

UMA APLICAÇÃO DA PRIMEIRA E DA SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA EM SECADORES SOLARES.

Nancy Lima Costa¹
Maria de Sousa Leite Filha²
Arthur Gilzeph Farias Almeida³
Marcelo Bezerra Grilo⁴
José Jefferson da Silva Nascimento⁵

RESUMO

Este trabalho, resultado de uma atividade da disciplina Termodinâmica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), tem por objetivo apresentar uma aplicação da Termodinâmica nos processos de secagem solar, por meio da aplicação da Primeira e da Segunda Lei da Termodinâmica nos cálculos de rendimento térmico do secador solar e da eficiência mássica do processo de secagem. A pesquisa é do tipo exploratório-descritivo, sendo realizada através de consulta a artigos científicos, dissertações e teses. Nos trabalhos de Lima (2017), Nunes (2016), Melo (2016), Fudholi *et al.* (2014), Hubackova *et al.* (2014), foram obtidos, respectivamente, os seguintes valores para o rendimento térmico do secador solar 27,85%, 19,60%, 28,51%, 28%, 12,37%. Em relação a eficiência mássica do processo de secagem, Lima (2017), Nunes (2016), Al-Juamily *et al.* (2007), Madhlopa e Ngwalo (2007) obtiveram 89%, 86,25%, 33%, 15%. Estes resultados são considerados bons para secadores solares. Em relação a eficiência mássica do processo de secagem os secadores desenvolvidos na UFCG obtiveram eficiência maiores do que os reportados na literatura.

Palavras-chave: Secador Solar, Rendimento Térmico, Eficiência Mássica.

INTRODUÇÃO

A secagem de alimentos e produtos agrícolas é um dos processos mais antigos usados para sua conservação e continua sendo o mais indicado, uma vez que um produto com teor de água reduzido a níveis recomendado pela Resolução nº 272/05 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), pode ser conservado por meses e mesmo anos, sem perder suas propriedades nutritivas e sensoriais. Na prática, a secagem de um alimento consiste na

¹Doutoranda do Curso em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande- UFCG, nancy.costa@upe.br;

²Doutoranda do Curso em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande- UFCG, marialeitefilhal@hotmail.com

³Doutorando do Curso em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande- UFCG, agilzeph@gmail.com;

⁴Doutor e Docente do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande- UFCG, griloufkg@yahoo.com.br;

⁵ Doutor e Docente do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande- UFCG, jeffpesquisador@gmail.com

remoção de parte de sua água livre a um nível no qual possa ser consumido e/ou armazenado à temperatura ambiente, sem significativas perdas de suas propriedades sensoriais e nutricionais (COSTA, 2008).

Existem muitos métodos de conservação de produtos agrícolas, dentre os quais podem ser citados: pasteurização, refrigeração, controle da atmosfera, uso de produtos químicos, aplicação de raios beta e gama e secagem (ÇAKMAK E YILDIZ, 2009). Atualmente, existem dois métodos básicos de secagem, a natural, em que o produto é disperso em terreiros ou em varais, e a secagem feita pelo sol ou vento (ar ambiente em movimento) e a artificial, a qual é feita em secadores mecânicos e que necessitam de outra fonte de energia. Historicamente, a secagem era feita de forma natural com a exposição dos alimentos diretamente ao sol. Segundo Sharma *et al.* (2009), a secagem natural tem muitas desvantagens tais como: produtos estragados devido à chuva, vento, umidade e poeira; deterioração das colheitas devido à decomposição, ataques de insetos e fungos, dentre outros.

Considerando a realidade do esgotamento dos combustíveis fósseis e dos danos ambientais causados pelo excesso de emissão na atmosfera de gases do efeito estufa pela queima de tais combustíveis, pesquisadores de todo o mundo têm se dedicado a investigar as fontes de energia renováveis e suas aplicações. A energia solar tem se mostrado uma alternativa viável, uma vez que é renovável e sustentável. A secagem de produtos agrícolas usando secadores solares passa então a ser uma alternativa para o desenvolvimento sustentável e da agricultura familiar.

