



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**ENGENHARIA AGRÍCOLA**



**SECAGEM DE TOMATE A BAIXA TEMPERATURA COM BOMBA DE CALOR E  
RECIRCULAÇÃO DE AR**

**Dourados – MS**  
**2014**

**SECAGEM DE TOMATE A BAIXA TEMPERATURA COM BOMBA DE CALOR E  
RECIRCULAÇÃO DE AR**

**Carlos Henrique de Oliveira Moreira de Melo  
Rodrigo Vital da Silva**

**Orientador: Rodrigo Aparecido Jordan**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Agrícola do Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Grande Dourados.

Dourados – MS

2014

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).**

M528s	<p>Melo, Carlos Henrique de Oliveira Moreira. Secagem de tomate a baixa temperatura com bomba de calor e recirculação de ar. / Carlos Henrique de Oliveira Moreira, Rodrigo Vital da Silva. – Dourados, MS : UFGD, 2014. 41f.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Aparecido Jordan. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados.</p> <p>1. Secagem com bomba de calor. 2. Tomate. 3. Modelagem matemática. I. Silva, Rodrigo Vital da. II. Título.</p> <p>CDD – 635.642</p>
-------	--

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central – UFGD.**

**©Todos os direitos reservados. Permitido a publicação parcial desde que citada a fonte.**

**SECAGEM DE TOMATE A BAIXA TEMPERATURA COM BOMBA DE CALOR E  
RECIRCULAÇÃO DE AR**

**Por**

**CARLOS HENRIQUE DE OLIVEIRA MOREIRA DE MELO**

**RODRIGO VITAL DA SILVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte das exigências para obtenção do título de Engenheiro Agrícola do curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Grande Dourados.

Aprovado em:

---

Prof. Dr. Rodrigo Aparecido Jordan  
Orientador – UFGD/FCA

---

Prof. Dr. Valdiney Cambuy Siqueira  
Prof. Adjunto – UFGD/FCA

---

Eng. Agrícola Elton Aparecido Siqueira Martins  
Mestrando em Eng. Agrícola – UFGD/FCA

## **AGRADECIMENTOS**

Queremos agradecer, em primeiro lugar, a Deus, pela proteção e por nos dar força e coragem durante toda esta jornada acadêmica.

Agradecemos a nossa família, que muito nos ajudou e nos apoiaram em todos os momentos da nossa vida.

Ao corpo docente da engenharia agrícola pelo conhecimento a nós cedido ao longo deste período acadêmico.

Agradecemos ao Prof. Dr. Rodrigo Aparecido Jordan pela orientação, apoio e incentivo durante a execução do trabalho.

Agradecemos ao Prof. Dr. Valdiney Cambuy Siqueira pela co-orientação e ao Eng. Agrícola Elton Aparecido Siqueira Martins que nos auxiliou durante os experimentos.

Agradecemos a UFGD e a FCA por nos ceder os laboratórios para a execução dos experimentos.

Queremos agradecer também aos nossos amigos do curso de Engenharia Agrícola em especial ao Victor Hugo Cavassini, Luiz Fernando Suda, Diogo Macedo Melo, Igor Queiroz, Eudes Porto, Fabio Miranda, Jhonatan Takara, João Guilherme Macedo, e também ao Elvis Ley Emídio do Prado, Wagner Rodrigues Oliveira e Alexandre Mota pela amizade e apoio.

Enfim, somos gratos, a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para realização deste trabalho.

## RESUMO

O tomate é um fruto considerado perecível, em função do seu alto teor de água, tendo uma vida de prateleira de aproximadamente uma semana. Uma alternativa para atender a demanda de produção do tomate é realizar a secagem. Dessa forma é possível estocar e armazenar o fruto do tomate. A secagem do tomate deve ser realizada a baixa temperatura para evitar que o fruto perca algumas propriedades nutricionais.

Objetivou-se analisar a secagem do tomate Gabriela, utilizando um protótipo de secador com tecnologia de bomba de calor. Foi realizada a modelagem matemática da secagem do tomate, e avaliou-se e comparou-se o consumo de energia para secagem do produto na estufa convencional e no secador com bomba de calor.

A secagem foi realizada na estufa com resistência elétrica a 50°C e 65°C e foi comparada com o secador com bomba de calor a 45°C. Para a estufa convencional na temperatura de 50°C o tempo total de secagem foi de 37 horas. Já na temperatura de 65°C, o tempo total foi de 19 horas. E, para o secador com bomba de calor a temperatura de 45°C o tempo total de secagem foi de 40 horas, até que o fruto de tomate atingisse o teor de água de 25% (b.u).

Com o presente trabalho conclui-se que o sistema de secagem a baixa temperatura por meio de bomba de calor mostrou-se funcional e através da sua utilização obtemos um produto com melhor aspecto visual. O maior consumo de energia se deve pelo fato do secador operando com bomba de calor ser construído utilizando-se sucatas de equipamentos, a falta de isolamento, possuir uma câmara de secagem maior que a da estufa convencional e o ventilador utilizado estar super dimensionado.

Foram ajustados diferentes modelos para representar a modelagem matemática da secagem do tomate, sendo que o modelo que melhor descreveu o processo foi o de Valcam, representando a secagem realizada na estufa elétrica a 50 °C, e 65 °C e no secador com bomba de calor a 45 °C. A secagem realizada no secador com bomba de calor a 45 °C proporcionou maior teor de água de equilíbrio do produto com 18,42%(b.u), comparando-se a estufa convencional a 50 °C 17,56% (b.u), e estufa a 65 °C a 13,73%(b.u).

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	6
2 REVISÃO DE BIBLIOGRÁFICA .....	8
2.1 Secagem.....	8
2.2 O fruto do tomateiro .....	9
2.3 Bombas de calor .....	12
2.4 Modelagens matemática.....	14
3 MATERIAS E MÉTODOS .....	16
3.1 Descrição do secador com principio de bomba de calor.....	16
3.2 Realização dos testes de secagem .....	18
3.3 Ajustes de modelos matemáticos. ....	20
3.4 Custo energético da secagem.....	22
3.5 Avaliação energética do secador.....	23
4 RESULTADA E DISCUSSÃO .....	24
4.1 Representação do ciclo de secagem do secador com principio de bomba de calor .....	24
4.2 Modelagens matemática do processo de secagem. ....	27
4.3 Avaliação energética do secador.....	30
4.4 Consumo de energia.....	31
CONCLUSÃO.....	34
REFERÊNCIAS .....	35
ANEXOS.....	39
ANEXO - DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS .....	40

## 1 - INTRODUÇÃO

O tomate é produzido ao longo do ano todo, mas tem algumas restrições com relação a sua comercialização, já que tem uma vida média de prateleira de uma a duas semanas. Uma das alternativas para disponibilizar o produto por maior período de tempo é a desidratação do mesmo *in natura* reduzindo perdas pós-colheitas, possibilitando a comercialização em uma época de melhor oferta, alcançando melhores preços. O tomate seco está ganhando mercado, sendo comercializados principalmente como cobertura de pizzas, molhos e outros pratos característicos, mostrando assim ser uma excelente alternativa para o desenvolvimento agroindustrial e um mercado muito lucrativo.

No Brasil, os secadores utilizam, na grande maioria dos casos, fontes de energia convencionais, tais como óleos combustíveis, GLP, lenha, ou eletricidade (ROSSI, 1993). Considerável a quantidade de energia que é utilizada na secagem de alimentos, a bomba de calor possibilita uma importante redução na degradação da energia elétrica em processo de aquecimentos, resfriamento de fluidos e pode contribuir para a racionalização de energia. A bomba de calor apresenta também a vantagem de ser menos poluidora, dependendo do fluido refrigerante utilizado. Os fluidos refrigerantes halogenados são os recomendados pelo Protocolo de Montreal, pois não destroem a camada de ozônio, visto que o ozônio detém os raios ultravioletas do sol que podem trazer danos à saúde humana.

A bomba de calor é um sistema que por meio de um ciclo termodinâmico, retira o calor de uma fonte à baixa temperatura e transfere para uma fonte uma temperatura mais elevada.

O uso de bombas de calor possibilita à secagem a baixa temperatura, sendo interessante na secagem de temperos, ervas medicinais e outros produtos em que temperaturas acima de 50°C afetam algumas propriedades como cheiro, odor, etc.

Meyer & Greyvenstei (1992) já comprovaram a viabilidade econômica da bomba de calor na secagem de produtos agrícolas, verificando a redução do período operacional mínimo tornando-o mais econômico que os outros secadores.

A bomba de calor pode proporcionar resfriamento e ou aquecimento em um só equipamento com um único consumo de energia. Isto implica em um custo menor, pois será necessário apenas um equipamento para realizar as duas operações. Do ponto de vista termodinâmico, é consideravelmente mais eficiente que uma resistência elétrica. O consumo de eletricidade é 52% menor que em cargas resistivas (HOGAN *et al.*, 1983).

Objetivou-se com o presente trabalho avaliar a secagem de tomates em fatias em diferentes níveis de temperatura, em estufa convencional e em um secador operando com bomba de calor. Foram avaliados a potência térmica, o tempo de secagem, o consumo de energia elétrica, o custo da secagem e o aspecto final do produto seco. Objetivou-se também realizar ajustes de diferentes modelos para representar a modelagem matemática na secagem de fatias de tomate em diferentes níveis de temperatura.

## 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Secagem

A conservação pós-colheita do alimento é um importante fator de contribuição para aumentar o suprimento de alimentos, assim como evitar desperdício, no caso de excesso de produção, além de agregar valor aos produtos agrícolas.

Nesse cenário, a secagem de produtos perecíveis com altos teores de água inicial apresenta diversas vantagens, tais como: manutenção dos constituintes minerais; inibição da ação de microorganismos; redução dos custos de transporte, manuseio e estocagem, além de ser uma alternativa para os problemas de desperdício, descarte e poluição.

Outra vantagem dos produtos secos está na embalagem, mais econômica e disponível, oferecendo uma opção para refeições leves e rápidas (WOODROOF & LUH, 1975).

A secagem a baixa temperatura é indicada para produtos como chás, ervas medicinais e condimentos. Para a maioria destes produtos, temperaturas superiores a 50°C, fornecidas por secadores convencionais, ocasionam a perda de essências e degradação de princípios ativos.

Os constituintes voláteis aromáticos presentes em produtos como temperos, ervas medicinais, chás e cafés são muito sensíveis ao processo de secagem. O efeito da secagem sobre a composição de substâncias voláteis tem sido pesquisado, no sentido de demonstrar que as variações nas concentrações de seus constituintes durante a secagem, dependem de vários fatores como o método de secagem, temperatura do ar empregada, características fisiológicas do produto, além do conteúdo e tipo de componentes químicos presentes nas plantas submetidas à secagem (VENSKUTONIS, 1997).

