

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO DE AR DE UM SECADOR SOLAR
HÍBRIDO DE PRODUTOS AGROALIMENTÍCIOS USANDO O TRNSYS

por

Diego Morello Basso

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Março de 2017

SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO DE AR DE UM SECADOR SOLAR
HÍBRIDO DE PRODUTOS AGROALIMENTÍCIOS USANDO O TRNSYS

por

Diego Morello Basso
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Leticia Jenisch Rodrigues

Aprovada por:

Prof. Dr. Arno Krenzinger PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin DEMEC / UFRGS

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 13 Março de 2017

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais que sempre estiveram ao meu lado durante este longo caminho.

Agradeço a orientadora Leticia Jenisch Rodrigues pela dedicação e paciência.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pelo suporte financeiro.

A UFRGS e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC.

Aos colegas e amigos que me apoiaram.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo principal apresentar a avaliação térmica, energética e financeira para um sistema de aquecimento de ar de um secador solar híbrido de produtos agroalimentícios, o qual utiliza como fonte de energia a energia solar e uma fonte de energia auxiliar. Dois tipos de fonte de energia auxiliar são utilizados, uma fonte utiliza biomassa como combustível e a outra utiliza energia elétrica. O sistema é composto por um coletor solar térmico, tipo placa plana de exposição indireta, uma fonte de energia auxiliar. O software TRNSYS é utilizado como ferramenta para executar as simulações, tendo como meta alcançar a temperatura do ar de 70°C na entrada da câmara de secagem. Os resultados são apresentados em função das temperaturas da placa absorvedora, do ar de saída do coletor solar e do ar de entrada na câmara de secagem e em função da quantidade de energia, por hora, fornecida para o ar de secagem pelo coletor solar (ganho de energia útil) e pela fonte de energia auxiliar. Calcula-se o custo horário da energia considerando a utilização da biomassa e da energia elétrica, resultando no custo da biomassa equivalente a 42,5% do custo da energia elétrica. Embora os custos com insumos sejam mais baratos para a utilização do sistema com biomassa, a implementação desse sistema é mais cara, sendo viável apenas em longo prazo. O retorno do investimento para o sistema com biomassa ocorre no quarto ano, enquanto que o sistema com energia elétrica obtém retorno no primeiro ano.

Palavras-chave: Secador Híbrido; TRNSYS; Biomassa; Energia Solar; Secador de Produtos Agroalimentícios.

ABSTRACT

This work aim to perform thermal, energy and financial analysis for an air heating system of a hybrid solar dryer for agricultural products, which uses as energy source a combination of solar energy and an auxiliary power source. Two types of external auxiliary power source for energy are used, biomass and electric power. The dryer is composed by an indirect flat plate flat plate collector, an external energy source and a drying chamber. The software TRNSYS is used to run the hybrid solar dryer simulations. The simulations goal is for the system to achieve 70°C air temperature at the drying chamber inlet. The results are showed as a function of the absorber flat plate temperature, the solar thermal collector outlet air temperature and the drying chamber inlet air temperature as a function of the energy amount per hour supplied to the drying air by the solar collector (useful energy gain) and by the external auxiliary power source. The energy cost per hour is calculated by assuming each one of the sources, biomass and electric power. It resulted that biomass costs 42.5% of the electrical power total costs. Although the source material costs are cheaper for biomass usage, it implies higher implementation costs, thus requiring long range usage analysis to prove practicable. The biomass system return of investment occurs at the fourth year while at the electrical power system return of investment occurs at the first year.

Keywords: Hybrid Dryer; TRNSYS; Biomass; Solar Energy; Agricultural Products Dryer.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Objetivo.....	2
1.3	Objetivos específicos.....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – ESTADO DA ARTE.....	3
3	PROCESSO DE SECAGEM.....	5
3.1	Mecanismo de secagem.....	5
3.2	Efeito da secagem nos alimentos.....	7
4	SECADOR SOLAR.....	8
4.1	Componentes do secador solar.....	8
4.1.1	Coletor solar.....	8
4.1.2	Câmara de secagem.....	9
4.1.3	Fonte de energia auxiliar.....	9
4.2	Modo de exposição.....	11
4.2.1	Secagem direta.....	11
4.2.2	Secagem indireta.....	13
4.3	Modo de passagem do ar.....	14
4.3.1	Convecção natural.....	14
4.3.2	Convecção forçada.....	14
5	METODOLOGIA	16
5.1	Definição do problema.....	16
5.1.1	Avaliação térmica.....	18
5.1.2	Sistema com biomassa.....	19
5.1.3	Sistema elétrico.....	21
5.2	TRNSYS.....	23
6	RESULTADOS.....	26
6.1	Caso 1 – Dia 03 de agosto.....	26
6.2	Caso 2 – Dia 15 de dezembro.....	30
6.3	Caso 3 – Dia 02 de outubro.....	35
6.4	Análise comparativa.....	39
7	CONCLUSÃO	44
7.1	Recomendações para trabalhos futuros.....	45
	REFERÊNCIAS	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Carta psicrométrica simplificada.(MSPC, 2016)	6
Figura 4.1 Coletor solar de placa plana. (Adaptado de Languri e Ganji, 2011).....	9
Figura 4.2 Secador solar com exposição direta. (Sharma et al., 1995)	12
Figura 4.3 Secador solar com exposição indireta. (Adaptado de Madhlopa et al., 2002).....	13
Figura 4.4 Secador solar com fluxo de ar por convecção natural. (Adaptado de Ekechukwu e Norton, 1999)	14
Figura 4.5 Secador solar com fluxo de ar por convecção forçada. (Adaptado de Mohanraj e Chandrasekar, 2008).....	15
Figura 5.1 Modelo do secador solar proposto.	17
Figura 5.2 Esquema do secador solar com biomassa.	19
Figura 5.3 Esquema do secador solar com resistores elétricos.....	21
Figura 5.5 Esquema de um sistema de aquecimento de água desenvolvido no TRNSYS.	23
Figura 5.6 Esquema do TRNSYS da simulação do coletor solar.....	24
Figura 5.7 Esquema do TRNSYS da simulação do sistema com biomassa.....	25
Figura 5.8 Esquema do TRNSYS da simulação do sistema energia elétrica.	25
Figura 6.1 Perfis de temperatura ambiente, da placa absorvedora e da saída do ar do coletor solar referente ao dia 03 de agosto.	26
Figura 6.2 Irradiação horária, ganho de energia útil e energia extra ao longo do dia 03 de agosto.	27
Figura 6.3 Total de energia, por hora, para atingir a temperatura de 70°C para o dia 03 de agosto, durante o período das 9 às 15 horas.	28
Figura 6.4 Perfis de temperatura ambiente, da placa absorvedora e da saída do ar do coletor solar referente ao dia 15 de dezembro.....	31
Figura 6.5 Irradiação horária, ganho de energia útil e energia extra ao longo do dia 15 de dezembro.	32
Figura 6.6 Total de energia, por hora, para atingir a temperatura de 70° para o dia 15 de dezembro, durante o período das 9 às 15 horas.....	33
Figura 6.7 Perfis de temperatura ambiente, da placa absorvedora e da saída do ar do coletor solar referente ao dia 02 de outubro.	35

Figura 6.8 Irradiação horária, ganho de energia útil e energia extra ao longo do dia 02 de outubro.	36
Figura 6.9 Total de energia, por hora, para atingir a temperatura de 70°C para o dia 02 de outubro, durante o período das 9 às 15 horas.	37
Figura 6.10 Valor presente líquido para os dois sistemas.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 Características do coletor solar instalado na Quinta da Estância.	17
Tabela 5.2 Informações sobre o custo da lenha.....	20
Tabela 5.3 Orçamento para instalação do sistema com biomassa.....	20
Tabela 5.4 Valores para tarifação da energia elétrica. (CEEE, 2017).....	22
Tabela 5.5 Orçamento para instalação do sistema elétrico.....	22
Tabela 6.1 Temperaturas e energias para cada intervalo de hora do dia 03 de agosto.....	29
Tabela 6.2 Custo da energia fornecida pela biomassa para cada intervalo de hora do dia 03 de agosto, para um custo de 0,11 R\$/kg de lenha.	29
Tabela 6.3 Custo da energia fornecida pela concessionária para cada hora do dia 03 de agosto, para um custo de 0,29 R\$/kWh.....	30
Tabela 6.4 Temperaturas e energias para cada intervalo de hora do dia 15 de dezembro.	33
Tabela 6.5 Custo da energia fornecida pela biomassa para cada intervalo de hora do dia 15 de dezembro, para um custo de 0,11 R\$/kg de lenha.	34
Tabela 6.6 Custo da energia fornecida pela concessionária para cada intervalo de hora do dia 15 de dezembro, para um custo de 0,29 R\$/kWh.....	34
Tabela 6.7 Temperaturas e energias para cada intervalo de hora do dia 02 de outubro.....	38
Tabela 6.8 Custo da energia fornecida pela biomassa para cada intervalo de hora do dia 02 de outubro, para um custo de 0,11 R\$/kg de lenha.	38
Tabela 6.9 Custo da energia fornecida pela concessionária para cada intervalo de hora do dia 02 de outubro, para um custo de 0,29 R\$/kWh.....	39
Tabela 6.10 Comparativo entre os custos com biomassa e eletricidade.....	39
Tabela 6.11 Análise financeira do sistema com biomassa.	40
Tabela 6.12 Análise financeira do sistema com biomassa sem custo com insumos.	41
Tabela 6.13 Análise financeira do sistema com energia elétrica.....	42

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica
CPR	Cédula de Produtor Rural
DEMEC	Departamento de Engenharia Mecânica
O&M	Operação e Manutenção
PCI	Poder Calorífico Inferior
PROMECC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Selic	Sistema Especial de Liquidação e de Custódia
TRNSYS	Transient System Simulation
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
VPL	Valor Presente Líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

$Q_{elétrico}$	Energia elétrica fornecida consumida pelo sistema auxiliar [W]
Q_{extra}	Energia, por hora, fornecida pelo sistema auxiliar necessária para atingir a temperatura alvo de 70°C na entrada da câmara de secagem [kJ/h]
Q_{total}	Soma de $Q_{útil}$ e Q_{extra} [kJ/h]
$Q_{útil}$	Ganho de energia útil [kJ/h]
T_{amb}	Temperatura ambiente [°C]
T_{cam}	Temperatura do ar na entrada da câmara de secagem [°C]
T_{col}	Temperatura do ar na saída do coletor solar [°C]
T_{placa}	Temperatura da placa absorvedora [°C]

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A crescente demanda de energia e a flutuação do preço dos combustíveis fósseis estimulam cada vez mais a busca por alternativas energéticas, entre elas a energia solar. Uma das formas mais usuais da utilização da energia solar é a secagem de produtos agroalimentícios, principalmente em países em desenvolvimento. Pequenas propriedades rurais com orçamento pequeno, administradas pela própria família, podem se beneficiar do processo de secagem. O processo de secagem permite ao produtor a venda quase total de sua produção. Dessa forma, produtos que não tenham um bom aspecto para venda direta, mas que estejam em boas condições para consumo, podem ser comercializados após o processo.

Esse tipo de secagem caracteriza-se em expor os produtos a serem secados através da radiação solar, direta ou indiretamente, promovendo a diminuição do percentual de umidade do produto, fator este que favorece o aumento da vida útil dos produtos agroalimentícios e, conseqüentemente, a redução das perdas. Essas perdas levam à redução de disponibilidade local e global de alimentos, diminuem o lucro dos produtores, elevam o preço para os consumidores e afetam negativamente o meio ambiente pela utilização não sustentável dos recursos naturais, apresentam Rodriguez et al., 2014.

Uma técnica de secagem largamente empregada é a secagem ao sol, que consiste em espalhar os alimentos em finas camadas sobre uma superfície plana onde ficam expostos diretamente sob a radiação solar e ao vento. Embora seja um método de baixo custo, por não necessitar de nenhuma estrutura, segundo Esper e Mühlbauer, 1998, podem ocorrer perdas consideráveis durante a secagem devido ao ataque de roedores, pássaros, insetos e microrganismos, além da perda significativa da qualidade em função da falta de controle do processo, como secagem em excesso ou insuficiente, contaminação por insetos e microrganismos, assim como a descoloração pela radiação ultravioleta. Este processo também possui a desvantagem de necessitar uma grande área, elevado tempo de secagem e mão de obra intensa, conforme explicam VijayaVenkataRaman et al., 2012.

Uma alternativa à secagem ao sol é a secagem solar, que consiste em um secador solar que coleta a energia solar por meio de um coletor solar térmico e aquece o ar que, por sua vez, é utilizado na secagem. Esse tipo de secagem, em relação à secagem ao sol, reduz as perdas,

aumenta a qualidade e reduz o tempo de secagem. De acordo com Fellows, 2006, apesar da secagem solar ser uma tecnologia simples e barata, traz como maiores desvantagens a baixa capacidade e o baixo controle das condições de secagem, se comparado a um secador industrial, restringindo sua utilização comercial. Um problema básico da secagem solar é a característica periódica da radiação solar e a sua variação ao longo do dia, limitando seu uso.

No entanto, o processo de secagem pode ser realizado de forma contínua com a inclusão de sistemas de armazenamento (termoacumulação) e/ou fontes de energia auxiliares. Entre as fontes de energia auxiliares destaca-se a biomassa devido à disponibilidade e ao menor custo em áreas rurais de países em desenvolvimento, apresentam Okoroigwe et al., 2013. Por isso, constantes estudos vêm sendo realizados buscando melhorias no funcionamento dos diferentes tipos secadores para expandir sua utilização, principalmente para pequenos produtores.

1.2 Objetivo

Dessa forma, o presente trabalho tem por objetivo principal apresentar a avaliação térmica, energética e financeira para um sistema de aquecimento de ar de um secador solar híbrido de produtos agroalimentícios, o qual utiliza como fonte de calor a energia solar e uma fonte de energia auxiliar.

1.3 Objetivos específicos

- Definir um modelo de secador solar e uma temperatura;
- Avaliar os dados meteorológicos de um ano e definir três dias distintos para as simulações;
- Simular e analisar o comportamento do sistema de aquecimento de ar com o coletor solar e a fonte de energia auxiliar para cada um dos três casos (dias) usando o TRNSYS;
- Simular o secador com a inclusão de dois tipos de fonte de energia auxiliar: biomassa e energia elétrica
- Fazer a avaliação financeira para cada tipo de fonte de energia auxiliar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – ESTADO DA ARTE

Diversos modelos de secadores solares têm sido desenvolvidos ao longo dos anos, desde modelos simples com apenas o coletor solar e a câmara de secagem até conjuntos com vários componentes como sistemas de armazenamento, ventiladores, aquecedores, controladores.

Sharma et al., 1990, modelaram, matematicamente, um secador solar com secagem direta. A temperatura da placa alcançou entre 80°C e 85°C com o secador vazio. Com 20 kg de trigo a temperatura máxima atingiu entre 45°C e 50°C. Essa diminuição de temperatura ocorreu devido ao fator de a maior parte do calor foi utilizada no processo de evaporação da água do produto.

Bala e Woods, 1994, simularam o comportamento de um secador solar de secagem indireta por convecção natural e obtiveram resultados próximos aos dados experimentais. Aumentando o comprimento do coletor, de 2 m para 3 m e depois para 4 m, observou-se um aumento na vazão mássica de ar em função dos efeitos convectivos. No entanto, a temperatura de saída do ar do coletor diminuiu. A distância entre a placa absorvedora e a cobertura de vidro, por onde passa o ar, também foi variada e avaliada, passando de 0,025 m para 0,05 m e depois para 0,075 m, porém, não houve efeito considerável. A altura da chaminé foi analisada com 2 m, 3 m e 4 m, e a influência foi mínima na vazão mássica de ar.

