



Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido – CDSA
Unidade Acadêmica de Tecnologia do Desenvolvimento – UATEC
Curso de Engenharia de Biosistemas

Maria Teresa Cristina Coelho do Nascimento

ESTUDO NUMÉRICO DE UM SECADOR SOLAR DE EXPOSIÇÃO DIRETA

SUMÉ – PB
SETEMBRO - 2014.

Maria Teresa Cristina Coelho do Nascimento

ESTUDO NUMÉRICO DE UM SECADOR SOLAR DE EXPOSIÇÃO DIRETA

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Biossistemas, do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Engenheiro de Biossistemas.

Orientadora: Prof^ª. Dr.^a. Fabiana Pimentel Macêdo Farias

SUMÉ – PB

SETEMBRO – 2014

N244e Nascimento, Maria Teresa Cristina Coelho do.
Estudo numérico de um secador solar de exposição direta. /
Maria Teresa Cristina Coelho do Nascimento. - Sumé - PB: [s.n],
2014.

35 f.

Orientadora: Professor^a Dr^a. Fabiana Pimentel Macêdo Farias.

Monografia - Universidade Federal de Campina Grande; Centro
de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido; Curso de Graduação
em Engenharia de Biosistemas.

1. Energia - renovável. 2. Secagem - alimentos. 3. Secador
solar. I. Título.

CDU: 631.365(043.3)

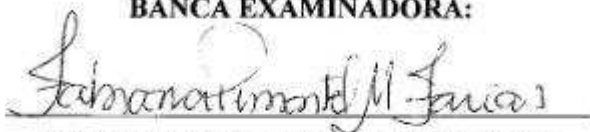
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SEMIÁRIDO
UNIDADE ACADÊMICA DE TECNOLOGIA DO DESENVOLVIMENTO
CURSO DE ENGENHARIA DE BIOSISTEMAS**

**PARECER FINAL DO JULGAMENTO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE
CURSO**

MARIA TERESA CRISTINA COELHO DO NASCIMENTO

ESTUDO NUMÉRICO DE UM SECADOR SOLAR DE EXPOSIÇÃO DIRETA

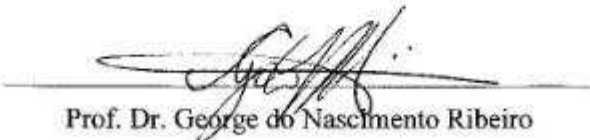
BANCA EXAMINADORA:



Prof.^a. Dra. Fabiana Pimentel Macêdo Farias
Orientadora – UATEC/CDSA/UFCG



Prof.^a. Dra. Joelma Sales dos Santos
Examinadora – UATEC/CDSA/UFCG



Prof. Dr. George do Nascimento Ribeiro
Examinador – UATEC/CDSA/UFCG

Trabalho aprovado em: 22 de setembro de 2014.

SUMÉ – PARAÍBA.

*Dedico esta, bem como todas as minhas
demais conquistas, aos meus pais,
Adailton e Socorro, e a minha filha
Isadora com muito amor.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me dado uma família maravilhosa e amigos verdadeiros. Deus que me atribuiu missões e permitiu que tudo isso acontecesse, não apenas nesses anos como universitária, mas em todos os momentos, é o maior mestre que alguém pode conhecer.

Aos meus pais José Adailton e Maria do Socorro, por minha vida, pelos exemplos de luta e de uma vida digna, com humildade e respeito ao próximo, por terem me apoiado em todos os momentos que precisei. Obrigada pelo amor incondicional.

A minha filha Isadora que com muito carinho e apoio, me estimulou a chegar até esta etapa de minha vida.

Ao meu namorado e companheiro Flavinho pela paciência, pelo incentivo e principalmente pelo carinho.

Aos meus irmãos Augusto e Adailton Júnior, e meus sobrinhos Sarah e Gustavo por me proporcionarem momentos felizes.

Aos meus avós paternos, Antonio José e Terezinha “in memórian” e maternos, José Silvino e Joana por eles terem me dado pais tão maravilhosos, agradeço eternamente.

À professora Fabiana Pimentel, pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão deste trabalho.

À professora e coordenadora do curso Joelma Sales, pelo convívio, pelo apoio, pela compreensão e pela amizade.

A todos os professores do curso, que foram tão importantes na minha vida acadêmica.

Aos meus amigos e colegas, pelo incentivo e pelo apoio constantes.

À Universidade Federal de Campina Grande pela oportunidade de fazer o curso.

Aos Laboratórios LCTF (Laboratório Computacional em Térmica e Fluidos) e LPFI (Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem) da Universidade Federal de Campina Grande que permitiram a realização deste trabalho.

À banca examinadora pela colaboração na versão final desse trabalho.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho.

RESUMO

A secagem é uma prática empregada na conservação de alimentos que ainda sofre muitas perdas relacionadas a altas temperaturas, longos períodos de secagem, dentre outros fatores, necessitando de equipamentos que venham minimizar essas perdas e proporcionar custos cada vez menores do processo, e o secador solar além de usar energia limpa, é uma ótima tecnologia para regiões com elevados índices de radiação solar. Logo, este e muitos outros processos podem ser facilmente simulados com a utilização de softwares comerciais disponíveis que visam a otimização e controle do processo. Este trabalho tem como finalidade avaliar numericamente o comportamento da termofluidodinâmica em um secador solar de exposição direta, ajudando no desenvolvimento de secadores solares mais eficientes para a obtenção de produtos finais com mais qualidade. Portanto, as soluções numéricas foram obtidas usando o software comercial ANSYS CFX, onde foram apresentados e analisados os campos de temperatura e pressão e as linhas de fluxo do ar. Nos resultados, observou-se que a temperatura do ar no interior do secador solar de exposição direta aumenta quando este se aproxima da superfície de vidro e que para velocidades menores do ar há uma tendência do ar se aquecer com maior intensidade, devido a sua maior permanência no interior do secador solar.

Palavras – chave: Secagem, Energia Solar, CFX, Simulação Numérica.

ABSTRACT

Drying is a practice used in food preservation that still suffers many losses related to high temperatures, long periods of drying, among other factors, requiring equipment that will minimize these losses and provide increasingly smaller costs of the process, and the solar dryer addition to using clean energy, is a great technology for regions with high levels of solar radiation. Thus, this and many other processes can be easily simulated using commercial software available that aim to optimize and control the process. This paper aims to numerically evaluate the behavior of termofluidodinâmica in a solar dryer of direct exposure, helping the development of more efficient solar dryers to obtain final products with higher quality. Therefore, the numerical solutions were obtained using the commercial software ANSYS CFX, where they were presented and analyzed in the fields of temperature and pressure and air flow lines. In the results, it was observed that the temperature of the air within the direct exposure to solar dryer increases as it approaches the surface of glass and to lower air velocities there is a tendency for air to heat more intensely, due to its higher stay inside the solar dryer.

Key words: Energy, Solar Radiation, Software, Numerical Simulation.

Lista de Figuras

Figura 1- Secagem solar de castanha de caju.	15
Figura 2 - Vista Frontal do secador solar “tipo túnel”	16
Figura 3 - Representação de uma malha.....	17
Figura 4 - Secador solar de exposição direta, disponibilizado pelo Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido (CDSA) da UFCG.	19
Figura 5 - Representação da geometria do secador solar.	20
Figura 6 - (a) Representação da geometria e malha do secador solar (b) Ampliação da seção de entrada.....	23
Figura 7 - Linhas de fluxo do ar no interior do secador solar.	24
Figura 8 - Campo de pressão no interior do secador solar.	25
Figura 9 - (a) Campo vetorial no plano ZY em posições distintas (b) Na posição central.	26
Figura 10 – Campo de temperature no plano ZY para diferentes posições.....	27
Figura 11 – Distribuição de temperature em função da posição Y em três posições (0,05; 0,35 e 0,65 m) ao longo do eixo central do secador solar.	28
Figura 12 – Perfis de velocidade para diferentes posições no secador solar.....	29
Figura 13 – Perfis de velocidade para diferentes velocidades de entrada do ar no secador solar a 0,25 m da entrada do secador solar.....	30
Figura 14 – Temperatura em função da altura do secador para diferentes velocidades de entrada do ar no secador solar a 0,25 m da entrada do secador solar.....	31

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Dimensões do secador solar.....	20
Tabela 2 – Propriedades do ar	22
Tabela 3 – Condições iniciais e de contorno	22

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Objetivos	11
1.1.1. Geral	11
1.1.2. Específicos.....	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1. Secagem.....	12
2.2. Tipos de Secadores.....	13
2.3. Energia Renovável	14
2.4. Secador Solar.....	15
2.5. Fluidodinâmica Computacional (CFD)	17
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1. Condução da Pesquisa	19
3.2. Geometria e Malha do Secador Solar	19
3.3. Modelo matemático.....	21
3.4. Condições iniciais e de Contorno.....	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
5. CONCLUSÃO	32
5.1. Sugestões para trabalhos futuros.....	32
6. BIBLIOGRAFIA PESQUISADA	33

1. INTRODUÇÃO

No cenário atual, vem se observando a necessidade de utilizar um número cada vez maior de tecnologias que almejem o mínimo gasto de energia, seja ela de origem fóssil (combustível) seja ela elétrica (usinas hidroelétricas). Neste foco, vem se convencionando a utilização de tecnologias que empreguem energia renovável, onde neste âmbito se enquadra de maneira sistêmica a utilização da energia solar para diversos fins, entre eles destacam-se a secagem de frutas, hortaliças e outros tipos de vegetais.

