

PROJETO, CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE UM SECADOR SOLAR INDIRETO PASSIVO DE FRUTAS COM CHAMINÉ

Felipe Cichetto Tedesco, felipe.tedesco1@gmail.com¹
Alexandre José Bühler, alexandre.buhler@farroupilha.ifrs.edu.br¹
Sérgio Wortmann, sergio.wortmann@farroupilha.ifrs.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, IFRS - Campus Farroupilha

Resumo: A crescente demanda por tecnologias alternativas, de natureza limpa e sustentável, tem fomentado o desenvolvimento e aprimoramento de equipamentos que utilizam a energia solar para a desidratação de frutas e sementes. Tais dispositivos vêm sendo mundialmente utilizados há milhares de anos, entretanto, permanecem incomuns na Serra Gaúcha, região de grande produção de uvas e maçãs para consumo in natura no estado do Rio Grande do Sul, local onde estão estabelecidos o IFRS - Câmpus Farroupilha e a empresa Silvestrin Frutas, parceira neste projeto. Buscando a apresentação de propostas para a difusão de secadores solares na Serra Gaúcha e, por conseguinte, para o incremento regional da produção de frutas desidratadas, desenvolveu-se um trabalho de concepção, simulação, construção e análise experimental de um Secador Solar Indireto Passivo com Chaminé. O protótipo, subdividido em coletor solar, câmara de desidratação e chaminé, foi construído priorizando materiais de baixo custo, mas que não comprometessem o seu desempenho. O dispositivo foi submetido a experimentos, em que se observou: comportamento do coletor solar muito próximo ao simulado, obtendo-se uma eficiência de 87% no equipamento; satisfatória elevação na temperatura na saída do coletor; e desidratação de maçãs com redução de 89% da massa com 32,78 MJ de energia entregue ao sistema. O PayBack do protótipo foi estimado em dois anos.

Palavras-chave: Secador solar, energia solar térmica, desidratação de frutas.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas de secagem de frutos e grãos que utilizam a radiação solar como fonte primária de energia têm recebido grande atenção há muito tempo. Esses métodos constituem uma alternativa barata e extremamente eficiente para a desidratação (Jairaj; Singh; Srikant, 2009), em comparação com técnicas tradicionais e arcaicas que utilizam a queima de madeira ou combustíveis fósseis em estufas (Vijayavenkataraman; Iniyar; Goic, 2012). A energia solar é uma fonte de energia totalmente gratuita e está infinitamente disponível para ser usufruída. Utilizar essa fonte de energia de forma racional e inteligente na desidratação de alimentos pode gerar alta qualidade no produto final aliada à grande lucratividade do processo.

Diversos métodos de secagem e desidratação de frutas têm sido empregados há mais de dez mil anos na história da humanidade. Os primeiros sistemas criados datam 8000 a.C. e baseiam-se na simples exposição direta das frutas à radiação solar à baixas umidades relativas (Belessiotis; Delyannis, 2011). Tais sistemas estão entre os mais utilizados na Índia, principalmente pelo seu baixo custo e não necessitar investimento inicial (Jairaj; Singh; Srikant, 2009), mesmo que tal processo exija intenso trabalho manual (Kothekar; Gavhad; Karale, 2016). Entretanto, esse método arcaico já é considerado ultrapassado e em desuso, pois a degradação e processamento excessivamente lento do produto final, além do desenvolvimento de microtoxinas, proliferação de insetos e crescimento de microrganismos no local (Ekechukwu; Norton, 1999), indicam a perda de características diretamente relacionadas à qualidade do produto. Outro empecilho a esse sistema é a sujeição à mudanças e características climáticas locais sofrendo intensa sazonalidade na produção de alimentos (Palumbo et al., 2000). Gutiérrez et al. (2012), ainda, destacam a perda de frutos durante a secagem devido à existência de pássaros e outros animais na região.

A desidratação de frutas, apesar de ser considerada o método mais antigo de conservação de alimentos (Kothekar; Gavhad; Karale, 2016), permanece sendo largamente utilizada. Dentre seus principais benefícios, destacam-se a capacidade de redução de desperdícios durante o processo de produção e transporte (Salaudeen, 2011), o baixo custo de armazenagem, pois não necessita refrigeração e ocupa pouco espaço (Kothekar; Gavhad; Karale, 2016), redução de aditivos químicos e utilização de frutas fora do padrão comercial para exportações (Spers et al., 2008), resistência no desenvolvimento de microrganismos devido à baixa quantidade de água presente (Misha et al., 2013) e o alto valor agregado, quando comparada com frutas in natura. Entretanto, toda uva-passa consumida no Brasil, em escala comercial,

é importada (Vitibrasil, 2014) e apenas uma pequena parcela da maçã produzida destina-se à desidratação (De Aquino et al., 2005), sendo o Sul do Brasil responsável por 98% da produção nacional in natura (Carvalho, 2011).

Uma alternativa econômica e tecnicamente viável é a utilização de um desidratador solar com chaminé, também denominado Secador Solar Indireto Passivo com Chaminé. Esta alternativa possibilita desidratações tanto em baixa escala, beneficiando microprodutores locais, como em grande escala, viabilizando o projeto em escala comercial. Esse dispositivo tem como base de funcionamento a captação da radiação solar por meio de uma superfície de alta absorvância – o coletor solar –, aquecendo o ar que, convecção natural, é escoado até uma estufa onde as frutas ou sementes são colocadas para a desidratação (Jairaj; Singh; Srikant, 2009). Independentemente de quais frutas serão desidratadas, essas são posicionadas em bandejas com telas de malha fina de aço galvanizado, cuja característica permite a passagem do ar aquecido através de orifícios em sua superfície.

Visando a análise da viabilidade de um Secador Solar Indireto Passivo com chaminé, procedeu-se para a construção de um protótipo do respectivo equipamento. As dimensões de tal protótipo foram escolhidas por meio de uma simulação computacional que possibilitou determinar a vazão de saída do coletor e sua respectiva temperatura, de acordo com sua área de entrada, comprimento e largura. O dimensionamento correto do equipamento é de suma importância para, assim, atingir temperaturas adequadas de desidratação. Lazarides et al. (1995), após um estudo da cinética de transferência de massa em maçãs a temperaturas de desidratação de 20 a 50 °C, concluíram que maiores temperaturas de desidratação resultam em maiores taxas de desidratação. Tal fruto é rico em água, compondo aproximadamente 85% da sua massa total (Saraiva et al., 2010).

Para o caso da uva, por exemplo, sabe-se que a faixa de temperatura ideal de desidratação é de, aproximadamente, 40 a 70 °C, sendo que temperaturas abaixo de 30 °C são consideradas de alto risco, devido à proliferação de bactérias no processo de desidratação de uvas (Belessiotis; Delyannis, 2011).

2. Secador Solar Indireto Passivo com Chaminé

O GPAER, Grupo de Pesquisa Aplicada em Energias Renováveis coordenou, em parceria com a empresa Silvestrin Frutas, um projeto de concepção, simulação, construção e análise experimental de um Secador Solar Indireto Passivo com Chaminé. Este é constituído, na sua entrada, de um coletor solar plano, responsável pelo aquecimento do ar, cuja fonte de energia é a radiação solar. Uma vez aquecido, o ar se dirige, espontaneamente, à câmara de desidratação, local onde as frutas ficam dispostas. Esse contato do fluxo aquecido com as frutas é responsável pela retirada de umidade dos produtos – processo de desidratação. Apresenta-se na Figura 1 uma imagem do projeto em CAD do desidratador desenvolvido.

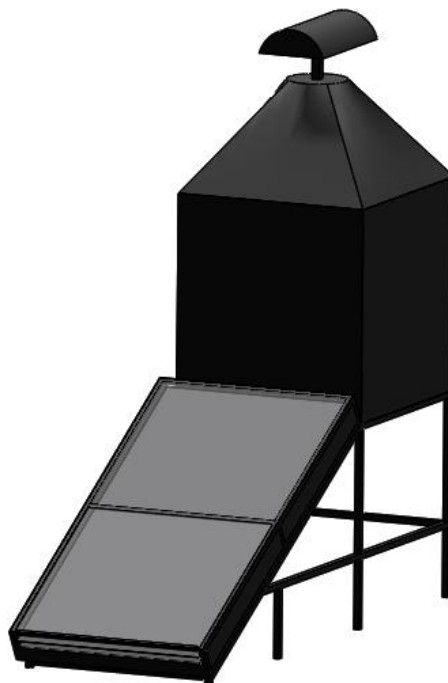


Figura 1: Secador solar indireto passivo com chaminé

O equipamento de desidratação desenvolvido subdivide-se, primordialmente, em coletor solar, câmara de desidratação e chaminé (Figura 2).

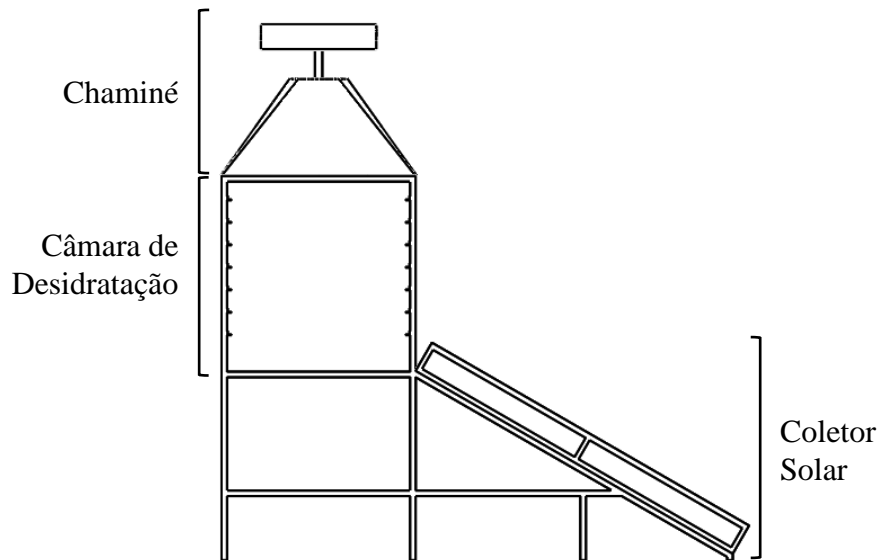


Figura 2: Secador solar indireto com chaminé – três partes principais

Cada uma das partes foi devidamente estudada e projetada. Apresentar-se-á cada componente, descrevendo sua função, dimensionamento, materiais utilizados e etapas de construção.

