

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO ENGENHARIA DE MATERIAIS

GABRIEL SALDANHA RODRIGUES

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TRANSMISSIVIDADE ESPECTRAL NA
EFICIÊNCIA ÓTICA E PERDAS RADIANTES DA COBERTURA DE UM
SECADOR SOLAR**

BELO HORIZONTE

2012

GABRIEL SALDANHA RODRIGUES

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TRANSMISSIVIDADE ESPECTRAL NA
EFICIÊNCIA ÓTICA E PERDAS RADIANTES DA COBERTURA DE UM
SECADOR SOLAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso em Engenharia de Materiais do Centro Federal Tecnológico de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção de título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: André Guimarães Ferreira

BELO HORIZONTE

2012

GABRIEL SALDANHA RODRIGUES

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA TRANSMISSIVIDADE ESPECTRAL DA
COBERTURA NA EFICIÊNCIA ÓTICA E PERDAS RADIANTES DE UM
SECADOR SOLAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. André Guimarães Ferreira

Prof. Ezequiel de Souza Costa Júnior

Profa. Mara Nilza Estanislau Reis

RESUMO

O presente trabalho visa avaliar as transmissividades médias para as radiações (solar e infravermelha) incidentes em diferentes tipos de materiais utilizados em coberturas de secadores solares. A eficiência térmica de secadores solares e a eficiência do processo de secagem são fortemente afetadas por estes valores de transmissividade. Estas coberturas, para melhorar a eficiência de um secador solar, devem apresentar elevados índices de transmissividade à radiação solar (maximizando energia solar captada pelo dispositivo) e baixa transmissividade à radiação infravermelha (impedindo que a radiação emitida pela superfície absorvedora deixe o secador). O poder emissivo destas fontes de radiações, incidentes sobre a cobertura translúcida, foi simulada neste trabalho como sendo emitidas por corpos negros a 5777K (solar) e 373K (infravermelha) obedecendo à distribuição de Planck. A partir de uma extensa pesquisa das transmissividades espectrais de materiais comumente utilizados em coberturas de secadores, foi possível determinar as transmissividades médias destes materiais para a radiação solar e infravermelha. Os diferentes tipos de materiais utilizados para análises foram placas de vidros de diferentes espessuras e filmes plásticos. Os vidros apresentaram características mais próximas da cobertura ideal para o secador solar, apresentando valores elevados para transmissividade média à radiação solar e baixos valores para a transmissividade média a radiação infravermelha, enquanto que os plásticos apresentaram como resultados, valores intermediários para a transmissividade média à radiação solar e elevados valores para a transmissividade média à radiação infravermelha.

Palavras-chave: Secador solar. Transmissividade espectral. Radiação solar. Radiação infravermelha.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the average transmittance for radiation (solar and infrared) incidents in different types of materials used in cover of solar dryers. The thermal efficiency of solar dryers and efficiency of the drying process are strongly affected by these values of transmittance. These coverage, to improve efficiency in a solar dryer, must present high levels of solar radiation transmittance (maximizing solar energy captured by the device) and low transmittance to infrared radiation (preventing radiation emitted by the absorber surface let the dryer). The emissive power of these rays, incident on the translucent cover, were simulated in this study as being issued by the 5777K black body (solar) and 373K (infrared) obeying the Planck distribution. From extensive research of the spectral transmittance of materials commonly used in coating dryer, it was possible to determine the average transmittance of materials for solar radiation and infrared radiation. Different types of materials were used for analyzes, like glass plates of different thickness and plastic films. The glasses exhibited characteristics closer to the ideal coverage for the solar dryer, presenting high values for average transmittance to solar radiation and low values for the average transmittance to infrared radiation, whereas the results presented for the plastics were intermediate values for the average transmittance to radiation solar and high values for the average transmittance to infrared radiation.

Keywords: Solar Drying. Spectral Transmittance. Solar Radiation. Infrared Radiation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do secador solar	9
Figura 2 - Espectro da radiação eletromagnética.....	12
Figura 3 - Emissão a partir de um elemento de área diferencial dA_1 para um hemisfério hipotético	13
Figura 4 - Radiosidade em uma superfície	15
Figura 5 - Poder emissivo espectral de corpos negros	16
Figura 6 - Variação da Radiação Solar Extraterrestre ao longo o do ano.	19
Figura 7 - Secador Solar em Convecção Natural Tipo Cabine	20
Figura 8 - Secador Solar Tipo Coletor com Chaminé.....	21
Figura 9 - Secador Solar Tipo Estufa com Chaminé	22
Figura 10 - Secador Solar de El-Sebaili <i>et al.</i> (2002)	23
Figura 11 - Secador Solar de Simate (2003)	24
Figura 12 - Secador Solar de Basunia e Abe (2001).....	24
Figura 13 - Secador Tipo Túnel.....	25
Figura 14 - Secador de Condorí <i>et al.</i> (2001).....	26
Figura 15 - Secador de Bena e Fuller (2002)	26
Figura 16 - Secador de Ivanova <i>et al.</i> (2003)	27
Figura 17 - Seletividade de Cavidades em “V”	32
Figura 18 - Propriedades Óticas do vidro verde horizontal (3mm) ao longo do dia 21/12 em BH.....	35
Figura 19 – Metodologia utilizada no trabalho	36
Figura 20 - Transmissividade do vidro em função do comprimento de onda.....	37
Figura 21 - Poder emissivo espectral de corpo negro de 30°C a 120°C.....	38
Figura 22 - Transmissividade espectral ao infravermelho do plástico termodifusor da Nortène	40
Figura 23 - Transmissividade espectral ao infravermelho do plástico de estufa da Nortène... 40	
Figura 24 - Transmissividade espectral do vidro em função da espessura	41

Figura 25 - Transmissividade espectral de vidro 3mm obtida por diferentes autores	41
Figura 26 - Poder emissivo espectral da superfície absorvedora e a radiação transmitida do vidro 3mm	44
Figura 27 - Poder emissivo espectral da superfície absorvedora e a transmissividade do vidro 5mm	45
Figura 28 - Poder emissivo espectral da superfície absorvedora e a transmissividade do vidro 8 mm	46
Figura 29 - Poder emissivo espectral da superfície absorvedora e a transmissividade do vidro 3mm de Hsieh e Su	47
Figura 30 - Poder emissivo espectral da superfície absorvedora e a transmissividade do vidro 3 mm de Ismail e Henríquez.....	47
Figura 31 - Poder emissivo espectral da superfície absorvedora e a transmissividade do plástico Filme estufa	49
Figura 32 - Poder emissivo espectral da superfície absorvedora e a transmissividade do plástico Termodifusor	50
Figura 33 - Poder emissivo espectral da superfície solar e a transmissividade do vidro 3mm	51
Figura 34 - Poder emissivo espectral da superfície solar e a transmissividade do vidro 5mm	52
Figura 35 - Poder emissivo espectral da superfície solar e a transmissividade do vidro 8mm	53
Figura 36 - Poder emissivo espectral da superfície solar e a transmissividade do vidro de 3mm Hsieh e Su.....	54
Figura 37 - Poder emissivo espectral da superfície solar e a transmissividade do vidro de 3mm Ismail e Henríquez	55
Figura 38 - Transmissividade Média do plástico filme estufa em função do horário	56
Figura 39 - Transmissividade Média do plástico termodifusor da Nortène em função do horário	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Absortividade Média de Materiais Opacos à Radiação Solar.....	29
Tabela 2 - Emissividade Média de Materiais Opacos à Radiação Infravermelho	30
Tabela 3 - Emissividade ao Infravermelho e Absortividade Solar de Superfícies Seletivas ...	31
Tabela 4 - Índice de Refração de Materiais Translúcidos.....	33
Tabela 5 - Valores médios de transmissividades.....	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	7
1.1	Justificativa e relevância.....	7
1.2	Objeto de Estudo.....	8
2	OBJETIVOS.....	10
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1	RADIAÇÃO TÉRMICA.....	11
3.1.1	Princípios de radiação.....	11
3.1.2	Intensidade da Radiação.....	12
3.1.3	Irradiação.....	14
3.1.4	Radiosidade.....	15
3.1.5	Corpo Negro.....	15
3.1.6	Energia Solar.....	18
3.2	TIPOS DE SECADORES SOLARES.....	20
3.2.1	Secadores Solares Passivos Integrados.....	20
3.2.2	Secadores Solares Passivos Distribuídos.....	22
3.2.3	Secadores Solares Passivos Mistos.....	23
3.2.4	Secadores Solares Ativos Integrados.....	24
3.3	COMPONENTES DE SECADORES SOLARES.....	28
3.3.1	Superfície Absorvedora.....	28
3.3.1.1	Absortividade (α).....	28
3.3.1.2	Emissividade (ϵ).....	30
3.3.1.3	Mecanismo de Seletividade.....	31
3.3.2	Cobertura Translúcida.....	32
3.3.2.1	Propriedades Óticas da Cobertura Translúcida em Relação à Radiação Solar ..	33
4	METODOLOGIA.....	36
4.1	Descrição Geral do Trabalho Realizado.....	36
4.2	Considerações Iniciais.....	37
4.3	Determinação de transmissividade global de materiais de cobertura.....	38
4.4	Transmissividade Espectral de materiais para a cobertura.....	39
5	RESULTADOS.....	43

5.1	Considerações Iniciais.....	43
5.2	Transmissividade média à radiação infravermelha de uma fonte a 373K	43
5.3	Transmissividade média à radiação solar.....	50
5.4	Análises Comparativas.....	57
6	CONCLUSÕES	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa e relevância

O Brasil dos tempos de hoje é caracterizado como um grande produtor agrícola, capaz de, segundo o Portal Brasil (2011), tornar-se uma grande potência agrícola nos próximos dez anos e, em seguida, ser capaz de liderar essa produção de alimentos. Devido a essa enorme quantidade de alimentos produzida, também existe a necessidade em se preocupar com os possíveis desperdícios existentes, que pode ocorrer devido às, principalmente, más condições de transporte e de armazenamento destes alimentos. Como consequência deste desperdício, pode-se inferir que, quando um produto se encontra com menor disponibilidade, a tendência é de se aumentar ainda mais a sua procura e a sua valorização. Através dessas análises feitas, uma importante técnica a ser utilizada para a manutenção, conservação e redução dessas perdas é a de secagem.