Segundo Baritoux *et al.* (1992), a secagem pode aumentar o número de modificações físicas e químicas negativas, alterando a qualidade da matéria-prima para a sua comercialização como, por exemplo, mudanças em aparência, cheiro e possíveis perdas de constituintes voláteis.

No caso de plantas medicinais, Martins (2000) afirma que não é aconselhável a secagem ao sol, visto que o processo de foto decomposição ocorre intensamente, degradando os componentes químicos e ocasionando alterações de odor, cor e sabor. Segundo MARTINS *et al.*, (1994), a temperatura do ar de secagem de plantas medicinais, geralmente varia entre 20 e 40°C, para folhas e flores.

Rainaet al. (1996) empregaram vários tratamentos na secagem do açafrão (*Crocussativus*L.), para verificar o efeito do processo de secagem na composição e no conteúdo do seu princípio ativo, que é o crocin, um pigmento natural e utilizado na indústria de alimentos. Esses autores concluíram que a temperatura ótima para a secagem foi  $45 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , condições estas que proporcionaram a produção de matéria-prima com melhor qualidade.

Segundo Afonso Júnior *et al.* (2002) um dos grandes problemas relacionados à qualidade do café, enfrentados por cafeicultores brasileiros, tanto no mercado interno como no externo, está associado ao processo de secagem. De acordo com Silva *et al.* (2001) devem ser evitadas temperaturas elevadas. Esse autor menciona que a temperatura ideal para a secagem de café é de  $40^{\circ}\text{C}$ .

Assim, sistemas de secagem que possam operar com temperaturas relativamente baixas, representam uma solução para melhorar a qualidade desses produtos, com a possibilidade de serem mais eficientes no que diz respeito ao consumo de energia, uma vez que utilizam o potencial de secagem do ar ambiente (PACCO, 2008).

### 2.3 O fruto do tomateiro

O tomate (*Lycopersiconesculentum*) teve sua origem na América do Sul, provavelmente na Região Andina, parte ocidental da América do Sul, e da América Central (FILGUEIRA, 1982).

O tomate tem uma grande importância econômica, pois é industrializada na forma de inúmeros subprodutos, como extrato, polpa, pasta e, mais recentemente, o tomate seco, cujo mercado vem crescendo consideravelmente.

Atualmente, nas condições brasileiras de comercialização, o tomate é produzido durante o ano todo. E inúmeras são as variedades que atendem às mais diferentes demandas, desde as variedades industriais até as variedades de mesa.

Segundo Coelho (2010), os tomates podem ser divididos em diversos grupos, de acordo com seu formato e sua finalidade de uso:

- Santa Cruz: tradicional na culinária, utilizado em saladas e molhos e de formato oblongo;
- Caqui: utilizado em saladas e lanches, de formato redondo;
- Saladete: utilizado em saladas, de formato redondo;

- Italiano: utilizado principalmente para molhos, podendo ainda fazer parte de saladas. Seu formato é oblongo, tipicamente alongado;
- Cereja: utilizado como aperitivo, ou ainda em saladas. É um "mini tomate", com tamanho pequeno, redondo ou oblongo.

Dentre as características do tomate destaca-se o alto teor de vitamina C e licopeno, além de uma coloração que varia do verde ao vermelho, possui alto teor de água, (aproximadamente 95%). Durante a maturação ocorrem algumas mudanças progressivas no tomate como, cor, firmeza, morfologia composição química.

Devido a sua natureza e às condições de pós-colheita, transporte e armazenamento, o fruto in natura tem vida de prateleira de aproximadamente uma semana (SANINO *et al.*, 2003).

O tomate seco foi introduzido no mercado brasileiro por imigrantes de países como Espanha e Itália e de algumas recentes produções domésticas nacionais. Em termos de pesquisa, vem-se observando nos últimos anos, interesse crescente pela qualidade deste produto. Estudos são desenvolvidos visando à investigação dos parâmetros de secagem e aplicação de novas tecnologias que minimizem os danos causados pelo calor à cor, textura, ao sabor e perda de nutrientes (VEJA *et al.*, 2001; TOTOBESOLA-BRABIER *et al.*, 2002; CAMARGO, 2003; 2005 CAMARGO *et al.*, 2003).

O maior consumo de tomates é na forma in natura em saladas e industrializados, como extrato de polpa concentrado, polpa, pedaços de tomate com adição de especiarias. Porém, com as mudanças dos hábitos alimentares dos consumidores, os tomates secos têm aumentado sua popularidade e consumo (AKANBI; ADEYEMI; OJO *et al.*, 2006).

O processamento do tomate, incluindo a secagem, representa uma alternativa de redução das perdas para o produtor, principalmente nas regiões onde a cultura do tomate constitui a principal atividade econômica. Frequentemente ocorre diminuição na demanda do comércio in natura e, por conseguinte, as perdas de tomates são aumentadas. Assim, o tomate seco, além de apresentar maior período de conservação, torna-se uma alternativa para minimizar essas perdas, bem como permite o aproveitamento dos produtos que não dão classificação para o mercado do tomate in natura.

Assim, o estudo do processo de secagem de tomate vem contribuir à agregação de valor, transformando-o, de um produto muitas vezes desvalorizado em função do excesso de oferta, em um produto diferenciado que visa um novo mercado de franca expansão, no Brasil, conquistando consumidores principalmente pelas suas propriedades nutracêuticas (FAGUNDES *et al.*, 2005).

Segundo Murari (2001), o tomate seco é um produto diferenciado tanto no aspecto do processamento como na comercialização. Trata-se de tomates não inteiros desidratados até uma umidade intermediária, mantendo sua textura macia. O tomate seco é comercializado imerso em óleo vegetal e temperado com sal, alho, orégano e outros condimentos. No Brasil, por tratar-se de um produto relativamente novo, o processamento é feito por pequenas e microempresas, em geral, próximas às regiões produtoras.

O tomate seco vem sendo cada vez mais utilizado em cobertura de pizzas, molhos e outros pratos característicos. Além de o tomate seco apresentar-se como uma alternativa para o aproveitamento do excedente de produção, disponibiliza ao consumidor um produto sensorialmente diferenciado, podendo ser comercializado em qualquer período do ano por ser menos perecível (FAGUNDES *et al.*, 2005).

Romero *et al.* (1997) alertam para que a secagem do tomate seja realizada a temperaturas inferiores a 65 °C, visando à preservação da cor e sabor característicos, ainda que exija maior tempo de processo. Camargo & Queiroz (1999) também observaram os efeitos negativos da temperatura de 80 °C na secagem de tomate, comparativamente à temperatura de 60°C, ressaltando, como primeira causa, a queima superficial do produto.

A temperatura influencia na cinética de secagem, uma vez que valores mais elevados resultam na diminuição da umidade e, conseqüentemente, redução do tempo. O tamanho da fatia, também exerce influência. Segundo esses autores o corte em quatro partes favoreceu a evaporação d'água devido à maior área de contato, diminuindo o tempo de processo para alcançar o equilíbrio (SANJINEZ-ARGANDOÑA *et al.*, 2011).

O tempo de secagem depende da matéria-prima e das condições externas do ambiente. Normalmente esse tempo é de 18 a 32 horas. Para determinação do fim do processo, observa-se que o produto sofreu um encolhimento e não apresenta pontos localizados de umidade. Recomenda-se ainda que sejam realizados ensaios para se familiarizar com o processo de secagem onde o operador estará habilitado a conduzir todo o processamento (CORNEJO & NOGUEIRA, 2006).

Para Camargo *et al.* (2003) a remoção da semente pode reduzir em até 50% do tempo de secagem do produto. Ainda segundo dados do estudo realizado por esses autores a preferência dos consumidores é por tomates secos até o teor de água de 35% (b.u).

## 2.4 Bombas de calor

Sistemas de secagem que possam operar com baixas temperaturas, representam uma solução para melhorar a qualidade dos produtos sensíveis à temperaturas elevadas, com a possibilidade de serem mais eficientes no que diz respeito ao consumo de energia, uma vez que utilizam o potencial de secagem do ar ambiente (PACCO, 2008).

A necessidade de reduzir o consumo de energia é outro gargalo do processo de secagem, pois segundo Pacco (2008), a quantidade de energia utilizada na secagem de alimentos é bastante significativa, estejam eles na forma in natura ou processados.

Em razão disso, já há algum tempo a aplicação de bombas de calor em processos de secagem vem despertando a atenção (PERRY, 1981/1982; HOGAN *et al.*, 1983; ZILLA; STRUMILLO, 1987) citados por Rossi (1993).

Bomba de calor é uma máquina termodinâmica de aquecimento a partir de uma fonte de calor externo cuja temperatura é inferior à do local ou do sistema em aquecimento (BERNIER, 1979).

Segundo Cortez e Neves Filho (1996), as bombas de calor, possibilitam uma importante redução na degradação da energia elétrica em processos de aquecimento e resfriamento de fluidos e poderão contribuir de modo efetivo para o uso racional da energia no Brasil. São equipamentos muito eficientes, pois utilizam racionalmente a energia que as acionam, podendo gerar um efeito de 3 a 5 vezes superior a energia elétrica utilizada, pois recupera-se calor de uma fonte térmica como o ar ou água fazendo pouco uso de trabalho mecânico.

As possíveis aplicações de bomba de calor são numerosas. Lazzarin (1995) apresenta layouts de montagens em cultura de peixe; sistemas de condicionamento, calefação e resfriamento em processos industriais; em plantas de tratamento de efluentes; em plantas de destilação; em indústrias metalúrgicas; em plantas de incineração; dentre outras. As bombas de calor ganharam espaço na indústria devido ao maior desenvolvimento da tecnologia nos últimos tempos. No caso da Europa, há predominância da aplicação de bombas de calor na indústria de alimentos (mais de 50% somente em indústrias de processamentos de alimentos e laticínios), seguido da agricultura, papel e celulose, refinarias e químicas, cervejarias, têxteis, plásticas e outros usos.

No caso do uso industrial, bombas de calor a altas temperaturas (100°C) são mais atrativas. Porém existem muitas aplicações com temperaturas de operação similares a sistemas de ar condicionado (40-50°C) (LAZZARIN, 1994).

Bernier (1979) afirma que as bombas de calor não são uma tecnologia recente. O conceito de utilização do “efeito quente” produzido em sistemas de refrigeração teve início em 1852 com William Thompson (Lord Kelvin), a quem é creditada a invenção. As primeiras utilizações comerciais de bombas de calor datam do início do século XX. Hoje, existem muitos tipos e aplicações já conhecidas e comercialmente bem estabelecidas.

Embora as vantagens da bomba de calor, sob o ponto de vista termodinâmico, sejam reconhecidas há muito tempo, seu desenvolvimento como um produto industrial, visando à recuperação de calor de rejeitos de processos, somente foi realmente iniciado nos princípios da década de 70 (WORSE-SCHMIDT, 1981; MOSER& SCHNITZER, 1985), citados por Rossi (1993).