2.1. Coletor Solar

O coletor solar desenvolvido é denominado “Coletor Solar com Superfície Absorvedora Suspensa” (Rossi; Roa, 1980). Isto é, a superfície absorvedora está suspensa entre a lâmina transparente (vidro) e a base, que é isolada termicamente com poliuretano expandido. Assim, há fluxo de ar no duto criado na parte superior da superfície absorvedora e no segundo duto criado na parte inferior.

O fluxo dentro do coletor, por ser dividido entre dois dutos paralelos, como apresentado na Figura 3, gera um aumento de troca térmica por convecção da placa para com o fluido por razão do aumento da área de contato. Outro grande benefício desse sistema é diminuição da espessura da camada limite (Incropera; Dewitt; Bergman, 2006).

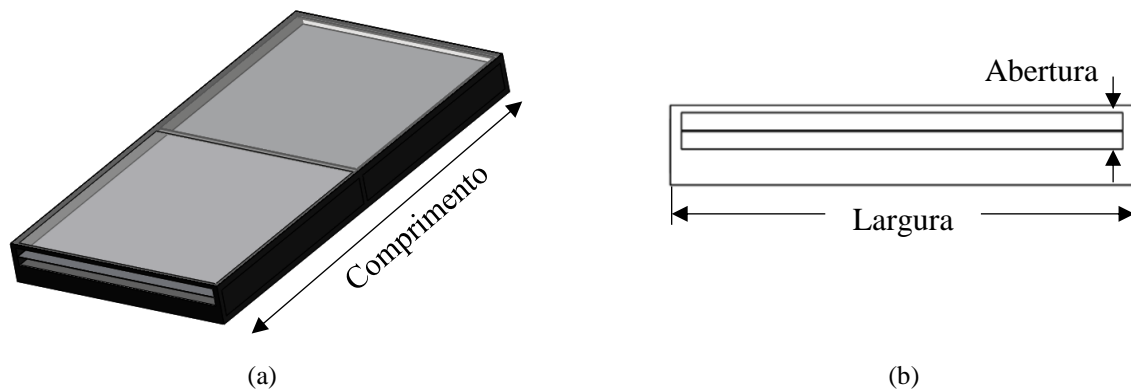


Figura 3: Coletor solar em (a) vista isométrica e (b) vista frontal

Rossi e Roa (1980) apresentam alguns resultados, de diversos experimentos, de coletores com superfície absorvedora suspensa. Tais experimentos confirmam uma melhor performance dos coletores suspensos quando comparados com coletores planos convencionais.

2.1.1 Dimensões - Simulação Computacional

As dimensões do Coletor Solar foram definidas através de uma simulação computacional, utilizando-se de equacionamento global, que determinou a vazão de saída do ar e sua respectiva temperatura para diferentes dimensões do coletor e diversas condições climáticas. Tal simulação considerou: variação da densidade e viscosidade dinâmica do ar com a temperatura; empuxo natural gerado pela diferença de densidade do ar na entrada e saída do coletor; perda de carga do fluxo dentro do coletor (Tedesco; Bühler; Wortmann, 2016). Detalhes da simulação desenvolvida são apresentados no Apêndice – Simulação Global do Coletor Solar.

Dentre as diferentes configurações simuladas do coletor solar, todas considerando o sistema em regime permanente e fator de eficiência η de 100%, destacam-se: abertura dos dutos do coletor solar, a área plana total do coletor solar (mantendo proporção de comprimento duas vezes maior que a largura) e a inclinação com a horizontal. Apresenta-se, na Figura 4, a simulação da elevação da temperatura na saída de um dos dutos do coletor, ou seja, temperatura de saída menos temperatura de entrada, para valor nominal de irradiância incidente sobre a placa absorvedora igual a 500 W/m^2 , considerando temperatura ambiente igual a $18 \text{ }^\circ\text{C}$ e inclinação do coletor de 30° .

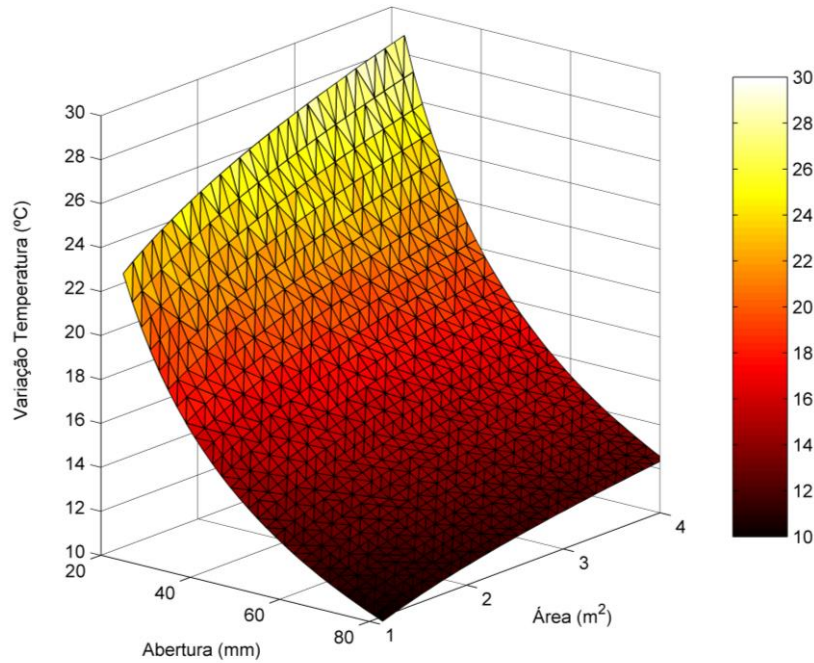


Figura 4: Simulações do coletor solar – área plana e abertura

Projetando a melhor posição do coletor para as diversas situações que este enfrentará, simulou-se a inclinação com a horizontal. Apresenta-se na Figura 5 a elevação da temperatura no coletor considerando temperatura ambiente igual a $18 \text{ }^\circ\text{C}$, abertura dos dutos de 25 mm do coletor e área plana de 2 m^2 , variando-se a inclinação, para diferentes valores de irradiância incidente sobre o equipamento.

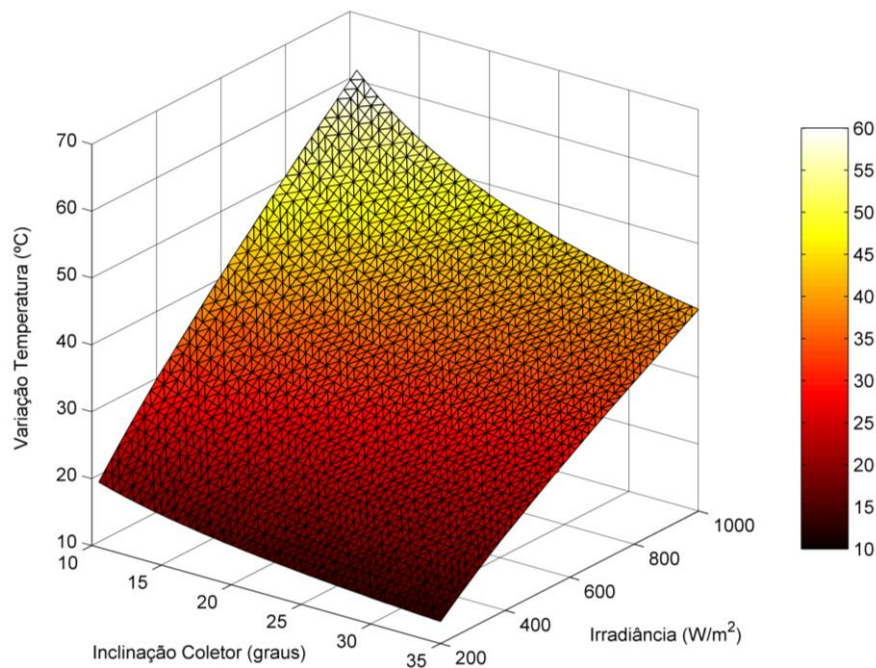


Figura 5: Simulações do coletor solar – Irradiância e inclinação do coletor

Na simulação considerou-se que 50% da energia incidente é entregue ao duto superior e o restante ao duto inferior do coletor solar. Tal consideração é válida, pois a parte superior da placa coletora absorve a energia incidente, estabelecendo uma temperatura. Este calor absorvido é conduzido para a parte inferior da chapa. Como o aço SAE 1020 é um bom condutor de calor ($k = 52 \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) e a espessura da chapa é de somente 1,2 mm, a diferença de temperatura prevista é de somente $0,02^\circ\text{C}$. Portanto, considera-se que cada lado da placa coletora transfere a mesma quantidade de energia térmica para o fluido de trabalho.