O Brasil está cada vez mais investindo no desenvolvimento de novas tecnologias, entre elas a energia solar. Contudo, o Brasil é um país que possui todas as características favoráveis para investir nesse ramo, principalmente na região Nordeste, onde a incidência da radiação solar é bastante favorável para esse processo. A utilização dessa energia torna-se cada dia mais importante no combate ao aquecimento do planeta, registrado por especialistas como ocasionadores de fenômenos climáticos severos como secas furacões e enchentes, que causam perda econômica e comprometem a saúde das pessoas no mundo inteiro, decorrentes do uso de tecnologias não renováveis. A secagem solar na região Nordeste, surge como uma grande oportunidade de renda para os produtores locais, uma vez que produtos secos, principalmente frutas, quando beneficiadas agregam valor comercial e aumenta o seu teor nutritivo.

Alonso (2001) expõe diversas razões para intensificar estudos experimentais e numéricos para secadores solar, dos quais se destaca o dimensionamento de equipamentos. Um dos principais desafios encontrados é o desenvolvimento de equipamentos de secagem que sejam economicamente viáveis para os pequenos agricultores de diversas regiões do Brasil, frente à escassez e o alto custo das energias fósseis e poluidoras.

Entre as tecnologias desenvolvidas para a produção de produtos de boa qualidade, tanto no aspecto sensorial como nutritivo e econômico, a secagem toma uma posição vantajosa devido à redução do peso da matéria prima diminuindo o preço de transporte e de estocagem. A desidratação de frutas e hortaliças em um secador solar é uma tecnologia simples e de baixo custo que, quando planejado e adequado às

condições de secagem, podem-se obter produtos de boa qualidade, similar ao produzido em secadores de bandeja que funcionam com a fonte de energia elétrica, que, indiscutivelmente, deve ser substituída por fontes naturais de energia. Portanto, é de fundamental importância o desenvolvimento de projetos que busquem estudar o beneficiamento de frutas e hortaliças pelo processo de secagem em secadores solar de fácil operação nas regiões produtoras.

Além disso, o estudo numérico do secador solar, onde se avalia os aspectos termofluidodinâmicos e geométricos, visa a otimização do equipamento proporcionando o dimensionamento e controle ótimos do processo, assegurando assim, uma melhor eficiência do processo de secagem de forma a garantir a manutenção da qualidade do produto final. A Fluidodinâmica computacional é considerada uma importante ferramenta capaz de solucionar problemas ligados à engenharia, que simula o comportamento dos fluidos e a transferência de calor e massa, determinando as equações matemáticas que governam esses processos.

Neste sentido, pretende-se dar uma contribuição no entendimento dos processos termofluidodinâmicos de um secador solar de exposição direta, proporcionando assim um maior conhecimento das correntes gasosas no interior do secador solar de radiação direta, com o auxílio do aplicativo comercial ANSYS CFX, que possibilita estudar as condições operacionais, dinâmicas e térmicas deste equipamento, ajudando no desenvolvimento de secadores solares cada vez mais eficientes, para a obtenção de produtos finais com mais qualidade.

1.1. Objetivos

1.1.1. Geral

Estudar a termofluidodinâmica de um secador solar de radiação direta, utilizando o aplicativo comercial ANSYS CFX.

1.1.2. Específicos

- Propor um modelo matemático capaz de prever numericamente a termofluidodinâmica do secador solar de radiação direta;
- Avaliar o comportamento da corrente gasosa no interior do secador solar a partir dos campos de pressão, velocidade e temperatura;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Secagem

A secagem pode ser considerada como uma combinação de vários fatores, como a remoção de umidade da superfície do produto e migração de umidade do interior à superfície do produto. Tanto a velocidade como a taxa de remoção de umidade da superfície do produto dependem da área do produto exposta ao ar e da habilidade do ar de remover a água da superfície. Conseqüentemente, quanto maior a área superficial do produto, maior também será a área de troca de calor e massa com o fluxo de ar, promovendo a retirada de água. Assim sendo, a diferença de pressão de vapor da superfície do produto e a pressão de vapor do fluxo de ar determinam a força motriz para a remoção de água nesta fase (COSTA, 2008).

De acordo com (BIHAIN, 2011) deve-se ter alguns cuidados no processo da secagem, pois, apesar de ser necessária uma secagem rápida, na sua realização é preciso reverenciar o princípio físico, onde a umidade do interior do produto precisa migrar para a periferia e ser transportada pelo ar para fora do ambiente de secagem. Quando há uma diferença significativa entre a umidade do interior e a periferia do produto, poderão ocorrer estragos internos que conseqüentemente danificará a qualidade do produto. Deste modo, também é necessário ter cuidado com a secagem exagerada, que acarreta em perda das propriedades físicas do produto.

Segundo (PARK, et al, 2007) para acontecer o processo de secagem é imprescindível o fornecimento de calor, geralmente cedido pelo ar quente, para vaporizar a água na superfície do produto ou mesmo próximo da mesma, se a mudança de estado ocorrer no interior do produto. Já o vapor gerado deverá ser removido pelo fluxo de ar, seja em convecção natural ou forçada. Na medida em que ocorre a retirada da umidade da superfície do produto e das camadas externas, cria-se no interior do produto um gradiente de concentração, levando a um processo migratório da umidade, a partir do centro para a superfície (ALONSO, 2001; FIOREZE, 2004).

A direção do fluxo de vapor sempre acontecerá do ponto com maior valor de umidade relativa para o de menor. Portanto, para que ocorra a secagem é indispensável que a umidade relativa do ar de secagem circunvizinho ao produto seja menor que a umidade relativa do ar do micro-clima do produto. E, para diminuir a umidade relativa

de secagem, é indicado aquecê-lo, podendo acontecer facilmente por meio da radiação solar (SILVA, 2005).

Dependendo da intensidade e do efeito da secagem, pode-se ocorrer a perda ou a inutilidade do produto. Deste modo, é muito importante estudar cuidadosamente a eficiente utilização da energia no processo, onde várias técnicas são utilizadas pelos pesquisadores.

Assim, os dois métodos usados no processo de secagem são: (1) Secagem natural, que é uma técnica dispersa e dependente do produto, (2) Secagem artificial, que é normalmente realizada em secadores mecânicos (SILVA, 2010).

Há também outra classificação da secagem: (1) Secagem contínua, onde o produto a ser seco fica sempre sob a ação do ar quente até atingir o teor de umidade desejado e (2) Secagem descontínua, também conhecida como secagem intermitente, até chegar ao fim do processo o produto é submetido a vários tempos consecutivos de secagem, podendo aumentar os custos de operação (COSTA, 2008).

2.2. Tipos de Secadores

Atualmente existe uma grande variedade de equipamentos utilizados no processo de secagem, todos com a finalidade de obtenção de um produto final de qualidade. Porém, essa variedade pode apresentar dificuldades na escolha do melhor equipamento para cada finalidade. Segundo (DANTAS 2007; FIOREZE, 2004) os secadores podem variar de acordo com o tipo do produto utilizado, da sua capacidade de secagem, da sua funcionalidade, do tipo de energia para aquecer o produto, entre outros.

Entre os diferentes sistemas de secagem, podem ser citados os secadores mecânicos e o secador solar. Nos secadores mecânicos a energia usada para o aquecimento do gás de secagem, é oriunda da queima de lenha, da queima de combustíveis fósseis ou ainda pelo uso de eletricidade. Já no secador solar, o gás de secagem é aquecido pela energia do sol (PARK, et al, 2007).