Um secador híbrido utilizando como fonte de energia radiação solar e biomassa foi projetado e fabricado por Bhattacharya et al., 2000, para secagem de banana e pimenta. O teor de umidade desejado foi alcançado em 18 e 22 horas, respectivamente, enquanto na secagem ao sol esse tempo foi de 66 e 48 horas.

Pangavhane et al., 2002 desenvolveram um secador, de secagem indireta e convecção natural para secagem de uvas e conseguiram reduzir o tempo de secagem de 7 para 4 dias em comparação com a secagem ao sol. Além disso, obteve-se um produto de melhor qualidade.

O efeito do formato da placa absorvedora foi estudado por Karim e Hawlader, 2006, experimentalmente e analiticamente. Neste estudo foi comparada a eficiência de uma placa plana e uma placa corrugada em formato de “V” e obteve-se como resultado uma maior eficiência na placa corrugada. Além disso, os mesmos autores compararam a eficiência de um coletor com simples e com dupla passagem de ar pelo coletor solar, chegando à conclusão que a dupla passagem aumenta a eficiência. Além do mais, o aumento da eficiência em coletores

com a dupla passagem foi mais significativo em coletores de placa plana em relação aos coletores de placa corrugada em “V”.

Mohanraj e Chandrasekar, 2008, projetaram, construíram e testaram um secador solar indireto com convecção forçada, para a secagem da polpa do coco. A velocidade ajustada foi de 1,2 m/s, proporcionando uma vazão de 300 m³/h. A temperatura média registrada na entrada da câmara de secagem foi de 43°C, atingindo um pico de 63°C, sendo que o experimento foi realizado apenas durante o dia. A secagem reduziu o teor de umidade de 51,8% para até 7,8%, conferindo à secagem em torno de 75% de produto da alta qualidade.

A combinação de um secador solar de exposição direta, um trocador de calor e um sistema de armazenamento foi projetada e construída por Amer et al., 2010. Esse sistema possui um tanque com água com aquecedores elétricos que fornece energia adicional ao secador solar, através de um trocador de calor, em dias nublados ou à noite. Utilizado para secagem de banana, foi realizada a secagem de 30 kg no período de 8 horas com a diminuição do teor de umidade de 82% para 18%. Para o mesmo período, a secagem ao sol reduziu o teor de umidade para apenas 62%.

Yang et al., 2012 realizaram uma análise experimental em diferentes tipos de coletores solares variando em cada coletor um dos seguintes cinco parâmetros considerados críticos: a resistência na transferência de calor no canal por onde escoar o ar; altura entre a placa e a cobertura; propriedades óticas da cobertura; emitância da placa absorvedora; e a condutividade térmica do isolamento inferior. A eficiência térmica foi utilizada como principal indicador dos efeitos. Os resultados indicaram que o efeito mais significativo no aumento da eficiência térmica foi provocado pela diminuição da resistência na transferência de calor no canal por onde escoar o ar.

A avaliação de um secador solar tipo placa plana para produtos agroalimentícios foi realizada por Basso et al., 2016, utilizando como ferramenta o método *f*-chart. A energia fornecida por uma fonte auxiliar foi reduzida em 98,17% com a modificação de dois parâmetros, o comprimento do coletor e o espaçamento entre a placa absorvedora e o isolamento inferior.

3 PROCESSO DE SECAGEM

A secagem é um processo que consiste na remoção de umidade de um produto. Ekechukwu, 1999, descreve quatro métodos de secagem. Quimicamente, através do uso de dissecantes químicos ou decomposição química da água. Por liofilização ou secagem a frio, na qual o produto é congelado e logo após é submetido a baixas pressões, promovendo a retirada da água por sublimação, ou seja, passando da fase sólida para a líquida. Mecanicamente, através de compressão, força centrífuga ou gravidade. E secagem térmica, que é a meio mais utilizado na secagem de produtos agroalimentícios, destaca Ekechukwu, 1999, e é o tipo de secagem utilizada neste trabalho, a qual envolve a evaporação da umidade do produto com o fornecimento de calor. Esse tipo de processo envolve simultaneamente transferência de calor e de massa. Diferentes tipos de fontes de calor são utilizados para essa finalidade, as mais usuais são os combustíveis fósseis, a eletricidade e a energia solar, afirma Ekechukwu, 1999.

Para Celestino, 2010, embora algumas propriedades nutritivas dos alimentos possam ser perdidas em processos com tratamento térmico, têm-se vantagens, entre as quais se encontram:

- Aumento da vida útil do produto;
- O valor nutritivo concentra-se em porções menores;
- O produto torna-se leve, compacto e suas qualidades permanecem inalterados por longos períodos, facilitando o transporte e comercialização;
- Secagem é um processo de baixo custo e não necessita mão de obra especializada;
- Reduz as perdas pós-colheita.

3.1 Mecanismo de secagem

A capacidade de secagem de um alimento, através da secagem térmica, está relacionada com três fatores: quantidade de vapor d'água presente no ar, temperatura do ar e quantidade de ar que passa pelo alimento.

A quantidade de vapor d'água pode ser expressa como umidade absoluta, que é a massa de vapor d'água por unidade de massa de ar seco, expressa em kg/kg, ou como

umidade relativa, que é a relação entre a pressão parcial do vapor d'água e a pressão de saturação do vapor na mesma temperatura.

Em relação à temperatura, dois tipos de medida são utilizados. A temperatura de bulbo seco, que é a temperatura do ar medida por um termômetro de bulbo. Já a temperatura de bulbo úmido é obtida colocando um material poroso umedecido, geralmente algodão, em torno do bulbo, nesse caso, o calor é retirado do bulbo através a evaporação a água, diminuindo, assim, a temperatura. Dessa forma, a temperatura de bulbo úmido representa a menor temperatura que pode ser alcançada apenas pela evaporação da água.

O processo de secagem depende fortemente das trocas que ocorrem nas propriedades (temperatura e umidade) da mistura ar seco – vapor de água, que constituem o ar de secagem (ar úmido). O estudo dessas propriedades é realizado através da psicrometria e estão inter-relacionadas nas cartas psicrométricas, Figura 3.1.

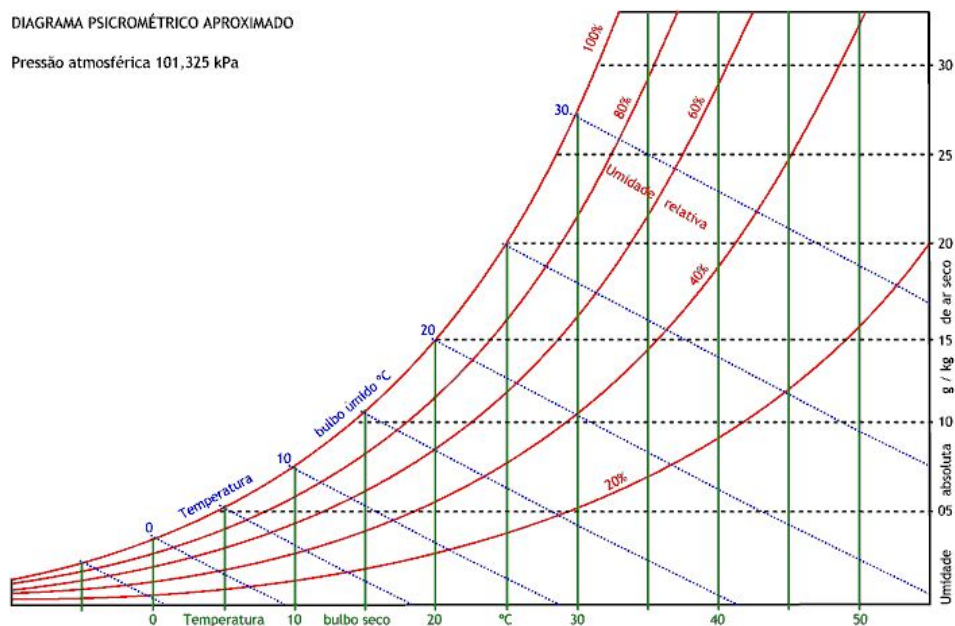


Figura 3.1 - Carta psicrométrica simplificada.(MSPC, 2016)

O terceiro fator que influencia na taxa de secagem é a velocidade do ar. O ar passa sobre o alimento úmido e o vapor d'água se difunde através da camada limite de ar em torno do alimento e é levado pelo ar. Dessa maneira, forma-se um gradiente de pressão de vapor d'água entre a superfície e o interior do alimento, o qual promove a remoção de água, explica Fellows, 2006.

3.2 Efeito da secagem nos alimentos

As alterações físicas e químicas que ocorrem no alimento no processo de secagem resultam em alterações nas seguintes características dos alimentos: textura, sabor e aroma, cor e valor nutricional. A textura do alimento está relacionada com sua consistência, ou seja, dureza, maciez, fibrosidade e suculência, afirma Celestino, 2010. Em alguns alimentos, por exemplo, altas temperaturas de secagem promovem uma rápida remoção da água, ocasionando uma concentração de solutos na superfície e provocando um endurecimento superficial, destaca Fellows, 2006.

Sabor e aroma estão ligados diretamente e evaporação de substâncias voláteis presentes nos alimentos, assim, muitos alimentos desidratados apresentam menos aroma que um alimento original. Fellows, 2006, destaca que o grau de perda dos voláteis depende da temperatura e do teor de umidade do alimento e da pressão de vapor e solubilidade no vapor d'água. A alteração na cor de um alimento pode ter diversas origens, entre as mais comuns encontra-se a exposição ao calor e o processo de oxidação no alimento durante a secagem, alterando as características da superfície e, conseqüentemente, a refletividade e a cor, relata Fellows, 2006.

A composição nutricional de um alimento pode variar significativamente tanto no procedimento de secagem como nos métodos de preparo e na estocagem. Fellows, 2006, cita como exemplo a vitamina C, que em função da sua solubilidade em água, é sensível ao calor e à oxidação, sendo necessários curtos tempos de secagem, enquanto que outras vitaminas (A, D, E e K), assim como os ácidos graxos, estão contidos na matéria seca e não ocorrem perdas significativas durante a secagem.

4 SECADOR SOLAR

O secador solar é um dispositivo que tem por finalidade a diminuição do teor de umidade de um produto utilizando o sol como fonte de energia. É um equipamento simples, mas que pode possuir diversas combinações de componentes na sua construção. Seus principais componentes são o coletor solar e a câmara de secagem. No entanto, alguns outros elementos podem ser adicionados ao conjunto, como por exemplo, um sistema de acumulação térmica e uma fonte de energia auxiliar. Quanto à sua classificação, podem ser definidos basicamente em dois tipos: em função do modo de exposição e do modo de passagem do ar.

4.1 Componentes do secador solar

O modelo de secador solar em estudo é constituído por um coletor solar, uma câmara de secagem e uma fonte de energia auxiliar, componentes estes descritos a seguir.

4.1.1 Coletor solar

O coletor solar é o maior componente do sistema de um secador solar. Segundo Duffie e Beckman, 2013, o coletor solar é um tipo de trocador de calor que transforma a energia proveniente da radiação solar em calor, que posteriormente é transferido para um fluido de trabalho (normalmente água ou ar). A absorção da radiação solar é feita por uma placa absorvedora, que aquece e transfere essa energia para o fluido. Em relação ao tipo de absorção da radiação solar há, basicamente, dois tipos de coletores solares, com e sem concentração. Neste trabalho utilizou-se um coletor solar de placa plana sem concentração.

O coletor solar sem concentração caracteriza-se por possuir a superfície de absorção com praticamente a mesma área do coletor. Trabalha com temperaturas baixas a moderadas, podendo atingir cerca de 100°C acima da temperatura ambiente, afirmam Duffie e Beckman, 2013. São equipamentos mais baratos e de fácil construção e utilizam como fonte tanto a radiação direta como a difusa. São usualmente utilizados no aquecimento de água, ar, edificações, em alguns processos industriais e na secagem de produtos agroalimentícios.

O coletor solar mais utilizado é o de placa plana por ser barato, de fácil construção e manutenção. Possui posição fixa, não necessitando seguir a trajetória do sol, apenas com orientação para o equador e com um ângulo de inclinação variando em torno de 10 a 15° sobre a latitude, dependendo da aplicação, afirma Kalogirou, 2003. Esse coletor utiliza tanto a radiação difusa como a direta, complementa Ebuy, 2007. Tipicamente, utiliza-se uma cobertura transparente (vidro ou polímero) acima da placa absorvedora com o objetivo de reduzir as perdas convectivas e radiativas para a atmosfera, além de isolamento na parte inferior e nas laterais do coletor. A Figura 4.1 mostra um coletor solar de placa plana com convecção natural, cobertura simples e passagem de ar por baixo da placa absorvedora.



Figura 4.1 - Coletor solar de placa plana. (Adaptado de Languri e Ganji, 2011)

4.1.2 Câmara de secagem

A câmara de secagem consiste no local no qual os alimentos ficaram dispostos durante o processo de secagem, normalmente distribuídos em cima de grelhas e com certo espaçamento entre si para facilitar a passagem do ar de secagem. Normalmente o ar aquecido entra pela parte inferior da câmara, passa pelo alimento fornecendo calor e leva consigo a umidade através de uma chaminé localizada na parte superior da câmara.

4.1.3 Fonte de energia auxiliar

Alguns dos problemas associados à secagem solar é intermitência da radiação solar ao longo do dia em função de períodos de chuva ou dias nublados, além de dificilmente ser alcançada uma temperatura alta a suficiente para uma secagem adequada devido à baixa intensidade da radiação solar. A utilização de uma fonte de energia auxiliar possibilita o funcionamento ininterrupto do secador independente das condições meteorológicas, inclusive

no período da noite. A fonte mais comum é a queima de biomassa, mas também são utilizados sistemas de aquecimento do ar com energia elétrica. Estes dois sistemas foram abordados neste trabalho para verificar a viabilidade financeira de cada um.

4.1.3.1 Biomassa

A biomassa é toda matéria orgânica não fóssil, de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada na produção de calor, na produção de combustíveis sólidos líquidos e gasosos, explica Portal Brasil, 2011. Ao contrário dos combustíveis fósseis, a biomassa é considerada um recurso natural renovável, o qual possui uma alta velocidade de renovação. Segundo Biomassa e Bioenergia, 2011, as biomassas mais utilizadas são a lenha, o bagaço da cana-de-açúcar, galhos e folhas de árvores, papéis, papelão e é o elemento principal de combustíveis como o biogás e o biodiesel.

A lenha destaca-se por ser a mais comum fonte de energia em áreas rurais de países em desenvolvimento, destacam Bena e Fuller, 2002. Assim, foi escolhida a lenha como combustível utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

4.1.3.2 Energia elétrica

A utilização da energia elétrica no processo de secagem, como fornecedora de calor para os produtos, não é usual em função do alto valor do quilowatt-hora em relação a outros insumos como gás natural, biomassa, etc., sendo utilizada apenas como fonte de energia para o funcionamento de equipamento como ventiladores, esteiras, controladores, etc. Além disso, existem regiões nas quais ainda não existe disponibilidade do sistema elétrico. No entanto, em alguns casos é possível que o uso de um sistema elétrico para a secagem seja viável se for levado em conta os custos de instalação, de operação e de insumos.

