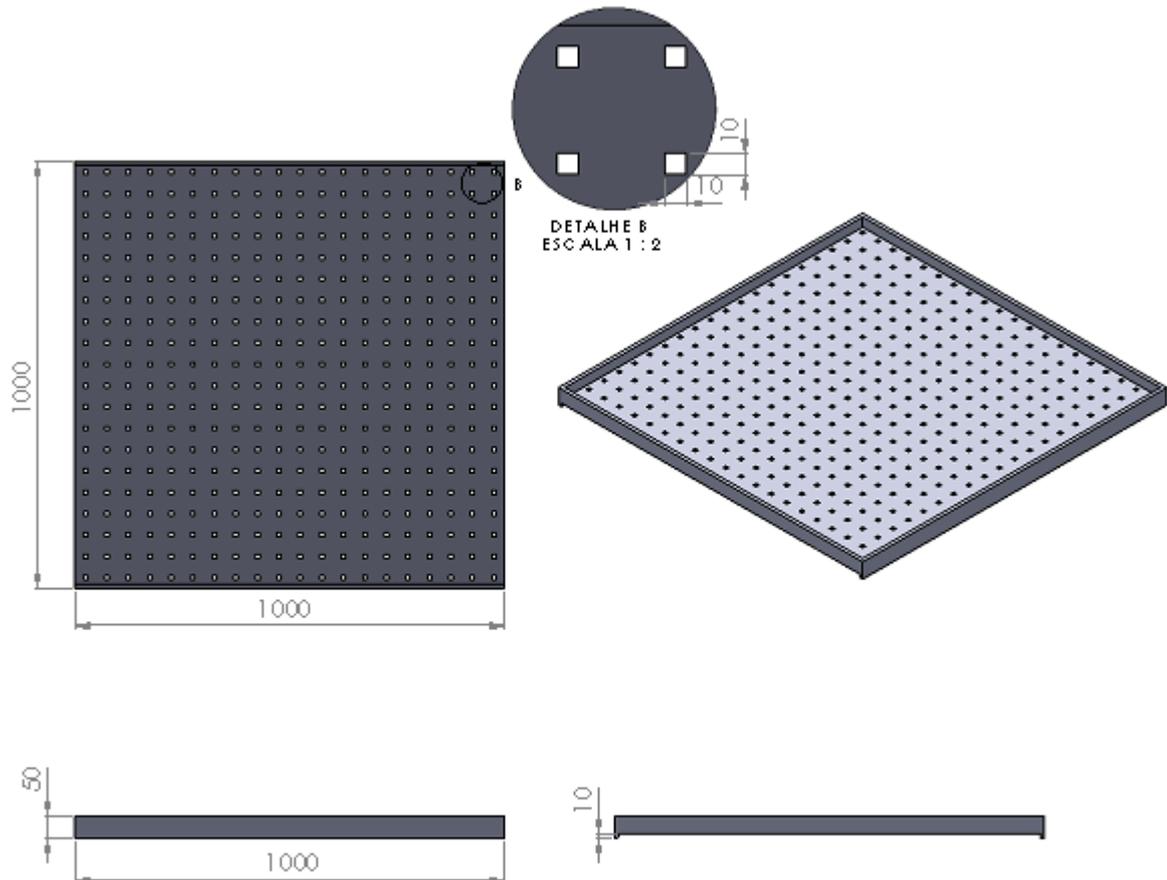
## A.4 Braço de alavanca - unidades em milímetros

Este braço de alavanca tem a função de acionar o movimento sincronizado e o travamento.



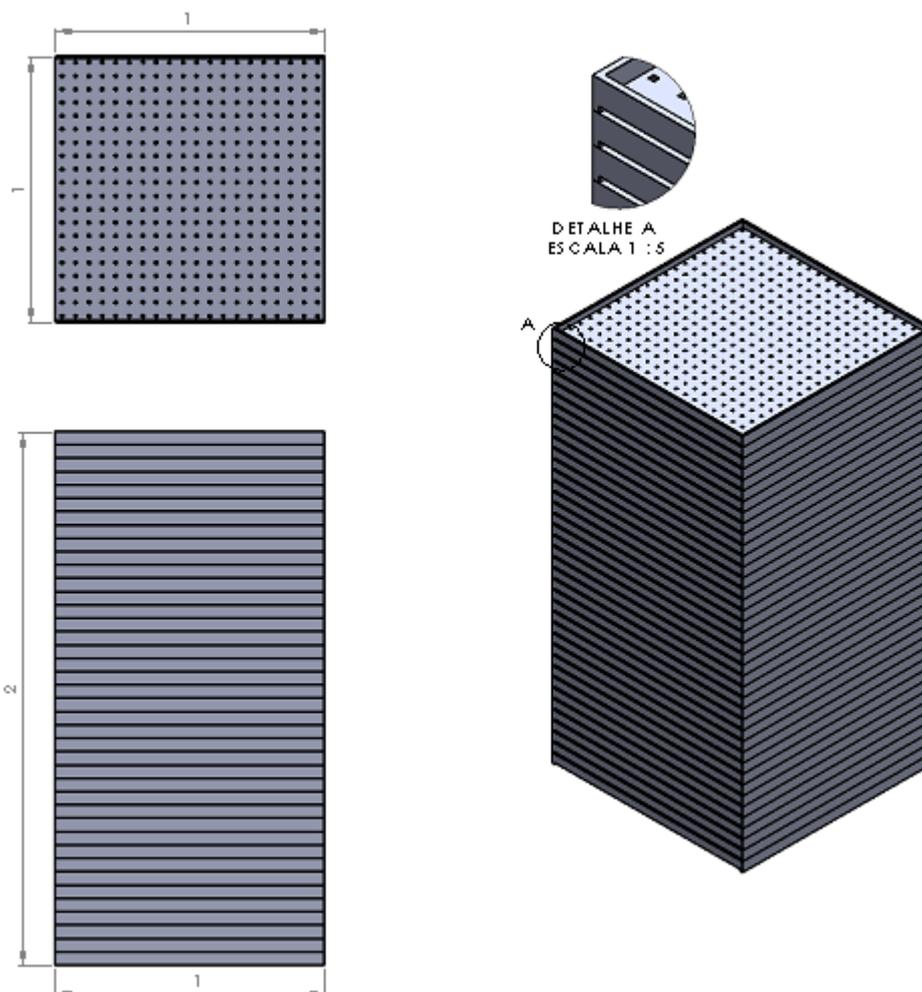
## A.5 Bandeja - unidades em milímetros

As bandejas foram projetadas para suportar uma camada de amêndoas frescas de cacau. A sua base pode ser um metal perfurado ou uma tela metálica.



## A.6 Bandejas empilhadas - unidades em milímetros

Em cada uma das bandejas existe um pequeno ressalto que gera um espaço entre as mesmas. É neste espaço que as placas contidas nas barras laterais entram para que haja a suspensão das bandejas.