Apesar de existirem inúmeros secadores de acordo com o tipo de energia utilizada para o aquecimento, a maioria das agroindústrias (em particular de frutas desidratadas) usam energia elétrica para promover a secagem, mesmo havendo um elevado custo econômico, alto consumo de energia não renovável, bem como, um grande prejuízo ambiental com a utilização desta fonte energética (SILVA, 2010).

2.3. Energia Renovável

Contudo, apesar das diversas vantagens oferecidas pela secagem, atualmente existe uma grande preocupação relacionada ao desenvolvimento de novas tecnologias e métodos de secagem, que venham minimizar o impacto ambiental. Logo, o uso de energias não renováveis e poluidoras para esse processo, torna-se um problema. Todavia, para se alcançar a sustentabilidade energética e garantir a preservação do meio ambiente é preciso utilizar fontes limpas e renováveis de energia.

Segundo (AFONSO JÚNIOR, et al, 2006) devido à tendência atual no planejamento dos recursos naturais, é imprescindível um estudo na escolha das fontes energéticas para a secagem, que visem não apenas os aspectos econômicos, mas também levem em consideração a minimização dos impactos ambientais e a escassez dos recursos não-renováveis.

De acordo com Costa (2010) há uma conscientização cada vez maior do mundo em relação ao aumento dos preços dos combustíveis fósseis, bem como, uma preocupação pelo fato de se tratar de fontes de combustão que provavelmente irão se esgotar nos próximos anos. Além do mais, há a crescente luta pela preservação do meio ambiente, que é um fator predominante em conjunto com a busca cada vez maior do uso da energia solar direta ou indiretamente.

Atualmente, em várias partes do mundo há uma busca crescente de processos envolvendo a energia solar, considerada uma energia limpa e renovável, sendo importante ressaltar que a região Nordeste Brasileira possui as melhores condições para o aproveitamento desse tipo de tecnologia.

Segundo (CAVALCANTE, 1999; COUTINHO, 2013) a região brasileira com grande potencial para a implantação da tecnologia heliotérmica é aquela delimitada pelo semiárido, localizada principalmente na região Nordeste, onde é possível constatar as melhores condições climáticas para essa finalidade, por apresentar baixa nebulosidade, precipitação mínima, baixa umidade e o maior nível de radiação solar direta disponível no Brasil. Assim, pelas condições climáticas do Brasil associadas ao potencial enorme a ser explorado, viabilizam o desempenho de equipamentos, a adaptabilidade e a aplicabilidade de tecnologias que utilizam a energia solar.

2.4. Secador Solar

Existem diversos tipos de equipamentos de secagem, que, em sua maioria, são de custos elevados tornando-os inviáveis a realidade do poder aquisitivo do pequeno produtor rural, inviabilizando assim processos de beneficiamento. Embora, os agricultores disponham de novas tecnologias de secagem e de vários tipos de secadores, a secagem a céu aberto ainda é muito utilizada, em especial junto às cooperativas e a agricultura familiar (Martins, apud Santiago, 2004).

A secagem a céu aberto apresenta algumas desvantagens, tais como: utilização de grandes áreas; a exposição do produto a condições climáticas adversas, o que favorece o desenvolvimento de fungos e o processo de fermentação, levando a depreciação dos produtos (SANTIAGO, 2004), por exemplo.

Uma alternativa viável para estes agricultores seria a utilização de um secador solar como, por exemplo, o ilustrado na Figura 1.



Figura 1- Secagem solar de castanha de caju.

(Fonte: Santiago, 2004)

A escolha do tipo de secador solar a ser utilizado deve ser basicamente, baseada no alimento a ser desidratado, no nível de qualidade que se deseja obter e no custo de implantação. No entanto, têm surgido diversos tipos de secadores solar visando promover secagens mais rápidas dos alimentos e torná-los cada vez mais independentes de outras formas de energia suplementar para o aquecimento.

Um exemplo destes secadores foi proposto por Santiago (2004), conforme Figura 2. Um secador solar “tipo túnel”, originalmente desenvolvido e testado na

Universidade de Hohenheim, na Alemanha, e tem como principais vantagens: bom rendimento, eficiência energética e baixo custo de implantação.

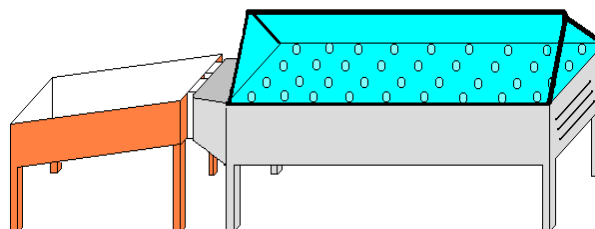


Figura 2 - Vista Frontal do secador solar “tipo túnel”.

(Fonte: Santiago, 2004)

A principal classificação dos secadores solar é: secador de exposição e/ou radiação direta e indireta. No secador de exposição direta o alimento é exposto à radiação solar e por absorção de energia e estar em contato com um ar circulante (que pode ser natural ou forçado) a umidade se vaporiza. Já no secador de exposição indireta a secagem ocorre através de um aquecedor solar que fornece ar quente à uma câmara de secagem separada. Neste caso, pode ser usada a energia solar simultaneamente com outra fonte de calor.

No secador solar de convecção natural e exposição direta, a energia radiante aquece o produto e o ar dentro do sistema, como o ar aquecido é menos denso, ele tende a subir num processo de convecção natural, saindo pela parte superior do sistema, levando a umidade retirada do produto. Desse modo, é recomendado que o produto fique bem acomodado e espalhado de tal forma que não cubra toda a tela suporte, permitindo assim que a radiação solar chegue até a superfície absorvedora.

Em regiões de clima tropical e subtropical, o uso da energia solar em alimentos torna-se uma excelente alternativa. Sobretudo, a utilização de secador solar garante o beneficiamento dos produtos por um baixo custo inicial, sem grandes exigências de mão de obra qualificada (RICCI, et al , 2012).

Costa (2010) realizou uma pesquisa que consiste na construção e montagem de um sistema de secagem solar para frutas, composto de um secador de exposição direta, construído por materiais alternativos, no qual foi usada a secagem do pedúnculo do caju, e posteriormente a sua utilização na produção de farinha. Uma sugestão de combate a perecibilidade e o desperdício, agregando valor ao produto final, usando um

sistema de baixo custo, que utiliza uma fonte de energia extremamente disponível e ecologicamente correta.

Machado et al., 2012 realizaram experimentos de secagem do pedúnculo de caju em dois secadores solares, um de radiação direta e o outro de radiação indireta, e após a secagem as fatias do caju apresentaram sabor, aroma e cor agradáveis. Logo, concluíram que a secagem solar do pedúnculo de caju mostrou-se como um método eficiente de conservação, redução de perdas pós-colheita, além de agregar valor ao produto aumentando a renda familiar dos produtores Nordestinos.

2.5. Fluidodinâmica Computacional (CFD)

De acordo com Piaia (2009) antes do surgimento dos computadores, problemas relacionados ao comportamento dos fluidos eram solucionados através de pesquisas experimentais e observações em laboratórios. Com a chegada dos computadores juntamente com a ativação dos estudos de análise numérica, surgiu a Dinâmica de Fluido Computacional CFD (*Computational Fluid Dynamics*) que é presentemente o estudo direcionado à dinâmica dos fluidos.

Para se aplicar a fluidodinâmica computacional é necessário dividir a geometria de interesse em um número de células computacionais denominadas de malha, como se observa na Figura 3. Esta tarefa, conhecida por discretização, é geralmente realizada empregando programas computacionais que utilizam CAD (Computer Aided Design).

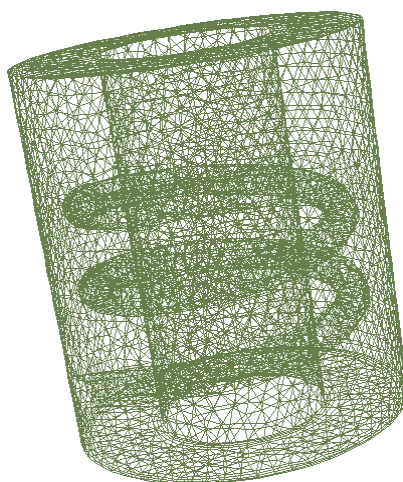


Figura 3 - Representação de uma malha.