Após análise dos resultados da simulação (Tedesco; Bühler; Wortmann, 2016), buscou-se escolher dimensões que se adequem do melhor modo possível às condições climáticas da cidade de Farroupilha, RS, onde o desidratador seria construído e testado. Optou-se, portanto, em utilizar área plana de 2m^2 , de comprimento de 2 m e largura de 1 m, inclinação de 30° com a horizontal, abertura de 60 mm (25 mm no duto superior e 35 mm no inferior). Cabe salientar que o fator η real do coletor construído, apresentado no Apêndice – Simulação Global do Coletor Solar, será analisado e determinado durante a apresentação dos resultados experimentais.

2.1.2 Materiais e Construção

Os materiais utilizados na construção do coletor solar foram: Vidro temperado de espessura de 6 mm; chapa de alta absorvância de aço SAE 1020 com revestimento em preto fosco, cuja absorvância varia de 85 a 95% (Frota; Schiffer, 2001); estrutura construída com cantoneiras dobradas de 1,2 mm, de aço SAE 1020, devido ao seu baixo custo, fácil manuseio e boa resistência mecânica. A Figura 6(a) apresenta a etapa de criação da primeira camada do coletor, a região onde seria, posteriormente, isolada termicamente através de poliuretano expandido. A Figura 6(b) exhibe o coletor pintado de preto fosco, aguardando a colocação da superfície absorvedora suspensa e, após, o vidro no topo. Adicionou-se um suporte para a superfície absorvedora suspensa, mantendo-a plana após instalada.



(a)



(b)

Figura 6: Coletor solar em construção (a) detalhe da região de isolamento térmico do coletor e (b) suporte de apoio para a chapa absorvedora do coletor.

2.2. Câmara de Desidratação

A câmara de desidratação é onde as bandejas são posicionadas, uma acima da outra, como apresentado na Figura 2. Na parte inferior da câmara ocorre a entrada do fluxo de ar aquecido oriundo do coletor solar. Esse ar aquecido, devido a sua baixa densidade, naturalmente sobe e passa através das bandejas, que são constituídas de uma malha de 4 mm de aço galvanizado. O fluxo se dirige até a parte superior da câmara onde está posicionada a chaminé. A Figura 7 apresenta em detalhe a câmara de desidratação.

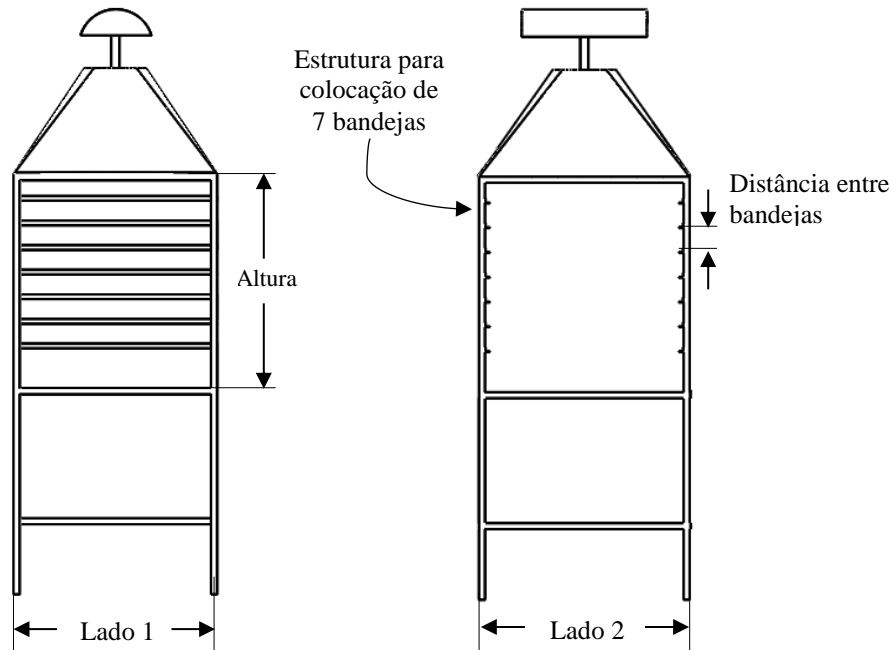


Figura 7: Câmara de desidratação

Após o dimensionamento da câmara de desidratação com as dimensões apresentadas, verificou-se experimentalmente que a carga máxima é de 4 kg de frutas sem restringir completamente a passagem do fluido. O aumento excessivo de frutas nas bandejas pode restringir ou até impedir a passagem do ar aquecido, devido à elevação descontrolada da perda de carga no sistema. Deste modo, projetou-se a câmara de secagem com 7 bandejas, com distância de 100 mm entre elas. As outras dimensões da câmara são:

- Altura de 1100 mm;
- Lado 1 de 1000 mm;
- Lado 2 de 1000 mm.

O volume interno total da câmara é de 1,1m³.

2.2.2 Materiais e Construção

A estrutura da câmara foi construída com cantoneiras dobradas de aço SAE 1020 de espessura 1,2 mm. Chapas metálicas do mesmo aço foram utilizadas para revestimento da câmara e para construção da porta de acesso às bandejas. Na parte interna construiu-se suporte para colocação de 7 bandejas de 1m², como apresentado na Figura 8 (a).



(a)



(b)

Figura 8: (a) Câmara de desidratação em construção; (b) bandeja com frutas

A Figura 8 (b) apresenta a bandeja de frutas construída. Ela é composta de uma tela galvanizada com malha de 4 mm anexada à um requadro de madeira.

2.3. Chaminé

Chaminés são largamente utilizadas em sistemas sem fluxo forçado, pois estes têm um papel fundamental no aumento da força “buoyant” (Jairaj; Singh; Srikant, 2009), aumentando assim o fluxo de ar no interior do desidratador (Misha et al., 2013). Portanto, projetou-se uma pequena chaminé que além do mencionado, impedisse a entrada de água da chuva.

O croqui do projeto da chaminé é apresentado na Figura 9.

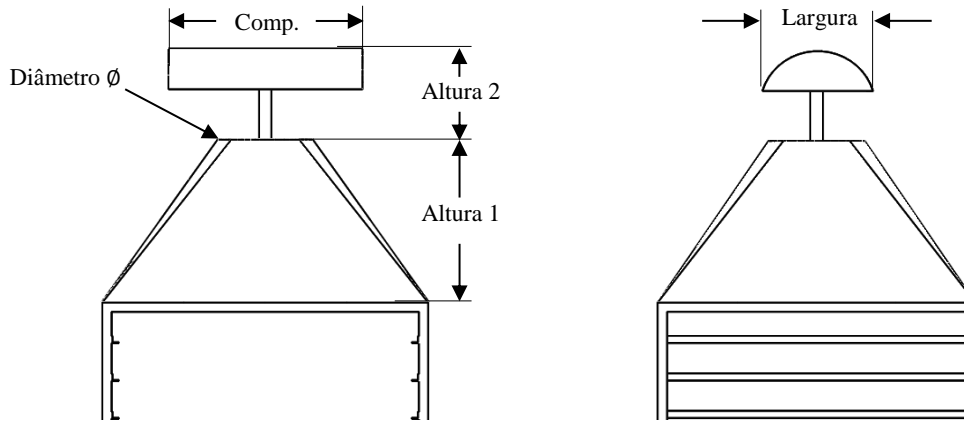


Figura 9: Chaminé - dimensões

As dimensões de cada característica da chaminé construída são:

- Comp. = 630 mm;
- Altura 1 = 530 mm;
- Altura 2 = 300 mm;
- Diâmetro = 300 mm;
- Largura = 350 mm.

2.3.2 Materiais e Construção

Com o projeto finalizado, construiu-se, de aço SAE 1020 de espessura 1,2 mm, a chaminé em preto fosco, como apresentado na Figura 10.



Figura 10: Chaminé

Na saída da chaminé, como pode ser observado na Figura 10, foi instalado um exaustor de 300 mm de diâmetro e 200 mm de profundidade. Quando ligado, este promove uma vazão de 0,43 m³/s. Tal exaustor foi instalado com o objetivo de promover futuros experimentos com circulação forçada. Cabe salientar que a presença desse acessório é opcional, não sendo necessária para o funcionamento do equipamento.

2.4. Protótipo Construído

Apresenta-se, na Figura 11, o Secador Solar Indireto com Chaminé construído e posicionado para testes.



Figura 11: Secador solar indireto com chaminé

O desidratador de frutas foi posicionado em direção ao norte, ou seja, ângulo do Azimute γ igual a 180° na cidade de Farroupilha, RS, onde a latitude é de $-29,5^\circ$. Observa-se que foram adicionados rodízios ao equipamento facilitando sua movimentação.

2.5. Análise de Custo do Projeto

Com vistas na reprodução de tal projeto por parte dos produtores locais e na busca de incentivar a produção brasileira de frutas desidratadas, expõe-se uma estimativa do investimento necessário para a realização do projeto, cujos valores referem-se ao período aproximado de setembro a outubro de 2016.