Jordan (2005) utilizou uma bomba de calor água/água para aquecimento e resfriamento em laticínios mostrando sua viabilidade, tanto com acionamento elétrico, como a biogás, resultando num potencial de economia entre 65 e 93% respectivamente.

Flikke *et al.* (1975), em trabalho realizado, apresentaram o emprego de uma bomba de calor água/água acoplado a um secador em uma unidade doméstica com compressor de 0,57 kW, operando com R12, com circuito fechado de ar, em que o calor equivalente do trabalho do compressor era transferido ao ambiente através de um trocador de calor auxiliar (ROSSI, 1993). Este sistema foi utilizado em testes de secagem de milho e aveia, de 25-28% até 12-13% de teor de água, em que a temperatura do ar na entrada do secador foi entre 43 e 54 °C, com vazão entre 0,15 e 0,56 (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>).

Sob as condições de seus experimentos, FLIKKE *et al.*, (1975) constataram que o consumo total mínimo foi encontrado quando o sistema foi operado com vazão de ar entre 0,18 e 0,25 m<sup>3</sup>/s. Nesta situação, o consumo específico de energia elétrica foi de 0,28 kWh kg<sup>-1</sup> de água evaporada (ROSSI, 1993).

Meyer & Greyvenstein (1992) estudaram a viabilidade econômica da aplicação da bomba de calor como secador de grãos e verificaram a redução do período operacional mínimo que a torna mais econômica que os outros secadores.

O uso de bomba de calor no aquecimento do ar ambiente utilizado na secagem de cebolas fatiadas apresentou resultados favoráveis em relação ao consumo de energia e qualidade do produto desidratado, quando comparado ao sistema de secagem a base de resistências elétricas (ROSSI, 1993).

Esta mesma bomba de calor utilizada para a secagem de cebolas fatiadas aumentou em 20 a 25 vezes o potencial de secagem do ar ambiente, para temperaturas de evaporação entre -3,5 e 0 °C e umidades relativas acima de 90%, correspondente a uma economia de

energia elétrica em torno de 40%, quando comparado com resultados estimados de um sistema de aquecimento por resistências elétricas.

Ainda segundo Rossi (1993), o tempo total de secagem pode ser reduzido entre 26 a 36%, em um secador acoplado a uma bomba de calor, comparado ao tempo de secagem em um secador com aquecimento elétrico, em operações de secagem de cebolas in natura, (fatiadas, até 4 - 5% de umidade final, base úmida, com ar à temperatura de 55 °C). Foram constadas reduções percentuais no consumo de energia elétrica entre 15 e 35% e o produto final apresentou percentuais de refletância superiores, em toda a faixa do espectro visível, em relação ao que se obteve no secador a base de resistências elétricas.

Pacco (2008), afirma que quanto maior a temperatura de secagem, menor será o COP (coeficiente de desempenho) da bomba de calor e maior o consumo de energia e, que a redução da temperatura de secagem ocasiona um aumento no valor do COP. Conseqüentemente há um aumento no tempo de secagem gerando um aumento no consumo de energia de equipamentos auxiliares. Pacco (2008), ainda diz que na operação de secagem de tomates em fatias no secador de bandejas, utilizando o sistema de bomba de calor em cascata, o tempo de meia secagem é também o mesmo quando se utiliza um secador convencional com fonte de aquecimento por resistências elétricas. A vantagem foi à redução de 30% no consumo de energia elétrica quando utilizado o sistema de bomba de calor em cascata aproveitando os dois efeitos para resfriamento e secagem de tomates.

## **2.4 Modelagens matemática**

A cinética de secagem é objeto de inúmeras pesquisas, devido a sua grande importância na área de secagem de produtos, modelagem matemáticas da operação e projetos de secadores. É através do estudo de modelagem matemática que possibilita verificar a otimização e a viabilidade do secador, sua aplicação comercial e seu dimensionamento.

Segundo (FERREIRA, 2004) a modelagem matemática estabelece as equações de umidade em função do tempo de secagem para o diferente período da taxa de secagem. Com objetivo de representar satisfatoriamente a perda de umidade do produto durante o período de secagem.

A cinética de secagem possibilita também a determinação do mecanismo predominante na transferência de massa do material para o fluido e as respectivas equações matemáticas correspondentes (FERREIRA, 2004).

Existem três tipos de modelos de simulação matemática do processo de secagem em camada delgada, que visam descrever a cinética de secagem de produtos agrícolas. O modelo teórico, que considera apenas a resistência interna, a transferência de calor e água entre o produto e o ar quente; os modelos semi teóricos e os empíricos, que consideram somente a resistência interna, a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem (MIDILLI; KUCUK; YAPAR, 2002).

De acordo com as condições do processo de secagem, diferentes modelos podem ser ajustados para descrever adequadamente a cinética de secagem de produtos capilares porosos, higroscópicos.

Uma importante correlação na área de secagem de alimentos é a lei exponencial. Essa lei assume que a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre do gênero alimentício, baseado na analogia com a lei de resfriamento de Newton (CHIRIFE, 1983).

A teoria de migração de água por difusão representada pela Lei de Fick, expressa em termos do gradiente de umidade, teve preferência no estudo da secagem de diferentes produtos alimentícios por vários pesquisadores, por apresentar uma concordância entre as distribuições de umidade experimental e a estimada pelo modelo (CHIRIFE, 1983)

Segundo (BARROZO *et al.*, 1998) as equações empíricas Henderson & Pabis, Page, Lewis, Overhults, são utilizadas na análise da secagem, buscando uma forma de representar a cinética de secagem de alimentos que melhor se ajuste aos dados experimentais.

### 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

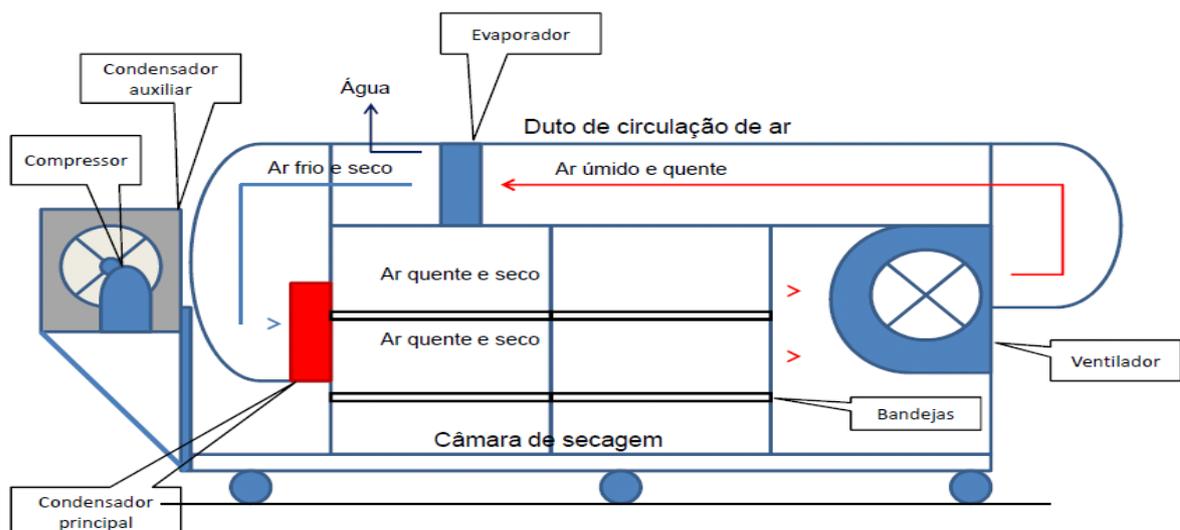
#### 3.1 Descrição do secador com princípio de bomba de calor

O secador foi montado na Unidade II da Universidade Federal da Grande Dourados – MS, reutilizando-se sucatas de metal de vários equipamentos velhos além de aparelhos de ar condicionado antigos.



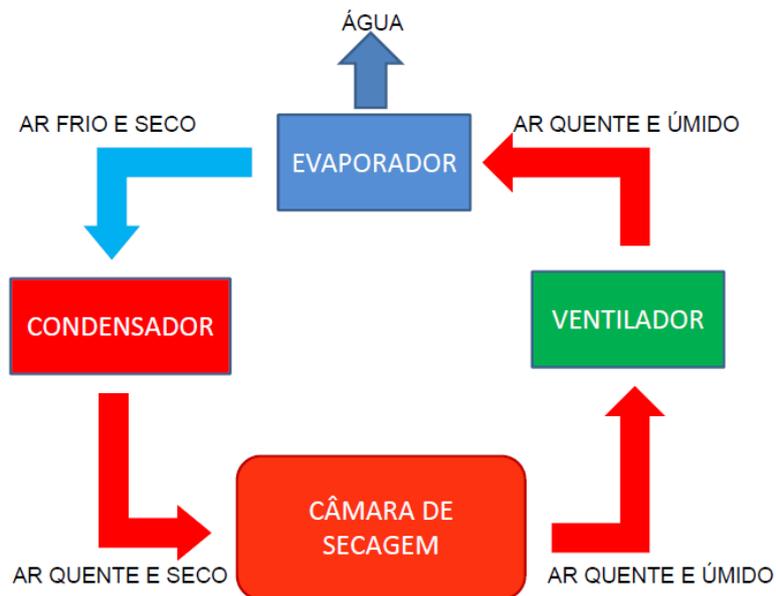
**Figura 1** - Sucatas utilizadas na montagem do secador.

O Secador é composto basicamente por uma unidade de refrigeração, condensador auxiliar, duto de circulação de ar, quadro de comando e câmara de secagem (Figura 2).



**Figura 2** - Esquema básico de funcionamento do secador.

O condicionamento do ar de secagem é realizado em um duto acoplado a câmara de secagem, onde estão instalados um evaporador e um condensador, colocados em série. Um ventilador instalado na saída da câmara de secagem força o ar vindo da câmara de secagem para o duto, passando pelo evaporador reduzindo a sua temperatura abaixo do ponto de orvalho, promovendo a condensação da água removida do produto. Na sequência o ar passa pelo condensador, onde é aquecido promovendo a redução da sua umidade relativa, proporcionando condições adequadas para uma secagem a baixa temperatura (Figura 3).



**Figura 3** - Fluxograma do processo de secagem no secador com bomba de calor.

A temperatura na câmara de secagem pode ser ajustada para uma faixa entre 35 a 45° C. O controle de temperatura é realizado por um controlador de temperatura instalado no painel de controle, operando com lógica (ON-OFF). O secador possui um condensador principal, para aquecer o ar frio e seco condicionado pelo evaporador, e um condensador auxiliar, localizado na parte externa do secador (Figura 4).

Quando o ar da câmara de secagem aumenta sua temperatura acima de um valor programado no controlador, o mesmo atua sobre válvulas solenóides direcionando o fluxo de fluido refrigerante R-22 para o condensador auxiliar, rejeitando calor no ambiente externo. E quando a temperatura na câmara de secagem diminui abaixo da programada, novamente o controlador de temperatura atua sobre as válvulas solenóides, direcionando o fluxo de fluido refrigerante para o condensador principal, tornando a aquecer o ar de secagem.