O processo de secagem antigamente era feito através da secagem natural ao sol. No entanto, como o produto ficava exposto diretamente ao ambiente, ele corria o risco de sofrer contaminações via agentes patogênicos, reabsorção da umidade ou até mesmo ataques de animais, como por exemplo, pássaros e roedores, causando perdas significativas durante o processo. Como soluções, foram desenvolvidos equipamentos denominados secadores, capazes de protegerem o produto e, ao mesmo tempo, melhorar a eficiência de secagem.

Os secadores podem ser classificados de acordo com a energia que eles utilizam para o aquecimento do ar. São eles os artificiais, solares e híbridos (que combinam os dois processos). Nos artificiais são utilizados, como energia, combustíveis fósseis, eletricidade, dentre outros. Nos solares é utilizada a energia solar para aquecimento do escoamento de ar de secagem. A energia nestes secadores é utilizada principalmente para o aquecimento do ar, possibilitando a secagem do produto. O aquecimento do ar promove a redução de sua umidade relativa e o aumento da transferência de umidade do produto para o ar. A redução do teor de umidade do produto cria condições desfavoráveis para o crescimento de microorganismos, aumentando o tempo de conservação, reduzindo seu peso (facilitando o transporte) e, eventualmente, intensificando nutrientes e sabor (caso de alimentos).

O trabalho em questão visa analisar o balanço radiante de secadores solares, que se utiliza da energia solar que é uma fonte natural sem custos, além do secador ser de baixo custo de

aquisição, operação e manutenção (EKECHUKWU E NORTON, 1999). Como o processo de secagem envolve trocas de calor, a minimização das perdas térmicas do secador determina o aumento da eficiência de um secador solar. A capacidade dos materiais utilizados na construção do secador em permitir a passagem dessa radiação solar, conservá-la, tornando-se um isolante térmico, e a estrutura como é construída definindo o escoamento desse ar, é que determina se o secador solar apresenta uma alta eficiência.

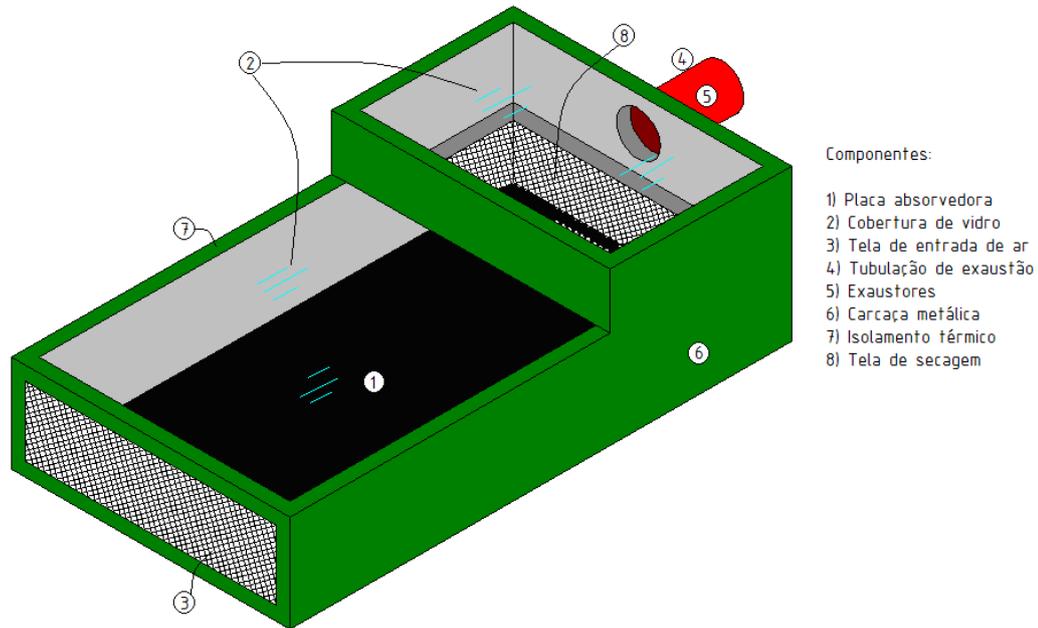
A escolha do material para os principais componentes do secador, que são o absorvedor, a cobertura e a carcaça exerce uma importante função para a sua eficiência térmica. No caso analisado da cobertura, a característica necessária para a uma melhor eficiência ótica do coletor solar do secador é obtida através do uso de um material translúcido, capaz de obter os maiores valores de transmissividade à radiação solar incidente sobre a cobertura (aumentando a fração da energia incidente no absorvedor) e baixos valores de radiação térmica de ondas longas (reduzindo perdas devido à radiação emitida pelo absorvedor que atravessaria a cobertura em direção á atmosfera), conforme descrito por Ferreira (2004). O material da cobertura deve ser capaz de absorver a radiação solar incidente sobre ele e evitar que ocorra a perda de energia para o ambiente externo, possibilitando a manutenção da temperatura desejada.

Este trabalho concentra-se no estudo da influência da transmissividade espectral de diferentes tipos de materiais na eficiência ótica e perdas radiantes para a construção da cobertura de um secador solar.

1.2 Objeto de Estudo

A análise de eficiência ótica desenvolvida nesse trabalho será realizada em possíveis materiais da cobertura do secador solar esquematizado na Figura 1.

Figura 1 - Representação esquemática do secador solar



Fonte: Oliveira (2010)

Neste secador, parte da radiação solar incidente na cobertura translúcida construída de vidro chega até a placa absorvedora de aço galvanizado pintada de preto fosco, sendo transformada em calor, aquecendo por convecção o ar no interior da estrutura do secador proveniente da tela de entrada de ar. O ar aquecido inicia o processo de remoção de umidade do produto através da vaporização térmica, que é a transformação de água em vapor em temperaturas abaixo a temperatura de fusão. O sistema de exaustão remove esse ar com a umidade para o ambiente externo, para que esse processo de retirada de umidade do produto seja contínuo, evitando a reabsorção de umidade e melhorar o nível de escoamento do secador.

A carcaça do secador (construída e em operação no *campus* II do CEFET-MG) é constituída de uma estrutura de madeira (caixeta), de baixo peso e alta resistência mecânica. A estrutura oferece suporte para os componentes internos do secador, além de promover um isolamento térmico com o ambiente, já que a mesma é revestida por aço galvanizado interna e externamente, com o isolamento interno de lã de vidro, reduzindo perdas de calor do secador.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é realizar um estudo da influência da transmissividade espectral de diferentes materiais para cobertura na eficiência ótica e nas perdas radiantes de um secador solar. Para alcançar este objetivo, são objetivos específicos deste trabalho:

- Realizar uma pesquisa bibliográfica sobre transmissividade espectral de materiais translúcidos que podem ser utilizados como cobertura de secadores solares;
- Avaliar as transmissividades médias, para diferentes materiais estudados de cobertura, em relação à radiação solar e à radiação infravermelha;
- Realizar análise comparativa entre os materiais estudados, verificando o que proporcionará máxima eficiência ao ser utilizado em um coletor de um secador solar.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 RADIAÇÃO TÉRMICA

3.1.1 Princípios de radiação

A transferência de calor por radiação térmica não depende de um meio material. Os mecanismos de emissão provêm do nível de oscilações e excitações dos elétrons constituintes da matéria, ou seja, a energia interna presente em cada material promoverá as trocas de radiações para o ambiente em que se encontra (INCROPERA *et al.*, 2008). Em suma, esse mecanismo de propagação pode ser caracterizado como um fenômeno de propagação da luz, explicados pela teoria ondulatória eletromagnética, ou como um fenômeno corpuscular, quando ocorre sua interação com a matéria (emissão e absorção). Todo corpo que apresenta temperatura acima de 0K vai emitir radiação (FERREIRA, 2004).

Segundo Incropera *et al.* (2008), em materiais sólidos ou líquidos, a radiação emitida ocorrerá na região mais externa, ou seja, na superfície do material, já que a radiação emitida nas moléculas constituintes no interior do material será absorvida pelas moléculas adjacentes, até a uma distância de aproximadamente 1 μ m de sua superfície exposta. Esta radiação eletromagnética emitida é compreendida por uma mistura com diferentes comprimentos de onda dependente da temperatura que o material se encontra.

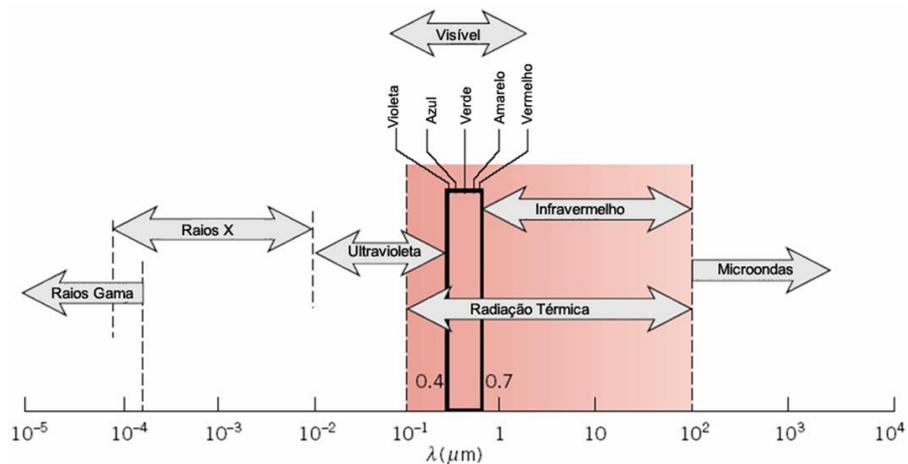
Como a radiação está relacionada à propagação de ondas eletromagnéticas, ela possui propriedades de onda padrão de frequência (ν) e comprimento de onda (λ). Para a sua propagação em um determinado meio, a Equação 1 apresenta as duas propriedades relacionadas por:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1)$$

Onde que c é a velocidade da luz no meio, no vácuo, $c_0 = 2,998 \times 10^8$ m/s .