Detalhamento	Valor unitário	Qtd.	Valor Total
Tela Galvanizada malha 6 mm	R\$ 17,50/m	20	R\$ 350,00
Dobradiça 184	R\$ 1,61/un	6	R\$ 9,66
Rodizio Giratório c/ trava 3"	R\$ 40,00/un	6	R\$ 240,00
Exaustor Industrial 30 cm	R\$ 159,99/un	1	R\$ 159,99
Vidro temperado incolor 6 mm	R\$ 118,00/m ²	1	R\$ 236,00
Espuma expansiva Power 500 ml	R\$ 25,00/un	12	R\$ 300,00
Silicone Acético Transp. Power 256g	R\$ 10,00/un	6	R\$ 60,00
Tinta Spray Preto fosco colorgin alta temperatura	R\$ 26,00/un	20	R\$ 520,00
Chapa Aço 1020 - 1,2X1000X2000mm	R\$ 120,00/un	8	R\$ 960,00
Madeira das Bandejas	R\$ 40,00/un	2	R\$ 80,00
Cantoneiras Aço 1020 de - 1,2X40X3000mm	R\$ 11,00/un	20	R\$ 220,00
Valor Total Projeto			R\$ 3.135,65

Tabela 1: Custos do projeto

O dispositivo foi projetado e, posteriormente, construído, para promover a realização de experimentos, visando avaliar sua performance e, então, sua viabilidade como um processo para grandes, médias e microempresas. Portanto, não optou-se por aço inoxidável no projeto. Entretanto, na reprodução de tal equipamento em escala industrial, visando a

comercialização, aconselha-se a utilização de aço inoxidável na construção da câmara de desidratação e das bandejas, obedecendo assim requisitos sanitários para o equipamento. Observa-se que nos custos apresentados desconsiderou-se os custos de produção do equipamento.

3. RESULTADOS

Com o equipamento construído e posicionado com face norte, procedeu-se para a análise do desempenho do desidratador. Foi instalado um sistema de aquisição de dados da marca Contemp com resolução de medida de 0,1 para temperatura e para tensão e exatidão de $\pm 0,3\%$ do fundo de escala. O sistema foi programado para fazer uma leitura das variáveis a serem monitoradas a cada minuto. Foram conectados ao sistema de aquisição de dados cinco sensores. Quatro sensores Pt100 medem a temperatura. Um deles mede a temperatura ambiente, enquanto os demais foram utilizados para medições na saída do coletor solar, na base inferior e na saída da câmara de desidratação (Figura 12). Também foi utilizada uma célula fotovoltaica de referência para a medida da irradiância. A irradiância é calculada através da medida da tensão sobre um resistor shunt conectado aos terminais da célula. O sensor de irradiância foi posicionado na mesma inclinação e azimute do coletor solar, possibilitando determinar a densidade de potência que atinge a placa coletora.

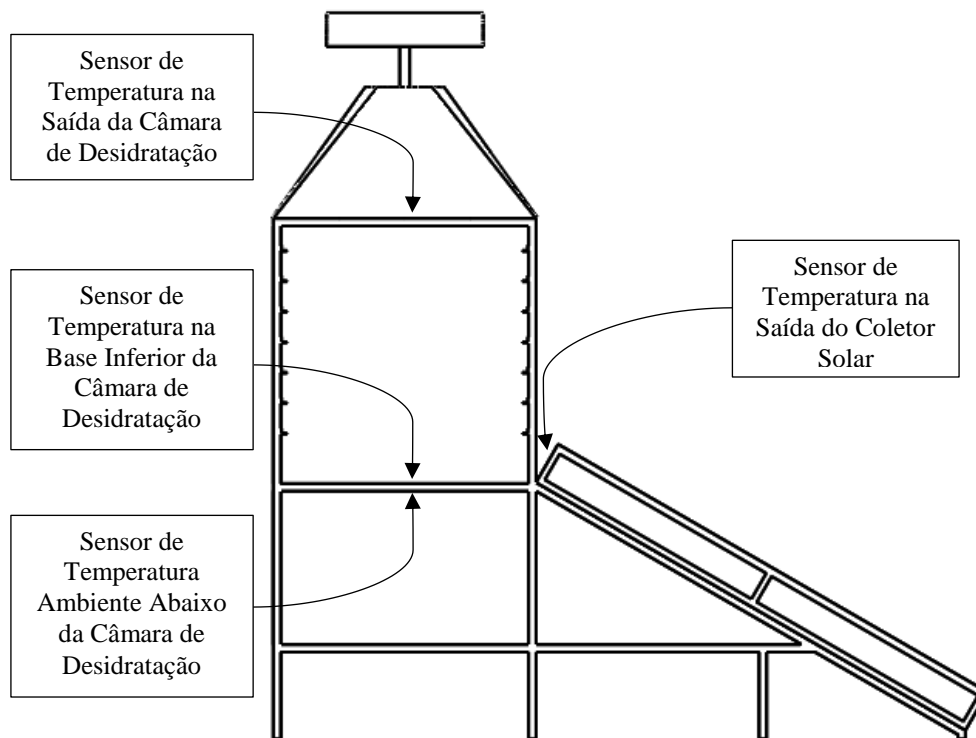


Figura 12: Posicionamento dos sensores de temperatura

O sensor de temperatura ambiente foi posicionado abaixo da câmara de desidratação, local onde não houvesse nenhum tipo de interferência e protegido da radiação solar. A definição da umidade relativa foi realizada através da leitura de termômetros de bulbo seco e bulbo úmido.

3.1. Análise do Desempenho do Coletor Solar

Com os resultados da simulação realizada, apresentada na seção 2.1.1 e complementada pelo Apêndice – Simulação Global do Coletor Solar, realizou-se, por meio dos resultados de mais de 20 mil medições experimentais durante diversos dias dos meses de abril e maio de 2017, uma comparação direta dos resultados simulados e reais. Salienta-se que os dados foram filtrados, buscando-se eliminar registros que não indicavam regime permanente, ou seja, dados com alto grau de variação nos valores de irradiância em curtos períodos.

Apresenta-se, portanto, na Figura 13 diversos dados experimentais medidos da elevação da temperatura no coletor solar, isto é, a temperatura de saída do coletor subtraindo-se a temperatura de entrada (temperatura ambiente), para diversos valores nominais de potência de entrada.

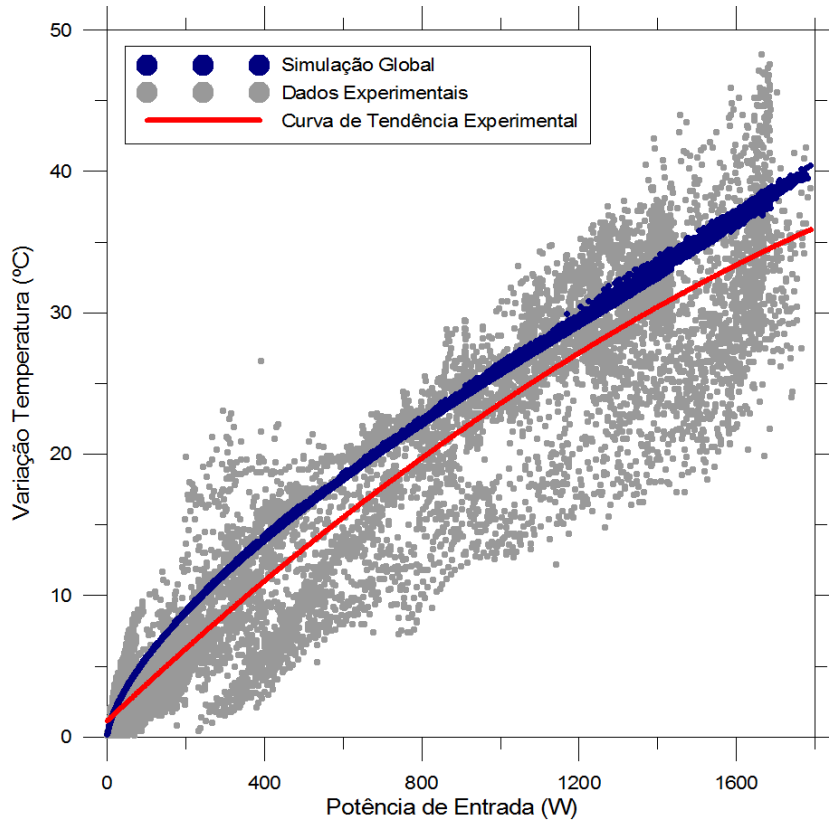


Figura 13: Elevação da temperatura no coletor *versus* potência de entrada– Simulação com $\eta = 100\%$

Através dos pontos experimentais apresentados, obteve-se a equação de tendência. Esta é uma função polinomial de segundo grau, apresentada na Equação 1.

$$\Delta T = T_{saída} - T_{entrada} = a + b * P - c * P^2 \quad (1)$$

onde as temperaturas são em graus Celsius, P indica a potência de entrada (W) e a , b e c são constantes. Para os gráficos das Figuras 13 e 15, os valores de a , b e c determinados foram 1,0482, $2,6372 \cdot 10^{-2}$ e $-3,8577 \cdot 10^{-6}$, respectivamente.

Apresenta-se o erro absoluto Figura 14 (a) e erro relativo Figura 14 (b) entre a curva de tendência dos dados experimentais e os resultados simulados.