Aliando as desvantagens e dificuldades apresentadas pela secagem em terreiros e a necessidade de tecnologias novas e limpas, pesquisas impulsionaram o desenvolvimento de secadores solares que permitam a obtenção de produtos cada vez melhores e em menos tempo, em particular no Nordeste brasileiro. Afinal, o Nordeste brasileiro tem uma excepcional incidência solar. A posição geográfica desta região brasileira, certamente influenciou diversas pesquisas no campo da secagem solar.

No Nordeste brasileiro destacam-se os trabalhos desenvolvidos no Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas (LEMT) na UFCG, que a mais de 10 anos vem desenvolvendo e testando secadores solares com materiais de baixo custo, sustentáveis e de fácil manutenção. Estes secadores estão sendo experimentados na secagem de frutas, principalmente banana prata (*Musa Spp*). Muitos desses secadores já são empregados na

secagem de frutas em pequenas comunidades produtoras rurais da região. A Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e a Universidade Federal de Sergipe (UFS) também vem desenvolvendo diversos secadores solares usando materiais sustentáveis e tem obtido resultados promissores. Pesquisas nessas áreas também são desenvolvidos em outras instituições brasileiras e internacionais.

Os primeiros secadores solares desenvolvidos que contavam com alguma proteção e tecnologia foram os secadores solares de exposição direta (Figura 1a), onde os produtos recebem diretamente a radiação solar, mas, diferentemente da secagem em terreiros, os produtos são colocados em câmaras construídas de modo a manter a higienização durante o processo de secagem. Estes secadores poderiam possuir convecção natural ou forçada, dependendo da necessidade e recursos disponíveis. Uma desvantagem nesses secadores era a falta de controle das propriedades termodinâmicas do ar de secagem. Posteriormente, foram desenvolvidos os secadores solares de exposição indireta (Figura 1b), inovações nesses secadores permitiram maior controle sobre temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem.

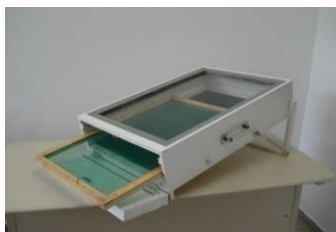


Figura 1a: Secador de exposição direta.

Figura 1b: Secador de exposição indireta.

Fonte: Nunes, 2016.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é apresentar uma aplicação da Termodinâmica nos processos de secagem solar, isso será feito através da aplicação da Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica, dos cálculos de rendimento térmico do secador solar e da eficiência mássica do processo de secagem.

METODOLOGIA

Este trabalho é do tipo exploratório-descritivo, onde é feito uma revisão dos secadores solares de exposição indireta. Para a sua construção foram feitas consulta a diversos artigos científicos, dissertações e teses. Outras revisões sobre secadores solares já foram publicadas,

mas este tem o diferencial de dar ênfase e apresentar o rendimento térmico e a eficiência mássica dos secadores desenvolvidos.

CICLO DE POTÊNCIA DE UM SECADOR SOLAR DE EXPOSIÇÃO INDIRETA

No desenvolvimento (projeto, construção e instalação) do secador solar, conceitos relacionados a Termodinâmica e a Transferência de Calor e Massa estão presentes, respectivamente, no equipamento e no processo de secagem.

As propriedades termodinâmicas temperatura, umidade relativa, volume e a Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica estão presentes em várias etapas de funcionamento do secador solar. Do ponto de vista da Termodinâmica, os secadores solares são exemplos de um sistema aberto uma vez que permite a transferência de massa através da superfície de controle.

Em relação ao produto em processo de secagem, ocorre uma Transferência de Massa uma vez que a água sai do produto (sendo seco) para o fluido de trabalho (o ar ambiente). Para que ocorra essa Transferência de Massa, o ar ambiente deve ser aquecido e ter umidade relativa menor que o produto. Na secagem com esse tipo de aparelho térmico, o ar é aquecido e então se expande, diminuindo dessa forma a sua umidade absoluta e aumentando sua capacidade de absorver água.