## APÊNDICE B – Tempo padrão de operação entre a Barcaça e a Torre

### B.1 Método de cálculo

O método foi similar ao indicado por [Michelino \(1964\)](#) e [Laugeni e Martins \(2005\)](#). Inicialmente, foi feita uma análise preliminar do ambiente de trabalho, identificando a operação "secagem de cacau". Após isto, foi feita a descrição da operação e seu conjunto (as condições, as ferramentas e os elementos do trabalho). Em seguida, separou-se a operação em elementos, que segundo [Laugeni e Martins \(2005\)](#), tem a finalidade de verificar o método de trabalho e deve ser compatível com a obtenção da medida precisa. Usou-se um cronômetro de hora centesimal, folha de observação e prancheta para as observações. Percebe-se que a simplicidade dos materiais torna esta técnica vantajosa frente às demais.

[Laugeni e Martins \(2005\)](#) indicavam diversas técnicas matemáticas para a definição dos tempos de ciclo a serem cronometrados, onde é possível verificar se há confiabilidade nas medições. Para aplicação desta técnica utilizou-se o *software*©MatLab 2013<sup>®</sup>, que tornou ágil os cálculos matemático fornecendo ainda uma aceitável precisão.

Após a definição do tempo padrão de operação na barcaça de cacau, com dados obtidos na fazenda Leão de Ouro, no município, foi feita uma análise hipotética de como seria a eficiência de operação utilizando o secador vertical de amêndoas de cacau. Como o secador ainda não existe fisicamente, as simulações foram realizadas reproduzindo movimentos com materiais caseiros. Por exemplo, a ação equivalente a alimentar e esvaziar o secador pôde ser comparada com a ação de abrir e fechar de uma gaveta de massa 24 kg.

A operação analisada foi a secagem do cacau, objetivando a redução da umidade (base úmida) das amêndoas de cacau para 7 ou 8% ([MCDONALD; FREIRE, 1983](#)).

### B.2 Avaliação da operação utilizando a Barcaça tradicional

Esta operação pode ser dividida em elementos, que segundo [Laugeni e Martins \(2005\)](#), têm a finalidade de verificar o método de trabalho e deve ser compatível com a obtenção da medida precisa. O quadro 6 mostra a divisão dos elementos e a sua descrição.

Em termos quantitativos vale ressaltar novamente que as medidas dos tempos

Quadro 6 – Elementos da operação e descrição.

<b>Elementos</b>	<b>Descrição</b>
Pegar o rolo	Ação do trabalhador pegar o objeto "rolo" para revolver as sementes de cacau na barcaça.
Abrir a Barcaça	Para a semente não molhar, há um telhado móvel que fica na parte superior da barcaça, permitindo abrir nas horas de sol e fechar nas horas de chuva. Como houveram vários momentos intercalados entre sol e chuva, típico do verão do sul da Bahia, o trabalhador teve que abrir e fechar a barcaça algumas vezes, ato este cronometrado.
Revolver as sementes com rolo	Para que as sementes sequem uniformemente, os produtores de cacau adotaram uma prática de revolver as sementes com rolo. A prática consiste em deixar as sementes agrupadas em formato de "lombada", apelidada pelo trabalhador de formato "cambaleão". A cada 20 minutos, o cambaleão é mudado de posição, para frente e para trás, fazendo com que as sementes que estavam embaixo fiquem na parte de cima, e vice-versa, proporcionando a secagem uniforme das sementes. Essa prática é adotada quando a semente está no processo inicial da secagem, geralmente nos primeiros dias.
Revolver as sementes com os pés	Após o terceiro ou quarto dia, o trabalhador passa a revolver as sementes com os pés, pois a semente de cacau atinge uma taxa de umidade menor, fazendo com que elas fiquem mais leves. Para o trabalhador, essa etapa é menos desgastante e mais rápida do que a anterior, e para acelerar o processo de secagem, é mais conveniente revolver com os pés ao invés de revolver com o rolo. Essa prática também proporciona uma secagem uniforme das sementes, e também é feita a cada 20 minutos de secagem direta no sol.

foram consideradas estritamente nos momentos em que o trabalhador se encontrava em operação, ou seja, o tempo de permanência da exposição das sementes ao sol não é contabilizado. Inicialmente foram realizadas 4 medidas para cada um dos elementos pré-selecionados, como mostra o quadro 7.

Quadro 7 – Folha de observação em centésimos de horas.

<b>Folha de observação</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>Tempos médios</b>	<b>Amplitude da amostra</b>
Pegar o rolo.	00:43,36	00:49,27	00:41,52	00:44,72	00:44,72	00:07,75
Abrir a barcaça.	00:35,14	00:41,08	00:37,56	00:38,23	00:38,01	00:05,94
Revolver com o rolo.	20:42,37	18:46,42	20:19,63	19:37,24	19:51,42	01:55,95
Revolver com os pés.	03:40,85	03:27,21	02:52,75	02:48,36	03:12,29	00:52,49

Com essas medidas, pode-se utilizar a equação 18 para calcular o número de ciclos a serem cronometrados  $N$ .

$$N = \left( \frac{Z.R}{Er.d_2.\bar{X}} \right)^2 \quad (35)$$

onde  $R$  = amplitude da amostra,  $d_2$  = coeficiente em função do número de cronometragens realizadas preliminarmente,  $\bar{X}$  = média da amostra,  $Er$  = erro relativo e  $Z$  = coeficiente da distribuição normal padrão para uma probabilidade determinada.

O quadro 8 e quadro 9 mostram os coeficientes disponíveis na literatura ligados à distribuição normal e ao número de cronometragens.

Quadro 8 – Distribuição normal.

Probabilidade	90%	91%	92%	93%	94%	95%	96%	97%	98%	99%
Z	1,65	1,70	1,75	1,81	1,88	1,96	2,05	2,17	2,33	2,58

Quadro 9 – Coeficiente  $d_2$  para o número de cronometragens iniciais.

N	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d_2$	1,128	1,693	2,059	2,326	2,534	2,704	2,847	2,970	3,078

Neste caso foi adotado uma confiabilidade de 90% e erro relativo de 10%. A partir daqui, utilizou-se o *software*©MatLab para a realização dos cálculos.

Para o elemento "Pegar o rolo", com  $\bar{X} = 44,72$ ,  $R = 7,75$ ,  $Z = 1,65$ ,  $Er = 0,1$  e  $d_2 = 2,0590$ , tem-se um  $N = 1,9287$ , ou seja, para que a amostra seja confiável considerando os parâmetros apresentados, deve-se medir no mínimo duas vezes o elemento "Pegar o rolo". Como foram realizadas quatro medições as medições são enquadradas como confiáveis. O mesmo procedimento foi realizado para os outros elementos e a mesma conclusão é verificada através dos valores de  $N$ . Para o elemento "Abrir barcaça" tem-se  $N = 1,5683$ , para "Revolver como o rolo"  $N = 0,6082$  e "Revolver com os pés"  $N = 4,7851$ .