(Fonte: Farias, 2006)

Devido ao intenso atrelamento que existe entre as equações e a presença de termos não-lineares, tem-se a necessidade do emprego de métodos numéricos. Recentemente, o estudo de transferência de calor e massa em diversos equipamentos mostraram a dependência da solução de complexos sistemas de equações diferenciais parciais, onde a solução é bastante complicada ou desconhecida (FARIAS, 2006).

Piaia (2009), diz que para fornecer um meio mais simples de resolver e avaliar problemas de escoamentos de fluidos, a maioria dos programas computacionais de CFD divide-se em cinco elementos: um gerador de geometria, um gerador de malha, um pré-processador, um processador que consegue a solução e um pós-processador. Para a realização da simulação computacional deve-se confeccionar uma geometria, definir um modelo matemático, determinar as propriedades dos fluidos e as condições de contorno.

Segundo Fioreze (2004) diversos complexos sistemas de equações diferenciais podem ser resolvidos com o uso de computadores, porém, é necessário que esses avanços tecnológicos cheguem aos agricultores e indústrias para serem colocados em prática.

Dantas (2007) diz que como os demais processos, a secagem deve ser prevista, dimensionada e planejada. Portanto, os profissionais da área necessitam de uma determinada ferramenta, como um programa computacional que simula o processo de secagem, prenunciando sob as condições de uma região, as condições específicas de secagem e o tempo necessário para realizá-la, capaz de prever e otimizar o processo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Condução da Pesquisa

Esta pesquisa foi desenvolvida no Laboratório Computacional em Térmica e Fluidos – LCTF (UAEM) e no Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem - LPFI (UAEQ) da Universidade Federal de Campina Grande, Campus I, Campina Grande, que se tratam de laboratórios que contam com computadores de última geração e dispõem da licença para utilização do pacote computacional ANSYS CFX 12.0 e o ICEM CFD.

3.2. Geometria e Malha do Secador Solar

O secador estudado no presente trabalho corresponde ao dispositivo ilustrado na Figura 4, sendo este um secador solar de exposição direta, que pertence ao Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido (CDSA) da UFCG para realização de experimentos de secagem de frutas. Na Tabela 1 encontram-se suas respectivas dimensões.



Figura 4 - Secador solar de exposição direta, disponibilizado pelo Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido (CDSA) da UFCG.

Tabela 1 – Dimensões do secador solar

Dimensões	(cm)
L_1	18
L_2	47,2
L_3	70
A	41,0
B	4,0

Para a geração da malha inicialmente foi necessário realizar um treinamento no ICEM-CFD (software comercial) necessário para aprender ferramentas e respectivas funções na confecção da geometria.

Na geração da malha do secador solar, ainda utilizando o ICEM-CFD, foi necessário representar a geometria, Figura 5, com auxílio da definição de pontos, curvas, superfícies e sólidos, em um espaço tridimensional, descrevendo o seu tamanho e o seu formato.

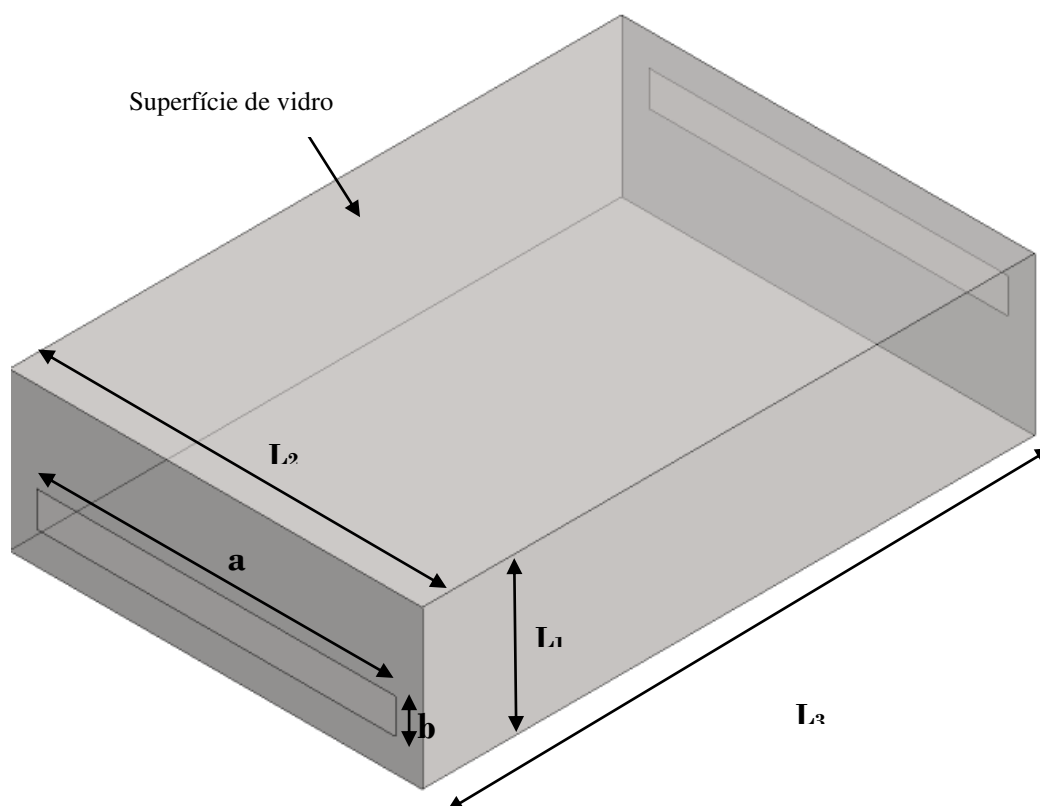


Figura 5 - Representação da geometria do secador solar.

3.3. Modelo matemático

O modelo de escoamento no interior do secador é baseado nas equações de conservação de massa e de momento linear assumindo ser estacionário, isotérmico e que não há reação química. Logo, o modelo matemático que descreve o problema físico é dado pelas equações (1), (2), (3) e (4).

- Equação de conservação de massa:
$$\nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (1)$$

Onde, ρ é a densidade do fluido e \vec{u} é o vetor velocidade do fluido.

- Equação de conservação de momento linear

$$\frac{\partial \rho \vec{U}}{\partial t} \cdot [(\rho \vec{U} \otimes \vec{U})] = -\nabla p + \nabla \cdot \left\{ \mu \left[\nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T \right] \right\} \quad (2)$$

- Equação de energia:
$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\nabla \rho \vec{U} h) - \nabla \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (3)$$

onde T é a temperatura do fluido, k é a condutividade térmica, h é a entalpia como função apenas da temperatura, isto é:

$$\partial h = C_{p_g} \partial T \quad (4)$$

Sendo, C_{p_g} o calor específico do fluido. Neste caso, o fluido (ar) foi considerado um gás perfeito.

- Modelo de turbulência

Dentre os vários modelos de turbulência disponíveis na literatura, modelos de zero equação e modelos de uma e duas equações, destacam-se aqueles modelos mais gerais, por introduzirem a separação das equações diferenciais em escalas de comprimento e de velocidade. A versão mais popular é o modelo k - ϵ que tem boa aceitação neste tipo de escoamento. Este modelo utiliza as hipóteses da viscosidade turbilhonar para a turbulência, e o mesmo é disponibilizado pela biblioteca do Ansys CFX.