O espectro eletromagnético completo está representado na Figura 2.

Figura 2 - Espectro da radiação eletromagnética



Fonte: Incropera *et al.* (2008)

A porção delimitada pelo comprimento de onda de aproximadamente $0,1$ até 100 μm é a de interesse para os estudos, pois ele que causa e afeta o estado térmico da matéria. Ela é então denominada radiação térmica e é constituída pelas frações de ultravioleta e todo o infravermelho. A radiação também, segundo Ferreira (2004), será dependente tanto das características da superfície emissora quanto da temperatura em que esta se encontra, logo, a magnitude dessa radiação será diferente em cada comprimento de onda e também varia em cada direção.

3.1.2 Intensidade da Radiação

A intensidade da radiação (I) é um fator dependente da direção na qual ela está sendo distribuída. Ela pode ser determinada tanto quando chega a uma superfície de diferentes direções ou quando sai de uma, demonstrando como essa superfície responde a essa radiação (INCROPERA *et al.*, 2008).

O poder emissivo (E) é definido como a taxa de energia emitida por radiação em todas as direções por unidade de área (W/m^2). Já o poder emissivo espectral (E_λ) é a taxa emitida por radiação em todas as direções, por unidade de área, no comprimento de onda específico λ_0 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$). Segue então desta relação à Equação 2 para poder emissivo em um comprimento de onda,

$$E_\lambda = f(\lambda) \quad (2)$$

e Equação 3 para poder emissivo global.

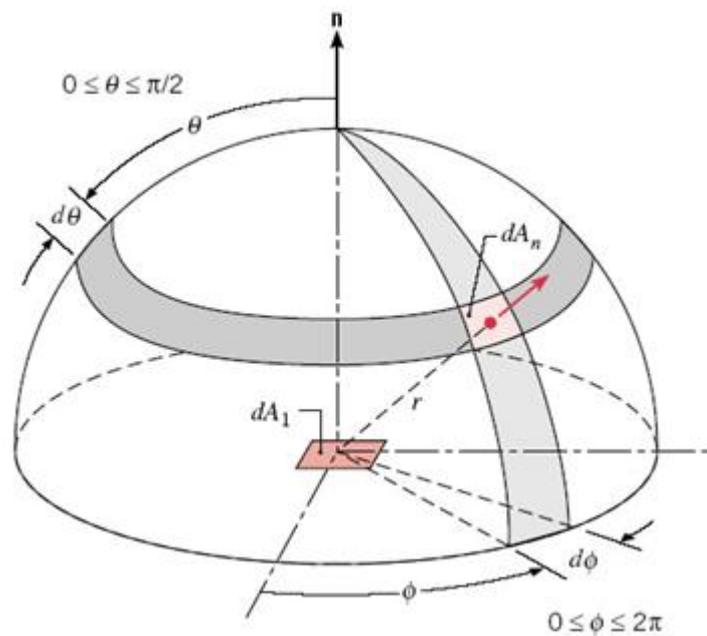
$$E_\lambda = \int_0^\infty f(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

Como essa radiação emitida pode variar em direções (θ, ϕ) , defini-se como intensidade espectral (I_λ) a taxa de radiação emitida no comprimento de onda (λ) na direção (θ, ϕ) , por unidade de área (FERREIRA, 2004).

$$I_\lambda = f(\lambda, \theta, \phi) \quad (4)$$

Assim, para o cálculo do poder emissivo em função da intensidade, é necessário utilizar um hemisfério hipotético sobre um dA conforme a Figura 3.

Figura 3 - Emissão a partir de um elemento de área diferencial dA_1 para um hemisfério hipotético



Fonte: Incropera *et al.* (2008)

Resultando na Equação 5 (INCROPERA *et al.*, 2008):

$$E_{\lambda}(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta \, d\theta \, d\phi \quad (5)$$

Que é específica para um comprimento de onda. Caso seja em todos os comprimentos de onda, deve ser calculada pela Equação 6 (INCROPERA *et al.*, 2008):

$$E_{\lambda}(\lambda) = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta \, d\theta \, d\phi \quad (6)$$

Uma aproximação razoável utilizada para o cálculo de emissividade para muitas superfícies é utilizando a de emissor difuso (FERREIRA, 2004), que emite a mesma intensidade de radiação independente da direção (θ, ϕ), resultando na Equação 7:

$$I=f(\lambda) \quad (7)$$

Com essa independência da direção, o cálculo do poder emissivo resulta na Equação 8 (INCROPERA *et al.*, 2008):

$$E_{\lambda} = \pi \cdot I_{\lambda}(\lambda) \quad (8)$$

3.1.3 Irradiação

De maneira análoga ao cálculo do poder emissivo, a intensidade da radiação incidente na superfície, definida como a Irradiação Espectral (G_{λ}), pode ser calculada da seguinte maneira, através da Equação 9, segundo Incropera *et al.* (2008):

$$G_{\lambda}(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta \, d\theta \, d\phi \quad (9)$$

Que determina a radiação de comprimento de onda λ que incide sobre uma superfície por unidade de área da superfície e por unidade de intervalo de comprimento de onda $d\lambda$ no entorno de λ , chamada de irradiação espectral G_{λ} .

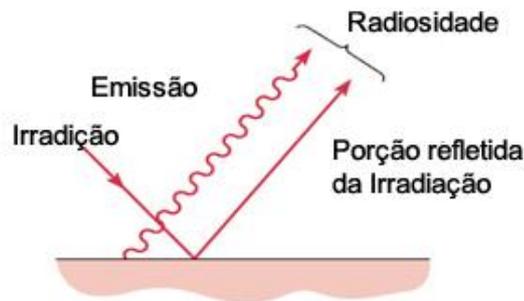
Se a radiação for difusa, a irradiação (I) é independente de (θ, ϕ) e é calculada conforme Equação 10.

$$G_{\lambda}(\lambda) = \pi \cdot I_{\lambda}(\lambda) \quad (10)$$

3.1.4 Radiosidade

A radiosidade compreende a porção de radiação que vai ser emitida mais a porção refletida da irradiação conforme a Figura 4 esquematizada.

Figura 4 - Radiosidade em uma superfície



Fonte: Incropera *et al.* (2008)

3.1.5 Corpo Negro

De acordo com Incropera *et al.*(2008), é necessário para o cálculo do poder emissivo, irradiação ou radiosidade de superfícies reais, estabelecer um padrão. Esse padrão no caso seria o corpo negro, utilizando-se de algumas definições:

1. O corpo negro absorve toda a radiação incidente.
2. É considerado um emissor perfeito, ou seja, nenhuma outra matéria emite mais energia que ele.
3. É considerado um emissor difuso.

Para o cálculo da intensidade espectral do corpo negro, é utilizada a Equação 11, determinada por Planck.

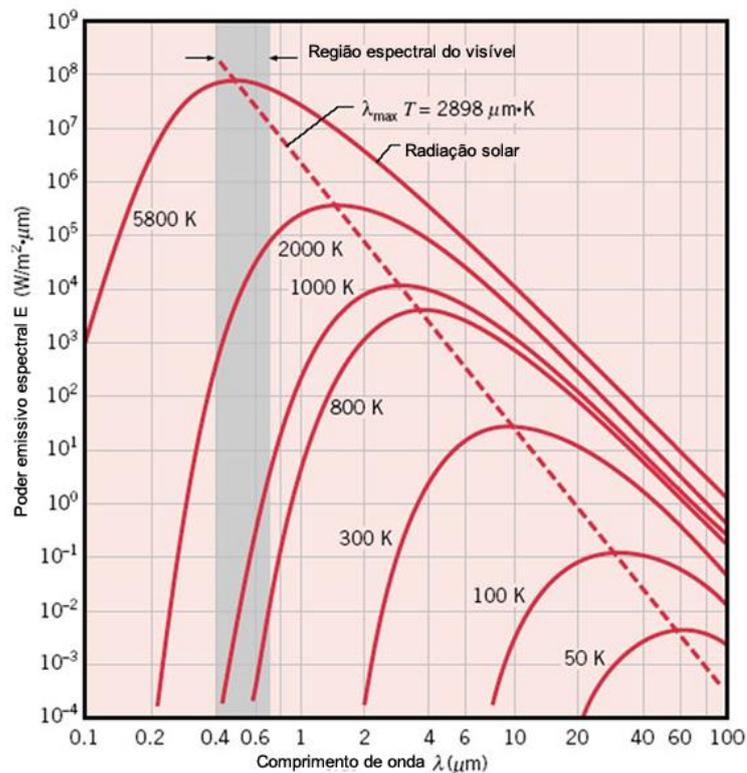
$$I_{\lambda, \text{cn}}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot [e^{(hc/\lambda kT)} - 1] \quad (11)$$

Como o corpo negro é difuso, segue a Equação 12, segundo Incropera *et al.* (2008), para o seu poder emissivo:

$$E_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \quad \begin{cases} C_1 = 3,742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2 \\ C_2 = 1,439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K} \end{cases} \quad (12)$$

A análise dessa equação representada graficamente na Figura 5 demonstra que a radiação vai variar continuamente com o comprimento de onda, e que em temperatura fixa, a magnitude da radiação aumenta com o aumento da temperatura.