4.2 Modo de exposição

O modo de exposição de um secador solar representa o meio pelo qual o alimento recebe a energia proveniente do Sol. Existem dois modos de exposição, a secagem direta e a secagem indireta, pode haver, ainda, a combinação dos dois modos.

Além desses dois modos existe a secagem ao sol que, embora não seja um modo aplicado a um secador solar, uma breve descrição torna-se necessária por ser uma das técnicas mais antigas utilizadas pelo homem e é ainda um método de secagem largamente empregado, sendo adotado por aproximadamente 80% dos agricultores, relata Murthy, 2009. Em vista disso, esse tipo de secagem acaba sendo um parâmetro para a avaliação de secadores solares.

A secagem ao sol consiste simplesmente na disposição dos produtos a serem secados em uma grande área aberta, expostos ao sol e ao vento. A grande vantagem desse tipo de secagem é o baixo custo, pois não utiliza nenhum equipamento. No entanto, possui diversas desvantagens: necessita de uma grande área de exposição, é um processo lento, não é possível a secagem à noite ou em períodos de chuva, ocorrem grandes perdas em decorrência de não ter controle de temperatura, os alimentos ficam à mercê de excesso de umidade, fungos, insetos, roedores, aves, além de fornecer um produto de baixa qualidade.

4.2.1 Secagem direta

O secador solar de secagem direta, também conhecido como *solar cabinet dryer*, consiste basicamente em um gabinete (câmara) isolado termicamente nas laterais e no fundo, com cobertura de algum material transparente (como vidro ou acrílico) logo acima da bandeja onde são dispostos os produtos a serem secados, como mostra a Figura 4.2. Há orifícios no fundo para a entrada de ar e na parte superior das laterais para a saída do ar.

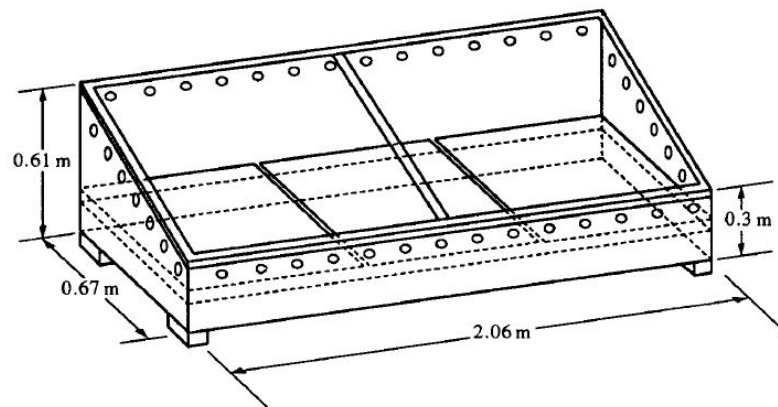


Figura 4.2 - Secador solar com exposição direta. (Sharma et al., 1995)

Nesse tipo de secagem, a radiação solar utilizada no processo é transmitida através da cobertura transparente de vidro, parte dela é refletida para a atmosfera e o restante é transmitida para dentro do secador. Uma parte dessa radiação é refletida de volta pelas superfícies internas do secador e pelo produto a ser secado e a radiação remanescente é absorvida pelo produto. Essa radiação absorvida promove um aumento na temperatura do produto e este começa a emitir radiação de comprimento de onda longo, a qual não volta para a atmosfera devido à presença da cobertura, afirmam Sharma et al., 2009. Esse fenômeno eleva a temperatura dentro do gabinete. Além disso, a cobertura evita as perdas por convecção para o ambiente, fator importante para elevar das temperaturas na cabine e no produto, complementam Hii et al., 2012. Esse aumento de temperatura permite o deslocamento de ar, por meio da convecção natural, da parte inferior do secador para as aberturas na parte superior das laterais, levando a umidade para fora da cabine.

Embora um secador de secagem direta seja barato e fácil construção, Hii et al., 2012, destacam as seguintes limitações:

- Pode haver superaquecimento, danificando o produto;
- Baixa taxa de remoção de vapor, provocando baixa taxa de secagem;
- Limitado a pequenas escalas em função da baixa capacidade;
- Descoloração do produto devido à exposição direta à radiação solar;
- Condensação da umidade no lado interno da cobertura reduz a transmissividade;
- Uso limitado de revestimentos na placa absorvedora e na cabine.

4.2.2 Secagem indireta

Os secadores solares com exposição indireta diferem-se dos secadores com exposição direta com respeito à transferência de calor e à remoção de vapor, explicam Hii et al., 2012. Nesse tipo de secador o produto a ser secado não fica diretamente exposto à radiação solar. O secador é composto basicamente em duas partes: o coletor solar, que absorve a radiação e aquece o ar, e a câmara de secagem, onde os produtos ficam dispostos em bandejas, pelas quais o ar aquecido passa, aquece o produto e remove a umidade, como exemplifica a Figura 4.3.

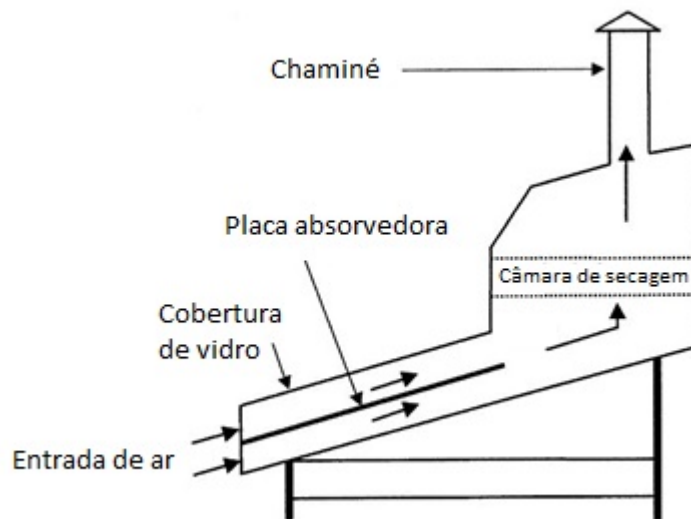


Figura 4.3 - Secador solar com exposição indireta. (Adaptado de Madhlopa et al., 2002)

Segundo Sharma et al., 2009, a secagem ocorre basicamente pela diferença de concentração de umidade entre o ar de secagem e o ar em torno da superfície do produto. Nesse sistema, o ar é aquecido durante a passagem pela placa absorvedora, aquecida pela radiação solar, que está localizada logo abaixo da câmara de secagem. O ar aquecido passa pela câmara de secagem e fornece calor para a evaporação da umidade dos produtos. Este foi o tipo de secagem utilizada no trabalho.

Hii et al., 2012, destacam as seguintes vantagens do secador de exposição indireta:

- Melhor controle de secagem e melhor qualidade nos produtos que na secagem ao sol;
- Evita-se a ocorrência de danos no produto, uma vez que a radiação não incide diretamente;

- Recomendado para produtos fotossensíveis;

4.3 Modo de passagem do ar

A passagem do ar através do secador solar pode ocorrer com ou sem o auxílio de ventiladores, sendo estes dois modos chamados de convecção natural ou por convecção forçada, respectivamente.

4.3.1 Convecção natural

Secadores solares com convecção natural são geralmente chamados de secadores passivos por não utilizar ventiladores para promover o movimento do ar, assim as velocidades são menores do que na convecção forçada. Nesse caso, o fluxo de ar ocorre devido à diferença de massa específica provocada pela mudança de temperatura nas camadas do fluido, o ar aquecido (mais leve) pela placa absorvedora sobe, promove a secagem do produto e sai pela chaminé, como mostra a Figura 4.4.

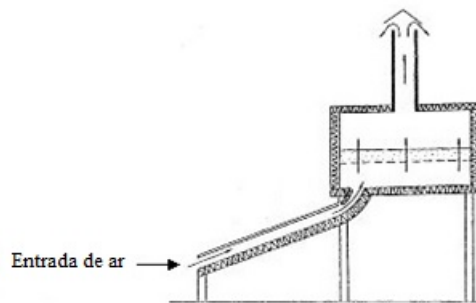


Figura 4.4 - Secador solar com fluxo de ar por convecção natural. (Adaptado de Ekechukwu e Norton, 1999)

4.3.2 Convecção forçada

A convecção forçada caracteriza-se por necessitar de um ventilador para promover a circulação de ar no interior do secador solar. Esse tipo de sistema é tipicamente utilizado em aplicações de larga escala, afirmam Hii et al., 2012. As vazões de ar são maiores, o que promove uma maior taxa de secagem, destaca Fellows, 2006. Esse ventilador pode estar

localizado tanto na saída da chaminé como na entrada do coletor solar, como é mostrado na Figura 4.5. Este modo de passagem do ar foi o modo utilizado no secador avaliado nesse trabalho.

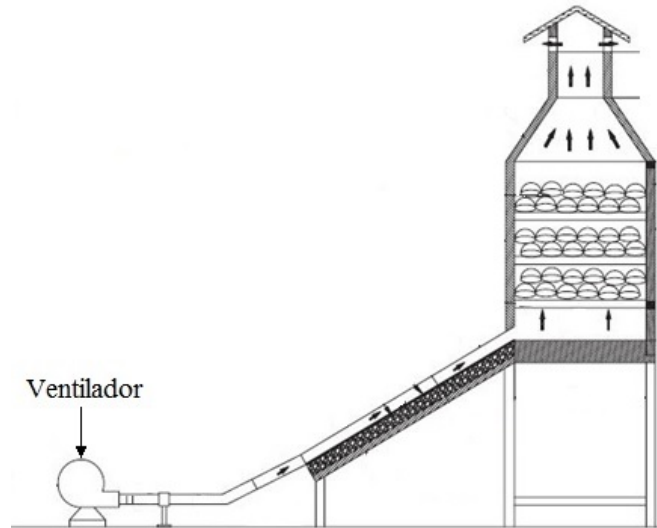


Figura 4.5 - Secador solar com fluxo de ar por convecção forçada. (Adaptado de Mohanraj e Chandrasekar, 2008)

5 METODOLOGIA

Nesta seção é detalhada a metodologia utilizada no projeto do secador solar híbrido. São apresentadas a definição do problema proposto e a descrição do funcionamento do software TRNSYS, utilizado na realização das simulações, seus componentes e a sequência de simulações realizadas. É feita a avaliação térmica, energética e financeira para cada dia e para cada fonte auxiliar de fornecimento de energia.

5.1 Definição do problema

O problema proposto consiste avaliação térmica, energética e financeira para um sistema de aquecimento de ar de um secador solar híbrido de produtos agroalimentícios, utilizando como fonte de energia a radiação solar e um sistema auxiliar de fornecimento de energia. O modelo do secador proposto foi baseado no protótipo instalado na Fazenda Quinta de Estância, localizada na cidade de Viamão, região metropolitana de Porto Alegre. O protótipo não tem uma fonte de energia auxiliar, funcionando apenas com a energia proveniente da radiação solar.

O secador caracteriza-se por apresentar um coletor solar do tipo placa plana de exposição indireta, com cobertura de vidro simples e passagem de ar por baixo da placa absorvedora, conforme Figura 5.1. Suas dimensões são de 2 m de comprimento por 1 m de largura. A análise foi realizada considerando a localização do coletor solar na área rural da cidade de Porto Alegre, latitude de 30°01', voltado para o norte e com inclinação de 42°. Outras características do coletor estão apresentadas na Tabela 5.1. Os coeficientes de perdas por cima e por baixo representam as perdas do coletor solar por convecção e radiação que levam em conta diversas variáveis como isolamento, tipo de cobertura, temperatura e foram calculados segundo a metodologia apresentada por Duffie e Beckman, 2013.

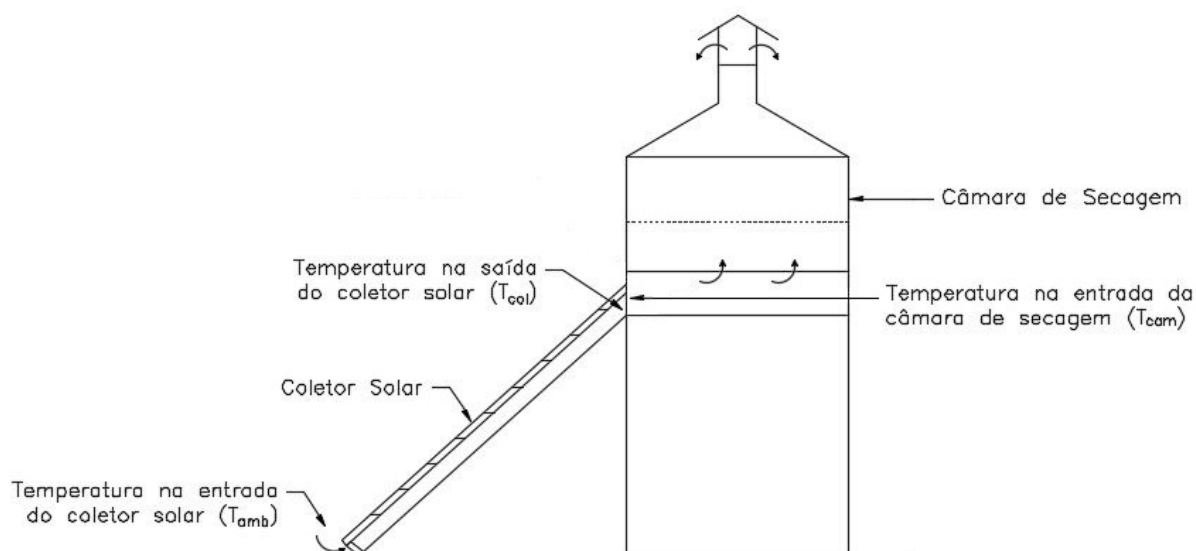


Figura 5.1 - Modelo do secador solar proposto.

Tabela 5.1 - Características do coletor solar instalado na Quinta da Estância.

Parâmetro	Valor
Comprimento (m)	2
Largura (m)	1
Área do coletor (m ²)	2
Local	Porto Alegre
Latitude	30°01'
Inclinação do coletor solar	42°
Cobertura	vidro simples
Coeficiente de perdas por cima (kJh ⁻¹ m ⁻² K ⁻¹)	5
Coeficiente de perdas por baixo (kJh ⁻¹ m ⁻² K ⁻¹)	3

A temperatura utilizada no processo de secagem de produtos agroalimentícios varia conforme o tipo de produto. Além disso, há casos onde, para um mesmo produto, são utilizadas diferentes temperaturas de secagem, como estudado em Cruz et al., 2012..

Com temperaturas acima de 55°C, a velocidade das reações bioquímicas envolvendo atividades enzimáticas é diminuída, afirma Cruz et al., 2012 apud Castro et al., 2005. No entanto, com temperaturas muito elevadas, a casca do alimento torna-se seca e rígida antes que o centro esteja desidratado, destaca Maia, 2014, reduzindo assim a qualidade do alimento. Meloni, 2003, informa temperaturas para secagem de alguns tipos de alimentos como 65°C para manga, 70°C para maçã, 60 a 65°C para banana, 65 a 70°C para tomate e cenoura.

Dessa forma, foi definido como objetivo principal atingir a temperatura do ar de 70°C na entrada da câmara de secagem (T_{cam}). Além da temperatura, a vazão de ar também tem significativa influência na taxa de secagem, sendo que neste trabalho utiliza-se como referência a vazão utilizada por Ebuy, 2007, de 100 kg/h.