**Figura 4** – Vista panorâmica do protótipo do secador, onde pode ser visto o quadro de comando (painel de controle).

### 3.2 Realização dos testes de secagem

O trabalho foi realizado utilizando a estrutura dos seguintes laboratórios da Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados: Automação Agrícola, Relação Água Solo Planta Atmosfera e de Propriedades Físicas de Produtos Agrícolas.

Foram realizadas três secagens distintas, alterando-se o tipo de secador utilizado e a temperatura de secagem. A metodologia utilizada para cada secagem foi igual em todos os tratamentos. Os tomates foram lavados com água a temperatura ambiente e foram cortados em quatro pedaços, tentando manter a máxima uniformidade entre os pedaços cortados. A polpa e a semente foram retiradas (Figura 5), pois utilizando essa metodologia o tempo de secagem é reduzido segundo Camargo e Queiroz (2003).



**Figura 5** – Preparação do tomate para submeter ao processo de secagem.

Os tomates já cortados foram distribuídos uniformemente em camada única sobre bandejas. Foram realizadas três repetições para cada temperatura de secagem. Onde cada bandeja possuía aproximadamente 1,5 kg de tomates cortados e despulpados (Figura 6).



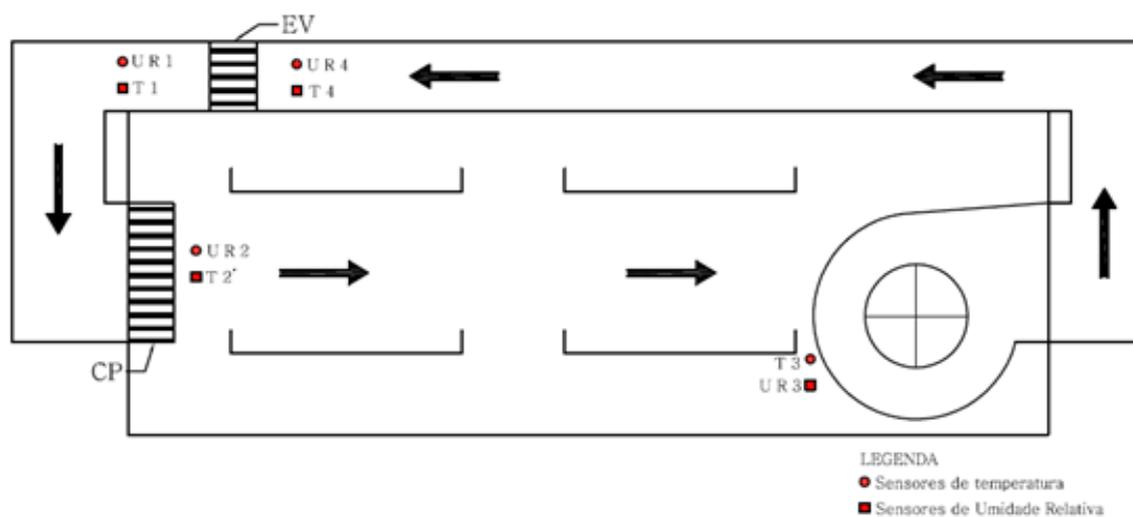
**Figura 6** - Bandeja de secagem com tomates cortados e despulpados.

As bandejas eram colocadas juntas para secagem, e nos intervalos de pesagem suas posições eram trocadas, para manter maior uniformidade de secagem. Para obtenção da curva de secagem a cada hora as bandejas eram retiradas do secador e pesadas em balança, com resolução 0,01g. Nesse mesmo intervalo de tempo eram anotados os dados de temperatura ambiente, umidade relativa e consumo de energia que eram obtidos através de um termohigrômetro e um medidor ampere-hora, respectivamente.

O teor de água inicial do produto foi determinado utilizando uma estufa regulada para a temperatura de 105 °C em um tempo de secagem de 12 horas (MONTEIRO *et al.*, 2008). As amostras destinadas a determinação da umidade foram escolhidas ao acaso e colocadas em 3 bandejas cada uma com aproximadamente 250 g de tomates cortados em fatias. Com a determinação do teor de água inicial do produto foi calculada a massa final para interpretação do processo de secagem, correspondente ao teor de água de 25%.

A primeira e a segunda secagem foram realizadas no Laboratório de Propriedades Físicas de Produtos Agrícolas, utilizando uma estufa com circulação forçada e renovação de ar (SOLAB SL-102/150), com temperatura de 50°C e 65 °C para a primeira e segunda secagem, respectivamente.

A terceira secagem foi realizada no Laboratório de Automação Agrícola, utilizando o secador com bomba de calor, com temperatura de 45°C. Neste teste foram instalados no secador sensores para o monitoramento das variáveis operacionais (temperatura e umidade relativa na câmara de secagem e pressão da bomba de calor). Os sensores foram conectados a um sistema de aquisição de dados que permaneceu ligado a um computador para o registro dos dados. O posicionamento dos sensores no secador (duto e câmara de secagem) esta descrito na Figura 7.



**Figura 7** - Posicionamento dos sensores de temperatura, umidade relativa no secador.

### 3.3 Ajustes de Modelos Matemáticos

Para determinação da curva de secagem das fatias do tomate foram utilizados os dados experimentais das secagens na estufa com temperaturas de 50 e 65 °C e do secador com temperatura de 45 °C. A umidade de equilíbrio do produto foi de 17,56% para estufa a 50 °C, de 13,73% para estufa a 65°C e, de 18,42% para o secador. A razão de umidade das fatias do tomate durante a secagem foi determinada pela equação 1.

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (1)$$

Em que:

RU: razão de umidade do produto, adimensional;

U: teor de água do produto (kg de água/kg de matéria seca);

$U_i$ : teor de água inicial do produto (kg de água/kg de matéria seca);

$U_e$ : teor de água de equilíbrio do produto (kg de água/kg de matéria seca).

Para representar a secagem do fruto do tomate foram utilizados os dados experimentais, e ajustados de acordo com os modelos matemáticos disposto na Tabela 1.

**Tabela 1** - Modelos matemáticos utilizados para prever o fenômeno de secagem de produtos agrícolas.

Modelos	Designação do modelo	Anexo
Exp. de 2 Termos	$RU = a \cdot \exp(-k^0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k^1 \cdot t)$	(A)
Henderson e Pabis	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	(B)
Logaritmo	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	(C)
Newton	$RU = \exp(-k \cdot t)$	(D)
Midilli	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot t$	(E)
Page	$RU = \exp(-k \cdot t)$	(F)
Thompson	$RU = \exp\left(\frac{-a - (a^2 + 4 \cdot t \cdot t)^{0.5}}{2} \cdot b\right)$	(G)
Valcam	$RU = a + (b \cdot t) + (c \cdot t^{1.5}) + d \cdot T^2$	(H)
Wang e Singh	$RU = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	(I)

Em que:

t - tempo de secagem, h;

k,  $k^0$ ,  $k^1$  - coeficientes de secagem,  $s^{-1}$ ;

a, b, c, n - constantes dos modelos, adimensional.

Para o ajuste dos modelos matemáticos, foi realizada análise de regressão não linear, pelo método Gauss Newton, utilizando-se o software STATISTICA 8.0 (StatSoft, Tulsa, Oklahoma, EUA). O grau de ajuste de cada modelo foi determinado com base no coeficiente de determinação ( $R^2$ ), a média relativa desvio percentual (P), e o erro padrão (SE). Os valores de P e SE para cada modelo foram calculados pelas equações (2) e (3):

$$P = \frac{100}{N} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (2)$$

$$SE = \sqrt{\sum \frac{|Y - \hat{Y}|^2}{GLR}} \quad (3)$$

Em que:

Y: valor observado experimentalmente;

$\hat{Y}$  : valor estimado pelo modelo ajustado;

N: número de observações experimentais;

GLR: graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

### 3.4 Custo energético da Secagem

O custo energético da secagem foi obtido através do consumo de energia elétrica durante a secagem, determinado com o auxílio de um medidor ampere hora. Para o custo do kWh foi adotado o valor de tarifa local da concessionária Enersul para consumidores rurais (R\$ 0,22/kWh). O consumo de energia elétrica foi determinado de acordo com a seguinte equação 4:

$$CE = V \times CA \times FP \quad (4)$$

Em que:

CE: Consumo de energia elétrica (kWh);

V: Tensão do Secador (V);

CA: Consumo em Ampere-hora (Ah);

FP: Fator de Potência (0,8 secador bomba de calor e 1 para secador resistência elétrica).

A partir da obtenção dos dados de custo de secagem para cada teste de secagem, foi possível estimar o custo energético específico de secagem (R\$/ kg de tomate seco). O custo energético de secagem foi determinado segundo a equação 5.

$$CS = CE \times VT \quad (5)$$

Em que:

CS: Custo de Secagem (R\$);

CE: Consumo de Energia (kWh);

VT: Valor da tarifa (R\$/(kWh));

### 3.5 Avaliação energética do secador

Sendo uma bomba de calor o sistema de aquecimento empregado no secador, a eficiência térmica foi avaliada segundo o coeficiente de desempenho (equação 6), o qual relaciona a energia térmica gerada com a energia utilizada para acionamento do compressor (JORDAN, 2005).

$$COP = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}} \quad (6)$$

Em que:

$\dot{Q}$  = calor gerado pela bomba de calor [kW];

$\dot{W}$  = trabalho de compressão [kW];

O calor gerado pela bomba de calor foi considerado como sendo igual ao calor transferido para o ar de secagem. Uma vez que o evaporador e o condensador estavam montados em série no duto por onde passava o ar de secagem, o calor gerado (transferido ao ar) é igual a diferença entre o calor removido pelo evaporador e o calor cedido pelo condensador (equação 2).

$$\dot{Q} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L \quad (7)$$

Em que:

$\dot{Q}$  = taxa de calor transferido ao ar de secagem [kW];

$\dot{Q}_H$  = taxa de calor cedida pelo condensador [kW];

$\dot{Q}_L$  = taxa de calor removida pelo evaporador [kW].

## 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Representação do ciclo de secagem do secador com princípio de bomba de calor

A representação do ciclo de secagem do secador com bomba de calor no diagrama psicrométrico foi realizado de acordo com as médias das leituras, de cada sensor de temperatura e umidade relativa (Figura 6). Cada ponto mostrado na Figura 6 representa o posicionamento dos sensores de temperatura e umidade relativa. As médias estão dispostas na Tabela 2.