Figura 5 - Poder emissivo espectral de corpos negros



Fonte: Incropera *et al.* (2008)

A linha tracejada representa a Lei do Deslocamento de Wien, que a partir da derivada da equação de poder emissivo em relação à temperatura (T) e igualando a zero, obtêm-se a Equação 13:

$$\lambda_{\text{máx}} = C_3 / T \quad (13)$$

onde que $C_3 = 2897,8 \mu\text{m.K}$

Que representa os pontos de comprimento de onda no qual o poder de emissividade do corpo negro será máximo.

A lei de Stefan-Boltzmann realiza a integração do poder de emissividade (Equação 12) do corpo negro varrendo todos os comprimentos de onda, gerando a Equação 14

$$E_{\text{cn}} = \sigma T^4 \quad (14)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$).

A Equação 14 facilita o cálculo de emissividade de um corpo negro apenas dependendo de sua temperatura.

Como a emissão é difusa. Tem-se que a intensidade do corpo negro é dada pela Equação 15

$$I_{\text{cn}} = E_{\text{cn}} / \pi \quad (15)$$

No entanto, conforme as definições estabelecidas pelo corpo negro, nem todo corpo vai emitir radiações como ele. Segundo Ferreira (2004), define-se como emissividade (ε) a razão entre a radiação emitida pela superfície e a emitida por um corpo negro a mesma temperatura, definida pela Equação 16

$$\varepsilon = f(\theta, \phi, \lambda, T) \quad (16)$$

e Equação 17, para um emissor difuso.

$$\varepsilon = f(\lambda, T) \quad (17)$$

Algumas definições sobre absortividade, refletividade e transmissividade estão bem definidas de acordo com Ferreira (2004). A absortividade (α) da superfície está relacionada com a fração entre a radiação incidente e a radiação absorvida. A refletividade (ρ) da superfície é

relacionada com a fração entre radiação incidente e a refletida. A transmissividade (τ) da superfície é relacionada com a fração entre a radiação incidente e a transmitida

Todas essas propriedades podem também ser definidas em função do comprimento de onda (λ), e da direção da radiação (θ, ϕ) e seguem a seguinte relação segundo Incropera *et al.* (2008), como são mostradas nas Equações 18 e 19:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (18)$$

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1 \quad (19)$$

3.1.6 Energia Solar

Segundo Duffie e Beckman (1991), o valor da temperatura da superfície do Sol, determinado pelo fluxo de energia emitido pela sua superfície, considerando-a como corpo negro, possui o valor de 5777K. Como o Sol não possui uma distância fixa entre a Terra, devido a sua excentricidade de órbita, se faz necessário determinar o fluxo médio de energia emitido pela superfície solar incidente sobre a Terra. A Constante Solar (G_{SC}) é esta energia captada em direção ortogonal a esta radiação, para a distância média entre o Sol e a Terra ($1,495 \times 10^{11}$ m). O valor obtido para esta constante foi de $G_{SC} = 1367 \text{ W/m}^2$ (DUFFIE E BECKMAN, 1991).

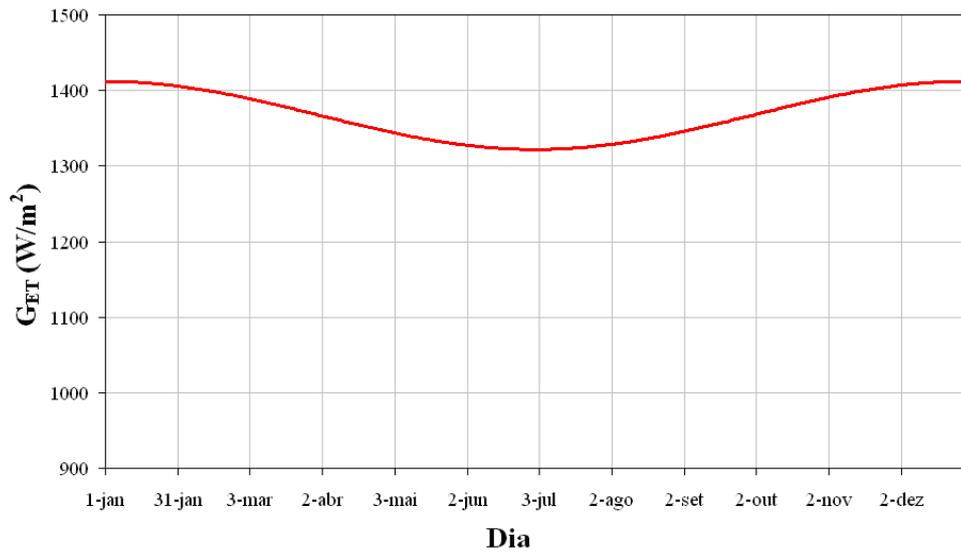
A radiação extraterrestre (G_{ET}) é a radiação incidente sobre uma superfície fora da atmosfera terrestre, em posição normal a esta propagação de radiação. Segundo Duffie e Beckman (1991), esta radiação não é dependente de condições climáticas, horário e localização, pois a superfície acompanha sempre as condições de perpendicularidade em relação a esta radiação incidente. Esta radiação extraterrestre apresenta duas variáveis, uma relacionada à variação do fluxo de energia emitida pelo Sol, no qual foi assunto de diversas análises em pesquisas, gerando resultados pouco conclusivos. A outra está relacionada com a variação da distância existente entre a Terra e o Sol, no qual devido a sua órbita excêntrica, apresenta uma variação de distância entre os centros da mesma de 1,7%.

A radiação extraterrestre pode ser calculada a partir da Equação 20:

$$G_{ET} = G_{SC} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360^\circ n}{365} \right) \right] \quad (20)$$

A Equação 20 permite determinar a radiação extraterrestre (G_{ET}) em função da variação do dia do ano (n), apresentando uma variação anual de $\pm 3\%$. Alguns valores foram utilizados por Ferreira (2004) obtendo um comportamento desta radiação ao longo do ano para a Terra, representados na Figura 6.

Figura 6 - Variação da Radiação Solar Extraterrestre ao longo o do ano.



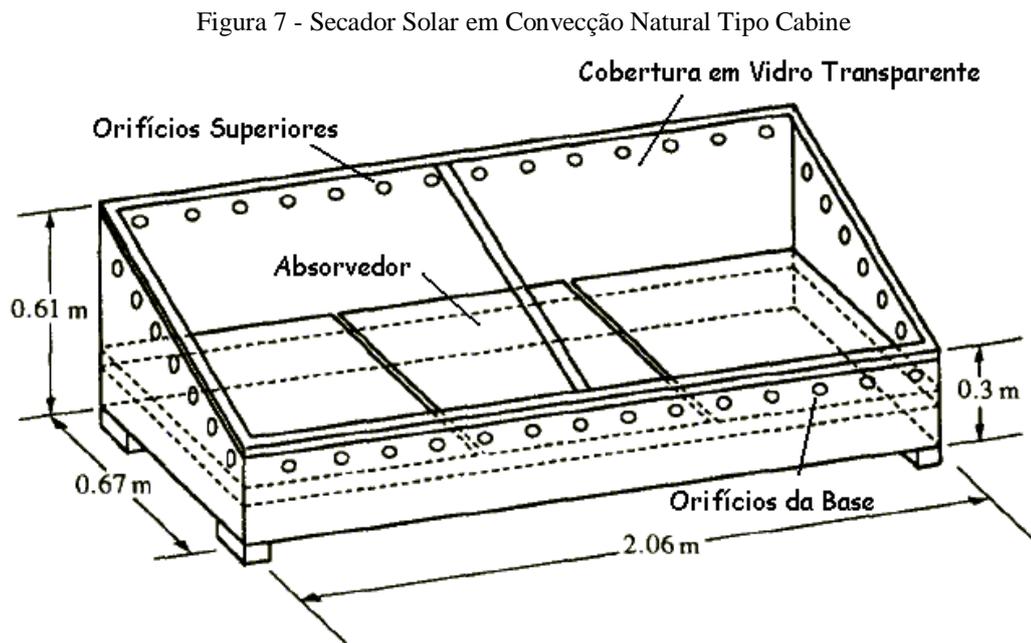
Fonte: Ferreira (2004)

3.2 TIPOS DE SECADORES SOLARES

3.2.1 Secadores Solares Passivos Integrados

Os secadores solares passivos integrados apresentam como característica o escoamento do fluxo de ar através de convecção natural, além da disposição dos produtos serem inseridos diretamente sob as placas absorvedoras. Existem três tipos de secadores solares com este formato que são mais facilmente utilizados, o secador tipo cabine, secador tipo coletor com chaminé e secador tipo estufa com chaminé.

O secador solar tipo cabine apresenta como características orifícios para possibilitar o fluxo de ar, mantendo a circulação do ar para remover a umidade presente na região interna do secador. A Figura 7 apresenta um modelo de secador solar tipo cabine produzido por Sharma *et al.* (1995).