3.4. Condições iniciais e de Contorno

Na Tabela 2 encontram-se as propriedades do ar utilizadas neste trabalho:

Tabela 2 – Propriedades do ar

Propriedades	
Densidade* (Kg/m ³)	1,185
Viscosidade dinâmica*(Kg/m.s)	1831x10 ⁻⁰⁵
Temperatura (°C)	25
Coeficiente de expansão térmica ** (1/K)	0,003356
Capacidade calorífica (J/Kg.K)	1004
Condutividade térmica (W/m.K) **	0,0261

* Fonte: Incropera (2011); ** CFX12.0

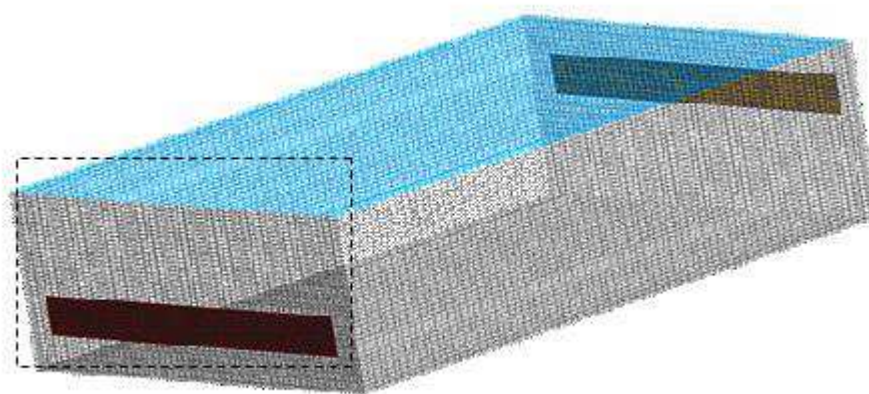
As condições iniciais e de contorno da entrada e da saída do secador solar de radiação direta foram definidas conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Condições iniciais e de contorno

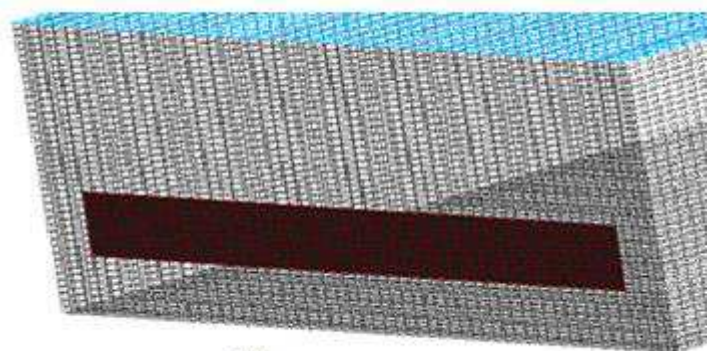
		Valores
Entrada	Temperatura	298 K
	Velocidade	1,5 m/s
Saída	Pressão estática	101,3 kPa
Parede	Não-deslizamento	$u_x = u_y = u_z = 0$
	Condições adiabáticas	$Q=0$
Vidro	Fluxo de calor	200 W/m ²
	Não-deslizamento	$u_x = u_y = u_z = 0$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro resultado deste trabalho foi a obtenção da malha numérica. Optou-se pelo padrão estruturado de malha no espaço tridimensional e que resultou na malha formada por 200.423 volumes de controles, conforme Figura 6.a. Na Figura 6.b está representada a ampliação da malha na região de entrada do secador.



(a)



(b)

Figura 6 - (a) Representação da geometria e malha do secador solar (b) Ampliação da seção de entrada.

Com o intuito de compreender o comportamento do escoamento no interior do secador solar, a Figura 7 ilustra as linhas de fluxo do ar. Observa-se que o ar tende a se movimentar para a parte inferior no início até a metade do secador. Em seguida o ar tende para a parte superior do secador e segue em direção a saída superior. Isto se dá pelo fato de que o ar mais frio é mais denso, por isso ele tende a descer, enquanto o ar

quente, sendo menos denso, tende a subir por ser mais leve. Ocorrendo uma inversão devido ao fenômeno de convecção existente. E observa-se que o ar tem um comportamento de recirculação.

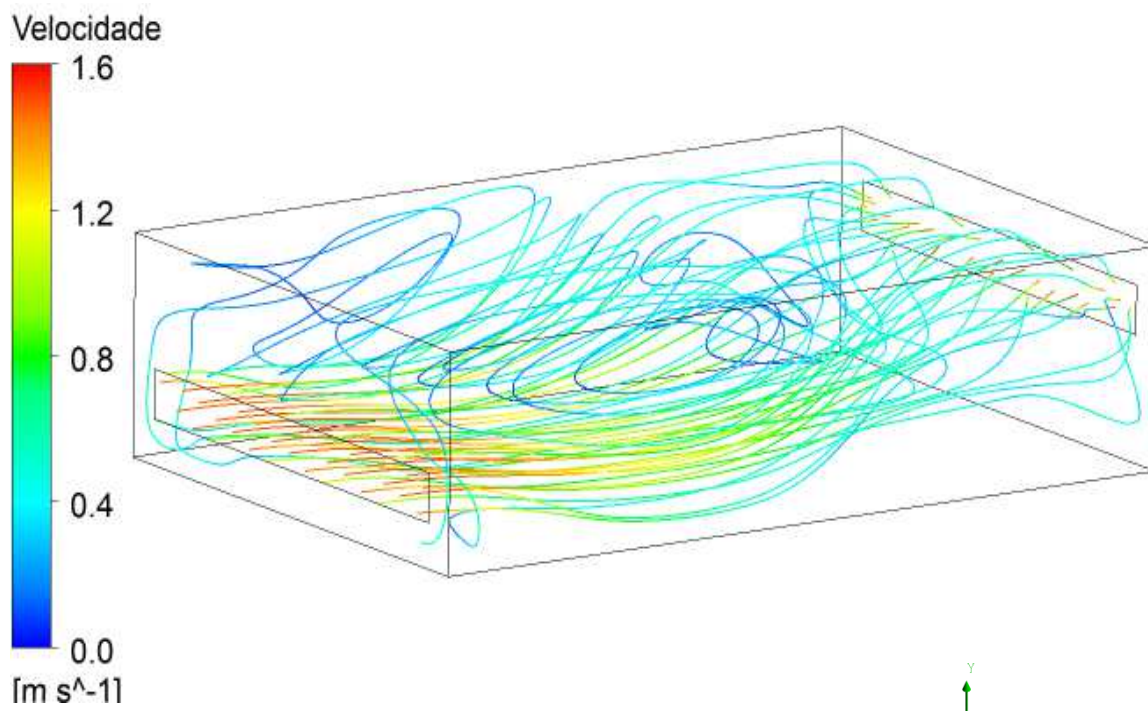


Figura 7 - Linhas de fluxo do ar no interior do secador solar.

Na Figura 8 encontra-se ilustrado o campo de pressão no plano ZY em posições distintas. Verifica-se que as maiores pressões se encontram na entrada do secador solar.

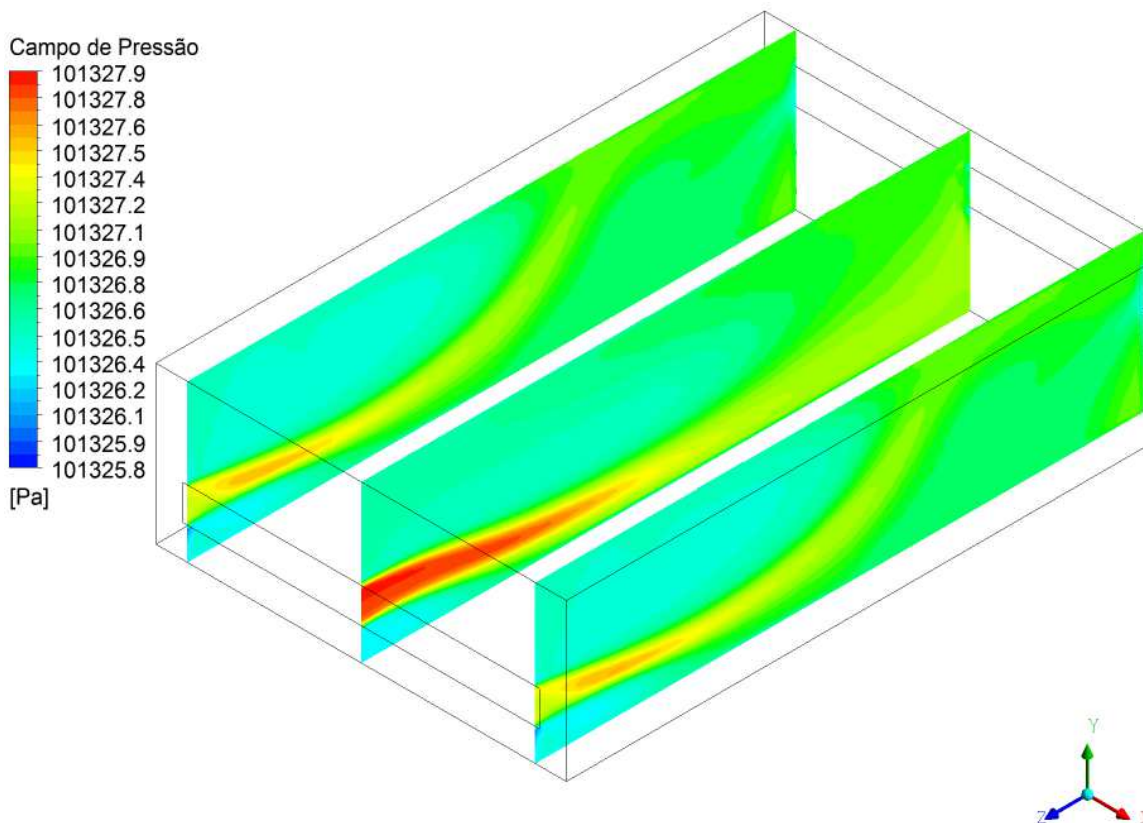


Figura 8 - Campo de pressão no interior do secador solar.