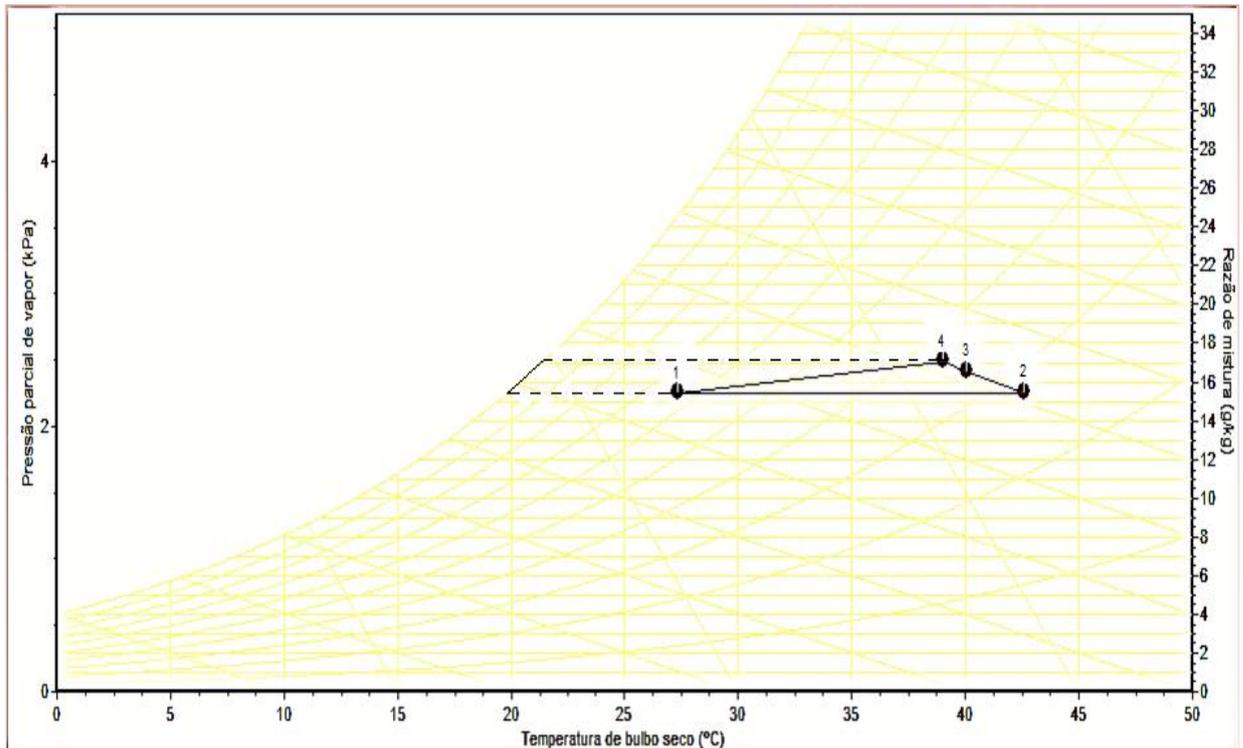
**Tabela 2**-Média dos sensores de temperatura e umidade relativa.

Sensores	T1 (°C)	UR1(%)	T2 (°C)	UR2(%)	T3 (°C)	UR3(%)	T4 (°C)	UR4(%)
Média	27,3	64,1	42,5	30,2	40,2	33,6	39,07	36,6

O ponto de estado 1, na carta psicrométrica Figura 8 refere-se a condição do ar após passar pelo evaporador com redução da razão de mistura, redução da temperatura de bulbo seco e aumento da umidade relativa. O ponto 2, representa a condição do ar na entrada da câmara de secagem, após passar pelo condensador, onde ocorre aumento da temperatura de bulbo seco e redução da umidade relativa. O ponto 3, representa a saída do ar da câmara de secagem, onde, após entrar em contato com o produto o ar sofre aumento da razão de mistura, aumento da umidade relativa e, uma pequena redução de temperatura, devido a troca de calor com o produto. O ponto 4 representa a entrada do ar no evaporador. Para sair do ponto 4 para o ponto 1 o ar passa pela curva de saturação.

A temperatura no ponto 4 deveria ser maior do que a temperatura no ponto 3, devido ao atrito entre o ar e as pás do ventilador. Porém, devido à ausência de isolamento no secador, acaba ocorrendo uma troca de calor com meio externo, reduzindo assim a temperatura.

A distribuição do fluxo de ar dentro do secador com princípio de bomba de calor, demonstra que devido ao posicionamento das bandejas em relação ao fluxo de ar, uma parte do ar, não entra em contanto com o produto, pois o sensor UR2 situado na entrada de ar da câmara de secagem obteve uma média de umidade relativa de 30,2 % e após o ar passar pela massa de produto a umidade relativa demonstrada pelo sendo UR3 foi de apenas 33,6 %.

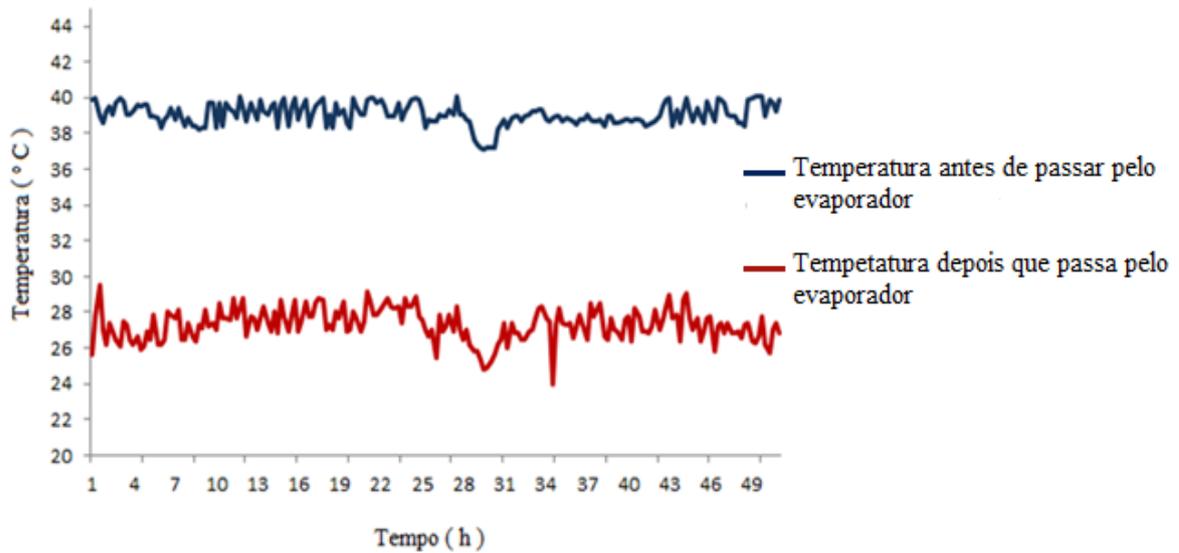


**Figura 8** - Representação do ciclo termodinâmico do secador com bomba de calor a 45° C

Os traços contínuos representa a posição dos sensores na câmara de secagem com bomba de calor. Mas devido ao posicionamento dos sensores dentro da câmara de secagem com bomba de calor não foi possível visualizar o ciclo corretamente, e, assim o tracejado mostra como é o ciclo, realmente.

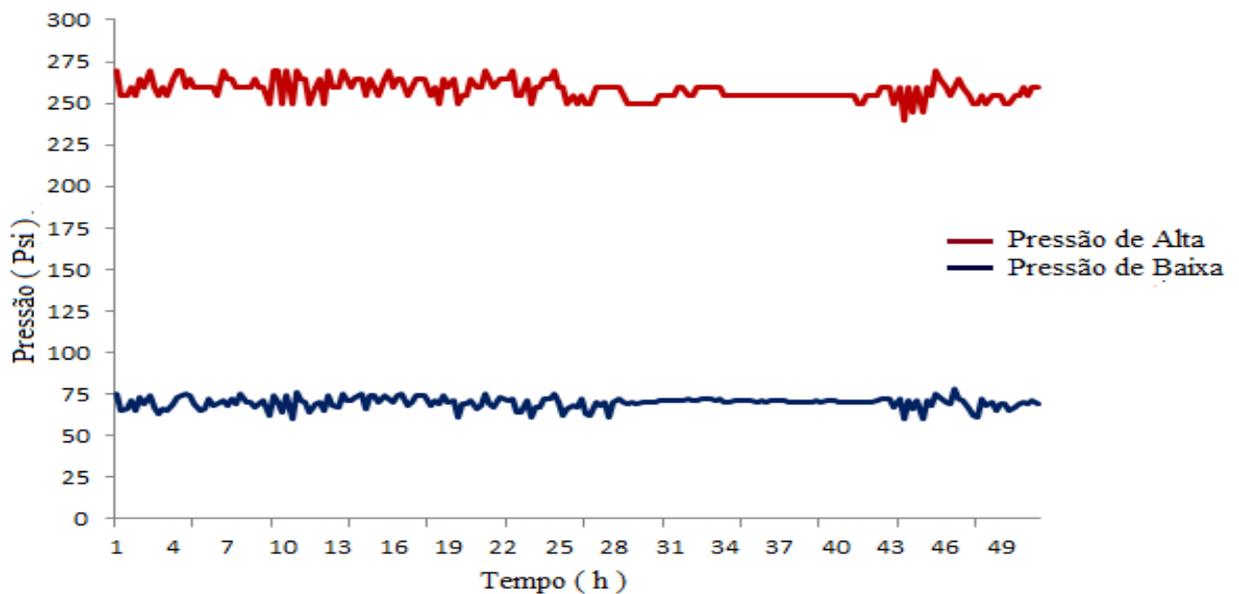
A variação da temperatura do ar na secagem com bomba de calor Figura 9, representada na carta psicrométrica pelo ponto T1, que refere-se às condições do ar após passar pelo evaporador e pelo ponto T4 que refere-se a temperatura do ar da câmara de secagem logo após a passagem pelo massa de produto antes de entrar no evaporador, em relação ao tempo de secagem.

A temperatura depois de passar pelo evaporador ponto T1, oscilou entre 24 e 29,5°C, essa variação é decorrente da oscilação da temperatura externa, já que o secador não possui isolamento. A temperatura da câmara de secagem logo após a passagem pela massa de produto representada pelo sensor T4 oscilou entre 37 e 40°C, esta também sofreu influência da temperatura externa.



**Figura 9** - Variação da temperatura antes de entrar no evaporador e depois que passa pelo evaporador.

A variação de pressão de alta e de baixa no compressor do secador Figura 10. A pressão de alta oscilou entre 240 e 270 psi e pressão de baixa oscilou entre 60 e 78 psi. Quanto maior for a variação entre a pressão de alta e de baixa, maior é o trabalho de compressão.



**Figura 10** - Variação de pressão de alta e pressão de baixa em relação ao tempo de secagem.

## 4.2 Modelagens matemática do processo de secagem

Analisando o erro padrão (SE), nota-se que para as temperaturas em estudo, que todos os modelos obtiveram valores inferiores a 0,057, sendo o modelo de Valcam o que obteve os menores valores dentro das três temperaturas em estudo (Tabela 3).