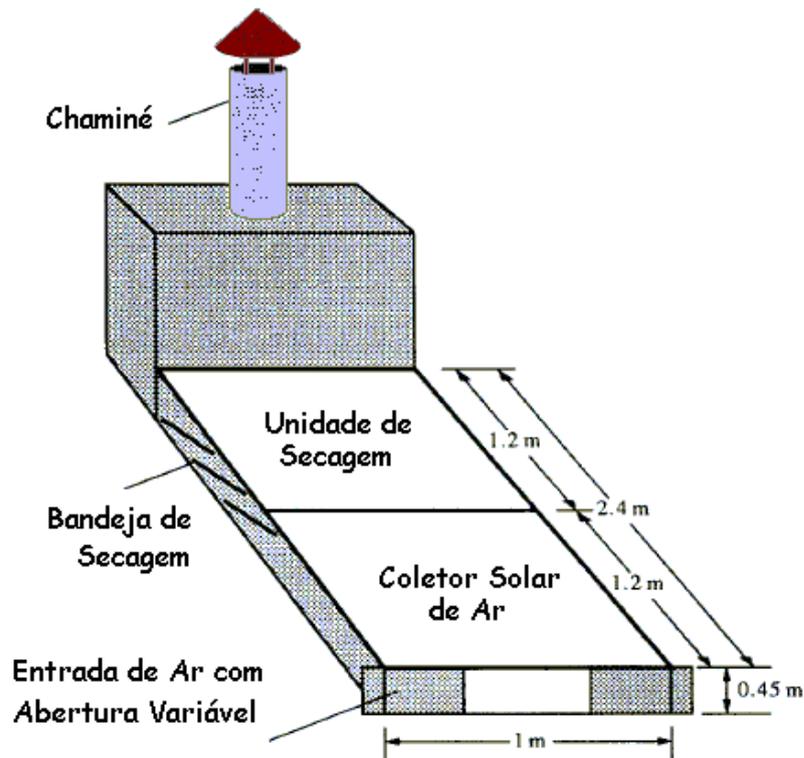


Fonte: Adaptado de Sharma *et al.* (1995)

O secador solar tipo coletor com chaminé é a construção de um secador solar adaptado com uma chaminé. Esta chaminé, promove uma sucção do ar interno proveniente de uma abertura na região do secador, formando um fluxo de ar que se forma através da convecção. No primeiro compartimento a incidência de radiação solar aquece o ar, enquanto no segundo, esse ar aquecido passa pelos produtos a secar, que também sofre diretamente a incidência da

radiação solar, possibilitando maior secagem. A Figura 8 mostra um tipo de secador solar com chaminé construído por Sharma *et al.* (1995).

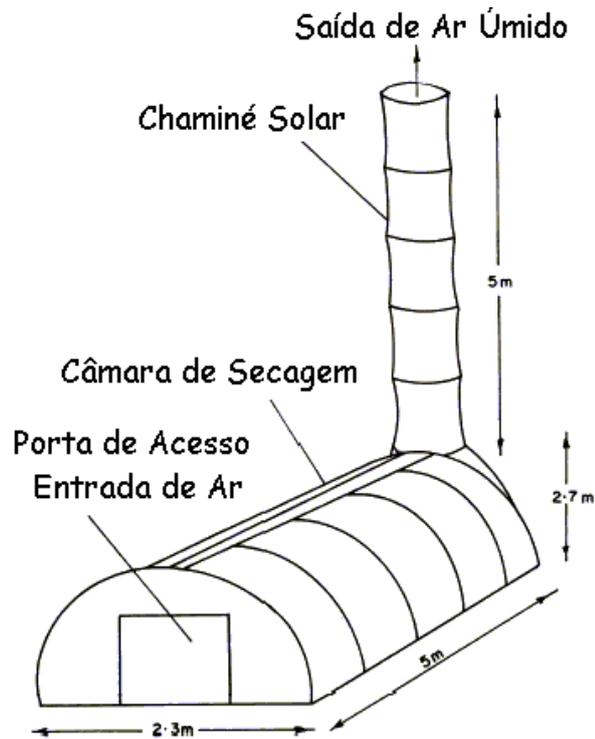
Figura 8 - Secador Solar Tipo Coletor com Chaminé



Fonte: Adaptado de Sharma *et al.* (1995)

O secador solar tipo estufa com chaminé é construído para realizar secagem em grande escala dos produtos. Ele é constituído por uma estufa de material de cobertura translúcido na qual apresenta uma estrutura de chaminé que possibilita a saída do ar aquecido através da convecção natural. Este ar é aquecido pela incidência da radiação solar transmitida pela cobertura que aquece o solo e também os produtos à serem secados. A Figura 9 apresenta um modelo de secador solar tipo estufa com chaminé construído por Ekechukwu e Norton (1999).

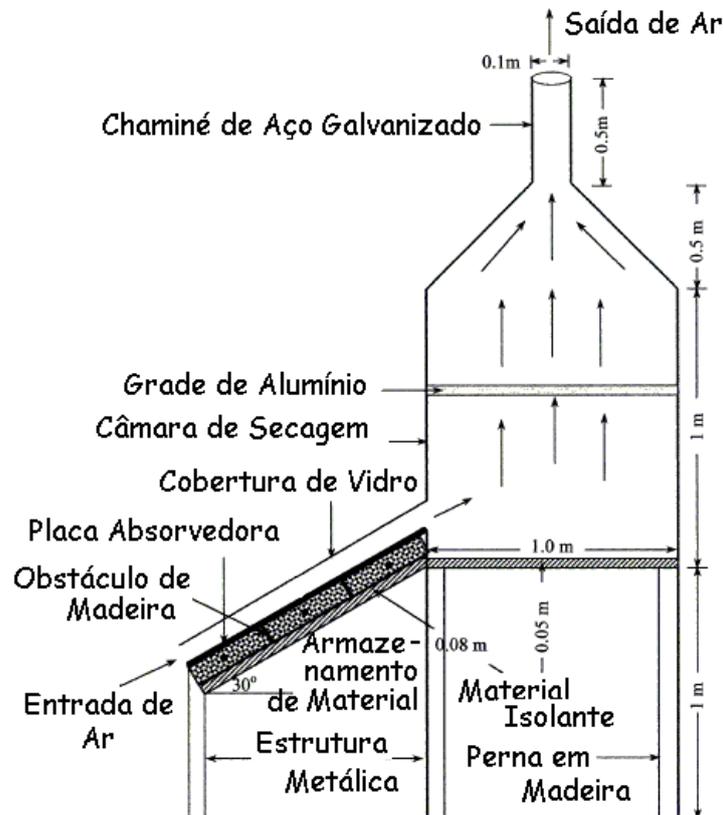
Figura 9 - Secador Solar Tipo Estufa com Chaminé



Fonte: Adaptado de Ekechukwu and Norton (1999)

3.2.2 Secadores Solares Passivos Distribuídos

Os secadores solares passivos distribuídos são dispostos por uma entrada de ar, na qual ela vai apresentar placas absorvedoras que através da incidência da radiação solar, promoverão o aquecimento do ar gerando o fluxo de ar aquecido por convecção natural, passando pelos produtos a serem secados e saindo por uma chaminé. A Figura 10 apresenta um secador solar passivo distribuído construído por El-Sebaili *et al.* (2002).

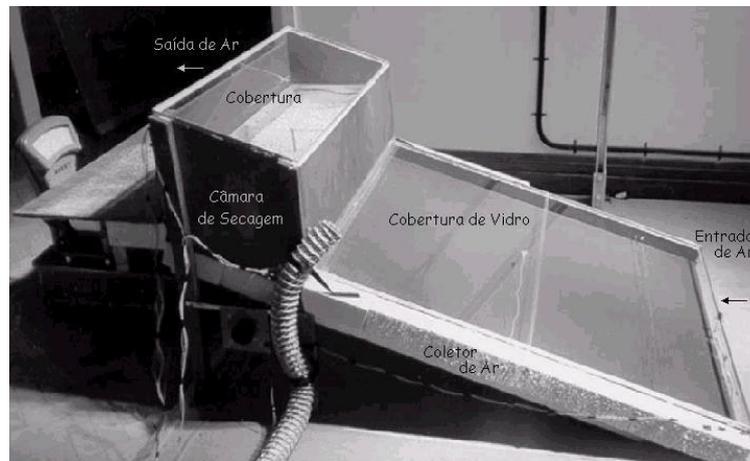
Figura 10 - Secador Solar de El-Sebaili *et al.* (2002)

Fonte: Adaptado de El-Sebaili *et al.* (2002)

3.2.3 Secadores Solares Passivos Mistos

Os secadores solares passivos mistos assemelham-se com os passivos distributivos. Possuem um coletor solar que permite a incidência de radiação solar para aquecer o ar que entra no secador, formando uma convecção natural que passa pelos produtos a serem secados, e na câmara de secagem, apresenta uma cobertura translúcida que permite que esta incidência de radiação solar realize o aquecimento e a secagem do produto. A Figura 11 apresenta um modelo de secador solar passivo misto construído por Simate (2003).

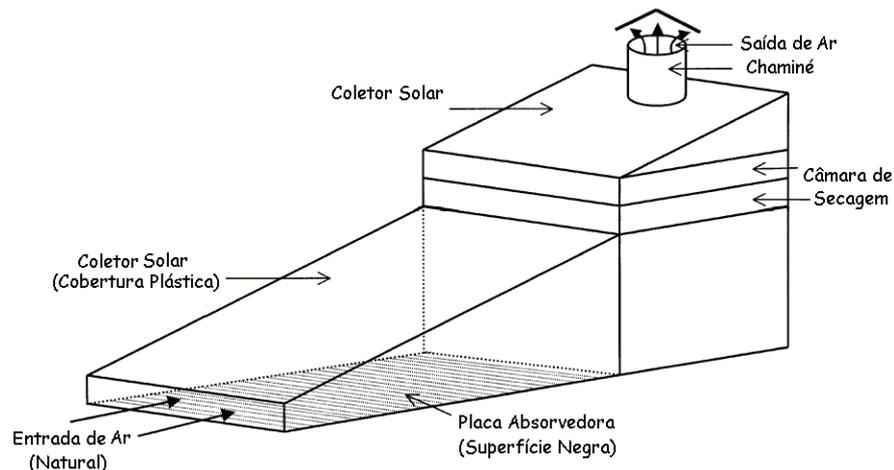
Figura 11 - Secador Solar de Simate (2003)



Fonte: Adaptado de Simate (2003)

Basunia e Abe (2001) contruíram um secador solar passivo misto, conforme a Figura 12 adaptados com uma chaminé, no qual permitiu um aumento significativo para a vazão de escoamento, que reduziu o tempo de secagem dos produtos.