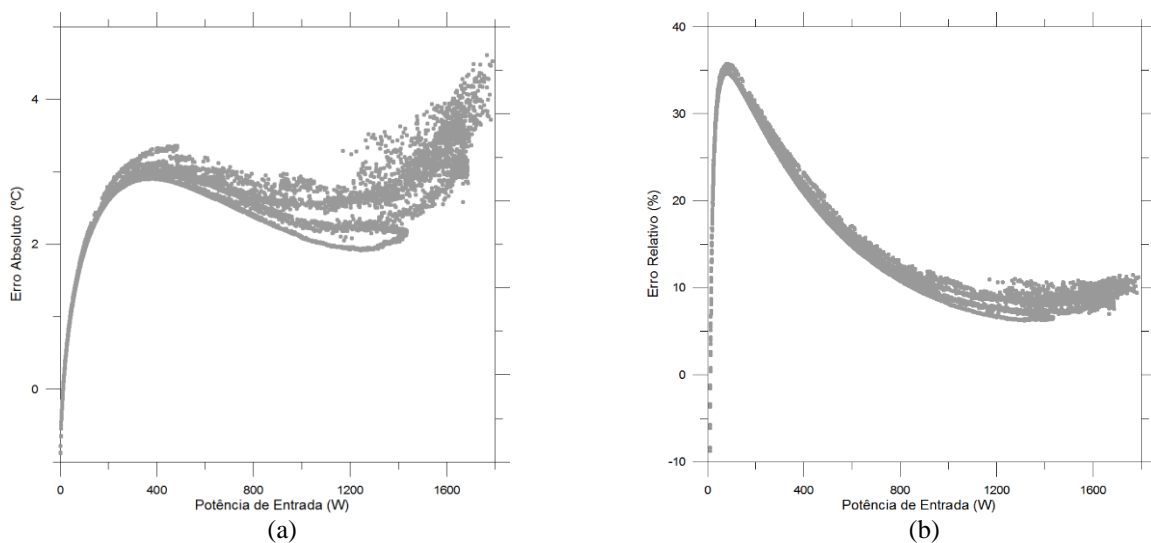


Figura 14: Erros da curva de tendência dos dados experimentais com os valores simulados (a) Erro absoluto; (b) Erro relativo.

Uma vez apresentado os dados experimentais e comparados com os resultados simulados para eficiência η de 100%, apresenta-se na Figura 15 os mesmo resultados experimentais para simulação de η igual a 87%.

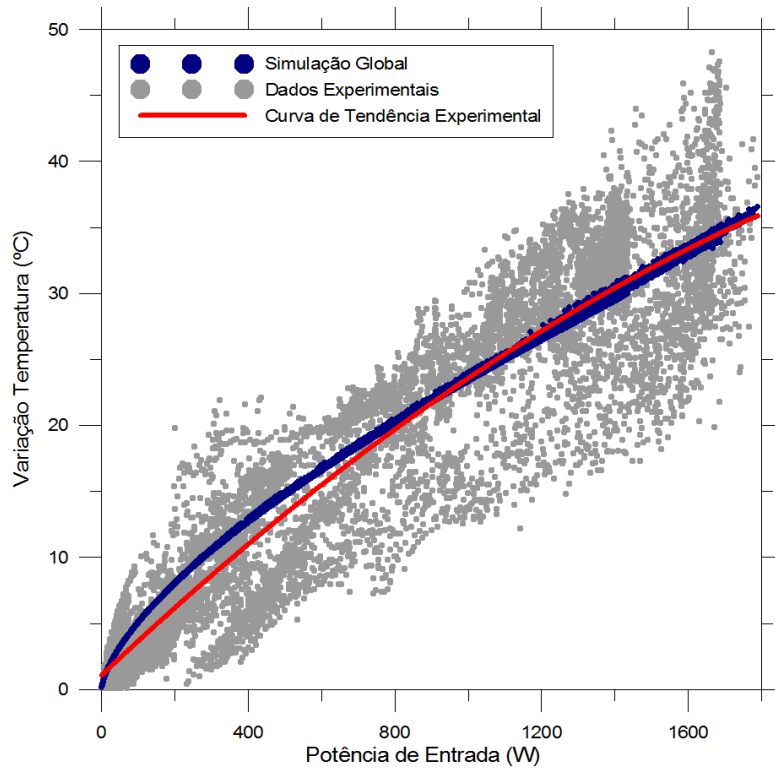


Figura 15: Elevação da temperatura no coletor *versus* Potência de entrada – Simulação com $\eta = 87\%$

Apresenta-se na Figura 16 os erros, absoluto e relativo, entre a equação de tendência dos resultados experimentais e a curva de simulação para η de 87%.

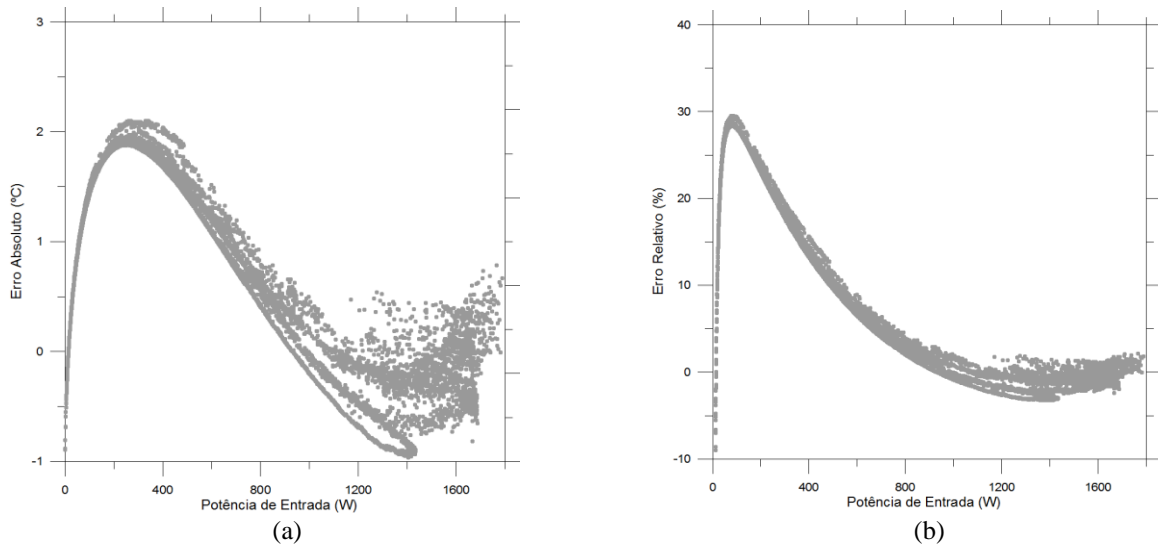


Figura 16: Erros da curva de tendência dos dados experimentais com os valores simulados (a) Erro absoluto; (b) Erro relativo

3.2. Análise do Desempenho do Desidratador Sem Frutas

Realizou-se experimentos sem frutas nos dias 29 e 30 de março de 2017. O desempenho do desidratador é apresentado na Figura 17.

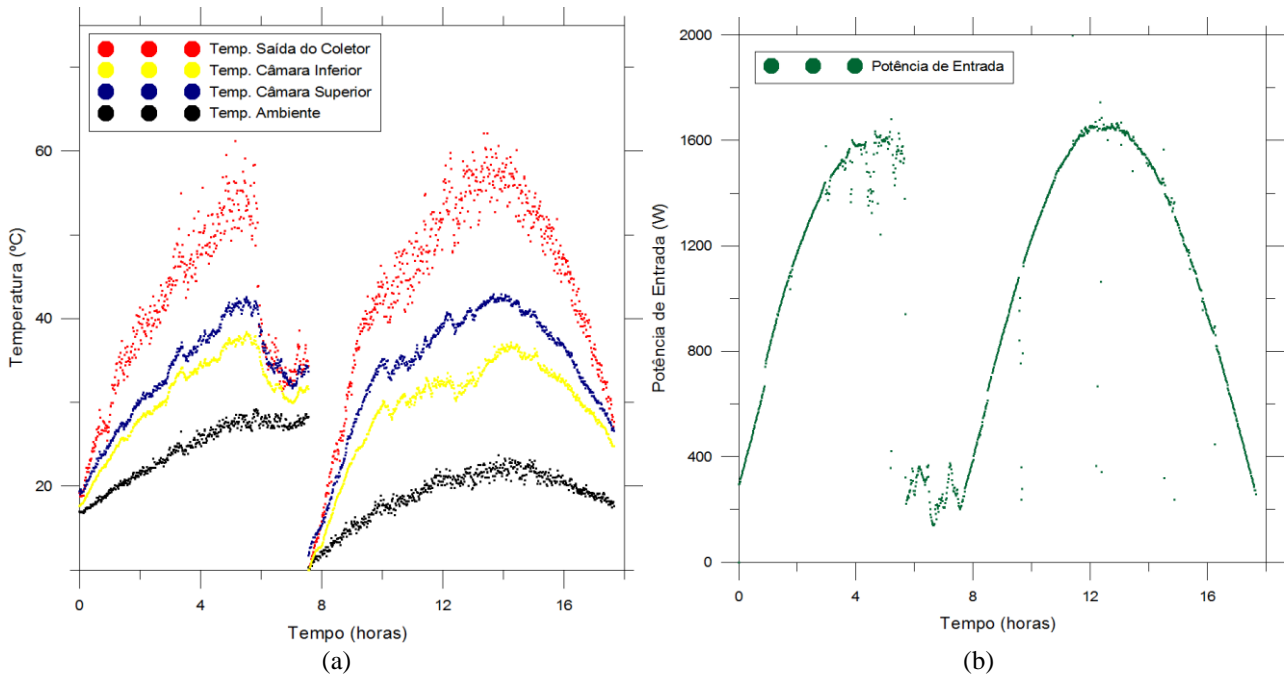


Figura 17: Desempenho do desidratador sem frutas

3.3. Análise do Desempenho do Desidratador Com Maçãs

Durante os dias 16 e 17 de maio de 2017, realizou-se experimento de desidratação de 2456 gramas de maçãs. Apresenta-se na Figura 18 os resultados da redução da massa das frutas de acordo com a energia entregue ao sistema.