Observa-se que as pressões nas laterais são afetadas pelo efeito de borda existente devido à geometria de entrada do secador. Contudo o resultado das pressões mais baixas na saída facilita o escoamento do ar para fora do secador já que existe uma diferença de pressão.

Na Figura 9 está ilustrado o campo vetorial no plano ZY em posições distintas. Observa-se que o escoamento é complexo e apresenta zonas de recirculação, conforme fica evidente na Figura 9.b. Nestas figuras ficam evidentes os efeitos de borda, de entrada e saída, como também das paredes laterais.

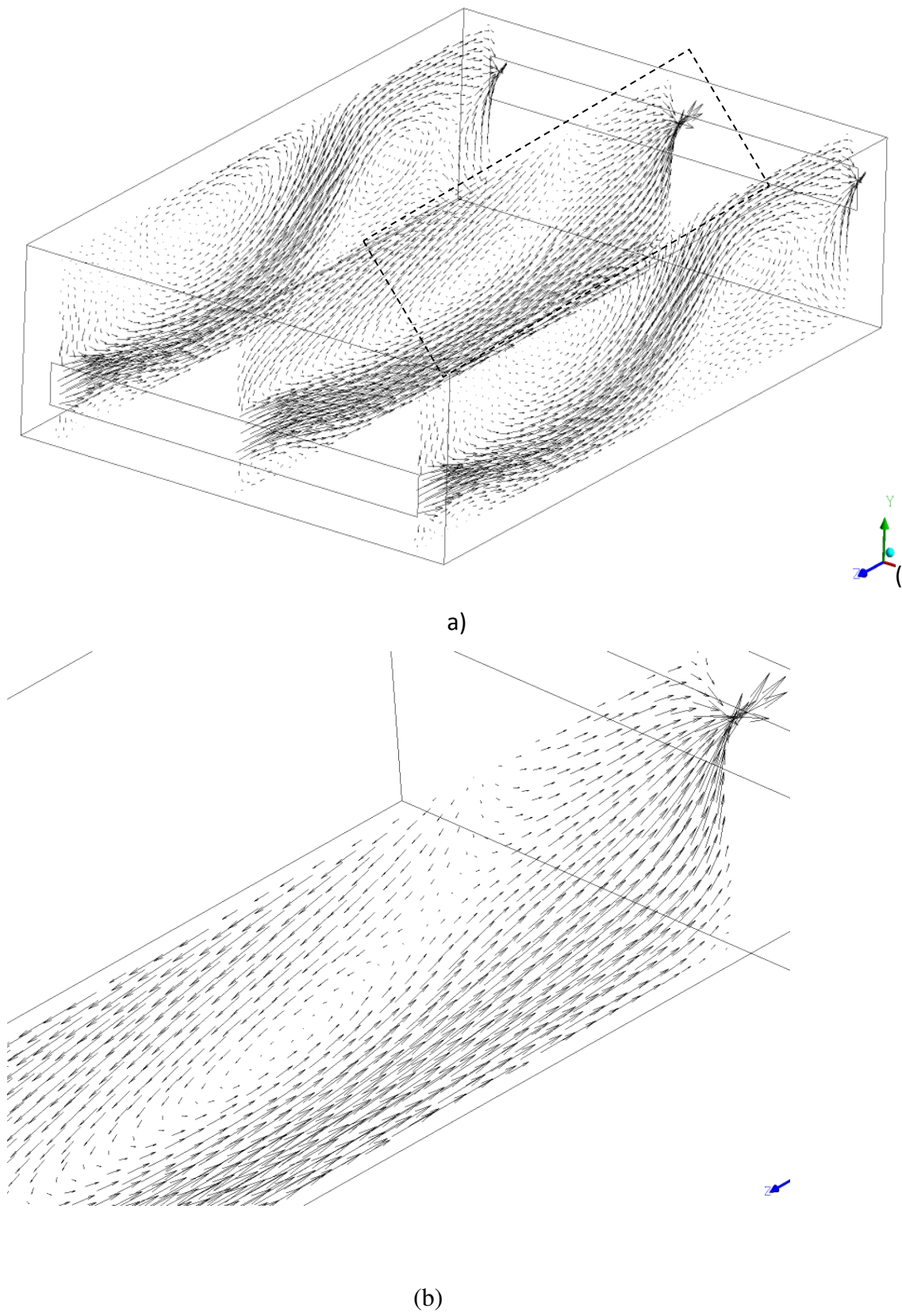


Figura 9 - (a) Campo vetorial no plano ZY em posições distintas (b) Na posição central.

Na Figura 10 está ilustrado o campo de temperatura no plano YZ em três posições distintas. Observa-se que o ar tem temperatura mais alta nas proximidades do vidro e mais baixas quando o escoamento se distancia do mesmo. Isto é um resultado esperado, visto que há um fluxo de calor nesta superfície.

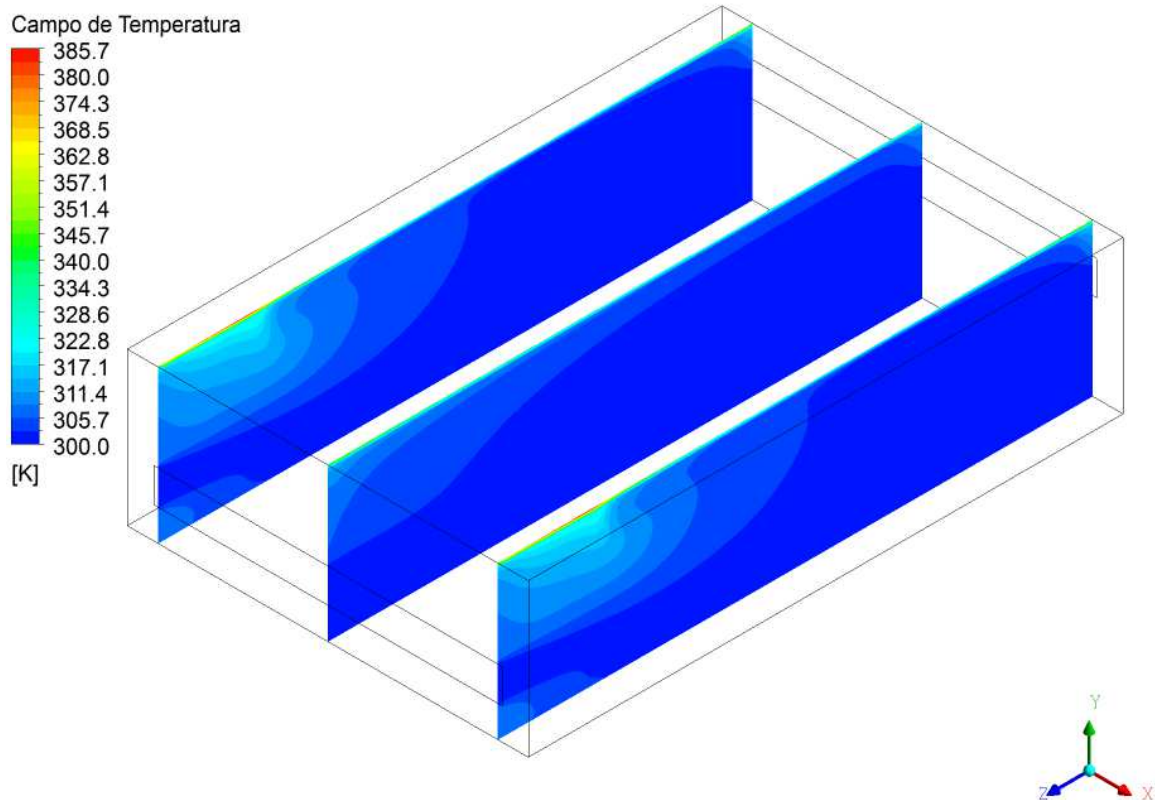


Figura 10 – Campo de temperature no plano ZY para diferentes posições.