Analisando a atividade do operador, a velocidade  $v$  (também denominada ritmo do operador) é determinada subjetivamente por parte do cronometrista, onde para  $v = 1$  a velocidade é normal, se  $v < 1$  a velocidade é lenta e se  $v > 1$  a velocidade é acelerada. Neste trabalho, o cronometrista julgou o operador com  $v = 0,95$ , devido as próprias condições de trabalho, tais como exposição ao sol.

As tolerâncias são calculadas em função dos tempos de permissão que uma determinada empresa se dispõe a conceder, desta forma surge o conceito de fator de

tolerância que é dado pela equação 19.

$$FT = \frac{1}{(1 - p)} \quad (36)$$

onde "p" é a relação entre o total de tempo parado devido às permissões e a jornada de trabalho. Em uma jornada de 8 h, o operador teve ao todo 15 minutos para lanche, 10 minutos para ingerir água e ir ao banheiro e 30 minutos para almoço. Aplicando a fórmula, tem-se que  $p = (10 + 15 + 30)/(8.60) = 0.1146$ , sendo assim obtém-se um fator de tolerância igual a 1.1294.

Uma vez obtida as  $n$  cronometragens válidas, deve-se:

- Calcular a média da  $n$  cronometragens, obtendo-se Tempo cronometrado (TC) ;
- Calcular o tempo normal (TN), onde:

$$TN = TC.v \quad (37)$$

- E, por fim, calcular o tempo padrão (TP), dado por:

$$TP = TN.FT \quad (38)$$

Com  $n$  cronometragens válidas foi calculado o tempo cronometrado  $TC = 44,72 + 38,01 + (1191,42.6) + (192,29.6) = 8384,99$  s. O operador no período observado revolveu seis vezes com o rolo e com os pés, por isso multiplicou-se por 6 as médias dos tempos observados nestas ações.

Para o cálculo do tempo normal, tem-se  $TN = TC.v = 7965,7405$  s. E por último tem-se o tempo padrão,  $TP = TN.FT = 7965,7405.1,1294 = 8996,507321$ s.

Logo tem-se um tempo padrão de 8996,507321 s o equivalente a aproximadamente 2 horas e 30 minutos para uma barcaça de dimensões 6x12.

### B.3 Avaliação da operação utilizando o Secador de Grãos vertical

O objetivo desta análise hipotética agora é comparar o desempenho do operador caso o mesmo trabalhe no secador de cacau. Para se comparar de forma mais adequada, considerou-se apenas um operador trabalhando no processo secagem, assim como na condição atual em grandes barcaças onde há apenas um barcaceiro responsável. A figura 39 ilustra o secador de grãos vertical, bem como a disposição de cada elemento e sequência de operação para mantê-lo em funcionando.

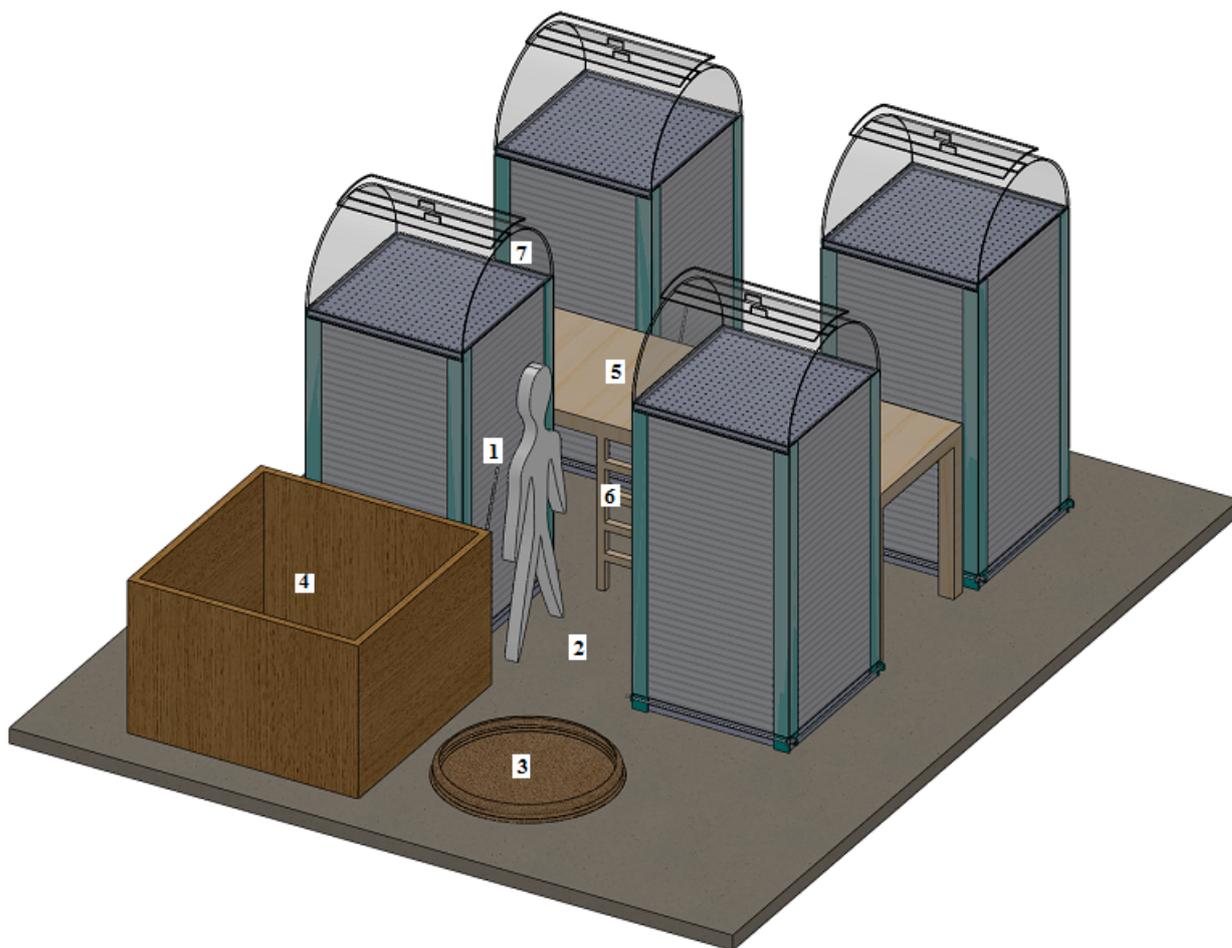


Figura 39 – Esquema do movimento do operário para a operação da torre de secagem de amêndoas de cacau.

Fonte: Autoria própria.

Os números dispostos na figura 39 são descritos em sua devida ordem no quadro 10, que descreve também cada elemento da operação.

Quadro 10 – Elementos da operação e descrição.