**Tabela 3** - Parâmetros estatísticos dos modelos ajustados, coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro padrão (SE), a média relativa do desvio percentual (P), calculado para verificação do ajuste dos modelos matemáticos aos valores experimentais de diferentes métodos e condições do ar de secagem.

Modelos	Secador 45°C		
	SE	P (%)	$R^2$
Exp. de 2 Termos	0,0233	52,7362	0,994266
Henderson e Pabis	0,0309	73,3256	0,989887
Logaritimo	0,0085	10,5451	0,999282
Newton	0,0312	77,2970	0,989166
Page	0,0241	51,2744	0,993871
Thompson	0,0320	77,3062	0,989164
Valcam	0,0064	9,0357	0,999617
Wang e Singh	0,0253	33,9279	0,993227
Midilli	0,0080	16,5141	0,999389
Modelos	Estufa 50°C		
	SE	P (%)	$R^2$
Exp. de 2 Termos	0,0164	40,5696	0,997111
Henderson e Pabis	0,0330	71,9389	0,988363
Logaritimo	0,0105	24,1072	0,998857
Newton	0,0384	84,0450	0,983777
Page	0,0150	32,8770	0,997602
Thompson	0,0390	84,0528	0,983774
Valcam	0,0037	5,2765	0,999865
Wang e Singh	0,0106	23,3531	0,998788
Midilli	0,0059	12,0950	0,999653
Modelos	Estufa 65°C		
	SE	P (%)	$R^2$
Exp. de 2 Termos	0,0263	46,6102	99,3680
Henderson e Pabis	0,0498	81,7585	97,7351
Logaritimo	0,0165	28,6409	99,7636
Newton	0,0557	94,2795	97,0017
Page	0,0212	32,1780	99,5870
Thompson	0,0573	94,2878	97,0012
Valcam	0,0031	1,5270	99,9921
Wang e Singh	0,0062	8,5473	99,9644
Midilli	0,0104	14,9319	99,9115

Segundo GONELI *et al.* (2011), um modelo é considerado aleatório se os valores residuais se encontrarem próximos à faixa horizontal em torno de zero e também não formarem figuras definidas, não indicando tendenciosidade dos resultados. Se apresentar distribuição tendenciosa, o modelo é considerado como inadequado para representar o fenômeno em questão.

Para os valores da média relativa do desvio percentual (P) o modelo de Valcam foi o único modelo satisfatório, com valores inferiores a 10 % para as três temperaturas, e foi o modelo que melhor representou a curva da secagem das fatias de tomate na estufa a 45 e 65 °C e no secador a 45 °C (Tabela 3).

Os valores de erro médio relativo do desvio percentual (P) indicam o desvio dos valores observados em relação à curva estimada pelo modelo (KASHANI-NEJAD *et al.*, 2007), e segundo MOHAPATRA e RAO (2005), valores inferiores a 10% são recomendados para a seleção de modelos.

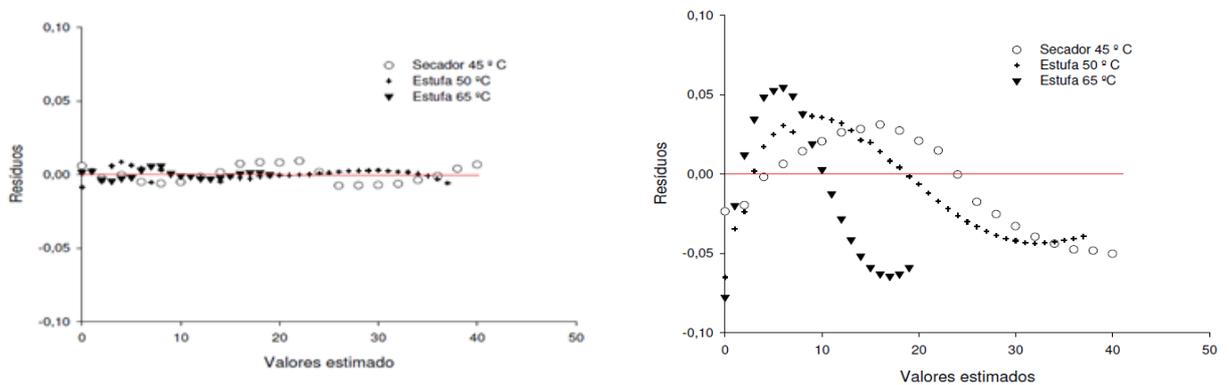
Verifica-se na Tabela 4 a representação dos resíduos para diferentes condições de secagem. Os modelos que são representativos para o secador são o modelo Logaritimo e o modelo de Valcam, e para a estufa a 50 °C, o único modelo representativo foi o de Valcam. Já para a estufa 65 °C os modelos representativos foram o de Wang e Singh demonstrando, dessa forma, que o modelo que representa todas as condições de secagem é o de Valcam.

**Tabela 4** - Tendência de distribuição dos resíduos com representação dos modelos, (A) aleatório, (T) tendencioso.

Modelos	S 45 °C	E 50 °C	E 65 °C
Exp. de Dois Termos	T	T	T
Henderson e Pabis	T	T	T
Logaritimo	A	T	T
Newton	T	T	T
Page	T	T	T
Thompson	T	T	T
Valcam	A	A	A
Wang e Singh	T	T	A
Midilli	T	T	T

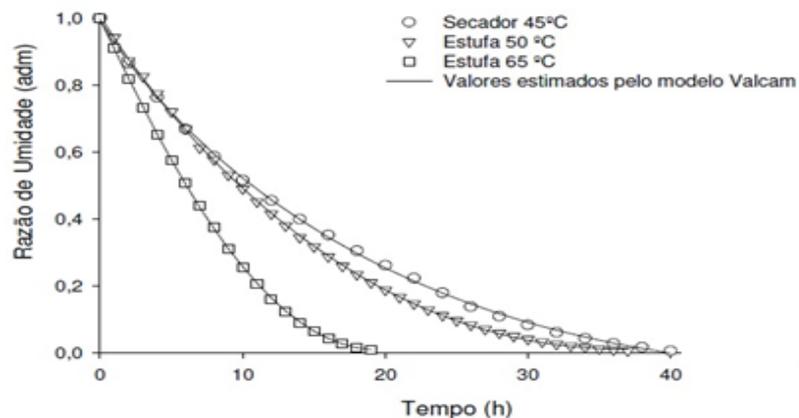
S,Secador ; E,Estufa

A ilustração da distribuição dos resíduos, Figura 11 para a secagem em uma estufa a 50 °C, 65 °C e secador a 45 °C. O único modelo considerado satisfatório foi o modelo de Valcam, indicando que esse modelo é o mais apropriado para descrição do fenômeno de secagem das fatias de tomate nas condições consideradas nesse experimento.



**Figura 11-** Distribuição dos resíduos para os frutos de tomate submetidos à secagem em uma estufa a 50 e 65 °C e, secador a 45 °C segundo o modelo Valcam, e Henderson e Pabis.

Na Figura 12 são apresentados os valores experimentais e estimados pelo modelo de Valcam, valores de razão de umidade, em função do tempo. O modelo que melhor representa a curva de secagem, é o modelo de Valcam, que se ajustou para as três curvas de secagem no secador a 45 °C e na estufa a 50 e 65 °C



**Figura 12 -** Curva de secagem para o tomate, modelo de Valcam, para o secador com bomba de calor e estufa.

Segundo ALVES (2013), o modelo de Valcam foi o modelo que apresentou melhor ajuste para representar a secagem de café a 40 °C.

Na Tabela 5 estão dispostos os coeficientes do ajuste do modelo de Valcam, para secador 45 °C, estufa 50 e 65 °C.

**Tabela 5** - Coeficientes do modelo de Valcam, para o secador a 45°C e estufa a 50e 65° C.

<b>Temperatura</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>
<b>45 °C</b>	0,99408	0,07706	0,01064	-0,00038
<b>50 °C</b>	1,00861	0,07444	0,00654	0,00021
<b>65 °C</b>	0,99834	0,08330	0,00839	0,00357

### 4.3 Avaliação energética do secador

Considerando que a bomba de calor operou segundo um ciclo ideal, onde a diferença entre o calor cedido pelo condensador e o calor retirado pelo evaporador é igual ao trabalho de compressão (BORGNAKKE& SONNTAG, 2009), o COP da bomba de calor fica reduzido a uma constante, de valor igual a 1, onde o calor cedido ao ar de secagem é igual ao trabalho de compressão, ou seja, a potência térmica do secador é igual a potência elétrica do compressor.

O valor da potencia média do compressor da bomba de calor em cada ensaio, foi obtido pelo quociente entre o consumo total de energia do compressor (kWh) e o tempo de operação em horas. A Tabela 6 representa os valores da potencia do secador bomba de calor e da estufa convencional.

**.Tabela 6** – Potência do secador com bomba de calor e da estufa convencional.

	Potência Térmica (W)
Secador bomba de calor	761
Estufa Convencional	2500

#### 4.4 Consumo de Energia

A Tabela 7 representa o tempo de secagem (TS), consumo de energia elétrica (CEE), massa de água evaporada (MAE) em cada teste de secagem. Também mostra o consumo de energia elétrica para retirar um quilograma de água do tomate (CERQA), consumo de energia para obtenção de um quilograma de tomate seco (CEQTS) e o custo de energia elétrica por quilograma de tomate seco (CS). Para o secador temos o consumo de energia total do equipamento e outro sem o ventilador.

**Tabela 7** – Tempo de secagem e o consumo total de energia elétrica em cada teste de secagem

<b>Tipo de Secagem</b>	<b>T (°C)</b>	<b>TS (h)</b>	<b>CEE (kWh)</b>	<b>MAE (kg)</b>	<b>MPS (kg)</b>	<b>(CERQA) (kWh)</b>	<b>(CEQTS) (kWh/kg)</b>	<b>CS (R\$/KG)</b>
<b>Estufa convencional</b>	50	37	17,16	4,79	0,36	3,6	47,5	11,5
<b>Estufa convencional</b>	65	19	12,76	4,5	0,33	2,8	38,7	9,4
<b>Secador bomba de calor</b>	45	50	59,37	4,08	0,32	14,6	185,5	45,1
<b>Secador bomba de calor s/ ventilador</b>	45	40	30,45	4,08	0,32	7,5	95,2	23,1

O tamanho da câmara de secagem do secador com bomba de calor, maior que o da estufa, juntamente com a falta de isolamento, colaborou para um maior consumo de energia.

Como o ventilador utilizado foi reaproveitado, não havendo dimensionamento, o mesmo era super dimensionado, aumentando assim o consumo de energia do secador.