De acordo Thomazini (2015), o ar aquecido flui devido ao gradiente de temperatura e pressão existentes, entre a região do coletor e a região da câmara, esse processo é conhecido como efeito termossifão. Buscando o estado de equilíbrio, quando o ar entra em contato com o produto a ser seco ocorre uma troca de calor devido ao gradiente de temperatura entre o ar e o produto e uma troca de massa de água devido diferença entre a umidade do produto e a umidade do ar.

RENDIMENTO TÉRMICO DO SECADOR SOLAR E EFICIENCIA MASSICA DO PROCESSO DE SECAGEM

A partir do conceito básico de rendimento termodinâmico, como sendo a razão entre a potência entregue pelo sistema e a potência disponível ao mesmo, Guerra e Varella (2014) afirmam que o rendimento de um secador solar pode ser determinado pela Equação 1

$$\eta_t = \frac{P_u}{A_1 \cdot \bar{G}} \cdot 100, \quad (1)$$

onde,

η_t – rendimento do secador solar [%]; P_u – potência transferida ao fluido de trabalho [W]; A_1 – área de cobertura transparente [m^2]; \bar{G} – média da radiação solar incidente [W/m^2].

A potência transferida ao fluido de trabalho, no caso do secador solar é o ar ambiente, também denominada de potência útil, pode ser obtida pela Equação 2. Essa potência representa a quantidade de energia transferida ao fluido de trabalho.

$$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2)$$

onde,

\dot{m} – vazão mássica do fluido de trabalho [kg/s]; c_p – calor específico do fluido de trabalho [J/kg.K]; ΔT – variação de temperatura [K].

Dessa forma, o rendimento térmico de um coletor solar, é expresso em função da potência útil, da irradiação solar incidente, da área de cobertura transparente e da vazão do fluido de trabalho, do calor específico do mesmo e da variação de temperatura obtida (NUNES, 2016).

Em secadores solares que possuem sistema de medição da umidade relativa do ar e temperatura, na entrada e saída de cada parte que compõe o sistema de secagem, como os desenvolvidos por Nunes (2016) e Lima (2017), o rendimento térmico do equipamento pode ser calculado a partir da Equação 3 e com a aplicação do balanço de energia em cada parte do equipamento. A Equação 3 representa matematicamente o Princípio de Conservação da Energia (1ª Lei da Termodinâmica) ao volume de controle.

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \cdot \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \cdot \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (3)$$

onde,

$\frac{dE_{vc}}{dt}$ – taxa temporal da variação da energia contida no interior do volume de controle, [J];

\dot{Q}_{vc} – taxa de transferência de calor ao longo da fronteira (superfície de controle) do volume de controle [J];

\dot{W}_{vc} – taxa de transferência por trabalho ao longo da fronteira (superfície de controle) do volume de controle [J];

\dot{m}_e e \dot{m}_s – vazões mássicas instantâneas na entrada e saída do volume de controle, respectivamente e, [kJ/kg];

$\dot{m}_e \frac{v_e^2}{2}$ e $\dot{m}_s \frac{v_s^2}{2}$ - energias cinéticas específicas na entrada e saída do volume de controle, respectivamente, [J];

$\dot{m}_e g z_e$ e $\dot{m}_s g z_s$ - as energias potenciais específicas na entrada e saída do volume de controle, respectivamente, [J];

h_e e h_s - as entalpias na entrada e saída do volume de controle, respectivamente, [kJ/kg].

Para determinar a eficiência térmica a partir das propriedades termodinâmicas envolvidas no processo de secagem, é calculado a eficiência em cada parte do sistema de secagem, a partir do balanço de energia aplicado ao coletor solar e câmara de secagem.

Ao analisar separadamente o volume de controle do coletor solar e da câmara de secagem, representado nas Figura 2 e Figura 3.