<b>Elementos</b>	<b>Descrição</b>
1 - Abrir a alavanca	Ação de abertura da alavanca proporcionando a elevação simultânea das bandejas, partindo da segunda (de baixo para cima);
2 - Retirada da bandeja	Ação de retirada da bandeja da torre contendo amêndoas secas;
3 - Ensacamento	Acondicionamento das amêndoas em sacos de linhagem;
4 - Alimentação das bandejas	Ação de alimentar a bandeja retirada com as amêndoas frescas contidas no caixote;
5 - Colocar a bandeja na plataforma	Após a alimentação da bandeja com as amêndoas moles, a mesma deve ser colocada em cima de uma plataforma para possibilitar a alimentação da torre;
6 - Subir da escada	Ação do operador que vai do solo até a metade da altura da torre.
7 - Alimentar a Torre	Ação do operador de empurrar a bandeja para dentro da torre;
8 - Descer da escada	Ação do operador que vai da metade da altura da torre até o chão.

Como o protótipo do secador de grãos ainda não foi montado, os tempos de cada operação serão simulados como mencionado no tópico 1. O quadro 11 mostra as medições para a ação de cada elemento da amostra.

Quadro 11 – Quadro de tempos cronometrados em centésimos de horas.

<b>Folha de observação</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>Tempos médios</b>	<b>Amplitude da amostra</b>
1 - Abrir a alavanca	2,89	2,87	2,61	2,76	2,78	0,28
2 - Retirada da bandeja	3,15	2,99	3,02	3,39	3,14	0,4
3 - Ensacamento	2,89	2,87	2,61	2,76	2,78	0,28
4 - Alimentação das bandejas	21,39	22,04	19,83	21,09	21,09	2,21
5 - Colocar a bandeja na plataforma	22,72	24,83	25,37	25,61	24,63	2,89
6 - Subir a escada	9,90	9,28	9,36	9,60	9,53	0,62
7 - Alimentar a torre	3,15	2,99	3,02	3,39	3,14	0,4
8 - Descer a escada	7,57	8,15	7,92	8,10	7,94	0,58

A utilização ou não da plataforma está ligada diretamente à altura do operador. Dependendo da sua altura, o mesmo pode ter dificuldades no processo de alimentação da torre e isto pode afetar negativamente os aspectos ergonômicos de operação, podendo causar acidentes, as chamadas "doenças do trabalho", dentre outros.

Com as variáveis já declaradas foi verificado que todos os valores de  $N$  foram menores ou iguais a 4, sendo assim, conclui-se que 4 medidas também foram suficientes para o caso.

Utilizando os mesmos procedimentos anteriores, para para o elemento "Abrir a alavanca", tem-se:  $Z = 1,65$ ,  $d_2 = 2,059$ ,  $Er = 0,05$ ,  $R = 0,28$ ,  $\bar{X} = 2,785$  obtém-se então a partir da equação 18 um  $N = 2,6011231$ . Os demais valores para o número de ciclo se encontram em um intervalo aberto ]1; 5[.

Já que trata-se de uma medição hipotética, toma-se que  $v=1$ , ou seja, velocidade normal.

As tolerâncias serão as mesmas já descritas no item 4.1.3, considerando-se que o tempo para necessidades pessoais deve variar entre 10 e 25 minutos por turno de 8 horas. Assim, o Fator de tolerância estará na faixa de 1.1294.

Uma vez obtida as  $n$  cronometragens válidas, segue-se o cálculo do Tempo Padrão (ou Tempo de Operação Padrão). O resultado foi que o tempo padrão para a operação secagem de cacau, utilizando secador vertical, é de aproximadamente  $55min$ . Ou seja, realizado os cálculos tem-se  $p = (10 + 15 + 30)/(8.60) = 0,1146$ ,  $FT = 1,1294$ ,  $TC = (2,78 + 3,14 + 2,78 + 21,09 + 24,63 + 9,53 + 3,14 + 7,94).40 = 3001,2$ ,  $v = 1$ ,  $TN = 3001,2.1 = 3001,2$ ,  $TP = 3001,2.1,1294 = 3389,591s$  equivalente a aproximadamente  $57min$ .

## B.4 Avaliação da operação utilizando o Secador de grãos vertical com motor

Foi observado no item anterior que ao utilizar o secador de cacau, há uma redução de aproximadamente 62% do tempo de operação, o que demonstra o quanto a indústria poderia ganhar em fatores temporais utilizando o secador de cacau. Este resultado já caracteriza um avanço em termos de economia de tempo e diminuição do esforço do trabalhador.

A abordagem agora consiste na inserção de um motor, seja elétrico ou pneumático, responsável pela abertura da alavanca e retirada da bandeja. Assim, a consequência é que, se duas ações podem ser substituídas por uma máquina, o operador não precisa esperar a ação se completar para continuar dando sequência no seu trabalho, logo estes elementos podem ser suprimidos do quadro 10.

Utilizando os mesmos procedimentos anteriores de cálculos tem-se  $p = (10 + 15 + 30)/(8.60) = 0,1146$ ,  $FT = 1,1294$ ,  $TC = (2,78 + 21,09 + 24,63 + 9,54 + 3,14 + 7,94).40 = 2764,4$ ,  $v = 1$ ,  $TN = 2764,4.1 = 2764,4$ ,  $TP = 2764,4.1,1294 = 3122,146s$  equivalente a aproximadamente  $52min$ .

O tempo padrão de uso do secador vertical sem o uso de um motor é de aproximadamente  $57min$ , já utilizando um motor, o tempo passou para aproximadamente  $52min$ , fornecendo uma redução de aproximadamente 9%. Comparando esta hipótese com o uso tradicional da barcaça, o qual o  $TP = 8996,51s$ , esta redução consiste em aproximadamente 55%. A figura 40 mostra o comparativo para as três situações abordadas neste artigo.

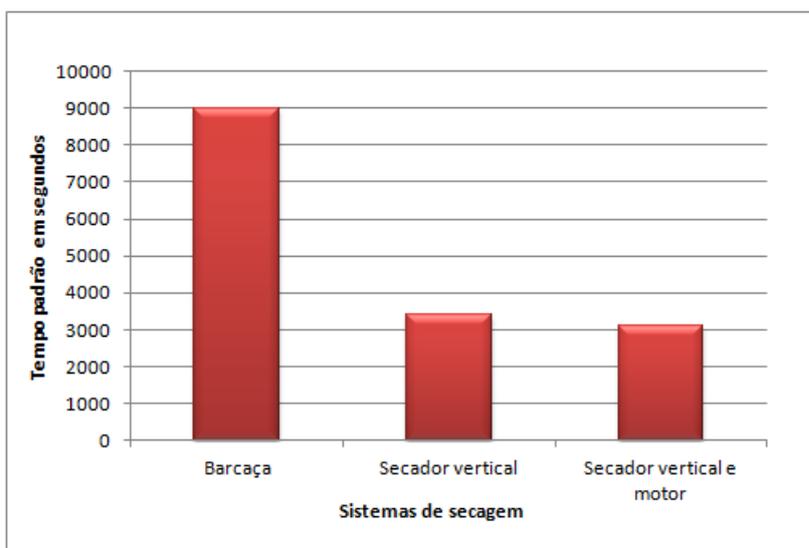


Figura 40 – Comparativo entre os tempos padrões para cada modelo de secagem de sementes adotado

Fonte: Autoria própria

Além disso, o uso de um motor faz com que diminua o esforço do trabalhador, evitando doenças ocupacionais, trabalho pesado, entre outros efeitos ergonômicos, reduzindo ainda a incidência de erros.