Não houve muita diferença no tempo de secagem entre a estufa a 50 °C e o secador a 45 °C, sendo essa diferença proporcional a diferença de temperatura entre os dois. A massa de água evaporada foi maior na estufa por que a umidade de equilíbrio foi menor que no secador. A massa de produto seco obtido foi praticamente igual, pois os três tratamentos receberam a mesma quantidade de produto para secagem. O ventilador interferiu diretamente no aumento do consumo de energia elétrica devido ao fato de não ser projetado.

A Figura 13 mostra o aspecto do tomate seco até a umidade de equilíbrio na estufa convencional com temperatura de 65 °C Figura 13.



**Figura 13** – Tomate seco até a umidade de equilíbrio na estufa elétrica com temperatura de 65 °C.

A Figura 14 mostra o aspecto do tomate seco até a umidade de equilíbrio na estufa convencional com temperatura de 50 °C Figura 14.



**Figura 14** – Tomate seco até a umidade de equilíbrio na estufa elétrica com temperatura de 50 °C.

A Figura 15 mostra o aspecto do tomate seco até a umidade de equilíbrio no secador com bomba de calor com temperatura de 45 °C.



**Figura 15** - Tomate seco até a umidade de equilíbrio no secador com bomba de calor em temperatura máxima de 45 °C.

## CONCLUSÃO

Com o presente trabalho conclui-se que o sistema de secagem a baixa temperatura por meio de bomba de calor mostrou-se funcional e através da sua utilização obtemos um produto com melhor aspecto visual. O maior consumo de energia se deu devido ao fato do secador ser construído utilizando-se sucatas de equipamentos, a falta de isolamento, possuir uma câmara de secagem maior que a da estufa convencional e o ventilador utilizado está super dimensionado.

Para realizar a secagem do tomate na estufa com temperatura de 50 e 65 °C foram gastos 37 e 19 horas de secagem, respectivamente e para o secador com bomba de calor a temperatura de 45 °C foi gasto 40 horas de secagem até que o fruto de tomate atingisse o teor de água de 25 %.

Foram ajustados diferentes modelos para representar a modelagem matemática da secagem do tomate, sobre tudo o modelo que teve melhor significância foi o modelo de Valcam, representando a secagem realizada na estufa elétrica a 50 °C, e 65 °C e no secador com bomba de calor a 45 °C.

A secagem realizada no secador com bomba de calor a 45 °C foi a secagem que proporcionou uma maior umidade de equilíbrio do produto com 18,42%, já para a estufa elétrica a 50 °C a umidade de equilíbrio foi de 17,56%, e para a estufa a 65 °C a umidade de equilíbrio do produto foi de 13,73%.

Para trabalhos futuros recomenda-se uma otimização do secador, com colocação de isolamento, melhoria da distribuição do fluxo de ar na câmara de secagem e adequação da potência do ventilador utilizado.

## REFERÊNCIAS

- AFONSO JÚNIOR, P. C. *et al.* Propriedades termofísicas dos frutos e sementes de café: Determinação e Modelagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 23, n. 4, p. 9-15, 2002.
- AKANBI, C. T.; ADEYEMI, R. S.; OJO, A. Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices. *Journal of Food engineering*, v. 73, n. 2, p. 157-163, 2006.
- ALVES, G. E. *Cinética de secagem e qualidade do café para diferentes temperaturas e fluxos de ar*. Universidade Federal de Lavras, UFLA Dissertação (Mestrado em Eng. Agrícola), 2013.
- ALVES, S. M.; SILVEIRA, A. M. Estudo da secagem de tomates desidratados e não desidratados osmoticamente, Univ. Fed. Rural do Rio de Janeiro, *Revista Universidade Rural*, Série Ciências Exatas e da Terra, v. 21, n. 1, p. 21-30, Suplemento, 2002.
- ASSOCIAÇÃO Brasileira das Indústrias de Alimentação (ABIA). *Comissão Nacional da Legislação de Alimentos: Consolidação das Normas e Padrões de Alimentos*. Resolução 12/78 (12/7 Frutas Secas ou Dessecadas). São Paulo. v.1/A, p.78, 1985.
- ASSOCIATION of Official Analytical Chemists. *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. Washington, D.C. 13. ed., 1018p, 1980.
- BARITAU, O. *et al.* Effects of drying and storage of herbs and spices on the essential oil. Part I. Basil, *Ocimum basilicum L. Flavour and Fragrance Journal*, v.7, p.267-271, 1992.
- BARROZO, M. A. S.; SARTORI, D. J. M.; FREIRE, J. T. **Transferência de calor e massa em leite desluzante e escoamento cruzados**. Secagem de sementes de soja. In: Tópicos especiais em sistemas particulados, São Carlos, ed. UFSCar, 1998
- BERNIER, Jacques. *La pompe de chaleur*. Pyc Edition. Paris, França. p. 382, 1979.
- BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. *Fundamentos da Termodinâmica*. 7. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2009, 454 p.
- CAMARGO, G. A. *et al.* Secagem de tomate para conserva: Parâmetros que influenciam a qualidade final; 2003; *Workshop Tomate na Unicamp: Pesquisas e Perspectivas*. Disponível em: <[http://www.tudosobretomate.com.br/publicacoes/textos/text\\_21.pdf](http://www.tudosobretomate.com.br/publicacoes/textos/text_21.pdf)>. Acesso em: 27 maio 2014.
- Camargo, G. A. Processo produtivo de tomate seco: novas tecnologias – Manual Técnico. Tomate na UNICAMP. <http://www.agr.unicamp.br>. 10 Ago. 2003.
- Camargo, G. A. Novas tecnologias e pré-tratamentos: tomate seco embalado a vácuo. Campinas: UNICAMP, 2005. 162p. Tese Doutorado
- Camargo, G. A.; Moretti, R. H.; Ledo, C. A. S. Quality of dried tomato pre-treated by osmotic dehydration, antioxidant application and addition of tomato concentrate. In:

International Drying Symposium, 14, 2004, São Paulo. Proceedings... Campinas: UNICAMP, 2004. p.2207.

CAMARGO, G.A.; QUEIROZ, M.R. Secagem de Tomate para Conserva: Parâmetros que influenciam a Qualidade Final. Escrito para apresentação no WORKSHOP TOMATE NA UNICAMP: PESQUISAS E PERSPECTIVAS Campinas, 28de maio de 2003

CHIRIFE, J. **Fundamentals of the Drying Mechanism During Air Dehydration of Foods.** In: MUJUNDAR, A. Advances in drying. Washington/ New York/ London. Ed. Hemisphere Publishing Corporation, v.3, p. 73-102, 1983.

COELHO K. D. *Secagem de Tomate (lycorpesiconesculentummill) em Camada Delgada: Avaliação das Características Físico-Químicas.* 2010; tese (Mestrado em Engenharia e Ciências de Alimentos) Universidade Federal do Rio Grande Escola de Química e Alimentos Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências de Alimentos. Disponível em: <http://repositorio.furg.br:8080/bitstream/handle/1/2953/karen.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 27 maio 2014.

CORNEJO, F. E. R.; NOGUEIRA, R. I. *Preparo de vegetais desidratados em bancos de alimentos.* Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Rio de Janeiro, Brasil, v. 73. p. 19, 2006.

CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BAPTESTINI, F. M. *Tomato infrared drying: modeling and some coefficientsof the dehydration process.* 2012.

CORTEZ, L. A. B.; NEVES FILHO, L. C. Aplicação de bombas de calor na agricultura e na agroindústria brasileira. In: III congresso Nacional de energia. Anais do Congresso, 1996, La Serena, Chile, p. 337-343, 1996.

Empresa Energética de Mato Grosso do Sul S.A. – Enersul; <http://www.enersul.com.br/sua-conta/tarifas/>; Acesso em 22 de abril de 2014.

FAGUNDES, A. F. *et al.*Influência do grau de umidade na textura de tomate seco refrigerado ou envasado em óleo. Publ. *UEPG Ci. Exatas Terra, Ci. Agr. Eng.*, Ponta Grossa, p 35- 42, abr. 2005.

FERREIRA, M. M. P. Desenvolvimento caracterização e secagem de sementes com cobertura artificial. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2004. 235f. Dissertação Mestrado.

FILGUEIRA. F. A. *Manual de Olericultura: Cultura e Comercialização de Hortaliças.*São Paulo, v.2, 1982. 584p.

FLIKKE, A. M.; CLOUD, H. A; HUSTRULID, A. Grain drying by heat pump. *Agricultural Engineering* v. 38, n. 8, p. 592-7, 1975.

GONELI, A. L. D. *et al.*Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. *Revista Brasileira de Armazenamento*, Viçosa, v. 11, p. 64-73, 2009. Edição especial café.

HOGAN, M. R. *et al.* Heatpump for low-temperature grain drying. *Trans. ASAE*, v. 26, n. 4, p. 1234-8, 1983.

JORDAN, R. A. *Desenvolvimento de uma bomba de calor água-água acionada a biogás para utilização em processos de aquecimento e resfriamento em laticínios visando a racionalização do uso de energia no nível de produção leiteira*. 2005. 266 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2005.

KASHANI&NEJAD, M. A.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI A. G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachionuts. *Journal of Food Engineering*, v.78, n.1, p.98-108, 2007.

LAZZARIN, R. M. Heat Pumps in Industry – I Equipament. *Heat Recovery Systems and CHP*. Elsevier Science Ltd, V. 14, N. 6, p. 581-597, 1994.

LAZZARIN, R. M. Heat Pumps in Industry – II. Applications. *Heat Recovery Systems and CHP*. Elsevier Science Ltd, V. 15, N. 3, 1995, p. 305-107.

MARTINS, E.R.; CASTRO, D.M.; CASTELLANI, D.C.; DIAS, J.E. *Plantas medicinais*. Viçosa: Arte Livros, 1994. 220p.

MARTINS, P. M. *Influência da temperatura e da velocidade do ar de secagem no teor e na composição química do óleo essencial de capim-limão (Cymbopogon citratus (D.C.) Stapf)*. Viçosa: UFV, 2000. 77p. Dissertação Mestrado.

MEYER, J. P.; GREYVENSTEIN, G. P. The drying of grain with heat pumps in south África: a Techno-Economic analysis. *International Journal of Energy research*. v. 16, p. 1-20, 1992.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A. A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, New York, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002.

MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering*, v.66, n.4, p.513-8, 2005.

MONTEIRO, C. S.; BALBI, M. E.; MIGUEL, O. G.; PENTEADO, P. T. P. S.; HARACEMIV, S. M. C. Qualidade nutricional e antioxidante do tomate “tipo italiano”; *Alim. Nutr.*, Araraquara; v.19, n.1, p. 25-31, jan./mar. 2008

MURARI, R. C. D. L. *Cinética da desidratação osmo-convectiva de tomates*. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos)-Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, 2001.

PACCO, H. C. *Desenvolvimento de um sistema de bomba de calor água/água para resfriamento e secagem de tomates*. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2008.

RAINA, B. L. *et al.* Changes in pigments and volatiles of saffron (*Crocussativus L.*) during processing and storage. *Journal Science Food Engineering*, v.71, p.27-32, 1996.