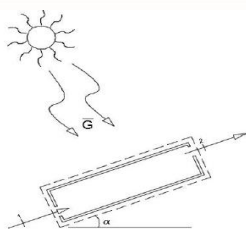


Figura 2: Volume de controle para o coletor solar

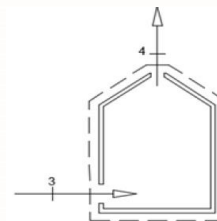


Figura 3: Volume de controle para a câmara de secagem

Fonte: Nunes, 2016

Aplicar o Princípio de Conservação de Massa e considerar que: a energia cinética e a energia potencial na entrada e saída tanto do coletor quanto da câmara de secagem são iguais, devido as características construtivas e operacionais do coletor solar; o trabalho realizado pelo coletor solar e pela câmara de secagem é nulo, pois este é um equipamento térmico e não uma máquina térmica; e a massa que entra no coletor é igual a massa que saí, a massa que sai da câmara de secagem é maior do que a massa

que entra, uma vez que sai a massa de ar que entrou, vindo do coletor solar, mais a massa de água que é retirada da fruta durante o processo de secagem.

Obtém-se o rendimento térmico do sistema de secagem aplicando a Equação 4 e 5 no coletor solar e na câmara de secagem.

$$\eta_{coletor} = \frac{\dot{m}(h_2 - h_1)}{A\dot{Q}_{solar}}, \quad (4)$$

$$\eta_{câmara} = \frac{\dot{m}_4 h_4 + \dot{E}_b}{\dot{m}_3 h_3} \quad (5)$$

onde,

$\dot{Q}_{solar} = \int_t^{\Delta t} \bar{G} dt$, $\dot{E}_b = h_v \cdot \dot{m}_{água \text{ retirada do produto}}$, e representa a vazão mássica da energia retirada da fruta durante o processo de secagem; h_v é a entalpia da água saturada como vapor saturado na temperatura média de saída, em [kJ/kg].

O rendimento do sistema de secagem ($\eta_{secador}$) é igual ao produto entre o rendimento do coletor solar ($\eta_{coletor}$) e o rendimento da câmara de secagem ($\eta_{câmara}$), isto é,

$$\eta_{secador} = \eta_{coletor} \times \eta_{câmara}.$$

Já a eficiência mássica do processo de secagem, pode ser obtida através da medição da variação das massas do produto a ser seco, através da Equação 6

$$\eta_p = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{m_{total \text{ de água}}}. 100 \quad (6)$$

onde,

η_p - eficiência mássica do processo [%]; $m_{inicial}$ - massa inicial do produto [kg]; m_{final} - massa final do produto [kg]; $m_{total \text{ de água}}$ - massa total de água presente no produto a ser secado [kg].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta sessão são apresentados os principais resultados e discussões dos trabalhos estudados. Os trabalhos estão listados em ordem decrescente ao ano de publicação.

Lima (2017) apresentou um estudo comparativo para a produção de banana passa. Neste trabalho foram utilizados um secador solar de exposição indireta com sistema de aquisição e controle das propriedades termodinâmicas do ar de secagem e um secador elétrico automatizado com sistema de supervisão e controle embarcados. Os sistemas de secagem estudados foram: secagem solar, secagem elétrica e secagem mista (secagem solar seguida de secagem elétrica).

O autor supracitado relata que nos três sistemas o produto obtido apresentou uma boa qualidade em relação ao aspecto visual, com um percentual de umidade inferior a 25%. No secador solar de exposição indireta as temperaturas variaram entre 40 e 60°C. Com relação ao consumo específico de energia (CEE), o processo de secagem elétrica apresentou um CEE de 379,33 kWh por ciclo com temperatura de 45°C, enquanto que na mesma temperatura o processo de secagem mista apresentou um CEE de 295,87 kWh por ciclo e o processo de secagem solar apresentou um CEE médio de apenas 45,83 kWh por ciclo. Com relação à eficiência mássica, os três processos apresentaram eficiências equivalentes em torno de 89%. O secador solar de exposição indireta com controle da temperatura apresentou um rendimento térmico de 27,85%, o que é um ótimo resultado.