## APÊNDICE C – Simulações Multifísicas

Os resultados das simulações nos capítulos 3 e 4 foram obtidos com o auxílio do *software* COMSOL Multiphysics® e são consequências de um conjunto de etapas seguidas, estipuladas pelo mesmo. Como ilustrado na figura 41, a partir do acesso ao ambiente do *software*, são apresentadas janelas de configurações consecutivas, após cada avanço dado pelo usuário. As janelas mostram as opções de: definir o espaço de dimensões que se quer trabalhar (0D, 1D, 2D e 3D), física que se deseja estudar (interface física), e analogamente o tipo de estudo relacionado (estacionário, transiente, entre outros).

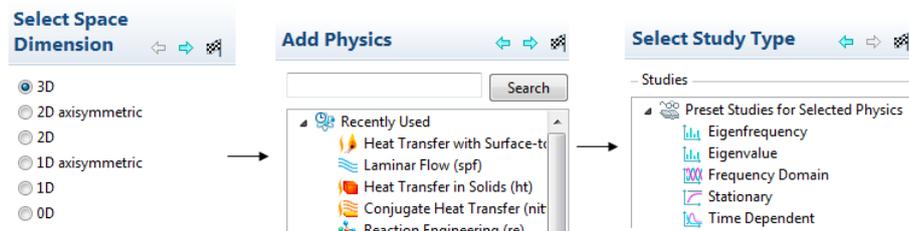


Figura 41 – Configurações iniciais para o início das simulações.

Fonte: Autoria própria

Após as definições supracitadas, outras mais específicas são necessárias. Forma-se uma árvore de nós, como mostrado na figura 42 e o acesso a cada nó leva a ambientes que permitem: a criação do modelo geométrico (domínios), acréscimo de materiais neste modelo com as propriedades físicas exigidas para o estudo escolhido, condições iniciais e de contorno, definição da malha de cálculo e por último tempo inicial, passo e tempo final de simulação (para regime transiente).

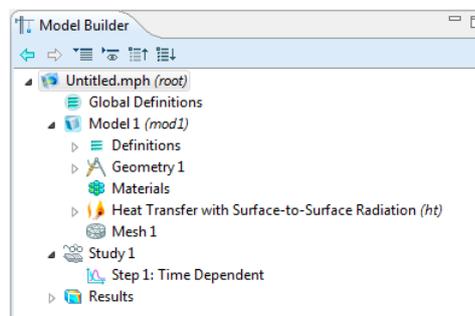


Figura 42 – Organização dos nós gerados automaticamente em função das configurações iniciais.

Fonte: Autoria própria

Estas são, a princípio, as etapas principais para a modelagem de um sistema a partir de tecnologias de CAD/CAE. O COMSOL Multiphysics® dispõe de uma extensa lista de materiais e uma grande parte com as constantes físicas exigidas para cada estudo, possibilitando ao usuário a edição destas. Certas constantes físicas estão indisponíveis para determinadas *interfaces*, porém o *software* permite a inserção das mesmas tornando possível a alimentação das equações envolvidas em um estudo para então se chegar às plotagens dos resultados.

Como visto anteriormente, a falta de memória de processamento para a plotagem de alguns modelos foi recorrente ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Não foi possível a utilização do *cluster* disponível na universidade, para paralelizar o problema, por uma série de problemas técnicos, sendo os principais: o não reconhecimento de licenças do COMSOL Multiphysics® e problemas com o *nobreak*. Para que fosse possível realizar as simulações em paralelo, seria necessário também um trabalho em conjunto, onde pessoas com conhecimentos específicos sobre o COMSOL Multiphysics® pudessem interagir com pessoas com conhecimentos ligados às próprias configurações necessárias para a instalação do *cluster*. Como não foi possível alcançar esta interação, utilizou-se para a realização das simulações um sistema com as configurações indicadas no quadro 12.

Quadro 12 – Configurações do sistema utilizadas para realizar as simulações.

Item	Valor
Nome do Sistema Operacional	Microsoft Windows 7 Professional
Versão	6.1.7601 Service Pack Compilação 7601
Fabricante do Sistema Operacional	Microsoft Corporation
Modelo do Sistema	LOG-Q77H2-AM
Tipo do Sistema	x64-based PC
Processador	Intel(R) Core(TM) i5-3550 CPU @ 3.30 GHz, 3301 Mhz, 4 Núcleos, 4 Processadores Lógicos
Versão/data do BIOS	American Megatrends Inc. P11-A2, 15/05/2013
Versão do SMBIOS	2.7
Memória física (RAM) Instalada	8,00 GB
Memória física total	7,88 GB
Memória física disponível	6,44 GB
Memória virtual total	15,8 GB
Memória virtual disponível	14,3 GB
Espaço do arquivo de paginação	7,88 GB

## C.1 Transferência de calor

Um dos principais objetivos deste trabalho foi a verificação das respostas térmicas de uma estufa verticalizada para a secagem de amêndoas de cacau bem como de uma barçaça, após submetê-los às mesmas condições físicas. A seguir serão detalhadas as etapas para a modelagem térmica dos dois sistemas de secagem em questão.

As configurações gerais consistiram na escolha do espaço de dimensões em 3D, a escolha da *interface* física *Heat Transfer > Radiation > Heat Transfer with Surface-to-Surface Radiation*, e um regime *Time Dependent* (dependente do tempo). A partir desta *interface* física, pode-se calcular os fenômenos de transferência de calor desfrutando de recursos avançados de radiação, como a consideração de uma radiação externa incidindo em um domínio bem como troca de radiações entre superfícies.

As definições específicas de cada modelo consistiram primeiramente na criação de cada geometria para o estudo térmico. Como foi escolhido um espaço de dimensões em 3D, foram definidas então as geometrias para as simulações da torre e da barçaça a partir do acesso ao nó *Geometry 1* e posteriormente comandos para a criação de entidades em 2D como *Draw Circle* e *Draw Rectangle*, e comandos que possibilitam a geração dos volumes das geometrias como *Extrude* e *Revolve*. Como mostrado na figura 43, foram criados dois sistemas geométricos para as simulações em 3D: a torre verticalizada sobre um bloco de concreto e uma barçaça sobre um bloco de concreto. Ambos os sistemas são subdivididos em  $n$  entidades, automaticamente, denominadas pelo *software* de domínios.