5.1.1 Avaliação térmica

Considerando-se a possibilidade do secador funcionar durante todos os dias do ano, ou seja, operar sob diferentes condições meteorológicas, foram selecionados três dias do ano, com características de temperatura e de radiação solar distintas, para a avaliação térmica. Inicialmente, foram obtidos valores de temperatura e radiação solar para todos os dias de um ano, a partir da base de dados do TRNSYS. Com base nessas informações foram selecionados três dias para a realização das simulações através do software TRNSYS.

No caso 1 o dia selecionado foi o dia 03 de agosto, um dia de inverno. Esse dia caracteriza-se por possuir uma das mais baixas temperaturas ambiente do ano. No caso 2 o dia escolhido foi o dia 15 de dezembro, um dia com alta temperatura ambiente e a alta incidência da radiação solar no plano do coletor comparado com os outros dias. No caso 3 o dia selecionado foi o dia 02 de outubro, pois foi um dos dias do ano que apresentou menor incidência da radiação solar no plano do coletor.

Os dados das simulações realizadas foram obtidos para o intervalo das 9 horas às 15 horas, o qual compreende a janela solar. A janela solar é importante porque é o intervalo no qual é recebida a maior quantidade de energia proveniente do sol, buscando, assim, aproveitar o máximo dessa energia pelo coletor solar.

A apresentação dos resultados das simulações para os três casos seguiu a seguinte ordem. Inicialmente, foi mostrado o comportamento da radiação solar no plano horizontal e no plano inclinado. Em seguida, foram apresentados os perfis de distribuição da temperatura ambiente (T_{amb}), da temperatura de saída do coletor do ar de secagem (T_{col}) e da temperatura da placa absorvedora do coletor solar (T_{placa}). Logo após, foi apresentado o ganho de energia útil (Q_{util}), que representa a taxa líquida na qual a energia é transferida para o fluido através do coletor solar.

Como se propôs uma condição na qual a temperatura do ar de entrada na câmara de secagem (T_{cam}) deve ser igual a 70°C e apenas com a radiação solar não foi possível alcançar

esta meta, foi necessária a inclusão de uma fonte de energia auxiliar, durante o período das 9 às 15 horas, que complemente o ganho de energia útil pelo coletor solar até que seja alcançada a temperatura de 70°C. Para esta finalidade foram utilizados dois tipos de fonte de energia auxiliar, a energia proveniente da queima de biomassa e a energia proveniente da rede elétrica, fornecida por uma concessionária.

5.1.2 Sistema com biomassa

O sistema de energia auxiliar alimentado pela energia proveniente da queima da biomassa funciona com a queima de lenha de eucalipto (20% de umidade), com um poder calorífico inferior de 14,13 MJ/kg (ADETEC, 2017), em uma fornalha. Os gases de exaustão da fornalha passam por um trocador de calor ar-ar e fornecem calor para o ar de secagem. Entre a fornalha e o trocador de calor há um *damper*, controlado por um termostato presente na saída do trocador de calor, que regula a passagem do ar a temperatura ambiente para misturar-se com os gases de exaustão evitando que estes forneçam calor em excesso e a temperatura do ar na câmara de secagem supere os 70°C. O consumo de energia elétrica do atuador do *damper* (2,5 W em funcionamento e 0,2 W em espera) e dos comandos foi desconsiderado, por não ser significativo. O esquema deste sistema é mostrado na Figura 5.2.

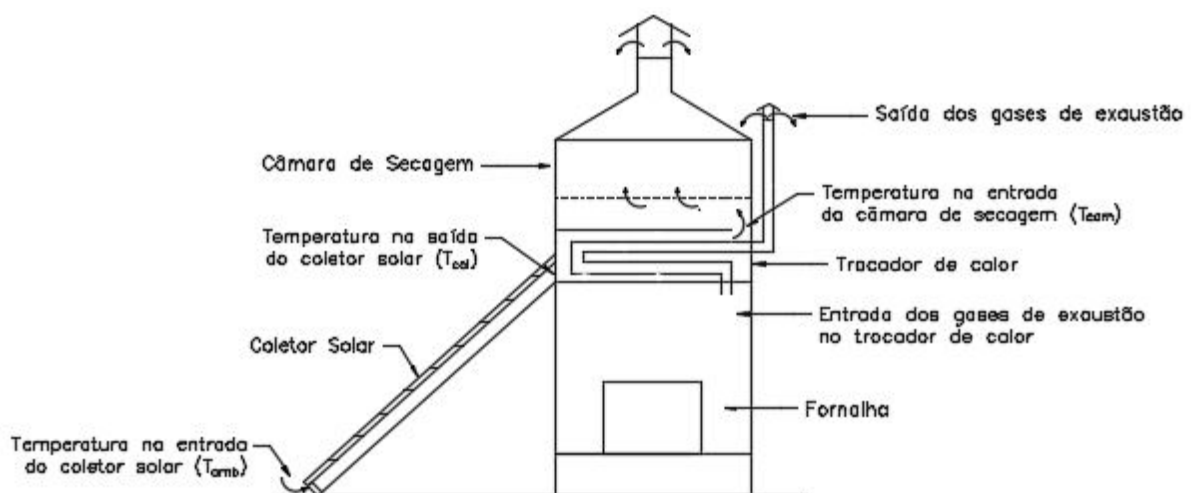


Figura 5.2 - Esquema do secador solar com biomassa.

A partir da energia total proveniente da lenha, com base no poder calorífico inferior, 22% foram transferidos para o ar de secagem, valor este encontrado por Bena e Fuller, 2002.

O custo da lenha foi calculado com base nas informações da Tabela 5.2. O valor do metro cúbico foi obtido para a compra de carga fechada de 35 m³. Dois cenários foram avaliados, em um cenário considerou-se o custo de compra da lenha e no outro cenário considerou-se que, por ser uma área rural, dispõe-se deste insumo sem nenhum custo.

Tabela 5.2 - Informações sobre o custo da lenha.

Valor da lenha (R\$/m ³)	50
Densidade aparente (kg/m ³)	450*
Custo da lenha (R\$/kg)	0,11

*Fonte: Adetec, 2017

A análise financeira do sistema com biomassa foi realizada para verificar o custo de operação ao longo dos anos. Para efeitos comparativos, utilizou-se como parâmetro o somatório do valor presente líquido de cada sistema, a taxa de juros foi definida como igual à taxa Selic, de 13% ao ano, O reajuste anual da lenha, dos custos com operação e manutenção, assim como a renda, foi fixado em 4,5%, valor este baseado na meta da inflação fixada para o ano de 2017 pelo Banco Central do Brasil, 2015, pela Resolução nº 4.419, de 25/6/2015, e os custos com operação e manutenção foram delimitados como 10% do valor da instalação. O custo total da instalação foi orçado em R\$ 4.485,67, referente à Tabela 5.3 e foi considerado uma renda anual de R\$ 2.400,00.

Tabela 5.3 - Orçamento para instalação do sistema com biomassa.

Item	Valor
Fornalha	R\$ 700,00
Damper com atuador	R\$ 581,77
Termostato	R\$ 53,90
Trocador de calor	R\$ 1.500,00
Instalação	R\$ 1.000,00
Interligações de comando	R\$ 200,00
Interligações elétricas	R\$ 200,00
Outros	R\$ 250,00
TOTAL	R\$ 4.485,67

5.1.3 Sistema elétrico

O sistema de energia auxiliar alimentado pela energia elétrica consiste em alimentar um conjunto de resistores elétricos, localizado na saída do coletor solar, que por sua vez fornece calor para o ar de secagem. Foram selecionados três resistores com diferentes potências para atender a demanda: de 1000 W, 500 W e 200 W. O controle de temperatura é realizado por um termostato presente na estrada da câmara de secagem, o qual aciona um contator que libera ou não a passagem de energia elétrica para o resistor. O esquema representativo é mostrado na Figura 5.3.

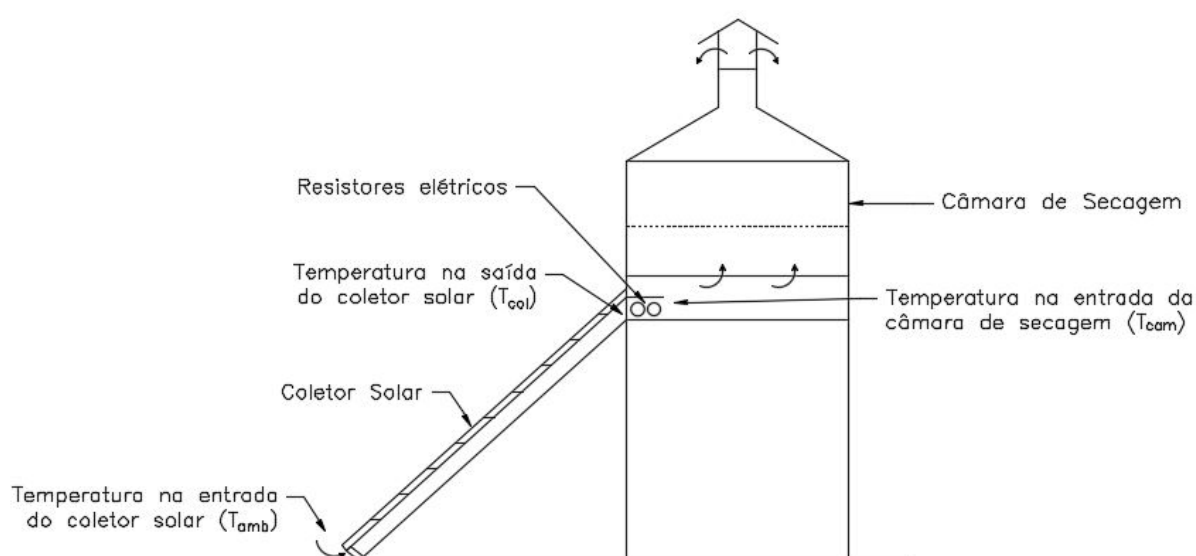


Figura 5.3 - Esquema do secador solar com resistores elétricos.

Para cálculo do consumo de energia elétrica desse sistema considerou-se que 95% da potência dos resistores elétricos convertida em calor foi transmitida para o ar de secagem. Assim, o cálculo do $Q_{elétrico}$ resulta da multiplicação de Q_{extra} por 0,95. O consumo do termostato foi desconsiderado por ser muito pequeno. Além disso, para cálculo do custo do quilowatt-hora utilizou-se os dados da Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Valores para tarifação da energia elétrica. (CEEE, 2017)

Classe de tarifa	Rural com CPR*
R\$/kWh	0,27789
ICMS (%)	-
COFINS (%)	2,83%
PIS (%)	0,61%
Custo da energia (R\$/kWh)	0,2878

*Célula de Produtor Rural

A análise financeira do sistema elétrico foi realizada para verificar o custo de operação ao longo dos anos. Para efeitos comparativos, utilizou-se como parâmetro o somatório do valor presente líquido de cada sistema, a taxa de juros foi definida como igual à taxa Selic, de 13% ao ano. O reajuste anual dos custos com operação e manutenção, energia elétrica, assim como a renda, foi fixado em 4,5%, valor este baseado na meta da inflação fixada para o ano de 2017 pelo Banco Central do Brasil, 2015, pela Resolução nº 4.419, de 25/6/2015. Os custos com operação e manutenção foram delimitados como 10% do valor da instalação. O custo total da instalação foi orçado em R\$ 1.409,10, referente à Tabela 5.5 e foi considerado uma renda anual de R\$ 2.400,00.

Tabela 5.5 - Orçamento para instalação do sistema elétrico.

Item	Valor
Conjunto resistores	R\$ 330,00
Termostato 70 °C	R\$ 44,90
Contator 220 V, 25 A	R\$ 103,96
Disjuntor 25 A	R\$ 42,66
Cabos 120°C 4 mm ²	R\$ 47,58
Quadro comando	R\$ 140,00
Interligações elétricas	R\$ 150,00
Instalação	R\$ 250,00
Outros (infraestrutura)	R\$ 300,00
TOTAL	R\$ 1.409,10

5.2 TRNSYS

O TRNSYS é um software utilizado na simulação do comportamento de sistemas em regime transiente. Entre as principais aplicações encontram-se sistemas solares térmicos e fotovoltaicos, sistemas eólicos, sistemas de cogeração de energia, sistemas de refrigeração e ar condicionado e sistemas elétricos.

O software é composto por duas partes. A primeira, conhecida como *kernel*, é responsável pela leitura e processamento dos arquivos de entrada, resolve os sistemas iterativamente, além de possuir utilitários que determinam propriedades termofísicas, inverte matrizes, interpola dados externos, entre outras funções (TRNSYS, 2017). A segunda parte é uma extensa biblioteca de componentes (*Types*), onde cada um modela o desempenho de uma parte do sistema.

Essa estrutura modular permite dar ao software uma grande flexibilidade. Um sistema complexo, por exemplo, pode ser representado por uma rede de pequenos componentes interligados entre si. Um componente pode representar um ventilador, uma placa solar, uma válvula, uma turbina, dados meteorológicos, etc. No entanto, se a biblioteca não possuir o componente que corresponde ao mecanismo desejado, é possível criar ou alterar um existente, pois cada componente é modelado matematicamente por um conjunto de equações e o TRNSYS resolve esse sistema para cada intervalo de tempo, utilizando métodos analíticos e numéricos e o fluxo de informações entre os componentes, destaca Lisboa, 2012. A Figura 5.4 demonstra um exemplo de um sistema de aquecimento de água desenvolvido no TRNSYS utilizando oito componentes (*Types*) diferentes,

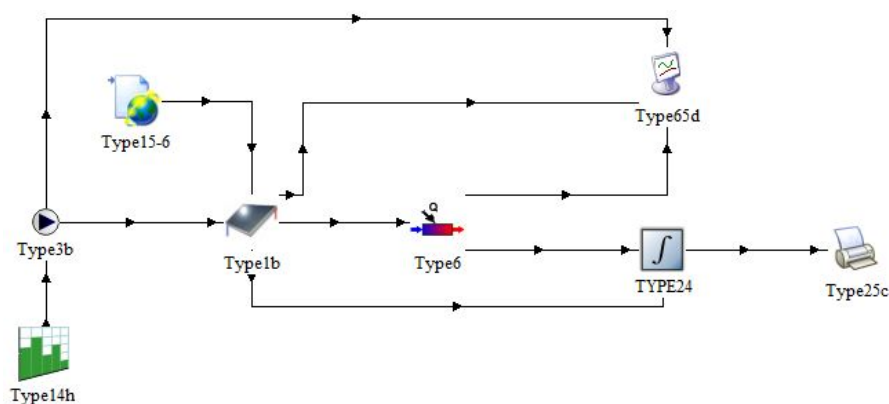


Figura 5.4 - Esquema de um sistema de aquecimento de água desenvolvido no TRNSYS.

Na qual,

- *Type14h* - agenda, delimita o funcionamento da bomba;
- *Type3b* – bomba;
- *Type15-6* – dados meteorológicos;
- *Type1b* – coletor solar;
- *Type6* – aquecedor auxiliar;
- *Type24* – integrador, soma a energia fornecida em um período;
- *Type65d* – mostra na tela os resultados da simulação;
- *Type25c* – grava os resultados da simulação em um arquivo.

Os dados meteorológicos utilizados na simulação são obtidos diretamente da base de dados do TRNSYS, os quais foram gerados pelo software Meteonorm sob licença da empresa Meteotest, apresentam Klein et al., 2014. Segundo Meteonorm, 2017, nos períodos de 1961 a 1990 e 2000 a 2009 estão disponíveis os dados de temperatura, umidade, velocidade do vento e precipitação, enquanto nos períodos de 1981 a 1990 e 1991 a 2010 estão disponíveis os dados de radiação solar.