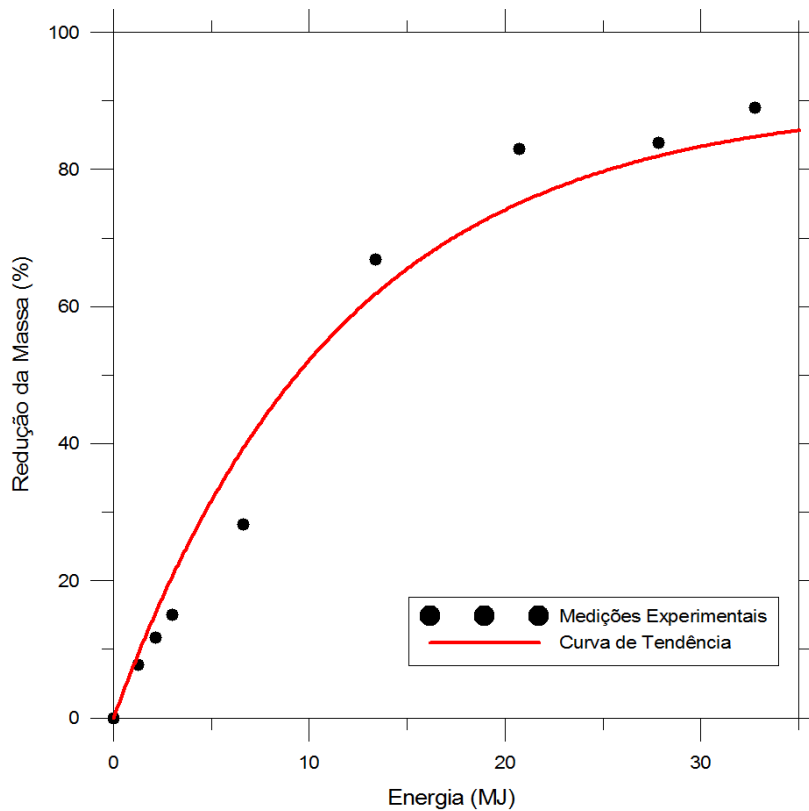


Figura 18: Redução percentual da massa *versus* Energia entregue

A massa final das maçãs foi de 271 gramas, aproximadamente 11% da massa inicial. Por meio das múltiplas pesagens ao longo do experimento, pôde-se desenvolver uma equação de tendência, apresentada na Equação 2, do processo de desidratação das maçãs. Tal equação é uma função exponencial.

$$RM = a \left[1 - e^{\left(\frac{-E}{b} \right)} \right] \quad (2)$$

onde RM é a redução de massa (%), E é a energia entregue ao desidratador (MJ) e a e b são constantes. Para o gráfico da Figura 18, os valores de a e b determinados foram 0,9 e 11,5428, respectivamente.

Durante os dias de desidratação, coletou-se dados das temperaturas e irradiância através do sistema de aquisição de dados. Realizou-se, também, leituras de umidade relativa do ambiente externo nos momentos de pesagem. Tais resultados são apresentados na Figura 19.

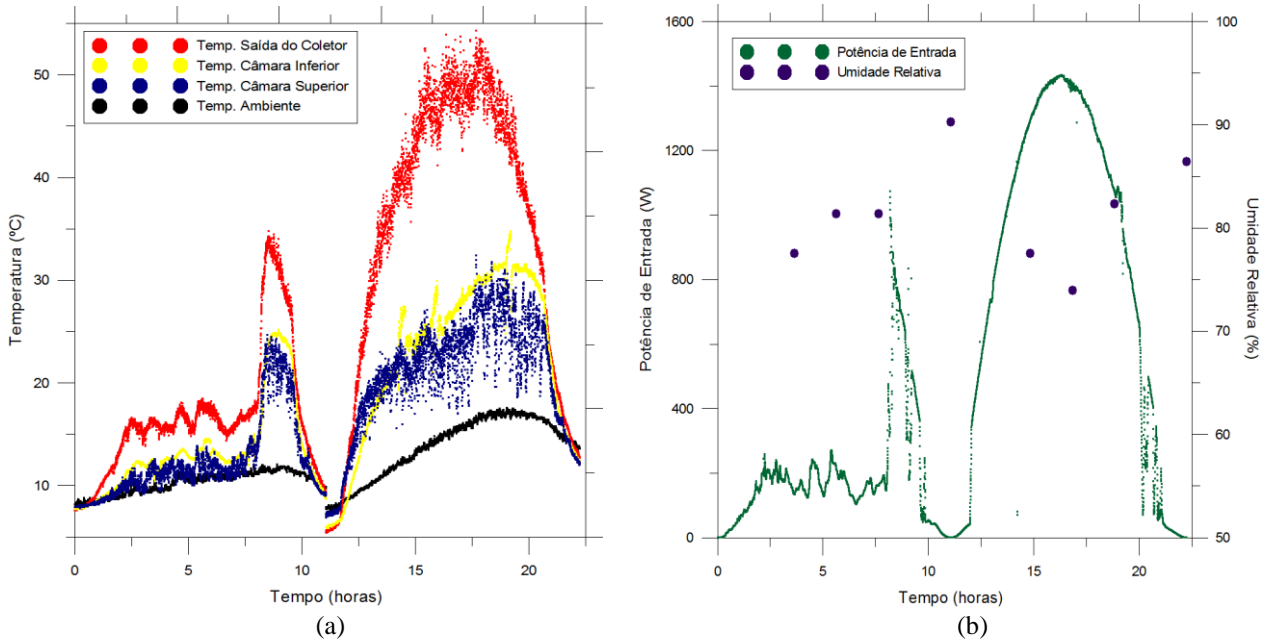


Figura 19: Resultados da desidratação de maçãs

Apresenta-se na Figura 20 imagens das maçãs durante e após o processo de desidratação.

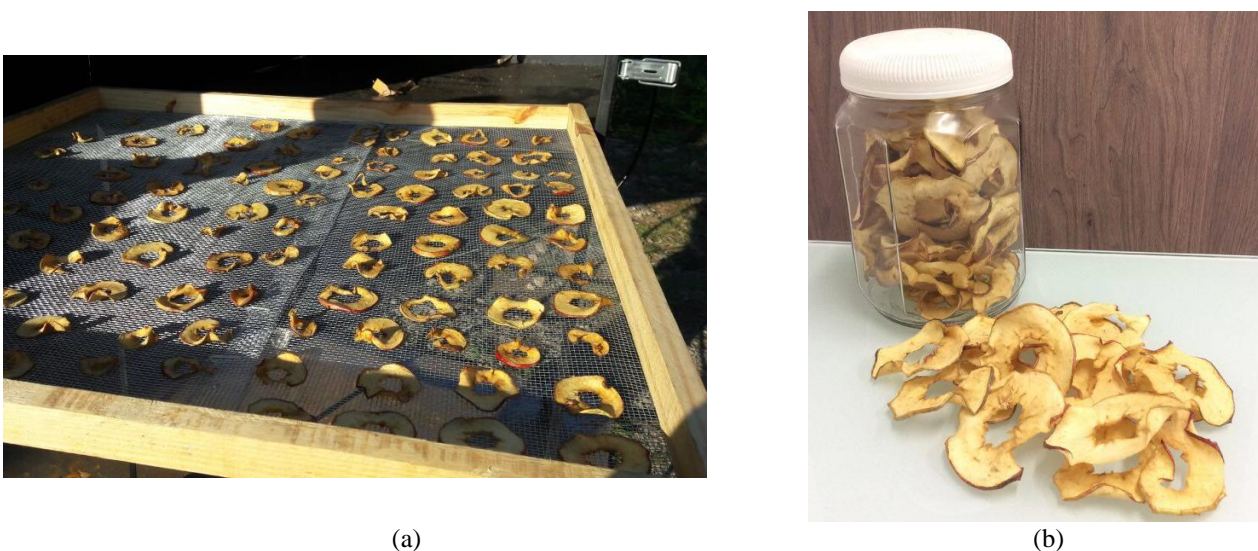


Figura 20: Imagens das maçãs (a) Durante o processo; (b) Ao final da desidratação

3.4. Projeção de Retorno ao Investimento - PayBack

Com vistas na reprodução do projeto de construção de um Secador Solar Indireto Passivo com Chaminé para desidratação de frutas pelos empreendedores, desenvolveu-se uma análise de PayBack, ou seja, um estudo do tempo de retorno ao investimento inicial. O PayBack indica o tempo necessário para que os gastos iniciais com o projeto sejam

igualados pelos lucros gerados pelo equipamento. Portanto, para tal análise, realizou-se uma série de experimentos com maçãs a fim de determinar o tempo médio de secagem (Tabela 2).

Experimento	Data	Hora da Pesagem	Peso das Frutas (kg)	Redução da Massa (%)
nº 1	27/3	7:20	2,60	0.0%
nº 1	27/3	18:00	0,79	69.5%
nº 1	28/3	18:00	0,36	86.1%
nº 2	5/4	7:20	2,90	0.0%
nº 2	5/4	18:00	1,77	39.0%
nº 2	6/4	18:00	0,67	76.8%
nº 2	7/4	18:00	0,41	85.8%
nº 3	26/4	7:20	2,90	0.0%
nº 3	26/4	18:00	1,26	56.6%
nº 3	27/4	18:00	0,52	82.1%
nº 3	28/4	18:00	0,49	83.1%
nº 4	16/5	7:20	2,46	0.0%
nº 4	16/5	18:00	1,76	28.3%
nº 4	17/5	18:00	0,27	89.0%

Tabela 2: Experimentos de secagem de maçãs

Observa-se que o tempo médio de desidratação das maçãs é de 3 dias, mas para o cálculo do retorno ao investimento utilizar-se-á 4 dias afim de considerar-se os dias chuvosos do ano que impossibilitam ou atrasam a desidratação. Deste modo, pode-se afirmar que, em média, haverá 7,5 processos por mês, com uma capacidade média de 3 kg de frutas in natura por desidratação, sendo que o produto final representa aproximadamente 15% da massa inicial. O *PayBack* do projeto é calculado através da Equação 3.

$$PayBack [meses] = \frac{Investimento\ Inicial}{Lucro\ por\ Mês} = \frac{Investimento\ Inicial}{\frac{30}{D} * Mt * (0,15 * P - C)} \quad (3)$$

onde D indica o quantidade média de dias de secagem, Mt é a massa total de maçãs por processamento, P representa o preço comercial por kg das maçãs desidratadas e C o preço por kg das frutas in natura. Assim, utilizando P igual a R\$ 62,45/kg (Zona Cerealista, 2017) e C igual a R\$ 3,65/kg (Notícias Agrícolas, 2017), calculou-se o *PayBack* do projeto (Figura 21).