Figura 12 - Secador Solar de Basunia e Abe (2001)



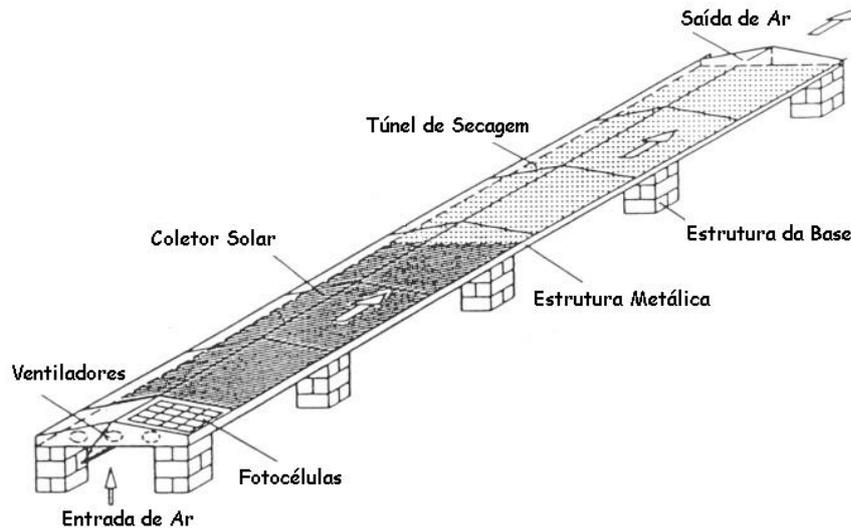
Fonte: Adaptado de Basunia e Abe (2001)

3.2.4 Secadores Solares Ativos Integrados

Dos secadores solares ativos integrados, os mais utilizados são os secadores do tipo túnel. Para este tipo de secador, o ar é induzido a entrar no secador através de exaustores. O

escoamento de ar, primeiramente ao entrar no secador, é aquecido pela placa absorvedora do coletor solar e em seguida passa pelo túnel de secagem, atravessando os produtos e saindo para o ambiente externo através de uma saída do secador. A Figura 13 apresenta um secador solar tipo túnel construído por Schirmer *et al.* (1996).

Figura 13 - Secador Tipo Túnel



Fonte : Adaptado de Schirmer *et al.* (1996)

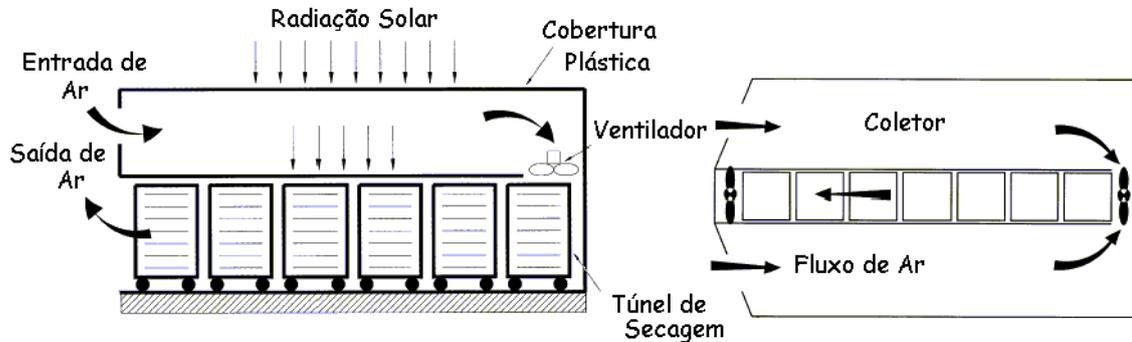
Algumas modificações deste tipo de secador podem ser feitas, tais como as realizadas por Bala *et al.* (2003), no qual este secador apresentou como cobertura para o coletor solar um plástico transparente e o escoamento do ar aquecido realizado por dois ventiladores acionados por um painel fotovoltaico, além de um revestimento interno feito por lã de vidro, evitando assim perdas térmicas para o ambiente externo.

3.2.5 Secadores Solares Ativos Mistos

O secador solar ativo é o secador solar formado pelo tipo túnel-estufa, conforme descritos por Condorí *et al.* (2001). Este modelo de secador de acordo com a Figura 14, apresenta entradas nas quais possibilitam a entrada de ar para dentro do secador. O fluxo de ar é aquecido através de sua passagem sobre um plástico preto e através da incidência solar transmitida pela cobertura translúcida. O ar então por correntes de convecção e indução de ventiladores

funcionando como exaustores, produz um escoamento de ar forçado para dentro do túnel de secagem realizando assim, a secagem do produto e a saída deste ar para o ambiente externo.

Figura 14 - Secador de Condorí *et al.* (2001)



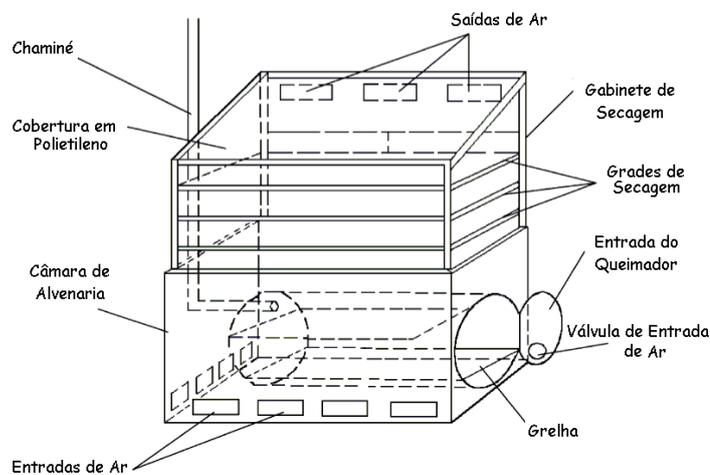
Fonte: Adaptado de Condorí *et al.* (2001)

3.2.6 Secadores Solares Híbridos

Os secadores solares híbridos realizam o processo de secagem utilizando não só exclusivamente a radiação solar incidente, mas também outras formas externas de energia capaz de complementar o processo caso haja períodos de baixa insolação, possibilitando assim uma forma de secagem contínua e mais eficiente.

Na Figura 15, é apresentado um tipo de secador solar híbrido feito por Bena e Fuller (2002), onde um queimador simples de biomassa é utilizado para o aquecimento do ar. Tal processo também poderia ser realizado utilizando combustíveis e/ou aquecimento elétrico.

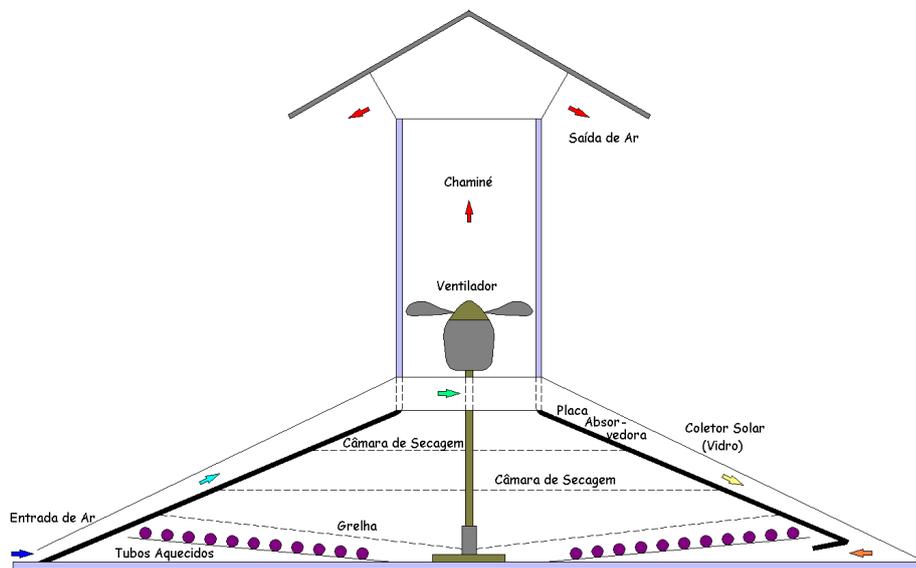
Figura 15 - Secador de Bena e Fuller (2002)



Fonte: Adaptado de Bena e Fuller (2002)

Ivanova *et al.* (2003) desenvolveu um secador solar que utiliza como auxílio para a energia solar, fontes geotérmicas naturais de água quente para realizar o aquecimento do ar de secagem. O modelo esquemático do secador está representado na Figura 16. O ar é aquecido tanto pela radiação solar através das regiões compreendidas entre a cobertura translúcida e a placa absorvedora, quanto durante a sua passagem pelos tubos aquecidos pela água quente das fontes naturais. Logo, o ar passa por entre a câmara de secagem, realizando assim a retirada de umidade dos produtos utilizados, sendo então, removido através de um exaustor.

Figura 16 - Secador de Ivanova *et al.* (2003)



Fonte: Adaptado de Ivanova *et al.* (2003)

3.3 COMPONENTES DE SECADORES SOLARES

O secador solar possui como componentes uma cobertura translúcida, capaz de transmitir a radiação solar incidente emitida pela superfície do sol, para o interior do secador, além de ser responsável em minimizar as perdas térmicas para o ambiente externo. Uma superfície absorvedora, capaz de absorver estas radiações solares transmitidas pela cobertura, transformando-as em calor para o aquecimento do ar no ambiente interno do secador. Um gerador de escoamento seja ele ventiladores para forçar a passagem do fluxo de ar, ou através de convecção natural, para realizar a secagem do produto. E por último, um armazenador de calor, caso seja necessário, capaz de possibilitar a manutenção da temperatura do secador caso ele sofra muitas oscilações.