Nunes (2016) desenvolveu e testou experimentalmente um secador solar de exposição indireta com convecção forçada e auxiliada por um sistema de energia solar fotovoltaica usado para a secagem de banana prata (*Musa Spp*). A temperatura na câmara de secagem ficou na média de 50 +/- 5°C. O autor reportou que as inovações apresentadas (capacitor térmico no coletor solar e um cooler na câmara de secagem) no secador permitiram maior controle das propriedades termodinâmicas do ar de secagem (temperatura, umidade relativa e velocidade) e a obtenção de eficiência mássica do processo de secagem em torno de 86,25%. O tempo de secagem ficou em torno de 14 horas, o que é compatível com os tempos relatados na literatura para secadores equivalentes. O rendimento térmico do secador foi de 19,60%, o que é considerado um bom resultado para secadores solares.

Melo (2016) desenvolveu um secador solar de exposição indireta com convecção forçada. O secador desenvolvido foi submetido a experimentos de secagem de banana prata

(*Musa Spp*). As temperaturas no interior da câmara de secagem variaram entre 45 e 55°C e a umidade relativa do ar variou entre 25 e 35%. A banana atingiu um teor de água de 25% em base úmida depois de 14 horas de secagem. A eficiência mássica foi de 83,95% e o rendimento termodinâmico foi de 28,51%.

Fudholi *et al.* (2014), testaram experimentalmente e analisaram o desempenho de um secador solar usado na secagem de pimentão vermelho. O processo de secagem durou cerca de 33 horas e foi usada a Primeira Lei da Termodinâmica para estimar a energia útil adquirida pelos coletores solares. O rendimento térmico do coletor solar foi de 28%.

Hubackova *et al.* (2014), construíram um secador solar de convecção natural para investigar a secagem de peixe no Camboja. A secagem solar foi comparada com a secagem convencional em forno elétrico. As médias de temperatura do ar de secagem e da umidade relativa do ar foram, respectivamente, 55,6°C e 19,9%. O rendimento total do secador solar foi de 12,37%, o que é típico para este tipo de secadores.

Al-Juamily *et al.* (2007), construíram e testaram um secador solar para a secagem de uva e damasco e um tipo de vegetal (feijão). Observaram que o fator mais eficaz na taxa de secagem é a temperatura do ar no interior da câmara de secagem. Mediram o efeito da variação da velocidade do ar de secagem no interior da câmara de secagem e concluíram que esta característica pode ser desprezada, quando a umidade relativa do ar de saída da câmara estiver entre 25 e 30%, portanto, não há necessidade de ar a alta velocidade no interior da câmara de secagem. Em relação ao damasco, por exemplo, os autores perceberam a câmara de secagem opera com uma *eficiência de 33%* para a secagem de 10 kg de damasco a 60°C e 25% de umidade relativa do ar de secagem no interior da câmara, ambos em camada fina.

Al-Juamily *et al.* (2007), construíram e testaram um secador solar para a secagem de uva e damasco e um tipo de vegetal (feijão). Observaram que o fator mais eficaz na taxa de secagem é a temperatura do ar no interior da câmara de secagem. Mediram o efeito da variação da velocidade do ar de secagem no interior da câmara de secagem e concluíram que esta característica pode ser desprezada, quando a umidade relativa do ar de saída da câmara estiver entre 25 e 30%, portanto, não há necessidade de ar a alta velocidade no interior da câmara de secagem. Em relação ao damasco, por exemplo, os autores perceberam a câmara de secagem opera com uma eficiência de 33% para a secagem de 10 kg de damasco a 60°C e 25% de umidade relativa do ar de secagem no interior da câmara, ambos em camada fina.