Na Figura 11 pode ser observada a distribuição de temperatura em função da posição Y em três posições (0,05; 0,35 e 0,65m) ao longo do eixo central do secador solar. Este resultado corrobora com as observações feitas anteriormente, quando foi observado que a temperatura é maior nas proximidades da superfície de vidro.

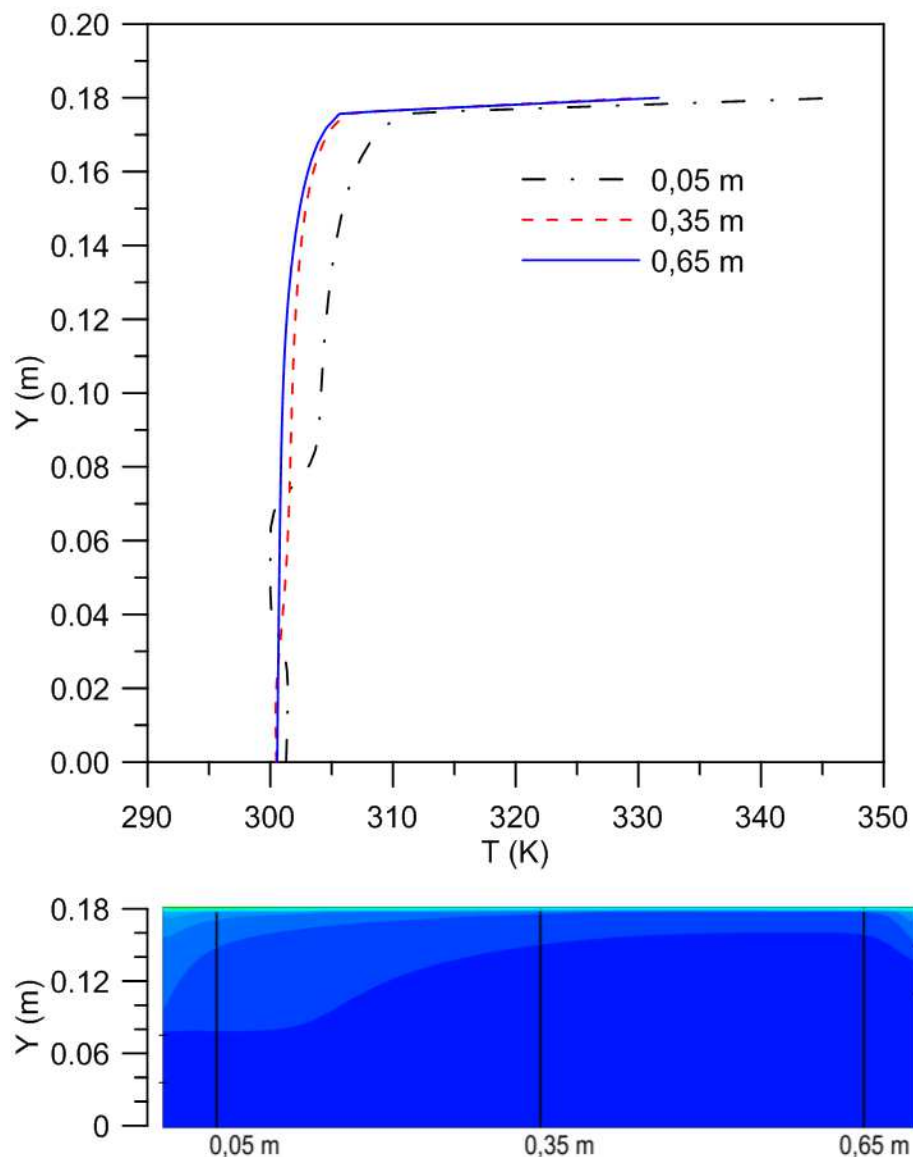


Figura 11 – Distribuição de temperature em função da posição Y em três posições (0,05; 0,35 e 0,65 m) ao longo do eixo central do secador solar.

A Figura 12 mostra os perfis de velocidades, para diferentes posições no secador solar. Observa-se claramente que nas proximidades de entrada do secador e na parte inferior do mesmo a velocidade do ar é mais alta, enquanto que nas proximidades da saída e na parte superior a velocidade é mais baixa. Este resultado é evidenciado pela Figura 8, corroborando os resultados..

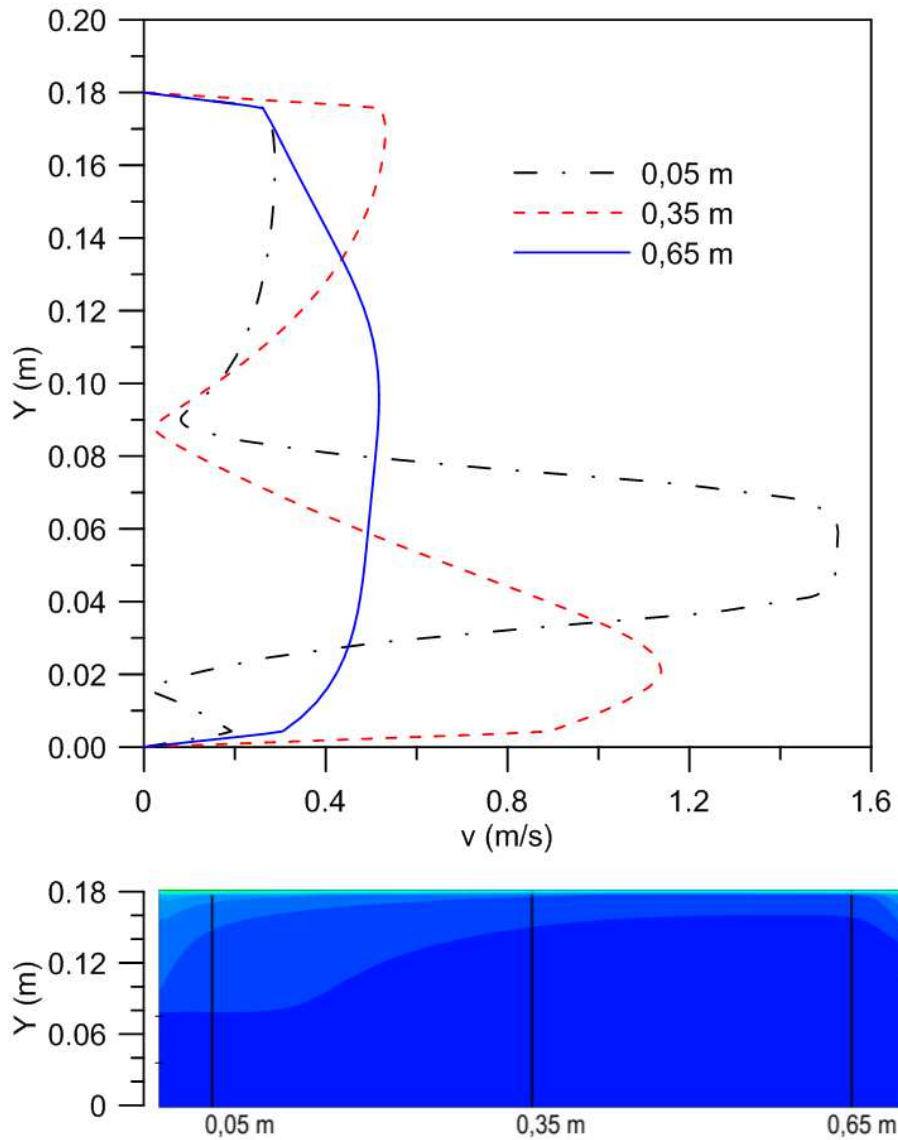


Figura 12 – Perfis de velocidade para diferentes posições no secador solar.

As velocidades de entrada do ar foram modificadas para mostrar o perfil de velocidade no secador. As velocidades estudadas foram 0,50, 0,75, 1,0 e 1,5 m/s.

Na Figura 13 estão ilustrados os perfis de velocidade do secador para diferentes velocidades de entrada do ar no secador solar. Observa-se claramente a influência da velocidade do ar na entrada do secador, na parte inferior. Mais uma vez o modelo matemático representou bem o escoamento do ar na entrada do secador solar.