As primeiras simulações, utilizadas na obtenção da radiação, das temperaturas no coletor solar e do ganho de energia útil, foram realizadas conforme esquema mostrado na Figura 5.5, na qual foram necessárias apenas as *Types* referentes aos dados meteorológicos (*Type15*), ao coletor solar (*Type561*), ao modo integrador (*Type24*), no qual as quantidades de energia horária são somadas ao longo do ano e ao modo de exporta os dados de saída (*Type25*).

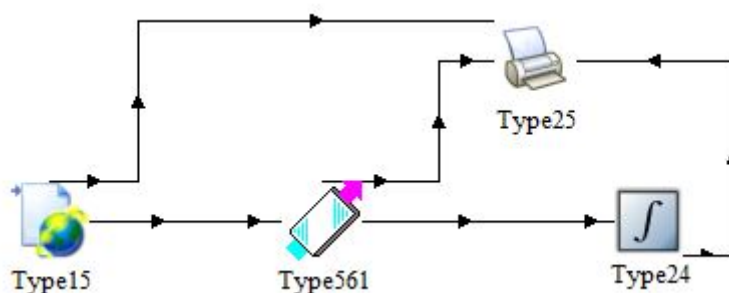


Figura 5.5 - Esquema do TRNSYS da simulação do coletor solar.

As simulações com a utilização do sistema com biomassa foram realizadas conforme o esquema da Figura 5.6, na qual, além das mesmas *Types* da Figura 5.5, foram necessárias a inclusão da fornalha (*Type121a*), do trocador de calor ar-ar (*Type760*), além de um sistema

para gerenciar os horários de fornecimento de energia extra composto pela *Type14h* e pela *Type3a-2*.

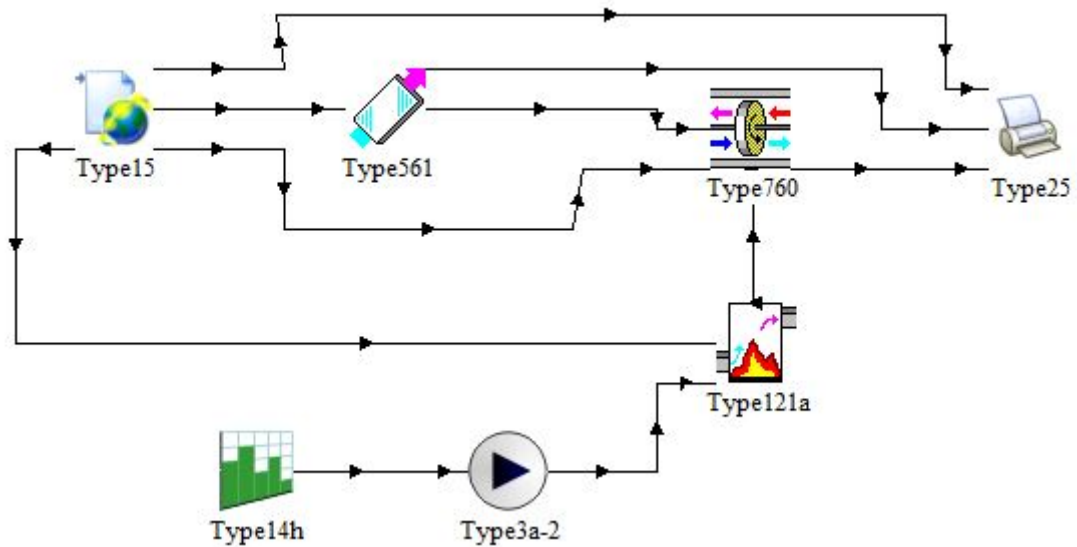


Figura 5.6 - Esquema do TRNSYS da simulação do sistema com biomassa.

As simulações com a utilização do sistema com energia elétrica foram realizadas conforme o esquema da Figura 5.7, na qual, além das mesmas *Types* da Figura 5.5 foi necessária a *Type930*, referente ao aquecimento por resistor elétrico e a *Type14h*, responsável por definir as horas de operação dos resistores.

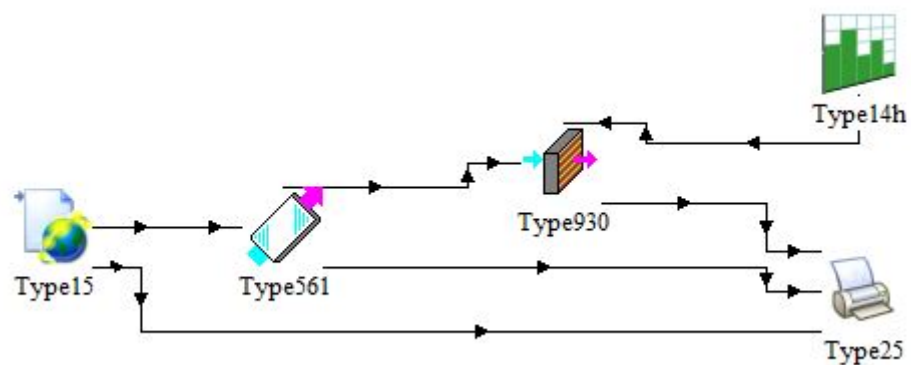


Figura 5.7 - Esquema do TRNSYS da simulação do sistema energia elétrica.

6 RESULTADOS

Com as simulações realizadas no software TRNSYS são apresentados, primeiramente, os resultados referentes aos três dias selecionados. Em seguida, é feito um comparativo entre os três casos.

6.1 Caso 1 – Dia 03 de agosto

No caso 1 foram realizadas as simulações para o dia 03 de agosto. Os perfis de temperatura são mostrados na Figura 6.1. Este dia apresenta uma temperatura ambiente variando de 3,9°C a 12,7°C. As temperaturas de saída do ar do coletor solar e da placa absorvedora atingiram picos 41,3°C e 49,9°C, às 12 horas, respectivamente.

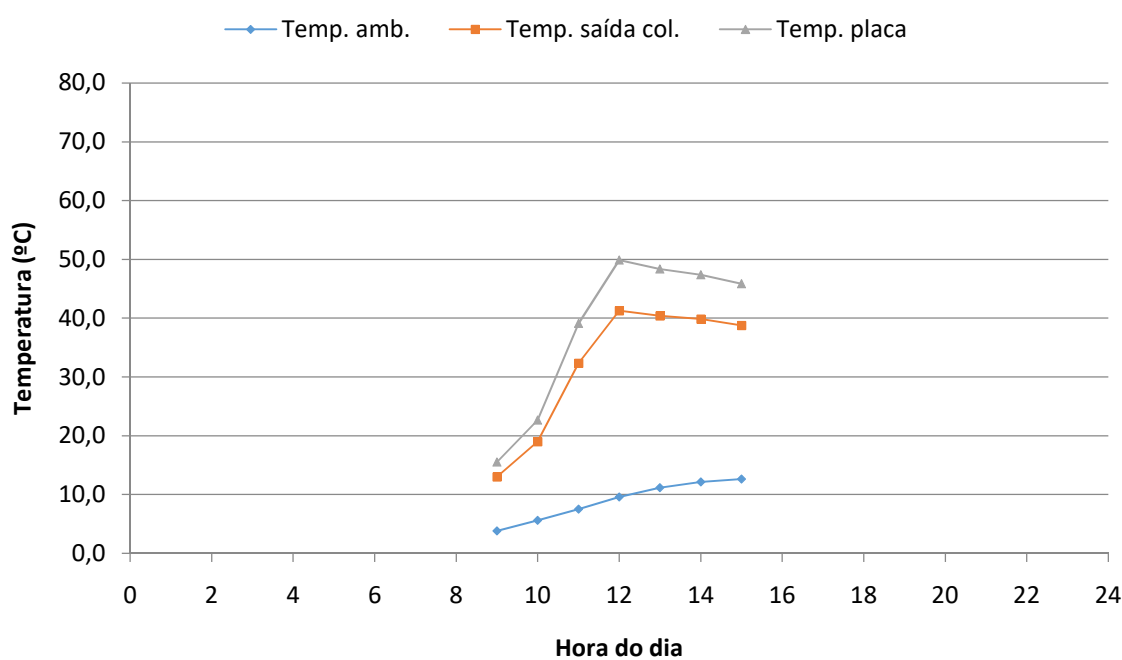


Figura 6.1 - Perfis de temperatura ambiente, da placa absorvedora e da saída do ar do coletor solar referente ao dia 03 de agosto.

O comportamento das energias envolvidas no aquecimento do ar para neste dia é apresentado na Figura 6.2. A maior incidência da radiação no plano inclinado ocorre às 12 horas, com uma irradiação horária de 3320 kJ/m² equivalente a 922 W/m², na média. O ganho de energia útil, ou seja, a taxa líquida na qual a energia é transferida para o fluido através do coletor solar, alcança um valor máximo de 3183 kJ/h às 12 horas.

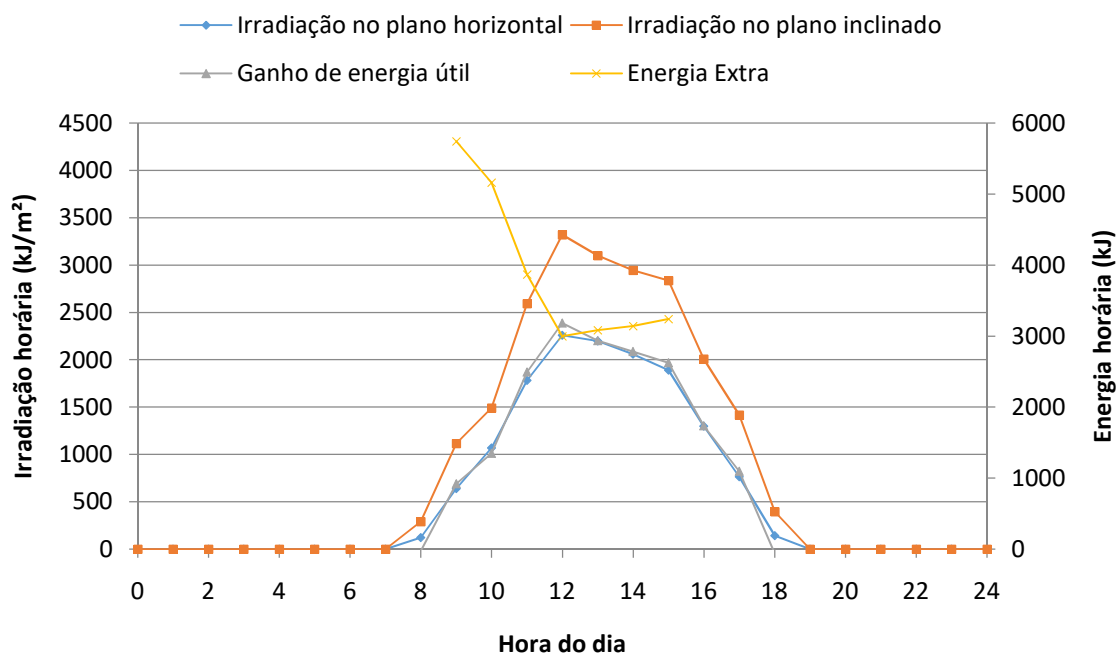


Figura 6.2 - Irradiação horária, ganho de energia útil e energia extra ao longo do dia 03 de agosto.

Como se propôs uma condição na qual a temperatura de entrada do ar na câmara de secagem deve ser igual a 70°C, é necessária a inclusão de uma fonte de energia auxiliar, durante o período das 9 às 15 horas, que complemente o ganho de energia útil pelo coletor solar até que seja alcançada a temperatura de 70°C. Essa energia extra, ao longo das horas, também é apresentada na Figura 6.2, onde se verifica que a maior demanda de energia por hora ocorre às 9 horas, com o valor 5746 kJ/h.

A Figura 6.3 mostra a distribuição da energia utilizada, da energia proveniente do coletor solar (ganho de energia útil) e da energia fornecida por uma fonte auxiliar, para que a temperatura do ar na entrada da câmara de secagem atinja os 70°C. Nota-se que a quantidade de energia total diminui com o passar das horas. Este fato ocorre porque a temperatura do ar

de entrada do coletor solar também aumenta e, ao diminuir a diferença entre a temperatura ambiente e os 70°C, torna-se necessária uma menor quantidade de energia.

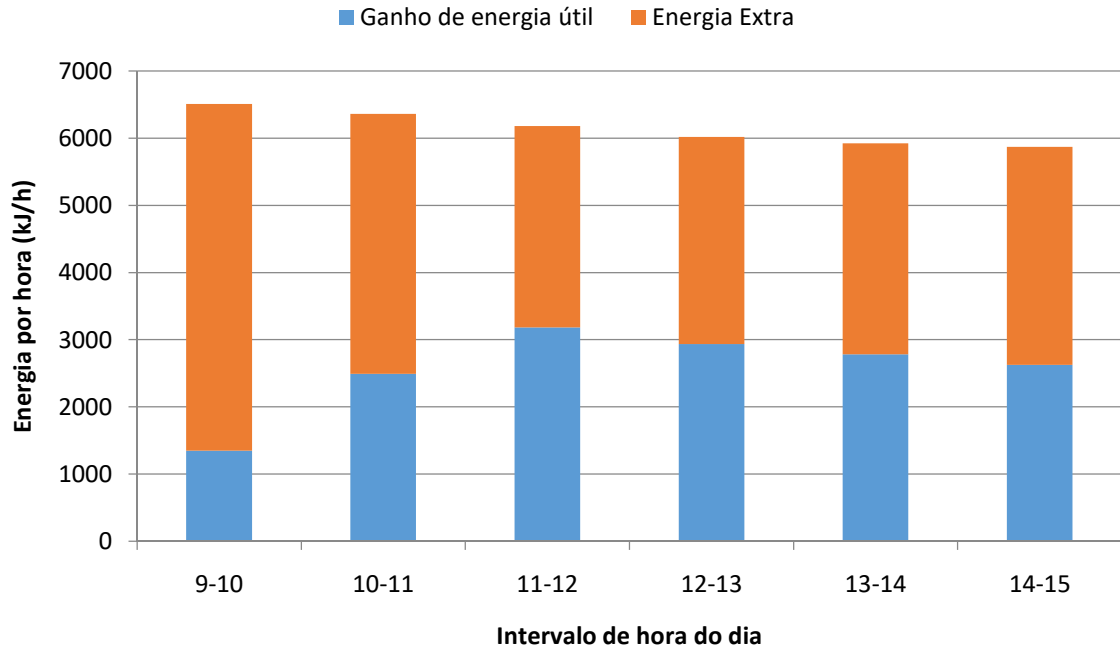


Figura 6.3 - Total de energia, por hora, para atingir a temperatura de 70°C para o dia 03 de agosto, durante o período das 9 às 15 horas.

A Tabela 6.1 apresenta a quantidade de energia fornecida para o ar a temperatura ambiente (Q_{util}) para que este atinja a temperatura de saída do coletor solar (T_{col}). Além disto, é mostrada a quantidade de energia extra (Q_{extra}) para que a temperatura de entrada do ar na câmara de secagem alcance os 70°C. Também, é exibida a quantidade de energia total (Q_{total}), que é a soma de Q_{util} e Q_{extra} e é apresentada a razão entre a quantidade de energia extra que deve ser fornecida em função da quantidade de energia total fornecida para o ar de secagem (Q_{extra}/Q_{total}) em porcentagem.