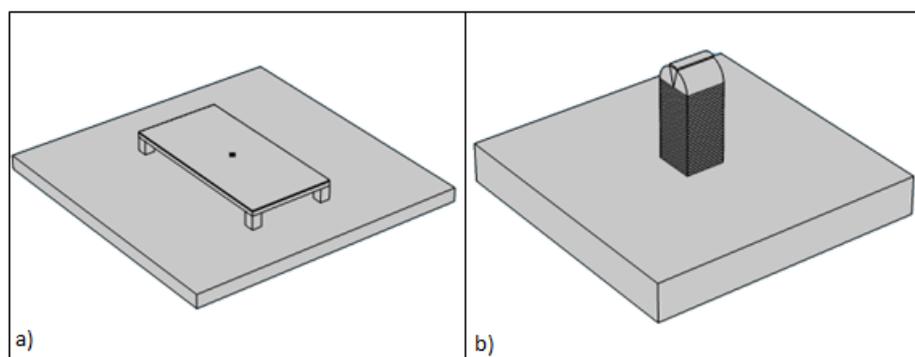


Figura 43 – a) Barçaça sobre um bloco de concreto; b) Torre sobre um bloco de concreto.

Fonte: Autoria própria

Após a criação dos domínios é necessário o acréscimo dos materiais referentes a cada um dos mesmos a partir do nó *Materials*. Os materiais utilizados para a simulação da torre verticalizada foram polietileno, concreto, ar e alumínio, já para a simulação da barçaça, madeira de pinheiro e concreto foram utilizados.

As definições de materiais aos domínios ou de condições iniciais ou de contorno são feitas adicionando os materiais ou condições desejadas no modelo, a partir de cliques com o botão direito nos nós, e posteriormente clicando nas entidades da geometria na área de modelagem (vértices, arestas, superfícies, entre outras) que se deseja associar a um material ou uma determinada condição.

As definições das condições físicas as quais os domínios da barcaça e da torre foram submetidos, foram acrescentadas a partir do acesso ao nó e subnó referente a *interface* física escolhida. Os elementos referidos estão mostrados na figura 44. Na *interface* física escolhido além de ser considerado o fenômeno de radiação entre superfícies no modelo, também foram definidas duas bandas de radiações nos sistemas, onde os comprimentos de ondas menores que  $2,5\mu m$  correspondem à irradiação solar, e os maiores que  $2,5\mu m$  correspondem a irradiação ambiental e ainda o índice de refração do meio transparente (ar) foi considerado 1.

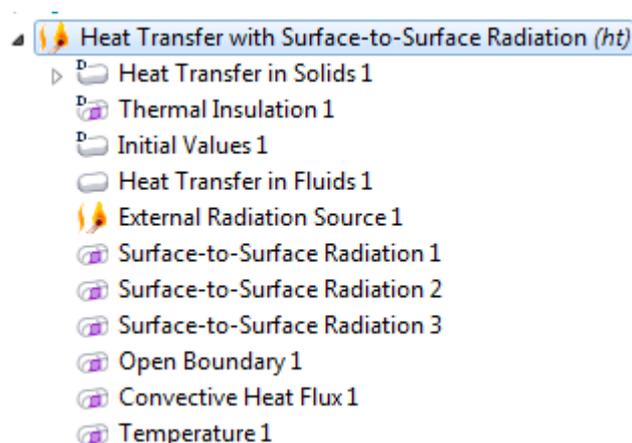


Figura 44 – Condições físicas expressas em um nó e 11 subnós.

Fonte: Autoria própria

As três primeiras condições apresentadas na figura 44 são padronizadas no modelo, se apresentam automaticamente. Para a simulação da torre, a condição inicial em *Initial Values 1 > Temperature* foi preenchida pela equação 17. Clicando com o botão direito no nó físico, pode-se acrescentar diversas outras condições. Como existe ar no interior da estufa, foi adicionada a opção *Heat Transfer in Fluids 1* relacionando-a com os domínios correspondentes a este material, e como consequência os domínios restantes são relacionados ao subnó *Heat Transfer in Solids 1. Thermal Isolation 1*, condição de isolamento térmico, é aplicada automaticamente aos domínios os quais outras condição não foram definidas.

Para a consideração da variação da irradiação solar incidente, foi adicionada a condição *External Radiation Source 1*, onde a irradiância, latitude, longitude e fuso horário de Ilhéus, bem como dia mês e ano foram informações necessárias para o cálculo

da variação da posição solar ao longo do dia, neste caso de 8h às 17h. O efeito de troca de radiações entre superfícies foi considerado ao adicionar o subnó *Surface-to-Surface Radiation*, onde foi definida uma irradiação solar incidindo na direção do eixo z, de cima para baixo, e uma radiação ambiental emitindo em todas as direções. A condição *Open Boundary 1* foi escolhida para a definição dos domínios abertos da torre.

O efeito das forças dos ventos também foram considerados, e esta condição é determinada ao se escolher *Convective Heat Transfer 1*, onde para a simulação da torre verticalizada utilizou-se um valor de coeficiente de convecção de calor equivalente a  $25W/(m^2.K)$ . Foi adicionada ainda uma temperatura fixa de  $25^{\circ}C$  no plano oposto ao plano que se encontra a torre a partir da adição do subnó *Temperature 1*.

Após as configurações físicas, criou-se uma customizada malha de cálculo para o domínio da torre vertical, já para a simulação da barcaça foi criada uma malha automática, definida pelo *software*. Diferentes elementos de malha podem ser adicionados em diferentes domínios. A figura 45 mostra algumas opções de malha após o clique com o botão direito do *mouse* no nó *Mesh 1*.

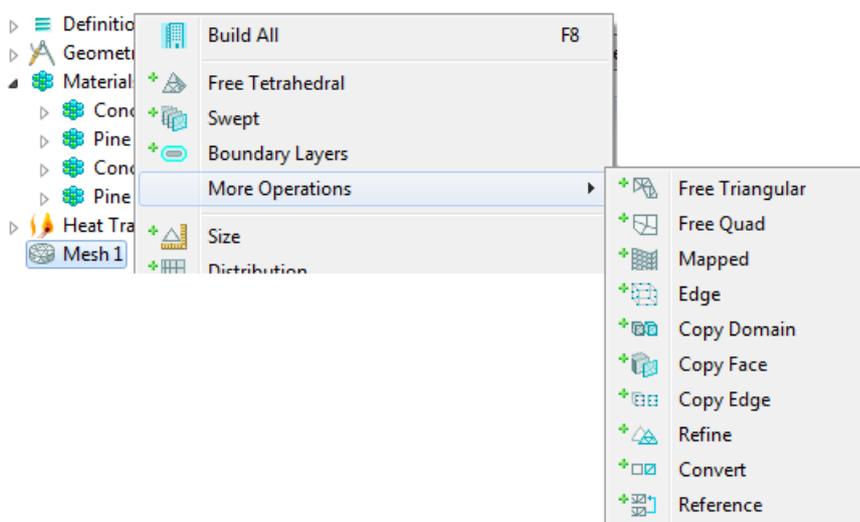


Figura 45 – Opções de elementos de malha.

Fonte: Autoria própria

O *software* utilizado possibilita o usuário aumentar ou reduzir o número de nós em determinados domínios, isto é muito conveniente quando se quer reduzir os esforços computacionais melhorando a precisão dos resultados em domínios específicos. Para a simulação do sistema relacionado à estufa os elementos utilizados foram: tetraédricos, triangulares, quadrilaterais, prismáticos, arestas e vértices. Para a simulação da barcaça os elementos utilizados foram: tetraédricos, triangulares, vértices e arestas. As geometrias discretizadas estão ilustradas na figura 46.