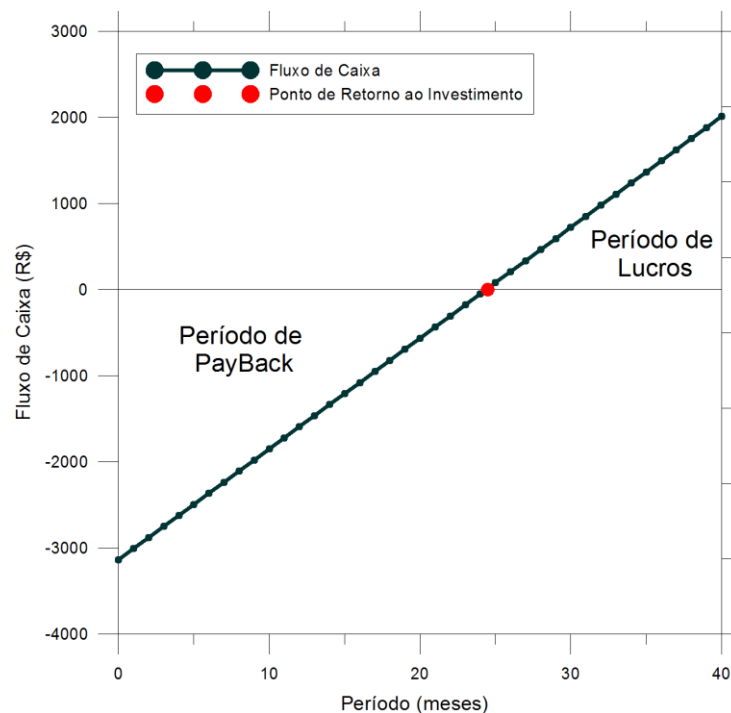


Figura 21: Retorno ao investimento - *PayBack*

O retorno ao investimento previsto para o projeto de construção do secador solar é de 24,4 meses. Salienta-se que os preços de compra e venda das maçãs podem variar significativamente dependendo da situação.

4. CONCLUSÕES

No projeto desenvolvido do secador solar indireto passivo com chaminé, cujo coletor solar é de superfície suspensa, estudou-se e simulou-se o comportamento de coletores solares com diferentes geometrias e condições de contorno. Uma vez que se obteve resultados, selecionou-se as dimensões do equipamento que melhor se adequavam tanto às condições climáticas quanto aos requisitos do projeto. Procedeu-se para construção do protótipo e, posteriormente, à análise por meio de experimentos com e sem frutas.

Pôde-se observar que houve alta proximidade da simulação computacional utilizando-se de equações globais com os resultados práticos do coletor solar. A elevação da temperatura dentro do coletor foi levemente superior na simulação computacional quando comparada com os dados reais. Tal comportamento confirma os resultados esperados, já que na simulação desconsiderou-se a perda por transferência do calor da placa absorvedora ao fluido de trabalho. Determinou-se, comparando os resultados simulados e práticos, o fator η de eficiência de trabalho, sendo este aproximadamente 87%. Salienta-se que para baixas potências de entrada, abaixo de 800 W, a eficiência do equipamento é menor, atingindo um erro absoluto próximo a 2 °C na faixa de 200 a 400 W.

Por meio da análise do protótipo sem frutas pôde-se identificar algumas características. A temperatura dentro da câmara de desidratação não se apresentou homogênea, mesmo em períodos de regime permanente. O fluxo interno não circula por todo seu volume interno, pois a temperatura do fluido de saída da chaminé foi superior à base, durante os experimentos, chegando a diferenças superiores a 5 °C. Tal disparidade não existiu quando se realizou experimentos com frutas, chegando a temperaturas menores na saída da câmara que na base em alguns instantes.

Houve um gradiente de temperatura da saída do coletor com a temperatura de saída da câmara durante experimentos sem frutas, atingindo diferenças de até 20 °C. Tal dado indica perda de calor na câmara de desidratação, aconselhando-se utilizar isolamento térmico nas paredes, principalmente na base e na parede sul e eventualmente nas paredes leste e oeste.

Durante experimentos com frutas, 2456 gramas de maçãs in natura foram desidratados e, após retirar 89% da sua umidade, restaram 271 g de maçãs desidratada. Tal processo requereu 32,78 MJ de energia durante 2 dias de experimento (aproximadamente 24 horas de insolação). Por meio da análise de redução da massa por energia entregue ao sistema, pôde-se desenvolver a curva de desidratação da maçã para o protótipo construído. Durante os dias de teste, observou-se uma considerável alta umidade relativa externa, mesmo que comum para a região da Serra Gaúcha, onde cinco das oito medições realizadas indicaram acima de 80%. Observa-se que mesmo com alta umidade relativa, o equipamento apresentou um bom desempenho na desidratação.

O *PayBack* indicou um retorno ao investimento de aproximadamente dois anos para o protótipo proposto. O rendimento do projeto ao final de 40 meses de produção indica, além do pagamento completo do custo de construção do protótipo, um lucro de mais de R\$ 1.500,00. Salienta-se que a desidratação pode extinguir com a sazonalidade do comércio das maçãs, possibilitando vendas ao longo de todo ano, além de aproveitar maçãs com problemas estéticos, mas que estão em boa qualidade.

Na reprodução do projeto apresentado, aconselha-se a utilização de cantoneiras SAE 1020 de 2 mm de espessura ao invés de 1,2 mm, tornando a estrutura mais rígida e de mais fácil locomoção. Outra modificação aconselhada do projeto é a redução da espessura do vidro temperado utilizado no coletor solar, de 6 para 4 mm, reduzindo a massa e o custo do projeto sem prejudicar a resistência do equipamento e aumentando sua eficiência por reduzir a absorção de calor pelo vidro.

O projeto de concepção, simulação, construção e análise de um secador solar, desenvolvido na Serra Gaúcha – RS, região de abundante produção das mais diversas frutas, foi finalizado e em meio aos diversos resultados obtidos, pode-se concluir que o desidratador indireto passivo, cuja única fonte de energia é a solar, é uma alternativa viável para os produtores locais. O protótipo construído, cujo retorno ao investimento é de 24,4 meses, é capaz de atender microprodutores e, em maior escala, produção em nível industrial. Salienta-se a necessidade de adequação do equipamento aos requisitos sanitários da Anvisa.

5. REFERÊNCIAS

- Belessiotis, V.; Delyannis, E., 2011. Solar drying. *Solar Energy, Progress in Solar Energy* 1. v. 85, n. 8, p. 1665–1691.
- Carvalho, V. R. F., 2011. Cadeia Produtiva da Maçã no Brasil: Limitações e Potencialidades. Cadeia Produtiva Maçã – Diretoria de Planejamento Superintendência de Planejamento.
- De Aquino, F. M. et al., 2005. Cadeia Produtiva da Maçã: Produção, armazenagem, comercialização, industrialização e apoio do BRDE da Região Sul Do Brasil. Diretoria de Planejamento Superintendência de Planejamento.
- Ekechukwu, O. V.; Norton, B., 1999. Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion and Management*, v. 40, n. 6, p. 615–655.
- Fox, R. W.; Pritchard, P. J.; Mcdonald, A. T., 2008. *Introduction to Fluid Mechanics*. 7 edition ed. Hoboken, N.J: Wiley.
- Frota, A. B.; Schiffer, S. R., 2001. *Manual de conforto térmico: arquitetura, urbanismo*. 5 ed. – São Paulo: Studio Nobel.