Tabela 6.1 - Temperaturas e energias para cada intervalo de hora do dia 03 de agosto.

Hora	T_{amb} (°C)	Q_{util}(kJ/h)	T_{col} (°C)	Q_{extra}(kJ/h)	Q_{total}(kJ/h)	Q_{extra}/Q_{total} (%)
9-10	5,6	1347	19,0	5161	6508	79,3
10-11	7,5	2494	32,3	3870	6364	60,8
11-12	9,6	3183	41,3	3000	6184	48,5
12-13	11,2	2936	40,4	3084	6020	51,2
13-14	12,2	2782	39,9	3141	5923	53,0
14-15	12,7	2625	38,8	3245	5869	55,3

Os custos referentes ao fornecimento da energia através da biomassa estão apresentados na Tabela 6.2. O consumo total do dia simulado foi de 21501 kJ/h, com um custo de R\$ 0,77 para um total de 6,9 kg de lenha.

Tabela 6.2 - Custo da energia fornecida pela biomassa para cada intervalo de hora do dia 03 de agosto, para um custo de 0,11 R\$/kg de lenha.

Hora	Q_{extra} (kJ/h)	Lenha (kg)	Custo (R\$)
9-10	5161	1,7	0,18
10-11	3870	1,2	0,14
11-12	3000	1,0	0,11
12-13	3084	1,0	0,11
13-14	3141	1,0	0,11
14-15	3245	1,0	0,12
Total	21501	6,9	0,77

Os custos referentes ao fornecimento de energia elétrica pela concessionária estão apresentados na Tabela 6.3. Neste caso, o consumo da energia elétrica resultou em 6,29 kWh, com um custo total de R\$ 1,81.

Tabela 6.3 - Custo da energia fornecida pela concessionária para cada hora do dia 03 de agosto, para um custo de 0,29 R\$/kWh.

Hora	Q_{extra} (kJ/h)	Q_{elétrico} (W)	kWh	Custo (R\$)
9-10	5161	1509	1,51	0,43
10-11	3870	1131	1,13	0,33
11-12	3000	877	0,88	0,25
12-13	3084	902	0,90	0,26
13-14	3141	918	0,92	0,26
14-15	3245	949	0,95	0,27
Total	21501	6287	6,29	1,81

6.2 Caso 2 – Dia 15 de dezembro

No caso 1 foram realizadas as simulações para o dia 15 de dezembro. Os perfis de temperatura são mostrados na Figura 6.4. A temperatura ambiente neste dia é mais elevada em comparação ao dia 03 de agosto, variando de 25,2°C a 34,8°C durante a janela solar. A temperatura de saída do ar do coletor chega próximo à temperatura desejada de 70°C na entrada da câmara de secagem, alcançando 63,5°C às 13 horas. A temperatura da placa absorvedora alcança 71,8°C, neste mesmo horário.

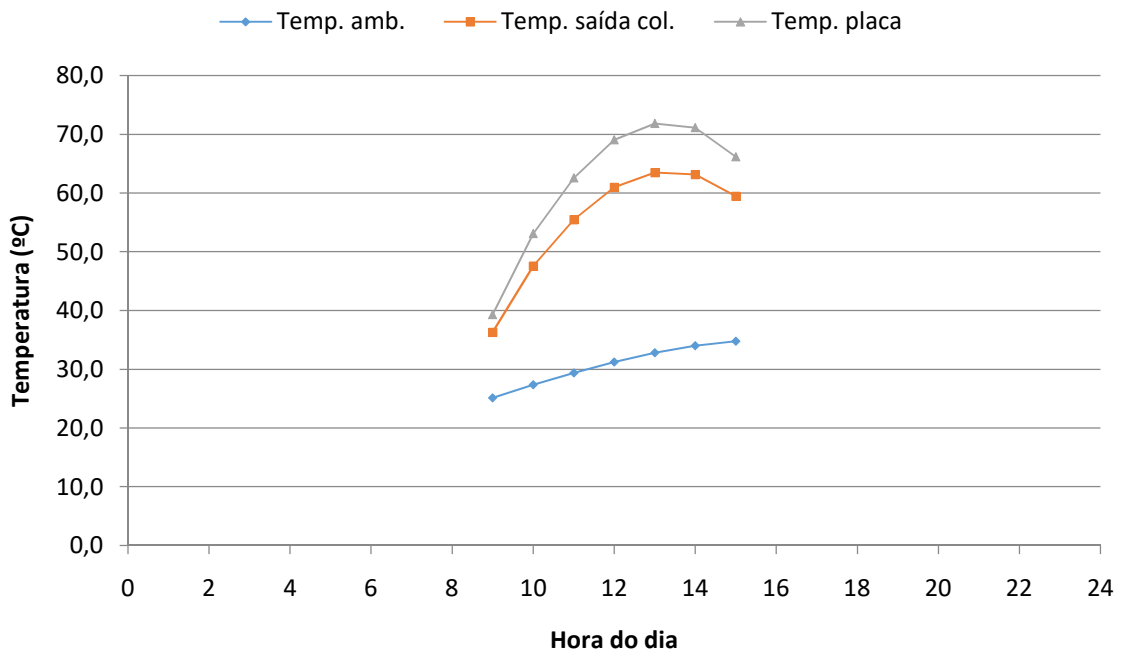


Figura 6.4 - Perfis de temperatura ambiente, da placa absorvedora e da saída do ar do coletor solar referente ao dia 15 de dezembro.

O comportamento das energias envolvidas no aquecimento do ar para neste dia é apresentado na Figura 6.5. Nota-se um perfil mais regular e com valores maiores de irradiação horária em relação ao caso 1, alcançando um valor máximo de 4093 kJ/m^2 , às 13 horas, equivalente a 1137 W/m^2 , na média. Como era de se esperar, o pico foi atingido no plano horizontal. O ganho de energia útil máximo obtido foi de 3080 kJ/h . Apesar deste ter maior incidência de radiação no plano horizontal, esse ganho foi próximo ao valor de 3183 kJ/h , obtido no plano inclinado no dia 03 de agosto. A maior quantidade demandada de energia extra para atingir a temperatura de 70°C na entrada da câmara de secagem ocorre às 9 horas, com um valor de 3487 kJ/h .

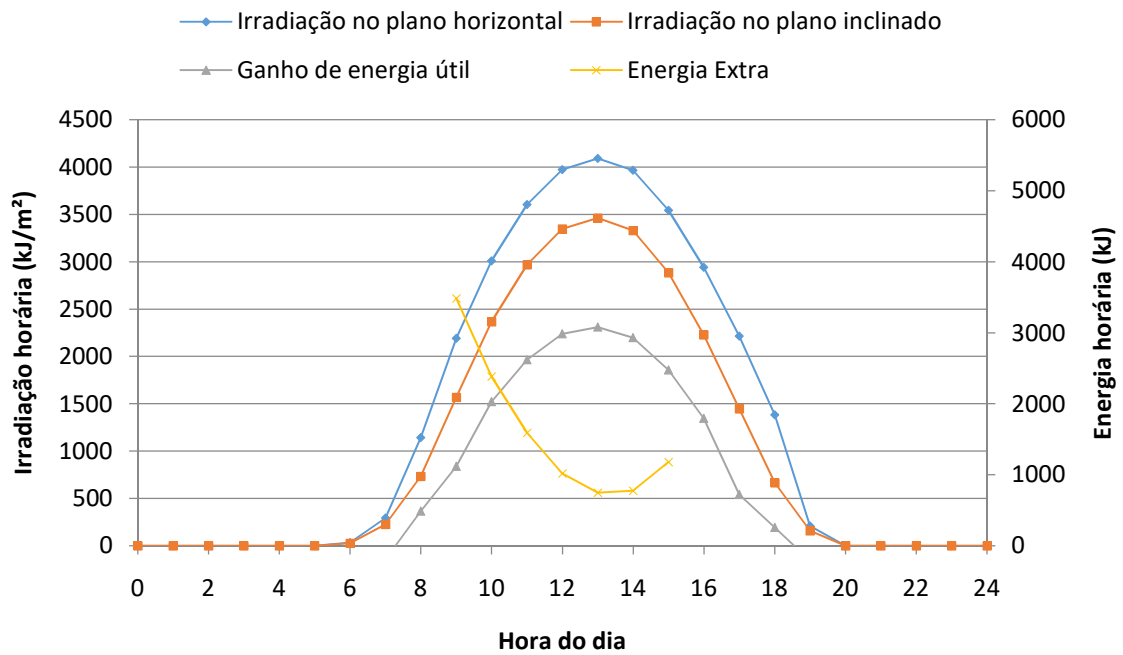


Figura 6.5 - Irradiação horária, ganho de energia útil e energia extra ao longo do dia 15 de dezembro.

A Figura 6.6 mostra a distribuição da energia utilizada para que a temperatura do ar de secagem atinja os 70°C. Semelhante ao que ocorreu para o dia 03 de agosto, a quantidade de energia total, por hora, diminui com o passar das horas, iniciando com 4417 kJ/h, às 9 horas até chegar a 3656 kJ/h às 15 horas.

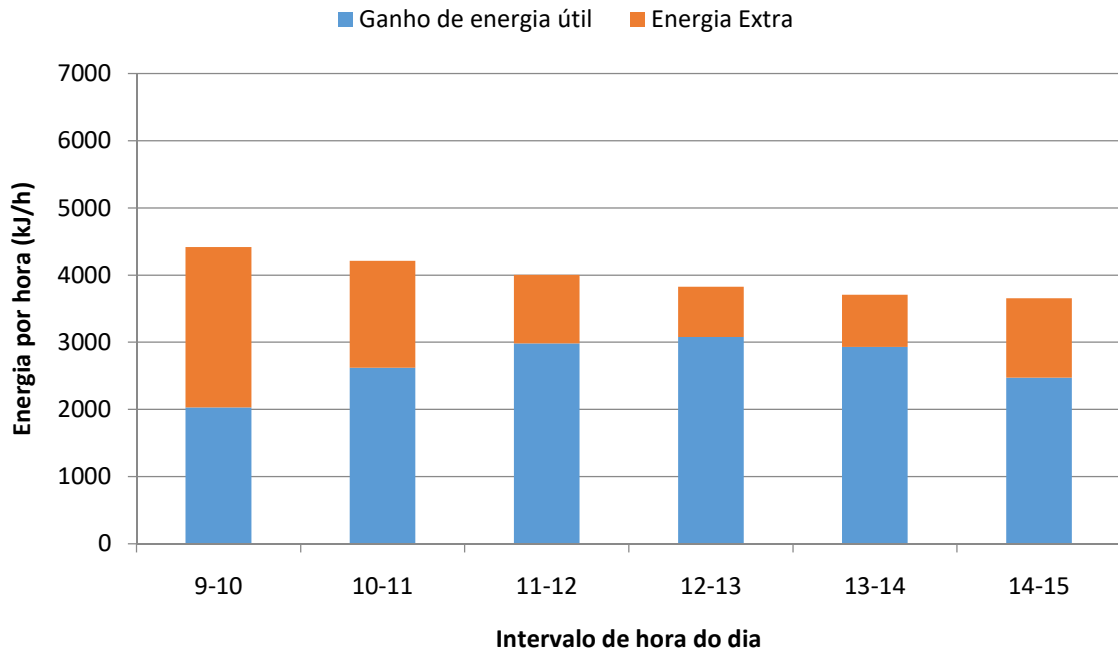


Figura 6.6 - Total de energia, por hora, para atingir a temperatura de 70° para o dia 15 de dezembro, durante o período das 9 às 15 horas.

A Tabela 6.4 apresenta a quantidade de energia fornecida para o ar a temperatura ambiente (Q_{util}) para que este atinja a temperatura de saída do coletor solar (T_{col}). Além disso, é mostrada a quantidade de energia extra (Q_{extra}) para que a temperatura de entrada do ar na câmara de secagem alcance os 70°C. Também, é exibida a quantidade de energia total (Q_{total}), que é a soma de Q_{util} e Q_{extra} e é apresentada a relação entre a quantidade de energia extra que deve ser fornecida em função da quantidade de energia total fornecida para o ar de secagem (Q_{extra}/Q_{total}) em porcentagem.

Tabela 6.4 - Temperaturas e energias para cada intervalo de hora do dia 15 de dezembro.

Hora	T_{amb} (°C)	Q_{util} (kJ/h)	T_{col} (°C)	Q_{extra} (kJ/h)	Q_{total} (kJ/h)	Q_{extra}/Q_{total} (%)
9-10	21,5	2031	19,5	2386	4417	54,0
10-11	22,0	2620	20,1	1592	4211	37,8
11-12	23,2	2985	28,0	1018	4003	25,4
12-13	25,2	3080	36,3	748	3828	19,5
13-14	27,4	2931	47,6	779	3710	21,0
14-15	29,4	2475	55,5	1181	3656	32,3

Os custos referentes ao fornecimento da energia através da biomassa estão apresentados na Tabela 6.5. O consumo total do dia simulado foi de 7703 kJ/h, com um custo de R\$ 0,28 para um total de 2,48 kg de lenha.

Tabela 6.5 - Custo da energia fornecida pela biomassa para cada intervalo de hora do dia 15 de dezembro, para um custo de 0,11 R\$/kg de lenha.

Hora	Q_{extra} (kJ/h)	Lenha (kg)	Custo (R\$)
9-10	2386	0,8	0,09
10-11	1592	0,5	0,06
11-12	1018	0,3	0,04
12-13	748	0,2	0,03
13-14	779	0,3	0,03
14-15	1181	0,4	0,04
Total	7703	2,48	0,28

Os custos referentes ao fornecimento de energia elétrica pela concessionária estão apresentados na Tabela 6.6. O consumo da energia elétrica resultou em 2,25 kWh, com um custo total de R\$ 0,65.

Tabela 6.6 - Custo da energia fornecida pela concessionária para cada intervalo de hora do dia 15 de dezembro, para um custo de 0,29 R\$/kWh.

Hora	Q_{extra} (kJ/h)	Q_{elétrico} (W)	kWh	Custo (R\$)
9-10	2386	698	0,70	0,20
10-11	1592	465	0,47	0,13
11-12	1018	298	0,30	0,09
12-13	748	219	0,22	0,06
13-14	779	228	0,23	0,07
14-15	1181	345	0,35	0,10
Total	7703	2252	2,25	0,65

6.3 Caso 3 – Dia 02 de outubro

No caso 3 foram realizadas as simulações para um dia com a menor radiação dos três casos, sendo para este caso selecionado o dia 02 de outubro. Os perfis de temperatura são exibidos na Figura 6.7. Nota-se que não houve variações significativas nas temperaturas. A temperatura de saída do ar do coletor solar atingiu 18,5°C para uma temperatura ambiente de 16,4°C às 12 horas.