ROMERO, L. M. *et al.* Cinética de secagem de tomates em fatias pré-tratadas: Resultados preliminares. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 25, 1997, São Carlos. *Anais...* São Carlos: SBEQ, 1997. p.627.

ROSSI, S. J. *Desenvolvimento e Avaliação de uma bomba de calor usada no condicionamento de ar para secagem de alimentos.* 1993. 229 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 1993.

SANINO, A.; CORTEZ, L. B., MEDEROS, B. T. Vida de prateleira do Tomate (*Lycopersicon esculentum*), variedade “Débora”, submetido a diferentes condições de resfriamento. In Workshop de tomate. Perspectivas e Pesquisas, 2003, Campinas. *Anais eletrônicos...* Campinas: UNICAMP, 2003. Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/tomates/pdfs/wrktom032.pdf>>. Acesso em: 23 abr. 2014.

SANJINEZ-ARGANDONA, E. J. *et al.* *Influência da geometria e da temperatura na cinética de secagem de tomate (Lycopersicon esculentum).* 2011.

SILVA, J. S. *et al.* Preparo, secagem e armazenagem do café. In: SILVA, J. S. *Secagem e armazenagem de Café: Tecnologia e Custos.* Viçosa: Jard., 2001.

TOTOBESOLA-BARBIER, M.; MAROUZÉ, C.; GIROUX, F. A Triz – based creativity tool for food processing equipment design. *The TRIZ Journal Article Archives*, Out, 2002. Disponível em: <<http://www.trizjournal.com/archives>>. Acesso em: 23 abr. 2014.

VASQUEZ, G.; CHENLO, F.; MOREIRA, R.; CRUZ, E. Grape drying in pilot plant with a heat pump. *Drying technology*, v. 15, n. 3-4, p. 899-920, 1997.

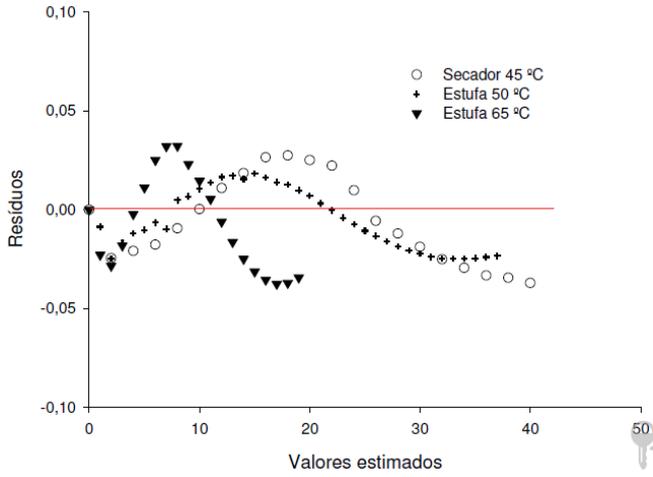
Veja, M.; Góngora, N.; Barbosa, C. Advances in dehydration offoods. *Journal of Food Engineering*, Amsterdam, v.49, p.271-289, 2001.

VENSKUTONIS, P. R. Effect of drying on the volatile constituents of thyme (*Thymus vulgaris L.*) and sage (*Salvia officinalis L.*). *Food Chemistry*, v.59, n.2, p.219-227, 1997.

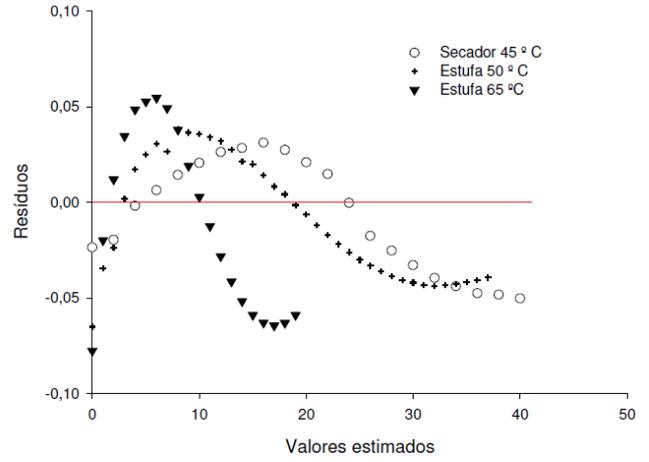
WOODROOF, G. J.; LUH, B. S. *Commercial Fruit Processing.* The AVI. Publishing Co. Inc. Westport. Connecticut. 710p, p. 375-507, 1975.

## **ANEXOS**

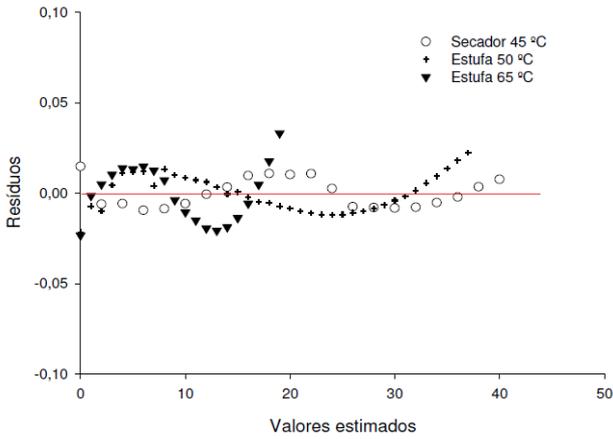
### Distribuições dos resíduos



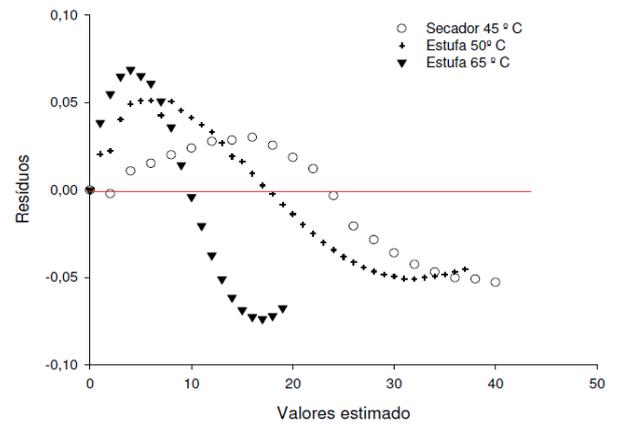
(A)



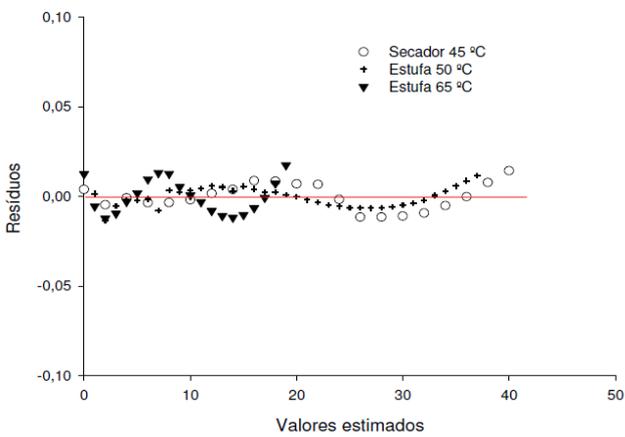
(B)



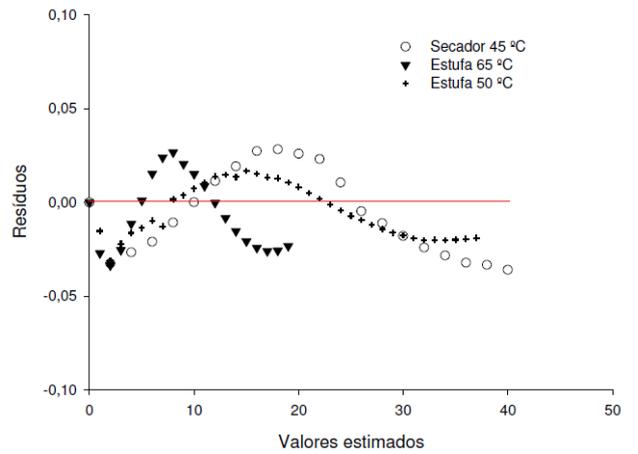
(C)



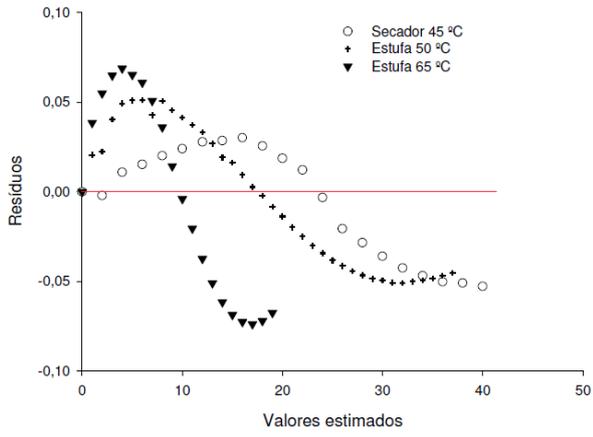
(D)



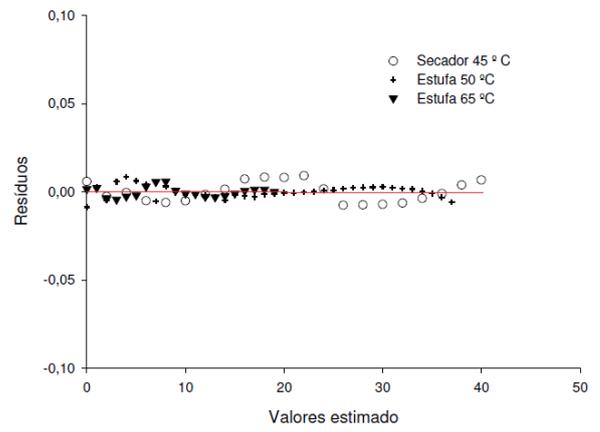
(E)



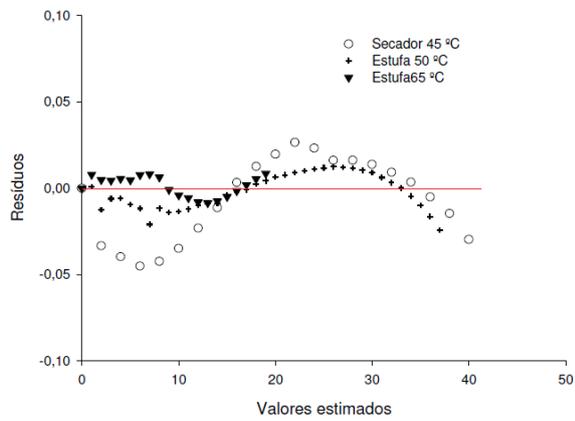
(F)



(G)



(H)



(I)