Expandindo o nó *Study 1*, e clicando em *Time Dependent* foi adicionado o intervalo

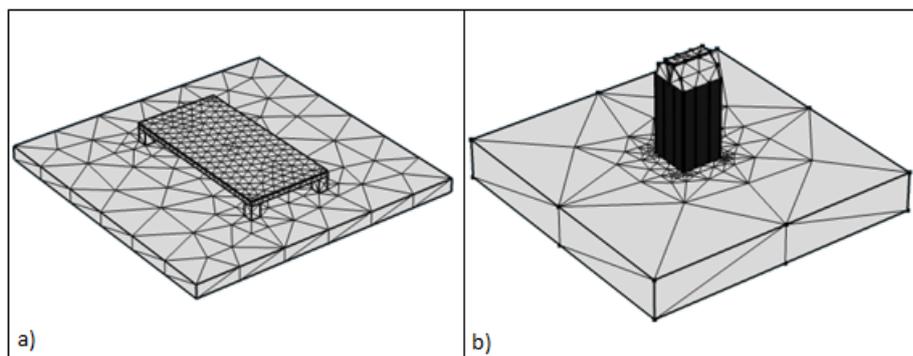


Figura 46 – a) Sistema da barcaça discretizado; b) Sistema da torre vertical com as bandejas discretizado.

Fonte: Autoria própria

da simulação desejado, ou seja,  $range(8[h], 1[h], 17[h])$  que respectivamente se refere ao início ( $8h$ ) da simulação, passo ( $1h$ ) e fim da simulação ( $17h$ ).

Por último, clicando em *Study 1 > Compute*, inicia-se os processos de cálculos computacionais iterativos, considerando as equações envolvidas e as condições informadas ao modelo, resultando então nas plotagem de campos de temperaturas para os modelos em 3D vistos neste trabalho.

Para a modelagem da torre sem as bandejas, as etapas anteriores são válidas, havendo mudança na consideração da condição *Surface-to-Surface Radiation*, onde para este caso a mesma foi aplicada somente na superfície do bloco de concreto a qual se encontra a torre. Na modelagem considerando as bandejas no interior da torre, este fenômeno foi aplicado à superfície citada bem como às 40 bandejas contidas no interior da torre. O mesmo é válido para os modelos em 2D, porém, com a modificação de um novo espaço de trabalho (2D) e do tipo de estudo (estacionário).

## C.2 Efeitos convectivos

Como visto anteriormente o fenômeno de convecção é esperado no interior da torre em função da diferença de temperatura entre o corpo do sistema e o teto. Devido a problemas de processamento, houve a necessidade de simplificação da geometria para o estudo deste fenômeno de forma que considerou-se a geometria em 2D, desprezando as 40 bandejas no interior do sistema de secagem proposto.

As definições iniciais para a modelagem do sistema considerando o fenômeno em questão consistiram na escolha da opção do espaço de dimensões 2D, a interface *Fluid Flow > Non-Isothermal flow > Laminar flow* e o regime de simulação *Time Dependent*. Esta interface física possibilita o cálculo de escoamento de fluidos compressíveis acoplado à

fenômenos de transferência de calor.

Desta forma então forma-se uma árvore de nós e subnós (similar à figura 37), e então iniciou-se os processos mais específicos de definições do modelo partindo com a definição da geometria, como mostrado na figura 47.

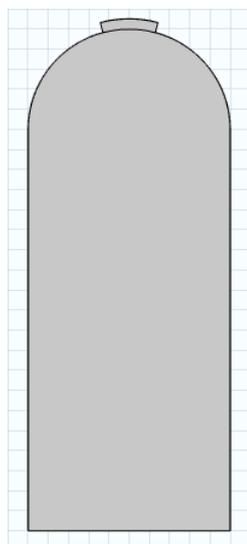


Figura 47 – Geometria criada para a simulação.

Fonte: Autoria própria

A figura 47, representa um corte longitudinal da torre verticalizada. Existe uma espessura de 1mm nas laterais da geometria e no teto para a representação do filme de polietileno. Todo o domínio restante é correspondente ao ar. A figura 48 mostra as condições relacionadas a esta *interface* física.

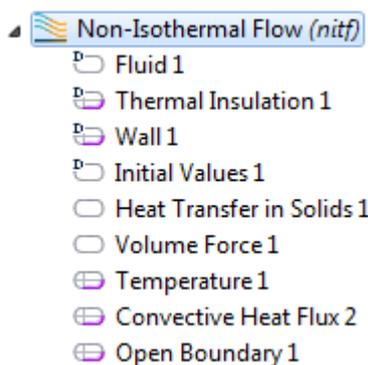


Figura 48 – Condição inicial e condições de contorno definidas.

Fonte: Autoria própria

Em *Fluid 1*, precisa-se selecionar os domínios referentes ao fluido, neste caso o ar. *Thermal Isolation 1* é considerado automaticamente pelo *software* quando nenhuma condição é adicionada a uma determinada entidade geométrica. A condição *Wall 1*

se refere a condição de não escorregamento ou regiões onde a velocidade é nula. O *software* adiciona esta condição inicialmente em todas as superfícies de contato entre o fluido e sólido. Em *Initial Values 1* define-se a condição inicial, onde no caso desta simulação considerou-se o sistema a uma temperatura de  $30^{\circ}\text{C}$ . Em *Heat Transfer in Solids 1*, define-se os domínios referentes aos corpos sólidos para que desta forma a equação da difusão de calor seja aplicada no domínio referido. *Volume Force 1* é a condição em que considera-se as forças de empuxo, no caso deste modelo, uma força de convecção natural ascendente devido à diferença de densidade em pontos no ar contido no interior da torre vertical. A condição de contorno *Temperature 1* foi adicionada para considerar o solo a uma temperatura de  $35^{\circ}\text{C}$ . *Convective Heat Flux 2* para a consideração da perda de calor devido às forças dos ventos, com um coeficiente de convecção de  $25\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$  e *Open Boundary 1* para os limites que representam a abertura no teto da torre para a saída do excesso de calor.

Após as anteriores definições, criou-se a malha de cálculo automaticamente aplicando-se um controle físico para a criação da mesma, ou seja, a malha mais adequada em função da física definida, como mostra a figura 49.

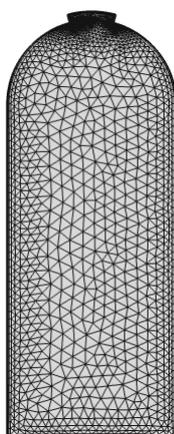


Figura 49 – Malha de cálculo criada automaticamente pelo *software*.

Fonte: Autoria própria

Após a criação da malha, foi definido então o tempo inicial de simulação, passo e tempo final. Isso pode ser feito a partir do acesso ao subnó *Study 1 > Step 1: Time Dependent*. Para o modelo em questão foi definido  $\text{range}(0,2[\text{s}],4[\text{min}])$  e após o clique em *Study 1 > Compute*, pode-se verificar os campos de velocidades mostrados neste trabalho com um tempo de simulação de  $60\text{s}$  e  $90\text{s}$ .