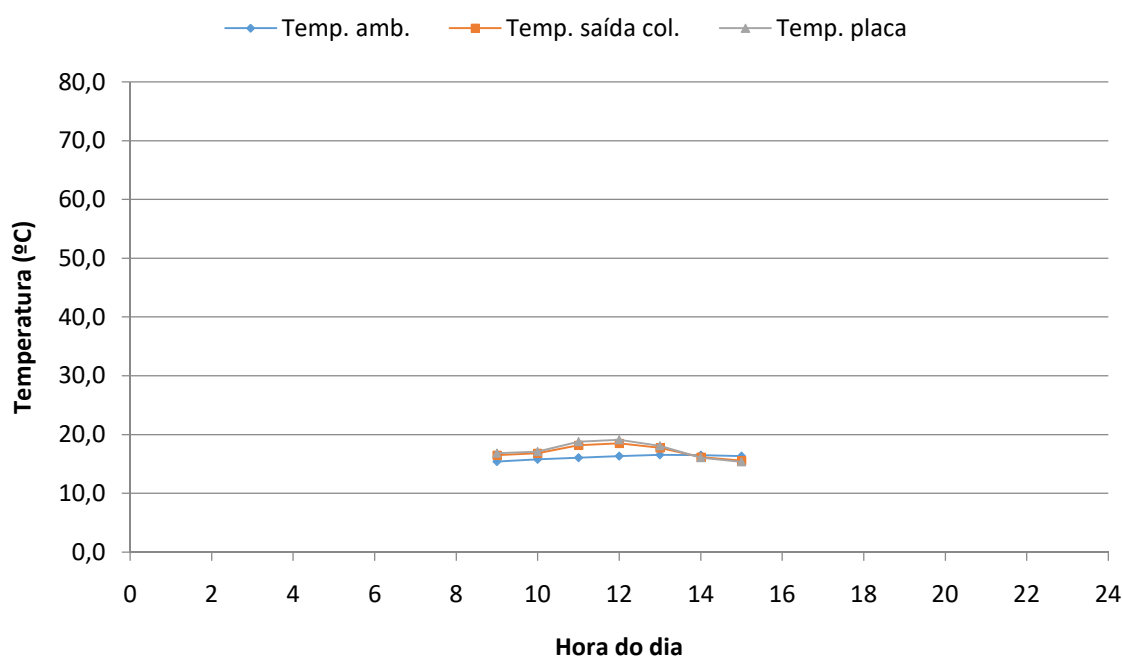


Figura 6.7 - Perfis de temperatura ambiente, da placa absorvedora e da saída do ar do coletor solar referente ao dia 02 de outubro.

O comportamento das energias envolvidas no aquecimento do ar para neste dia é apresentado na Figura 6.8. Percebe-se que neste dia houve pouca irradiação horária em relação aos casos 1 e 2, alcançando um valor máximo de 486 kJ/m², na média, no plano horizontal, às 12 horas. Da mesma maneira, o ganho de energia foi pequeno, alcançando 216 kJ/h às 11 horas, inferior aos 2494 kJ/h do dia 03 de agosto e aos 2620 kJ/h do dia 15 de dezembro, para o mesmo horário. Conseqüentemente, tornou-se necessário uma demanda energia por hora extra com valores maiores em todos os horários, com um valor mínimo de 5207 kJ/h, às 12 horas e um máximo de 5496 kJ/h, às 15 horas,

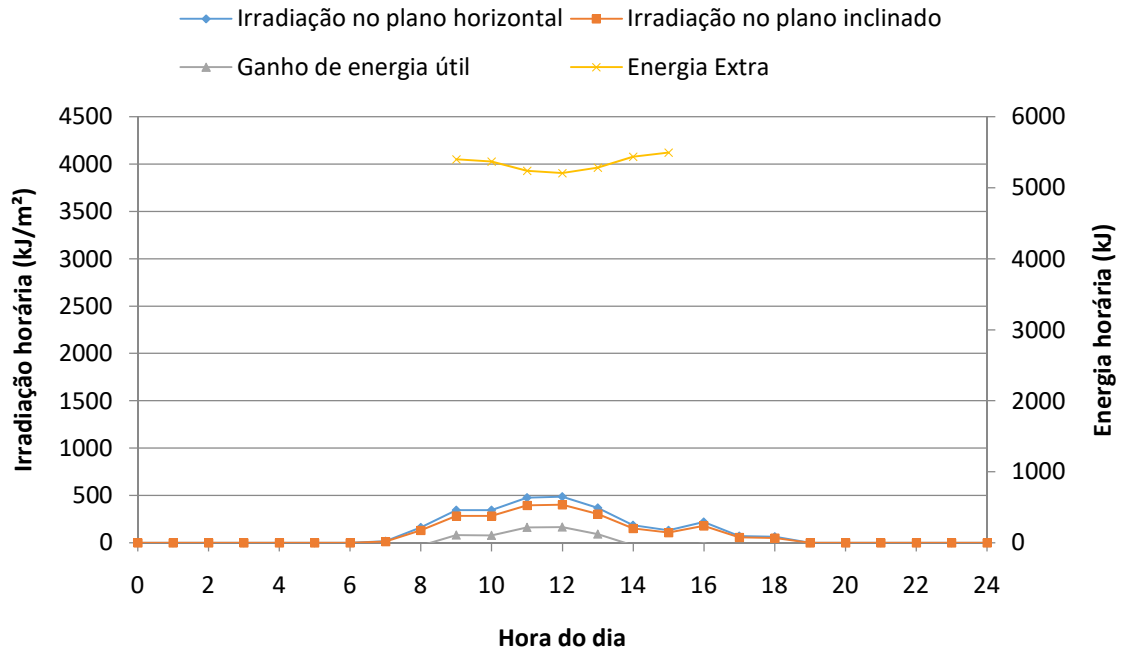


Figura 6.8 - Irradiação horária, ganho de energia útil e energia extra ao longo do dia 02 de outubro.

A Figura 6.9 mostra a distribuição da energia para que a temperatura do ar de secagem atinja os 70°C. Nota-se que a quantidade de energia total permanece praticamente constante ao longo das horas devido à pequena variação da temperatura ambiente e da radiação solar. A energia extra, proveniente de uma fonte auxiliar, é predominante sobre o ganho de energia útil em todos os horários.

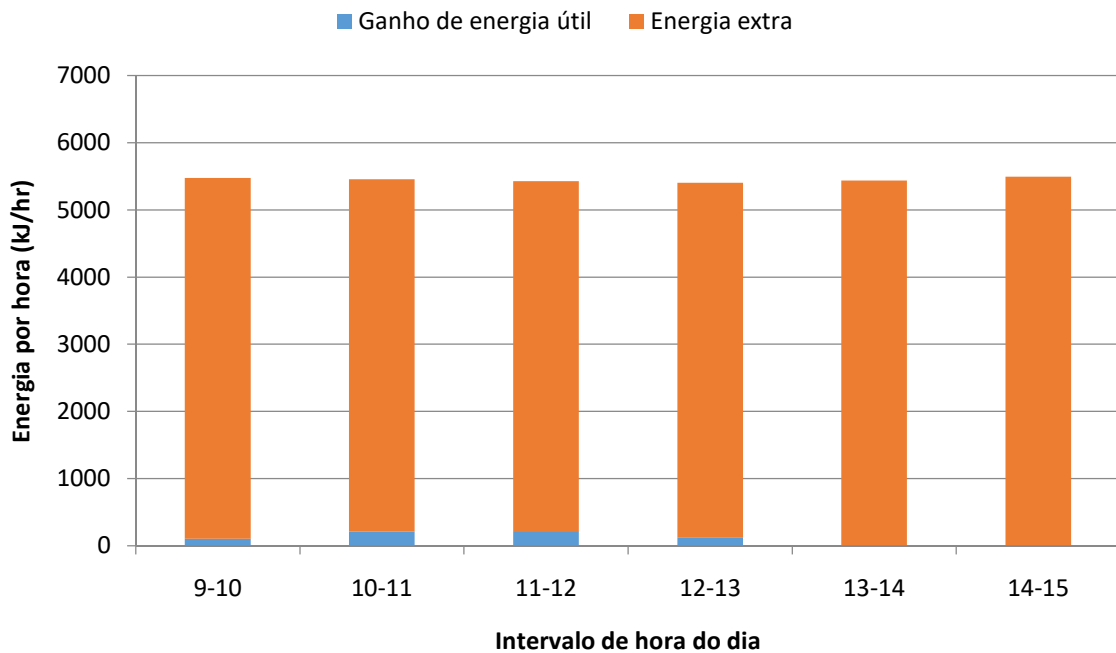


Figura 6.9 - Total de energia, por hora, para atingir a temperatura de 70°C para o dia 02 de outubro, durante o período das 9 às 15 horas.

A Tabela 6.7 apresenta a quantidade de energia fornecida para o ar a temperatura ambiente (Q_{util}) para que este atinja a temperatura de saída do coletor solar (T_{col}). Além disto, é mostrada a quantidade de energia extra (Q_{extra}) para que a temperatura de entrada na câmara de secagem alcance os 70°C. Também, é exibida a quantidade de energia total (Q_{total}), que é a soma de Q_{util} e Q_{extra} e é apresentada a relação entre a quantidade de energia extra que deve ser fornecida em função da quantidade de energia total fornecida para o ar de secagem (Q_{extra}/Q_{total}) em porcentagem.

Tabela 6.7 - Temperaturas e energias para cada intervalo de hora do dia 02 de outubro.

Hora	T_{amb} (°C)	Q_{util}(kJ/h)	T_{col} (°C)	Q_{extra}(kJ/h)	Q_{total}(kJ/h)	Q_{extra}/Q_{total} (%)
9-10	15,8	105	16,8	5373	5477	98,1
10-11	16,1	216	18,2	5240	5456	96,0
11-12	16,4	220	18,5	5207	5427	95,9
12-13	16,6	121	17,8	5284	5405	97,8
13-14	16,5	-34	16,2	5439	5439	100,0
14-15	16,4	-78	15,6	5496	5496	100,0

Os custos referentes ao fornecimento da energia através da biomassa estão apresentados na Tabela 6.8. O consumo total do dia simulado foi de 32040 kJ/h, com um custo de R\$ 1,15 para um total de 10,31 kg de lenha.

Tabela 6.8 - Custo da energia fornecida pela biomassa para cada intervalo de hora do dia 02 de outubro, para um custo de 0,11 R\$/kg de lenha.

Hora	Q_{extra} (kJ/h)	Lenha (kg)	Custo (R\$)
9-10	5373	1,7	0,19
10-11	5240	1,7	0,19
11-12	5207	1,7	0,19
12-13	5284	1,7	0,19
13-14	5439	1,7	0,19
14-15	5496	1,8	0,20
Total	32040	10,31	1,15

Os custos referentes ao fornecimento de energia elétrica pela concessionária estão apresentados na Tabela 6.9. O consumo da energia elétrica resultou em 9,37 kWh, com um custo total de R\$ 2,70.

Tabela 6.9 - Custo da energia fornecida pela concessionária para cada intervalo de hora do dia 02 de outubro, para um custo de 0,29 R\$/kWh.

Hora	Q _{extra} (kJ/h)	Q _{elétrico} (W)	kWh	Custo (R\$)
9-10	5373	1571	1,57	0,45
10-11	5240	1532	1,53	0,44
11-12	5207	1523	1,52	0,44
12-13	5284	1545	1,55	0,44
13-14	5439	1590	1,59	0,46
14-15	5496	1607	1,61	0,46
Total	32040	9368	9,37	2,70

6.4 Análise comparativa

Um resumo dos três casos é apresentado na Tabela 6.10. O gasto diário varia significativamente de um dia para o outro. O sistema que utiliza biomassa pode custar, em combustível, R\$ 0,28 em um dia com alta radiação (caso 2) ou chegar à R\$ 1,15 em um dia com pouca radiação (caso 3), já para o sistema com eletricidade esses valores passam a ser de R\$ 0,65 e R\$ 2,70, respectivamente. Observa-se que o custo da energia com a utilização de biomassa como fonte de energia auxiliar representa 42,5% do custo da eletricidade.

Tabela 6.10 - Comparativo entre os custos com biomassa e eletricidade.

Casos	Biomassa		Energia elétrica	
Caso 1 (03 de agosto)	R\$	0,77	R\$	1,81
Caso 2 (15 de dezembro)	R\$	0,28	R\$	0,65
Caso 3 (02 de outubro)	R\$	1,15	R\$	2,70

Embora a biomassa seja mais barata, seus custos com instalação e manutenção são maiores que um sistema elétrico. Dessa forma, pode-se chegar a uma conclusão fazendo uma análise financeira para os dois sistemas considerando a quantidade anual de energia extra, por hora, necessária para que seja atingida a temperatura alvo de 70°C na entrada da câmara de secagem, a qual resultou em 6.837 MJ/h por ano, uma média diária de 18,73 MJ/h.

A análise financeira dos cenários foi feita utilizando como parâmetro o valor presente líquido. Os resultados encontrados para os primeiros quatro anos para a utilização da biomassa estão apresentados na Tabela 6.11. O custo da instalação do sistema foi de R\$ 4.485,67. No decorrer dos anos foram descontados os custo da biomassa (lenha) e de operação e manutenção (O&M). As receitas, ao longo dos anos, tiveram apenas alterações nos valores em função do reajuste, estipulado em 4,5% ao ano. Com isso, o retorno do investimento ocorreu no quarto ano, quando o valor presente líquido resultou em R\$ 1215,27.

Tabela 6.11 - Análise financeira do sistema com biomassa.

Despesas				
Ano	1	2	3	4
Custo da lenha	R\$ 255,38	R\$ 266,87	R\$ 278,88	R\$ 291,43
O&M	R\$ 448,57	R\$ 468,75	R\$ 489,85	R\$ 511,89
Total das despesas	R\$ 703,94	R\$ 735,62	R\$ 768,72	R\$ 803,32
Valor presente	-R\$ 622,96	-R\$ 576,10	-R\$ 532,76	-R\$ 492,69
Receitas				
Ano	1	2	3	4
Renda	R\$ 2.508,00	R\$ 2.620,86	R\$ 2.738,80	R\$ 2.862,04
Total das receitas	R\$ 2.508,00	R\$ 2.620,86	R\$ 2.738,80	R\$ 2.862,04
Valor presente	R\$ 2.219,47	R\$ 2.052,52	R\$ 1.898,12	R\$ 1.755,35
VPL	-R\$ 2.889,16	-R\$ 1.412,74	-R\$ 47,38	R\$ 1.215,27

Considerando o sistema de biomassa com o custo zero para os insumos têm-se os valores apresentados na Tabela 6.12. Neste caso, o retorno do investimento ocorreu no terceiro ano, com um valor presente líquido de R\$ 580,89, com um retorno no quarto ano de R\$ 2022,28.

Tabela 6.12 - Análise financeira do sistema com biomassa sem custo com insumos.

Despesas				
Ano	1	2	3	4
Custo da lenha	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
O&M	R\$ 448,57	R\$ 468,75	R\$ 489,85	R\$ 511,89
Total das despesas	R\$ 448,57	R\$ 468,75	R\$ 489,85	R\$ 511,89
Valor presente	-R\$ 396,96	-R\$ 367,10	-R\$ 339,49	-R\$ 313,95
Receitas				
Ano	1	2	3	4
Renda	R\$ 2.508,00	R\$ 2.620,86	R\$ 2.738,80	R\$ 2.862,04
Total das receitas	R\$ 2.508,00	R\$ 2.620,86	R\$ 2.738,80	R\$ 2.862,04
Valor presente	R\$ 2.219,47	R\$ 2.052,52	R\$ 1.898,12	R\$ 1.755,35
VPL	-R\$ 2.663,16	-R\$ 977,75	R\$ 580,89	R\$ 2.022,28

A Tabela 6.13 apresenta os resultados encontrados para o sistema com energia elétrica, na qual se seguiu a lógica de distribuição das despesas e das receitas, ao longo do ano, do mesmo modo que na Tabela 6.11. Neste caso, o retorno do investimento ocorreu logo no primeiro ano, quando o valor presente líquido foi de R\$ 153,60. Ao final do quarto ano, o valor presente líquido foi de R\$ 4171,11.

Tabela 6.13 - Análise financeira do sistema com energia elétrica.