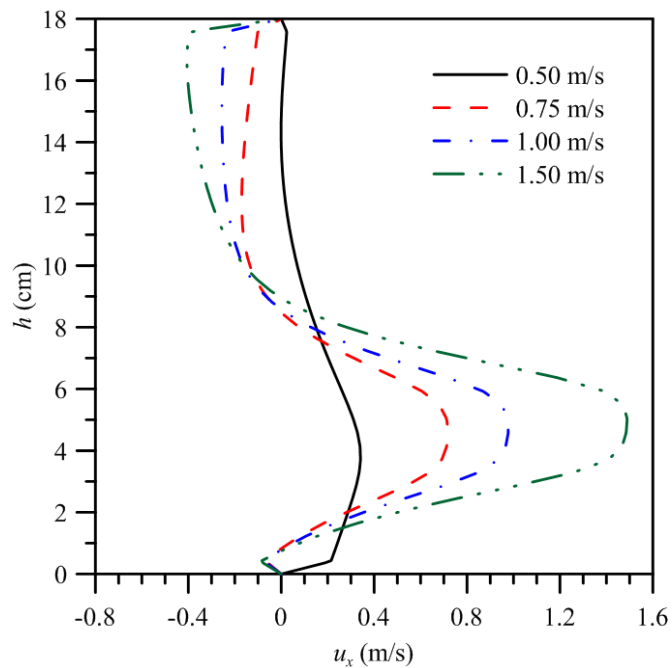


Figura 13 – Perfis de velocidade para diferentes velocidades de entrada do ar no secador solar a 0,25 m da entrada do secador solar.

De acordo com a Figura 14 é possível verificar a temperatura em função da altura do secador para diferentes velocidades de entrada do ar no secador solar. Observa-se que para menores velocidades do ar a temperatura foi mais elevada. Isto pode estar relacionado com a maior permanência do ar no interior do secador solar.

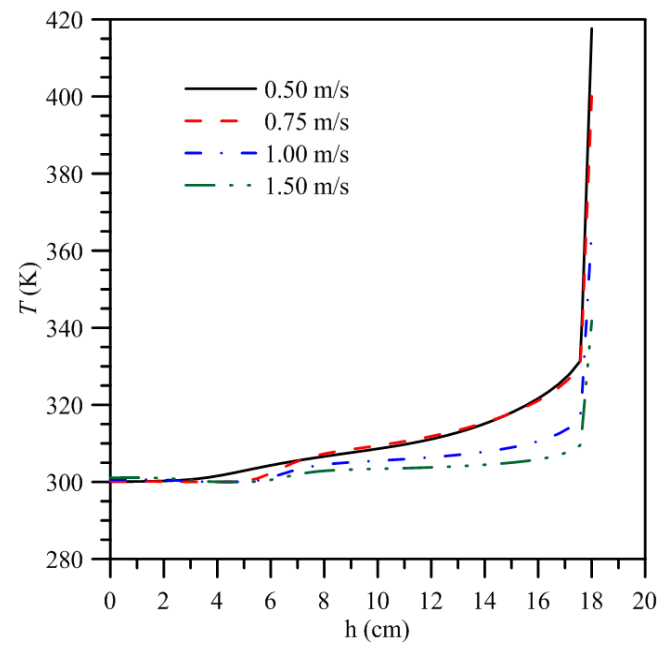


Figura 14 – Temperatura em função da altura do secador para diferentes velocidades de entrada do ar no secador solar a 0,25 m da entrada do secador solar.

5. CONCLUSÃO

Em concordância com os resultados obtidos, temos em geral que:

- O Modelo Matemático representou de maneira satisfatória o escoamento do ar no interior do secador solar.
- Os perfis de velocidade são influenciados pela posição no interior do secador solar, observando os efeitos de borda e de parede.
- Há um aumento de temperatura do ar no interior do secador solar, especialmente quando este se aproxima da superfície de vidro devido ao fluxo de calor existente.
- Para velocidades menores há uma tendência do ar se aquecer com maior intensidade no interior do secador solar, devido a sua maior permanência no interior do secador solar.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

- Modificar a geometria do secador solar de exposição direta e avaliar a termofluidodinâmica do ar no interior do mesmo.
- Adição de uma nova malha de um produto (frutas ou hortaliças) no interior do secador solar e avaliar a transmissão de calor e massa simultaneamente.
- Avaliar a influência da posição (inclinação) do secador solar na secagem de frutas e hortaliças.

6. BIBLIOGRAFIA PESQUISADA

AFONSO JÚNIOR, P. C. A., FILHO, D. O. COSTA, D. R. **Viabilidade Econômica de Produção de Lenha de Eucalipto para Secagem de Produtos Agrícolas.** Eng. Agríc., Jaboticabal, v.26, n.1, p.28-35, jan./abr. 2006.

ALONSO, L. F. T., **Algoritmos de seleção e dimensionamento de secadores.** Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, SP, Brasil (2001).

BIHAIN, A. L. J., **Modelagem Matemática da Influência da Umidade do ar, sobre a Dinâmica de Secagem de Grãos de Soja em Camada Fina.** Dissertação de Mestrado - Iju, RS - Brasil, 2011.

CAVALCANTE, E. S. C.; Brito, R. B. S. **Geração Heliotérmica: Uma Nova Opção de Energia Limpa Para o Brasil.** Artigo a ser submetido ao VIII Congresso Brasileiro de Energia – CBE, a ser realizado no Rio de Janeiro (RJ), 30 de Novembro a 2 de Dezembro, 15p., 1999.

COSTA, A., R., da Silva. **Sistema de Secagem Solar para Frutos Tropicais e Modelagem da Secagem de Banana em Secador de Coluna Estática.** Tese de Doutorado. Natal – RN, 2008.

COSTA, J. B. S., **Obtenção e Caracterização de Farinha de Frutas e Vegetais Através do Uso de um Sistema de Secagem Solar de Baixo Custo.** Dissertação submetida à Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Mestre em Engenharia Mecânica, Natal – Agosto – 2010.

COUTINHO, S. A., **Estudo Teórico e Experimental de um Dessalinizador Solar para Tratar Água Salobra.** Qualificação de Doutorado – Campina Grande – PB – UFCG, 2013.

DANTAS, L. A., **Desenvolvimento de um Programa Computacional Dinâmico para Simulação de Secagem de Grãos e Sementes.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Campina Grande, 2007.

FARIAS, F. P. M., **Estudo da termofluidodinâmica em secadores ciclônicos.** Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, CG- Paraíba (2006).

FIGUEIREDO, R., **Princípios de secagem de produtos biológicos.** Vol. 1, 1ª Edição, Editora Universitária, João Pessoa, UFPB, 2004.

MACHADO, A. V., OLIVEIRA, E. L., SANTOS, E. S., OLIVEIRA, J. A., FREITAS, L. M., **Estudo da Influência da Espessura no Tempo de Secagem do Pedúnculo de Caju em Secadores Solar de Radiação Direta e Indireta**. Revista Verde (Mossoró – RN – Brasil) v.7, n.1, p. 256 - 263 janeiro/março de 2012.

PARK, K. J.; COLATO, A.; OLIVEIRA, R. A. **Conceitos de processos e equipamentos de secagem**. Campinas, v. 1, (2007).

PIAIA, J. C. Z., **Secagem da linguiça calabresa: Experimentação e Modelagem 3D aplicadas a Fornos industriais**. Universidade Federal de Santa Catarina - Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Florianópolis – 2009.

RICCI, M. R., BATTISTI, J. F., SCHMIDT, C. A. P., **Secador solar: Processo de desidratação de frutas com diferentes tratamentos osmóticos**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/Medianeira. Resumos do V Encontro Regional de Agroecologia – Medianeira/PR – 08 e 09/08/2012.

SANTIAGO, B. H. S., **Desenvolvimento de desenhos inovadores de defumadores, fornos e secadores para uso em Agronegócio**. Relatório final: BITEC/IEL-RN/Sebrae/Gpec/CNPQq, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, UFRN, 2004.

SILVA, L. C., **Secagem de Grãos**. UFES – Universidade Federal do Espírito Santo – Campus de Alegre – Alegre: ES. Boletim Técnico: AG: 04/05 em 29/03/2005. Artigo Publicado na Revista: Grãos Brasil: Da Semente ao Consumo, Ano III, no XIV, p. 10 - 14, Maio de 2005.

SILVA, I. G., **Viabilidade técnica econômica de secadores solar e elétrico na desidratação de bananas no Estado do Acre**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia, Área de Concentração em Produção Vegetal, da Universidade Federal do Acre. Rio Branco, AC: UFAC, 108 f, 2010.