Madhlopa e Ngwalo (2007) construíram, com materiais simples, e testaram em três modos de operação (solar, híbrido e fóssil), um secador solar de exposição indireta, na

secagem de 20 kg abacaxi fresco (*Ananascomosus*). Os valores médios da eficiência foram 15%, 11% e 13% nos modos de operação, solar, híbrido e fóssil, respectivamente. E assim, concluíram que o secador solar é adequado para a preservação dos abacaxis e outros alimentos frescos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Conceitos básicos da Termodinâmica como umidade, velocidade e temperatura do ar são essências no processo de secagem de produtos agrícolas. No tocante a secagem usando energia solar é crescente o número de pesquisas visando o desenvolvimento e aprimoramento de secadores solares. Nessas pesquisas a análise energética dos sistemas e\ou processos de secagem é feita através do cálculo do rendimento térmico do equipamento e da eficiência mássica do processo de secagem, os quais são aplicações da Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica. Dentre os trabalhos citados, observou-se que os valores do rendimento térmico e eficiência mássica são considerados bons para esse tipo de equipamento térmico. Em relação a eficiência mássica do processo de secagem percebe-se que os secadores desenvolvidos na UFCG apresentam resultados melhores do que os reportados na literatura.

REFERÊNCIAS

- ANVISA, Brasil. **Resolução RDC nº 272, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária**. Aprova o regulamento técnico para produtos de vegetais, produtos de frutas e cogumelos comestíveis. Diário Oficial: Brasília, 23 de set. 2005.
- ÇAKMAK, G.; YILDIZ, C. Design of a new solar dryer system with swirling flow for drying seeded grape. **International Communications in Heat Mass Transfer**. vol 36. p. 984–990. 2009.
- COSTA, A. R. S. **Sistema de secagem solar para frutos tropicais e modelagem da secagem de banana em um secador de coluna estática**. Tese, UFRN. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Química. Natal, 2008.
- EKECHUKWU, O. NORTON, B. Experimental studies of integral-type natural circulation solar-energy tropical crop dryers. **Energy conversion and management**, Elsevier, v. 40, n. 6, p. 615-655, 1999.

- FUDHOLI, A., SOPIAN, K., YAZDI, M. H., RUSLAN, M. H., GABBASA, M., KAZEM, H. A. Performance analysis of solar drying system for red chili. **Solar Energy**. v. 99, p. 47-54. 2014.
- GRILO, M. B. **Fundamentos da energia solar: radiação solar e o coletor solar plano. conceitos básicos e aplicações**. Campina Grande, PB: Editora da UFCG, 60p. 2007.
- GUERRA, M. I. S., VARELLA, F. K. O. M. Análise do desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar de baixo custo na cidade de Mossoró, RN. Mossoró, RN. **Revista Holos**, v.4, p.241-268. 2014.
- HUBACKOVA, A., KUCEROVA, I., CHRUN, R., CHALOUPOKOVA, P., BANOUT, J. Development of solar drying model for selected cambodian fish species. **The Scientific World Journal**. v.2014, 10 p. 2014.
- IMRE, L. Solar drying. IN: MUJUMDAR, A.S.(Ed.). **Handbook of industrial drying**. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.chap 14, p.303-350. 2015.
- KUMAR, M., SANSANIWAL, S, K., KHATAK, P. Progress in solar dryers for drying various commodities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol 55, p. 346-360. 2016.
- LIMA, W. S. **Análise de sistemas de secagem: solar, elétrico e misto na produção de Banana Passa**. Campina Grande, PB. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande PB, 259 p. 2017.
- MADHLOPA, A; NGWALO, G. Solar dryer with thermal storage and biomass-backup heater. **Solar Energy**. v.81, n.(4), p.449–462. 2007.
- MELO, B.; SILVA, C. A.; ALVES, P.R.B. **Processamento mínimo de hortaliças e frutas**. Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Ciências Agrárias, Núcleo de Estudos em Fruticultura no Cerrado. 2003. Disponível em <<http://www.fruticultura.iciag.ufu.br/pminimo.htm>>. Acesso em: 28/04/2019.
- NUNES, Antonio Gomes. **Desenvolvimento experimental de um secador solar multienergético para a secagem de frutas**. 2016. 198 p. Tese. Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, PB, 198 p. 2016.
- SHARMA, A. C., Vu Lan, N. C. R.. Solar-energy drying systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 13, p. 1185-1200. 2009.