3.3.1 Superfície Absorvedora

Para análises de superfícies absorvedoras, duas características relacionadas às suas propriedades do material devem estar bem descritas para aplicação em energia solar. A absorção de radiação solar pela superfície do material absorvedor transmitida pela cobertura, denominando-se absortividade (α), e também a radiação térmica que o material vai emitir da parcela de radiação solar não absorvida, chamando-se de emissividade (ϵ).

3.3.1.1 Absortividade (α)

Um material para ser utilizado nos secadores solares deve apresentar como propriedades características para a absortividade, valores próximos a 100%. Tal valor representa a quantidade de radiação solar que será absorvida por este material, que será capaz de ser transformada em calor para promover o aquecimento do ar.

Um dos parâmetros analisado para a absortividade do material é o ângulo de incidência desta radiação solar sobre o material, mas como a variação angular, de acordo com Ferreira (2004), não representa variações significativas para diferentes tipos de materiais, é utilizada geralmente a hipótese de absorção difusa, no qual será independente o ângulo de incidência da radiação solar transmitida. O outro parâmetro, que é mais utilizado e que configura em

variações mais representativas é a capacidade de absorção dos materiais em função de cada comprimento de onda (λ) da radiação espectral. Os valores ideais para materiais utilizados como absorvedores devem apresentar elevada absorvidade média para a região de comprimento de onda entre $0,3\mu\text{m}$ e $3,0\mu\text{m}$ (FERREIRA, 2004). Esta faixa de comprimento de onda é a região onde ocorrem os maiores valores para a radiação solar transmitida que incide no absorvedor, sendo ela parte da radiação ultravioleta, cobrindo toda a luz visível e uma parcela da radiação infravermelha.

A utilização de materiais opacos para superfície absorvedora se faz necessário devido ao mesmo não permitir a passagem dessa radiação solar, ou seja, o material não apresenta valores de transmissividade. Logo, parte da radiação incidente sobre eles serão absorvidas e refletidas, resultando assim na seguinte relação.

$$\alpha + \rho = 100\% \quad (21)$$

Onde (α) representa a parcela de radiação solar absorvida e ρ a radiação solar refletida pela superfície do material.

Como as características de absorvidade dos materiais são determinadas pela sua superfície, segundo Ferreira (2004), a possibilidade de modificá-las torna este tipo de material aplicável ou não como um absorvedor para secador solar, dependendo de cada tipo de situação. A Tabela 1 apresenta valores de absorvidade de alguns materiais. Fatores como pinturas poderiam influenciar nos valores de absorvidade dos materiais.

Tabela 1 - Absortividade Média de Materiais Opacos à Radiação Solar

Material	Absortividade (α)
Alumínio Puro	9% a 10%
Alumínio Anodizado	12% a 16%
Carbono Preto Blindado	94%
Cobre Polido	35%
Ferro	44%
Óxido de Magnésio	14%
Tinta Parson Negra	98%
Níquel	36% a 43%
Ouro	20% a 23%

Fonte: Ferreira (2004)

3.3.1.2 Emissividade (ϵ)

A emissividade é a capacidade que um corpo quando aquecido possa emitir a radiação térmica para o ambiente externo a ele. Os valores obtidos vão variar na escala de 0 à 100%, onde que quando um corpo apresenta 100% de emissividade, ele vai ser definido como “corpo negro”.

Para corpos negros, o poder emissivo pode ser determinado em termos espectrais pela distribuição de Planck da Equação 12 ou em termos globais pela Equação 14.

Como a maioria das superfícies absorvedoras não possui 100% de emissividade, característico de um corpo negro, a emissividade será determinada a partir da Equação 22 para diferentes tipos de superfícies, pois parte da radiação será perdida na forma de absorção.

$$E = \epsilon \sigma T^4 \quad (22)$$

Onde ϵ é a emissividade da superfície, que varia de acordo com os tipos de materiais, apresentando valor mínimo ou nulo (superfície totalmente opaca) ou máximo (corpo negro).

A Tabela 2 representa a emissividade média de alguns materiais em função de diferentes temperaturas em Kelvin (K) para a radiação infravermelha.

Tabela 2 - Emissividade Média de Materiais Opacos à Radiação Infravermelho

Material	$\epsilon(\%)/T(K)$		
Alumínio Puro	10,2/573	13/773	11,3/873
Alumínio Anodizado	84,2/296	72/484	66,9/574
Carbono Preto Blindado	-	83/278	-
Cobre Polido	4,1/338	3,6/463	3,9/803
Ferro	2,5/275	4/468	4,8/668
Óxido de Magnésio	73/380	68/491	56/755
Tinta Parson Negra	98,1/240	98,1/462	-
Níquel	10/310	10/468	12/668
Ouro	2,5/275	4/468	4,8/668

Fonte: Ferreira (2004)

A emissividade (ϵ) do material, de acordo com as análises da tabela, varia de acordo com o comprimento de onda (λ), a temperatura da superfície emissora e do ângulo de direção da emissão (θ). Caso seja um emissor difuso, não haverá dependência do ângulo de direção.

Se uma superfície absorvedora possui elevados valores de emissividade, é sinal de que está havendo maior dissipação de calor para o ambiente externo, logo, a temperatura para aquecimento do ar diminui, ocasionando perdas na eficiência do secador solar, não sendo

favorável para o processo de secagem. Assim, o material em uso, deve apresentar uma alta absorvidade à radiação solar transmitida pela cobertura e baixa emissividade a radiação infravermelha (FERREIRA, 2004).

3.3.1.3 Mecanismo de Seletividade

Um dos mecanismos utilizados para a preparação da superfície absorvedora é a união de elementos que possam se complementar, no qual eles serão capazes de apresentar elevada absorvidade para a radiação solar e baixa emissividade para radiações infravermelhas. Os elementos devem apresentar características distintas entre eles, como um apresentar alta absorvidade e emissividade e sendo utilizado como revestimento superficial, enquanto o outro apresente, de forma contrária, baixa absorvidade e emissividade, sendo este o material a ser revestido (FERREIRA, 2004).

Ao observar a Tabela 3, é possível verificar que o Cromo Negro é uma boa superfície seletiva, no qual é utilizado para o recobrimento de uma placa de níquel, pois apresentou um tipo de material de absorvedor com características desejáveis para o secador solar, como elevada absorvidade para a radiação solar e baixa emissividade à radiação infravermelha.

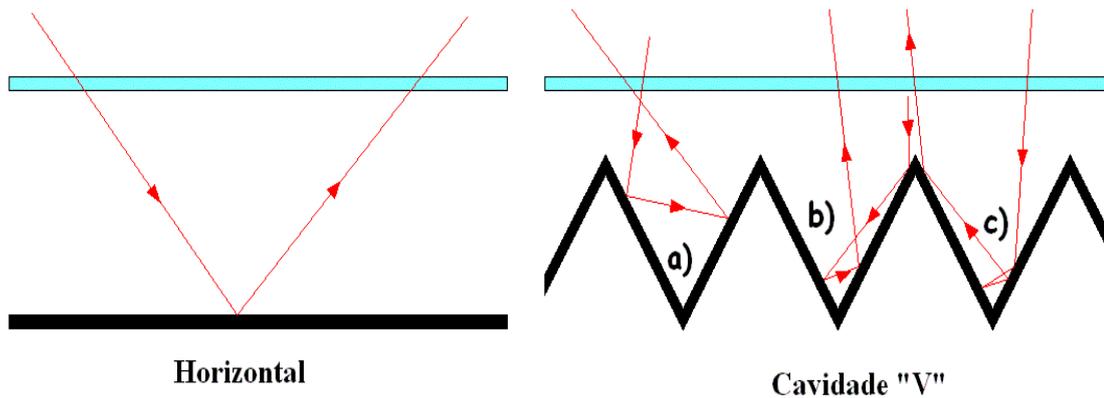
Tabela 3 - Emissividade ao Infravermelho e Absortividade Solar de Superfícies Seletivas

Superfície	α	ϵ
Cromo Negro sobre Placa de Níquel	95%	9%
Níquel Negro sobre Aço Galvanizado	81%	17%
Cobre Negro sobre Cobre	89%	17%
Ebanol C sobre Cobre	90%	16%

Fonte: Ferreira (2004)

A alteração geométrica de uma superfície absorvedora fornece uma outra forma de seletividade, criando situações onde que a radiação solar incidente sobre a placa absorvedora, quando refletida, possa incidir novamente em uma outra região da placa, conservando-o por mais tempo e mantendo a temperatura na região interna entre a cobertura e o absorvedor do secador solar (FERREIRA, 2004).

Figura 17 - Seletividade de Cavidades em "V"



Fonte: Ferreira (2004)

Na Figura 17, está representado esquematicamente que a radiação solar incidente sobre a placa absorvedora, quando esta apresenta uma superfície horizontal, é refletida uma única vez e diretamente para a cobertura, enquanto que em uma superfície com cavidade em "V", esta mesma radiação solar incidente sobre a placa absorvedora é capaz de ser refletida várias vezes e sobre a própria placa absorvedora, absorvendo ainda mais a radiação no interior do secador solar, ocasionando menores perdas térmicas por reflexões para a cobertura do secador.

3.3.2 Cobertura Translúcida

A cobertura translúcida para os secadores solares deve apresentar elevada transmissividade para a radiação solar incidente sobre ela, para que permita que esta radiação solar chegue até a superfície absorvedora, além de refletir a menor quantidade dessa radiação. A cobertura também é caracterizada em confinar a radiação infravermelha emitida pela superfície absorvedora, para que assim, reduza as perdas térmicas do secador para o ambiente externo. Essa radiação deve ser refletida novamente para a superfície do absorvedor ou absorvida pela própria cobertura.