- Gutiérrez, C.; Herrera, M.; Mansilla, F. E.; Sisca, N., 2012. Secadero solar indirecto de circulación natural, para hierbas aromáticas, frutas y verduras em La ciudad de Pico Truncado. *ASADES - Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v. 16, pp. 02.01-02.07.
- Incropera, F. P.; Dewitt, D. P.; Bergman, T. L., 2006. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Jairaj, K. S.; Singh, S. P.; Srikant, K., 2009. A review of solar dryers developed for grape drying. *Solar Energy*, v. 83, n. 9, p. 1698–1712.
- Kothekar, M. M.; Gavhad, A. A.; Karale, S. R., 2016. A review on solar dehydration (dryer) system. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, v. 5, n. 10, p. 384–393.
- Lazarides, H. N. et al., 1995. Mass transfer kinetics during osmotic preconcentration aiming at minimal solid uptake. *Journal of Food Engineering*, v.25, p. 151-166.
- Misha, S. et al., 2013. Review on application of a tray dryer system for agricultural products. *World Applied Sciences Journal*, v. 22, p. 424-433.
- Notícias Agrícolas. Disponível em: < <https://www.noticiasagricolas.com.br/cotacoes/frutas/maca-gala-ceasas>>. Acesso em: 31/05/2017.
- Palumbo, D. A.; Barral, J. R.; Lestarpé, I. E.; Lara, M. A., 2000. Análisis de factibilidad económica para un secadero híbrido de madera en Río Cuarto. *ASADES - Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.
- Rossi, S. J.; Roa, G., 1980. *Secagem e Armazenamento de Produtos Agropecuários com uso de Energia Solar e Ar Natural*. Publicação ACIESP nº 22.
- Salaudeen, O., 2011. Design, construction and testing of a solar dryer. University of Agriculture, Abeokuta Ogun State.
- Saraiva, S. H. et al., 2010. Estudo do Processo de Secagem de Maçã. XIV Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e X Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba.
- Spers, E. E. et al., 2008. Mercado de frutas secas. *Mercado & Negócios – Agroanalysis*, p. 13,14.
- Tedesco, F. C.; Bühler, A. J.; Wortmann, S., 2016. Simulação e análise do desempenho de um secador solar indireto passivo de frutas e sementes. XXII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente.
- Vijayavenkataraman, S.; Iniyan, S.; Goic, R., 2012. A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 5, p. 2652–2670.
- Vitibrasil, 2014. Dados da vitivinicultura. Disponível em: <www.vitibrasil.cnpuv.embrapa.br>. Acesso em: 19 mar. 2017.
- Zona Cerealista – Um Clique Saudável e Econômico. Disponível em: <<https://zonacerealista.com.br/para-o-lanche/frutas-desidratadas/mac-desidratada-em-rodela-200g.html>>. Acesso em: 31/05/2017.

6. APÊNDICE – SIMULAÇÃO GLOBAL DO COLETOR SOLAR

A simulação computacional, utilizando-se de equações globais de transferência de calor, foi utilizada para criar uma projeção do comportamento do coletor solar. Ela correlaciona a vazão com a temperatura do fluido no equipamento, encontrando o ponto de equilíbrio do sistema em diferentes condições de contorno. Observa-se que o aumento da temperatura provoca uma diminuição na densidade do fluido de trabalho, aumentando imediatamente a velocidade do fluxo no coletor. Esse aumento na velocidade faz com que a temperatura caia já que haverá menor tempo de transferência de calor do coletor para as moléculas de ar. Isto foi solucionado através de um cálculo iterativo realizado em Fortran determinando-se a velocidade e temperatura do fluido de equilíbrio dada as condições iniciais. O fluxograma apresentado na Figura 1 demonstra a lógica criada para a solução do problema citado.

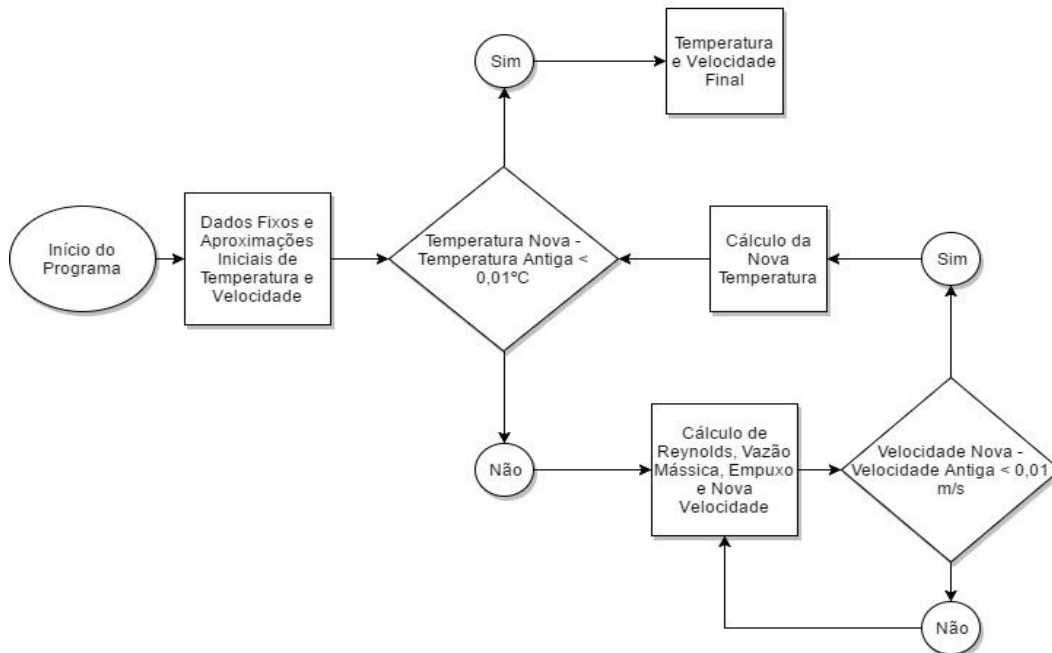


Figura 1: Fluxograma da simulação

O empuxo, responsável pelo fluxo natural dentro do coletor, é calculado através da Equação 1.

$$Emp = g \Delta\rho v V \text{ sen } \theta \quad (1)$$

onde:

- $\Delta\rho$ é a variação da densidade dentro do coletor;
- v é o volume interno do coletor;
- V é a velocidade do fluxo de ar no coletor;
- θ é o ângulo de inclinação do coletor;
- g é a aceleração da gravidade.

A velocidade do fluxo é calculada através da formulação global de Bernoulli (Fox; Pritchard; Mcdonald, 2008).

$$\left(\frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2} + g z_1\right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2} + g z_2\right) = hl \quad (2)$$

sendo:

- p_1 e p_2 as pressões na entrada e na saída, respectivamente;
- α_1 e α_2 são os fatores de correção conhecidos como coeficientes de energia cinética, onde, para escoamento laminar, α é igual a 2 e igual a 1, para escoamento turbulento, pois o perfil de velocidades é bem achatado (Fox; Pritchard; Mcdonald, 2008);
- V_1 e V_2 representam as velocidades do fluido na entrada e na saída do coletor, respectivamente;
- z_1 e z_2 indicam as cotas geométricas;
- ρ é a densidade do fluido;
- g representa a aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$);
- hl é a perda de carga.

A perda de carga é, normalmente, desconsiderada nos cálculos de coletores solares. Isso ocorre devido ao fato da perda de carga de um gás à baixa velocidade entre placas planas e paralelas ter baixa significância nos resultados finais. Este fato é atenuado por não haver perdas localizadas, isto é, causadas por variações na área da seção interna, acessórios, entradas e saídas de fluido. Entretanto, calcula-se na Equação 3 (Fox; Pritchard; McDonald, 2008), para escoamento laminar, a perda de carga no coletor simulado buscando obter-se maior eficácia na simulação.

$$hl = \left(\frac{64}{Re_d} \right) \frac{L V^2}{D} \quad (3)$$

onde L é o comprimento do coletor, V é a velocidade média do fluido e Re_d é número de Reynolds hidráulico.

Salienta-se que a perda de carga calculada na Equação (11) é a energia convertida de energia mecânica para térmica devido ao atrito com as paredes, caracterizando-se a perda de energia no fluido. Outra característica da Equação 03 é que o diâmetro D indicado refere-se ao diâmetro hidráulico. Deste modo, optou-se por subdividir a área de entrada do coletor por múltiplos pequenos quadrados, respeitando a razão de largura/altura de 1 para 4 (Tedesco; Bühler; Wortmann, 2016).

A temperatura de saída do coletor foi determinada através da Equação 4.

$$\frac{dQ}{dt} = \dot{Q} = \dot{m} C_p (T_2 - T_{amb}) \quad (4)$$

onde C_p é o calor específico, \dot{m} é a vazão do fluido de trabalho, T_2 a temperatura de saída do fluido e T_{amb} a temperatura de entrada, considerada temperatura ambiente. A Equação 4, após ser manipulada e agregando-se um fator η , utilizado para corrigir a real potência instantânea devido à eficiência na transferência do calor do coletor ao fluido, chega-se a Equação 5 capaz de determinar T_2 .

$$T_2 = \frac{\dot{Q} \eta}{\dot{m} C_p} + T_{amb} \quad (5)$$

O fator η é obtido através da comparação dos resultados simulados com dados de experimentos reais coletados no coletor construído.

DESIGN, CONSTRUCTION AND ANALYSIS OF A PASSIVE INDIRECT SOLAR DRYER WITH FRUIT CHIMNEY

Felipe Cichetto Tedesco, felipe.tedesco1@gmail.com¹

Alexandre José Bühler, alexandre.buhler@farroupilha.ifrs.edu.br¹

Sérgio Wortmann, sergio.wortmann@farroupilha.ifrs.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, IFRS - Campus Farroupilha

Abstract. *The growing demand for alternative technologies, of a clean and sustainable nature, has fostered the development and improvement of equipment that uses solar energy for the dehydration of fruits and seeds. Such devices have been used worldwide for thousands of years. However, they remain uncommon in Serra Gaúcha, a region of great grapes and apples production for consumption in natura in the state of Rio Grande do Sul, where IFRS - Campus Farroupilha and Company Silvestrin Frutas, sponsor of this project, are established. In order to present proposals for the diffusion of solar dryers in the Serra Gaúcha and, consequently, for the regional increment in the production of dried fruits, a work of conception, simulation, construction and experimental analysis of an Indirect Solar Dryer with Chimney was developed. The prototype, subdivided in solar collector, dehydration chamber and chimney, was built prioritizing materials of low cost, but without compromising its performance. The device was subjected to experiments, in which: solar collector behavior was found very close to the simulated one, obtaining an efficiency of 87% in the equipment; satisfactory rise in temperature at the collector outlet; and dehydration of apples with a reduction of 89% of the mass with 32.78 MJ of energy delivered to the system. The prototype PayBack was estimated in two years.*

Keywords: *Solar dryer, solar thermal energy, fruit dehydration.*