Despesas				
Ano	1	2	3	4
Custo eletricidade	R\$ 601,24	R\$ 628,30	R\$ 656,57	R\$ 686,12
O&M	R\$ 140,91	R\$ 147,25	R\$ 153,88	R\$ 160,80
Total das despesas	R\$ 742,15	R\$ 775,55	R\$ 810,45	R\$ 846,92
Valor presente	-R\$ 656,77	-R\$ 607,37	-R\$ 561,68	-R\$ 519,43
Receitas				
Ano	1	2	3	4
Renda	R\$ 2.508,00	R\$ 2.620,86	R\$ 2.738,80	R\$ 2.862,04
Total das receitas	R\$ 2.508,00	R\$ 2.620,86	R\$ 2.738,80	R\$ 2.862,04
Valor presente	R\$ 2.219,47	R\$ 2.052,52	R\$ 1.898,12	R\$ 1.755,35
VPL	R\$ 153,60	R\$ 1.598,75	R\$ 2.935,19	R\$ 4.171,11

Observa-se nas duas tabelas acima que o custo de instalação do sistema com biomassa é de R\$ 4.485,67, em torno de três vezes maior que o custo para instalação do sistema elétrico. Da mesma forma, o custo de operação e manutenção é maior para a queima da lenha, R\$ 448,57 no primeiro ano contra R\$ 140,91 do sistema elétrico. No entanto, mesmo o custo da energia elétrica, de R\$ 575,35 por ano (sem reajuste), sendo maior que o custo da lenha (R\$ 244,38), o sistema com energia elétrica obteve um valor presente líquido de mais de quatro vezes superior ao longo de quatro anos, além obter o retorno do investimento em um prazo menor. Essa diferença diminui no caso em que o custo com insumo no sistema com biomassa é igual a zero.

A Figura 6.10 mostra o valor presente líquido dos dois sistemas para o período de 10 anos, onde é possível visualizar o tempo no qual cada sistema começa a ter retorno financeiro. Como os custos com insumos e operação e manutenção dos dois sistemas possuem valores parecidos, as curvas mantêm um comportamento similar ao longo dos anos. Com o custo da biomassa para a ser considerado nulo, a curva se aproxima, aos poucos da curva da eletricidade.

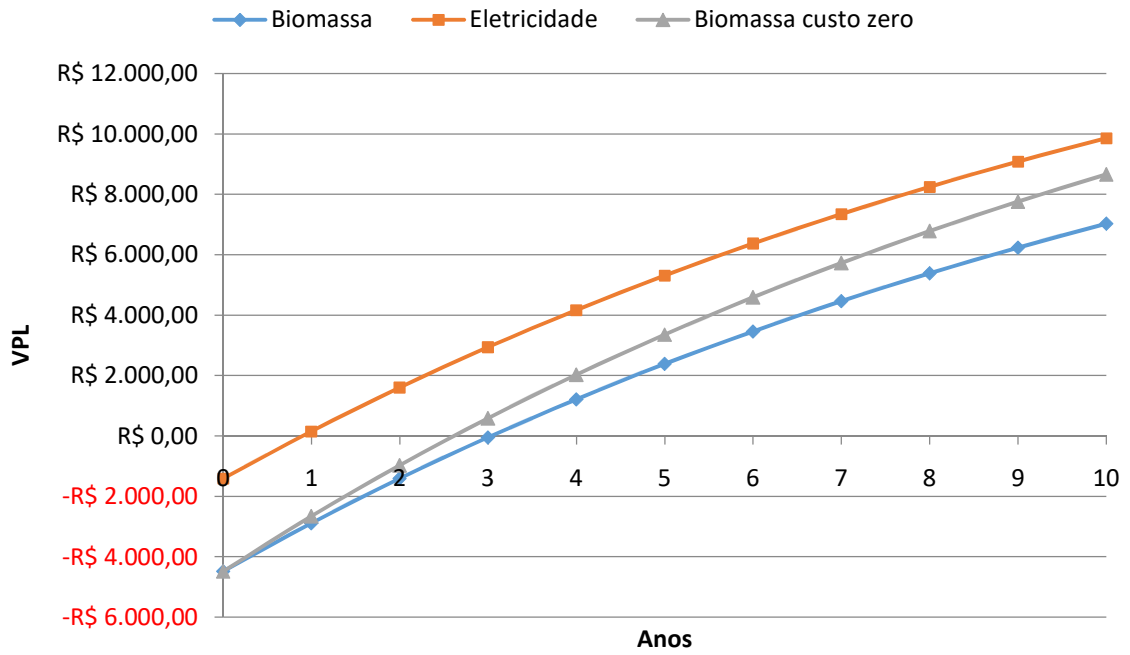


Figura 6.10 - Valor presente líquido para os dois sistemas.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho, a avaliação térmica, energética e financeira foi realizada para um sistema de aquecimento de ar de um secador solar híbrido de produtos agroalimentícios, o qual utiliza como fonte de energia a energia solar e uma fonte de energia auxiliar. Dois tipos de fonte de energia auxiliar foram utilizados, uma utilizou biomassa como combustível e outra utilizou energia elétrica.

Foi definido como objetivo principal atingir a temperatura do ar de 70°C na entrada da câmara de secagem. O software TRNSYS foi utilizado como ferramenta para executar as simulações no secador híbrido.

Os resultados parciais foram apresentados em função de três dias do ano, cada um com diferentes perfis de temperatura ambiente e radiação solar incidente, no período da janela solar, que compreende o intervalo das 9 às 15 horas. Os resultados foram apresentados em função das temperaturas da placa absorvedora, do ar de saída do coletor solar e do ar de entrada na câmara de secagem e em função da quantidade de energia, por hora, fornecida para o ar de secagem pelo coletor solar (ganho de energia útil) e pela fonte de energia auxiliar.

A avaliação térmica mostrou que, em todos os casos simulados, a temperatura do ar na saída do coletor solar não atingiu a temperatura alvo de 70°C. Na situação mais favorável (dia 15 de dezembro), a temperatura máxima do ar alcançada na saída do coletor solar foi de 63,5°C, para uma temperatura ambiente de 32,8°C e com uma radiação solar no plano horizontal no valor de 1137 W/m², na média, às 13 horas. Sendo assim, apenas com o coletor solar não é possível realizar a secagem, uma vez que este não consegue fornecer energia suficiente para o ar atingir a temperatura adequada para o processo.

A partir disso, foi obtida a quantidade de energia complementar necessária para que a temperatura do ar na entrada da câmara de secagem atingisse 70°C. Com isso, foi incluída ao secador solar uma fonte auxiliar de fornecimento de energia possibilitando que o secador opere sob as diferentes condições climáticas ao longo do ano, desde dias com alta incidência de radiação solar no coletor até dias nublado.

Para essa finalidade, um sistema que utiliza biomassa como combustível e outro que utiliza energia elétrica foram avaliados em função dos custos dos insumos e de instalação. No primeiro estudo calculou-se o custo horário da energia para cada sistema, resultando no custo da biomassa equivalente a 42,5% do custo da energia elétrica.

A análise financeira geral baseou-se no valor presente líquido e levou em consideração o consumo de energia extra durante um ano. Foi estipulada uma renda anual fixa, apenas reajustada pela meta da inflação, assim como as despesas com insumos e com operação e manutenção. A taxa de juros Selic foi utilizada como a taxa mínima de atratividade.

Embora os custos com insumos sejam mais baratos para a utilização do sistema com biomassa, a implementação desse sistema é mais cara, sendo viável apenas em longo prazo. O retorno do investimento para o sistema com biomassa ocorreu no quarto ano considerando a compra da lenha e no terceiro ano considerando o custo do insumo igual a zero, enquanto que o sistema com energia elétrica obteve retorno no primeiro ano. Entretanto, apesar da avaliação financeira ser favorável ao sistema alimentado com energia elétrica, nem sempre há disponibilidade de rede elétrica no local, o que torna sua aplicação inviável.

7.1 Recomendações para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se:

- Modelar e simular a câmara de secagem com a inclusão de alimentos;
- Avaliar a taxa de secagem para diferentes vazões de ar;
- Estender o período de funcionamento para mais horas do dia, incluindo a noite, para diluir os custos de instalação, almejando um retorno financeiro mais rápido para o sistema de biomassa;
- Realizar a análise financeira com a utilização de GLP como combustível.

REFERÊNCIAS

ADETEC. **Consumo de Combustível.** Disponível em: <<http://adetek.ind.br/consumo.asp>>. Acesso em: 2 fev. 2017.

Amer, B. M. A.; Hossain, M. A.; Gottschalk, K. Design and performance evaluation of a new hybrid dryer for banana. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 4, 2010.

Bala, B. K.; Woods, J. L. Simulation of the indirect natural convection solar drying of rough rice. **Solar Energy, Simulations**. v. 53, n. 3, p. 259–266, 1 set. 1994.

Banco Central do Brasil. **Resolução nº 4.419, de 25/6/2015.** Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/Pec/relinf/Normativos.asp>>. Acesso em: 20 fev. 2017.

Basso, D. M.; Rodrigues, L. J.; Schneider, P. S.; Eugênio, D. A. Avaliação de um secador solar para produtos agroalimentícios pelo Método f-Chart. In: Anais do **II Congresso Internacional de Gestão, Tecnologia e Inovação - CONIGT**, Erechim, RS, Brasil. 2016.

Bena, B.; Fuller, R. J. Natural convection solar dryer with biomass back-up heater. **Solar Energy**, v. 72, n. 1, p. 75–83, jan. 2002.

Bhattacharya, S. C.; Ruangrungrachikul, T.; Pham, H. L. Design and Performance of a Hybrid Solar/Biomass Energy Powered Dryer for Fruits and Vegetables-Chapter 240. **MyScienceWork**, 2000.

Biomassa e Bioenergia. **O que é biomassa?** Disponível em: <<http://www.biomassabioenergia.com.br/imprensa/o-que-e-biomassa-/20110811-103208-u704>>. Acesso em: 17 fev. 2017.

CEEE. **Custos e Tarifas.** Disponível em: <<http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Component/Controller.aspx?CC=1782>>. Acesso em: 19 fev. 2017.

Celestino, S. M. C. Princípios de secagem de alimentos. **Planaltina: Embrapa Cerrados**, 2010.

Cruz, P. M. F. Da; Braga, G. C.; Grandi, A. M. De. Composição química, cor e qualidade sensorial do tomate seco a diferentes temperaturas. **Seminário: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 4, p. 1475–1486, 30 ago. 2012.

Duffie, J. A.; Beckman, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2013.

Ebuy, H. **Simulation of solar cereal dryer using TRNSYS**. Thesis—[s.l.] aau, 2007.

Ekechukwu, O. V. Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory. **Energy Conversion and Management**, v. 40, n. 6, p. 593–613, abr. 1999.

Ekechukwu, O. V.; Norton, B. Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. **Energy Conversion and Management**, v. 40, n. 6, p. 615–655, abr. 1999.

Esper, A.; Mühlbauer, W. Solar drying - an effective means of food preservation. **Renewable Energy**, Renewable Energy Energy Efficiency, Policy and the Environment. v. 15, n. 1, p. 95–100, 1 set. 1998.

Fellows, P. J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos - Principios e Prática**. 2^a ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.

Hii, C. L.; Jangam, S. V.; Ong, S. P.; Mujumdar, A. S. Solar drying: Fundamentals, applications and innovations. **TPR Group Publication, Singapore**, 2012.

Kalogirou, S. The potential of solar industrial process heat applications. **Applied Energy**, v. 76, n. 4, p. 337–361, dez. 2003.

Karim, M. A.; Hawlader, M. N. A. Performance investigation of flat plate, v-corrugated and finned air collectors. **Energy**, v. 31, n. 4, p. 452–470, 2006.

Klein, S. A.; Duffie, J. A.; Mitchell, J. C.; Kummer, J. P.; Thornton, J. W. **TRNSYS Users Manual: Weather Data**. 17. ed. Madison: University of Wisconsin, 2014. v. 8

Languri, E. M.; Ganji, D. D. **Thermal aspects of solar air collector**. [s.l.] INTECH Open Access Publisher, 2011.

Lisboa, P. A. Programa de simulação de sistemas de aquecimento solar. **Master's degree dissertation, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Brasil**, 2012.

Madhlopa, A.; Jones, S. A.; Kalenga Saka, J. D. A solar air heater with composite-absorber systems for food dehydration. **Renewable Energy**, v. 27, n. 1, p. 27–37, set. 2002.

Maia, L. R. Métodos de Conservação dos Alimentos. Notas de Aula. UESC, Ilhéus, BA, Brasil, 2014.

Meloni, P. S. **Desidratação de frutas e hortaliças**. Fortaleza: Instituto Frutal, 2003

Meteonorm. **Features**. Disponível em: <<http://www.meteonorm.com/en/features>>. Acesso em: 16 jan. 2017.

Mohanraj, M.; Chandrasekar, P. Drying of copra in a forced convection solar drier. **Biosystems Engineering**, v. 99, n. 4, p. 604–607, abr. 2008.

MSPC. **Termodinâmica IV-30: Diagrama Psicométrico**. Disponível em: <<http://www.mspc.eng.br/termo/termo0430.shtml>>. Acesso em: 4 nov. 2016.

Murthy, D. A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 2009, p. 835–844, 2009.

Okoroigwe, E. C.; Eke, M. N.; Ugwu, H. U. Design and evaluation of combined solar and biomass dryer for small and medium enterprises for developing countries. **International Journal of Physical Sciences**, v. 8, n. 25, p. 1341–1349, 2013.

Pangavhane, D. R.; Sawhney, R. L.; Sarsavadia, P. N. Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. **Energy**, v. 27, n. 6, p. 579–590, 2002.

Portal Brasil, P. **Brasil é destaque global no uso de biomassa**. Notícia. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/12/brasil-e-destaque-global-no-uso-de-biomassa>>. Acesso em: 17 fev. 2017.

Rodriguez, I.; Luis Posas, F.; Echeverri, M. E.; Contreras, P.; Ochoa, L.; Patricia, C.; Vasquez, G.; Maestre, O.; Vallejo, C. G.; Fernando, L.; Others. **Perdidas y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe**. [s.l.] FAO (Organizacion de las Naciones Unidas para la Alimentacion y la Agricultura), 2014. Disponível em: <<http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=BFHIA.xis&B1=Buscar&formato=1&cantidad=50&expresion=%20Alimentos>>. Acesso em: 28 jan. 2017.

Sharma, A.; Chen, C. R.; Vu Lan, N. Solar-energy drying systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 6–7, p. 1185–1210, ago. 2009.

Sharma, S.; Sharma, V. K.; Jha, R.; Ray, R. A. Evaluation of the performance of a cabinet type solar dryer. **Energy Conversion and Management**, v. 30, n. 2, p. 75–80, 1990.

Sharma, V. K.; Colangelo, A.; Spagna, G. Experimental investigation of different solar dryers suitable for fruit and vegetable drying. **Renewable Energy**, v. 6, n. 4, p. 413–424, jun. 1995.

TRNSYS. **AT a Glance: What is TRNSYS?** Disponível em: <<http://www.trnsys.com/#1>>. Acesso em: 30 jan. 2017.

VijayaVenkataRaman, S.; Iniyan, S.; Goic, R. A review of solar drying technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 2652–2670, jun. 2012.

Yang, M.; Wang, P.; Yang, X.; Shan, M. Experimental analysis on thermal performance of a solar air collector with a single pass. **Building and Environment**, v. 56, p. 361–369, out. 2012.