As simulações relacionadas à saída de ar pela parte superior da torre seguem a mesma sequencia citada, onde somente foi destacado o domínio do ar para tornar mais claro o fenômeno em questão.

## Referências

- AMARAL, D. C.; TOLEDO, J. C. D. colaboração cliente-fornecedor e qualidade no processo de desenvolvimento de produto. **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Niterói-RJ, n. 18, 1998.
- BECKETT, S. T. **Industrial chocolate manufacture and use**. 2. ed. London: Chapman and Hall, 1994. 408 p.
- BEGIATO, G. F.; SPERS, E. E.; CASTRO, L. T. E.; NEVES, M. F. Análise do sistema agroindustrial e atratividade dos vales do são francisco para a cacauicultura irrigada. **Custos e Agronegócios**, v. 5, n. 3, 2009.
- CHUERUBIM, M. L. análise da variação da radiação solar na superfície terrestre com base no cálculo da irradiância para diferentes latitudes. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 6, n. 1, p. 75–80, 2012.
- COMSOL. **A Warm Sunny Day on the Beach under a Parasol**. 2015. Disponível em: <<http://www.br.comsol.com/models?q=parasol>>. Acesso em: 31 de janeiro de 2015.
- COSTA, E.; LEAL, P. A. M.; JÚNIOR, R. R. D. C. Modelo de simulação da temperatura e umidade relativa do ar no interior de estufa plástica. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 1, p. 57–67, 2004.
- DAVOLOS, J. F. M. R.; CORREA, M. A. Protetores solares. **Química Nova**, v. 30, n. 1, p. 153–158, 2007.
- EFRAIM, P.; PEZOA-GARCÍA, N. H.; JARDIM, D. C. P.; NISHIKAWA, A.; HADDAD, R.; EBERLIN, M. N. Influência da fermentação e secagem de amêndoas de cacau no teor de compostos fenólicos e na aceitação sensorial. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas - SP, p. 9, 2010.
- FERREIRA, A. C. R.; AHNERT, D.; NETO, B. A. de M.; MELLO, D. L. N. Guia de beneficiamento de cacau de qualidade. **Ficha técnica**, 2013.
- INCROPERA, D. P. D. F. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro: LTC Editora - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2003.
- JOHNSON, C. **Numerical solutions of partial differential equations by the finite element method**. CAMBRIDGE: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1987.
- LAUGENI, F. P.; MARTINS, P. G. **Administração da Produção**. 2. ed. [S.l.]: Saraiva, 2005.
- LOTT, R. S.; MACHADO, A. W.; MAZZIEIRO, N. T.; JÚNIOR, J. L. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. **Revista Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial**, Maringá, v. 11, n. 2, p. 35–43, 2006.
- MCDONALD, C. R.; FREIRE, E. S. Secagem de cacau em um secador tipo plataforma com e sem recirculação de ar. **COMISSÃO EXECUTIVA DO PLANO DA LAVOURA DO CACAU**, 1983.

MCGUINNESS, N.; WILSON, A. N.; JONES, M.; MIDDLETON, J.; ROBERTSON, N. R. Stresses induced by edgewise appliances in the periodontal ligament - a finite element study. **The Angle Orthodontist**, Appleton, v. 62, n. 1, p. 15–22, 1992.

MICHELINO, G. **Estudo de Tempos para Supervisores**. 2. ed. São Paulo: Publicações Educacionais Limitada, 1964.

NETO, O. L. D. M.; COSTA, A. A.; RAMALHO, F. P. Estimativa de radiação solar via modelagem atmosférica de mesoescala aplicada à região nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 3, p. 339–345, 2009.

NITSCHKE, A. T.; FILHO, E. R. aplicação de tecnologias de CAD/CAE/CAM em desenvolvimento de produtos. **XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Curitiba-PR, 2002.

OETTERER, M.; REGITANO-D'ARCE, M. A. B.; SPOTO, M. H. F. **Fundamentos de ciência e tecnologia de alimentos**. BARUERI-SP: MANOLE LTDA, 2006.

PINTO, L. I. C.; COSTA, M. H.; DINIZ, L. M. F.; SEDIYAMA, G. C.; PRUSKI, F. F. Comparação de produtos de radiação solar incidente à superfície para a América do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 4, p. 469–478, 2010.

PIRES, A. J. V.; VIEIRA, V. F.; SILVA, F. F. D.; VELOSO, C. M.; SOUZA, A. L. D.; OLIVEIRA, T. N. D.; SANTOS, C. L. D.; CARVALHO, G. G. P. D. Níveis de farelo de cacau (*Theobroma cacao*) na alimentação de bovinos. **REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria**, España, VI, n. 2, p. 1–10, 2005.

POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C.; MIDHAT; P. SHIH, T. I. **Mecânica dos Fluidos**. SÃO PAULO: PIONEIRA THOMSON LEARNIG, 2004.

SALES, J. H. D. O.; FILHO, G. W. L. N.; SANTOS, E. C. Use of software CAD and CAE in product development for sustainable water heating. **Revista GEINTEC: gestão, inovação e tecnologias**, v. 3, p. 168–179, 2014.

SALES, J. H. D. O.; SANTOS, E. C.; CANDIDA, T. Beneficiamento de amêndoas de cacau em um secador alternativo solar. **Aceito para publicação - International Symposium on Technological Innovation**, v. 1, p. 1–15, 2014.

SALES, J. H. D. O.; SANTOS, E. C.; LIMA, C. A. Comsol multiphysics model of a solar dryer. **Comsol Conference 2014**, Curitiba, v. 1, p. 1–5, 2014.

SANTOS, E. C.; SALES, J. H. D. O.; DANTAS, I. simulação de um secador vertical. **XVI Encontro de modelagem Computacional**, Ilhéus - BA, v. 1, p. 1–10, 2013.

SANTOS, W. N. D.; FILHO, R. G.; MUMMERY, P.; WALLWORK, A. Método de fio quente na determinação das propriedades térmicas de polímeros. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 14, n. 5, p. 354–359, 2004.

SILVA, H. G. D. O.; PIRES, A. J. V.; SILVA, F. F. D.; VELOSO, C. M.; CARVALHO, G. G. P. D.; CEZÁRIO, A. S.; SANTOS, C. C. Farelo de cacau (*Theobroma cacao* L.) e torta de dendê (*Elaeis guineensis*, jacq) na alimentação de cabras em lactação: Consumo e produção de leite. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 34, n. 5, p. 1786–1794, 2005.

---

SILVA, W. P. D.; PRECKER, J. W.; SILVA, C. M. D. P. S. e; SILVA, D. D. P. S. E.; SILVA, C. D. P. S. E. Medida de calor específico e lei de resfriamento de newton: Um refinamento na análise dos dados experimentais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 4, 2003.