Para que esses parâmetros sejam eficazes para a escolha da cobertura, o material a ser selecionado deve apresentar então a maior transmissividade à radiação solar onde apresentam os maiores valores de incidência em função do comprimento de onda ($0,3\mu\text{m}$ a $3\mu\text{m}$), para que toda a radiação incidida na superfície da cobertura possa ser transferida para o absorvedor, e baixa transmissividade ao infravermelho, para que a radiação emitida pela placa absorvedora possa ser refletida para a placa ou para a cobertura. Isso vai permitir que as perdas térmicas presente no secador possam ser reduzidas (FERREIRA, 2004).

3.3.2.1 Propriedades Óticas da Cobertura Translúcida em Relação à Radiação Solar

A análise das propriedades óticas da cobertura translúcida de cada material é realizada mediante a avaliação de propriedades como transmissão, reflexão e absorção de radiação solar, sendo elas necessárias para avaliar o desempenho e funcionamento em um secador solar. A absorvidade (α_c), a refletividade (ρ_c) e a transmissividade (τ) relacionadas aos materiais translúcidos são determinadas em função do ângulo de incidência da radiação solar (θ), além da espessura da cobertura (E), do índice de refração (n) e do coeficiente de extinção (K) de cada tipo de material.

Antes de se determinar estas propriedades, se faz necessário determinar os valores de radiação para componentes não polarizadas da radiação paralela à radiação direta ($r_{//}$) pela Equação 23 e perpendicular à radiação solar direta, na cobertura (r_{\perp}) pela Equação 24.

$$r_{//} = \frac{\operatorname{tg}^2(\theta_r - \theta)}{\operatorname{tg}^2(\theta_r + \theta)} \quad (23)$$

$$r_{\perp} = \frac{\operatorname{sen}^2(\theta_r - \theta)}{\operatorname{sen}^2(\theta_r + \theta)} \quad (24)$$

Nas Equações 23 e 24, θ_r é o ângulo de refração da radiação solar, modelado pela Lei de Snell representada na Equação 25.

$$\theta_r = \operatorname{arc} \operatorname{sen} \left[\frac{\operatorname{sen}(\theta)}{n} \right] \quad (25)$$

Valores para o índice de refração de alguns materiais que podem ser utilizados para cobertura translúcida de secadores solares foram listados por Ferreira (2004) na Tabela 4.

Tabela 4 - Índice de Refração de Materiais Translúcidos

Material	n
Vidro	1,526
Polimetil	1,49
Polivinilfluorito	1,45
Polifluorinato Etileno Propileno	1,34
Politetrafluoretileno	1,37
Policarbonato	1,60

Fonte: Ferreira (2004)

A transmissividade da cobertura (τ) pode ser modelada, segundo Ferreira (2004), como o produto entre a transmissividade de perdas por absorção (τ_a) com a transmissividade de perdas por reflexão (τ_r), ambas da cobertura, conforme a Equação 26.

$$\tau = \tau_a \cdot \tau_r \quad (26)$$

Considerando apenas a absorção da cobertura, a transmissividade (τ_a) é modelada de acordo com a Equação 27.

$$\tau_a = e^{\frac{-K \cdot E}{\cos(\theta_r)}} \quad (27)$$

Para o vidro transparente, o coeficiente de extinção vale aproximadamente 4 m^{-1} , enquanto que para o vidro verde vale cerca de 32 m^{-1} (FERREIRA, 2004).

Considerando apenas a reflexão da cobertura, a transmissividade (τ_r) é modelada pela Equação 28.

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - r_{//}}{1 + r_{//}} + \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \right] \quad (28)$$

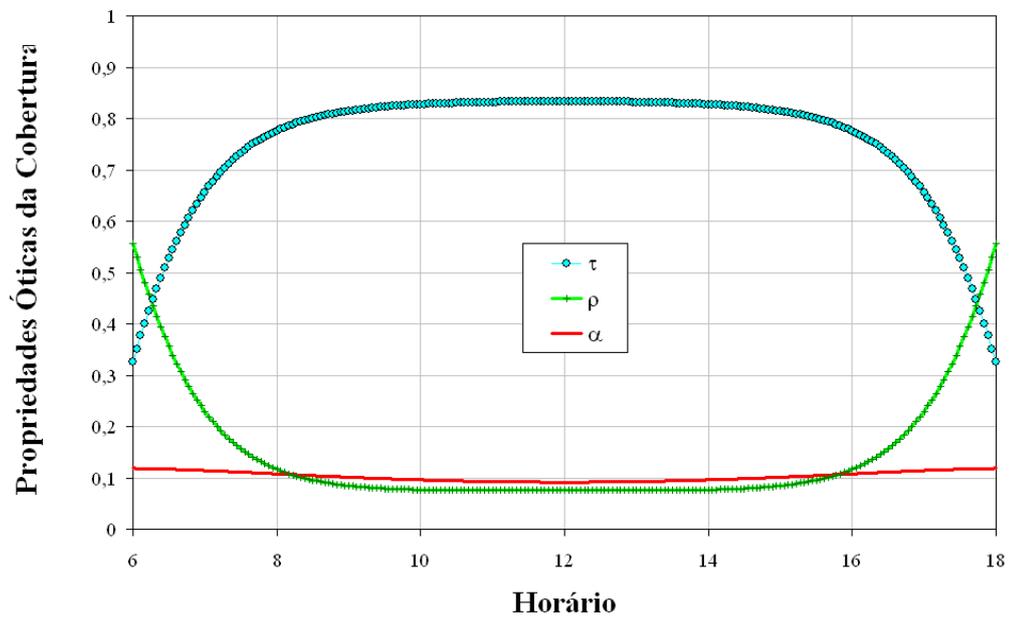
A partir de cada um dos componentes da transmissividade da cobertura (τ_a e τ_r), torna-se possível determinar a sua absortividade (α_c) e sua refletividade (ρ_c), conforme as Equações 29 e 30 respectivamente.

$$\alpha_c = 1 - \tau_a \quad (29)$$

$$\rho_c = 1 - \tau - \alpha_c \quad (30)$$

A Figura 18 apresenta os valores de α_c , ρ_c e τ para uma cobertura de vidro verde (com 3 mm de espessura) para todo o período de brilho solar sobre uma superfície horizontal, em Belo Horizonte, no dia 21 de Dezembro, obtidas por Ferreira (2004).

Figura 18 - Propriedades Óticas do vidro verde horizontal (3mm) ao longo do dia 21/12 em BH



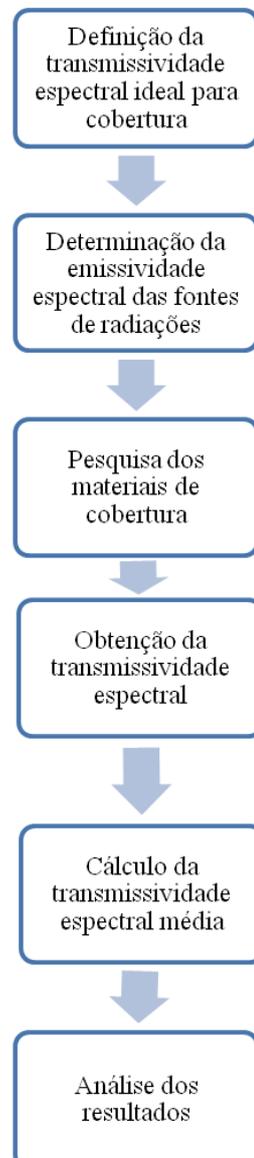
Fonte: Ferreira (2004)

4 METODOLOGIA

4.1 Descrição Geral do Trabalho Realizado

O trabalho foi realizado seguindo a metodologia conforme a Figura 19, no qual foram definidas as características de transmissividade espectral dos materiais a serem utilizados em cobertura de secador solar e a determinação da emissividade espectral da radiação incidente sobre a cobertura, sendo ela infravermelha e solar, cada qual por uma fonte emissora a uma temperatura estabelecida. Após a obtenção dos valores de emissividade espectral das fontes emissoras, estes foram relacionados com a transmissividade espectral de cada material pesquisado, para a obtenção da transmissividade espectral média nas regiões do infravermelho e solar e assim comparando cada valor obtido entre eles, com os característicos ideais a ser utilizado em coberturas de secador solar, avaliando a eficiência de cada material para a cobertura do secador.

Figura 19 – Metodologia utilizada no trabalho

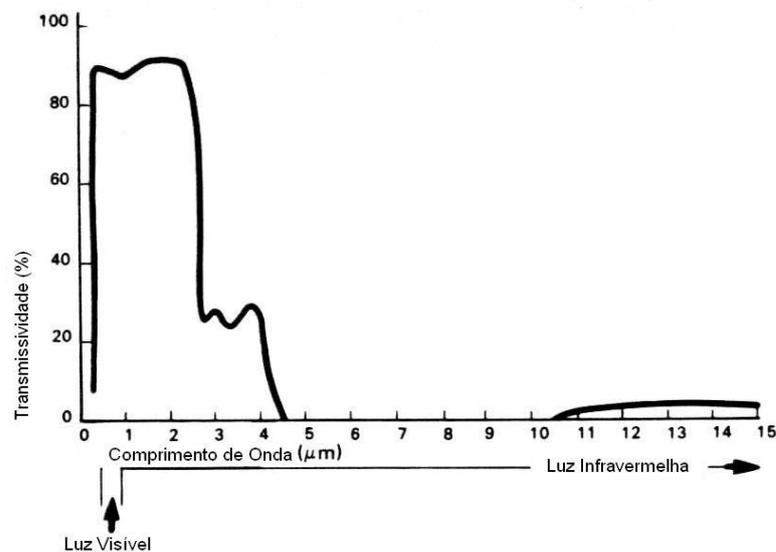


4.2 Considerações Iniciais

O material ideal para a cobertura translúcida de um coletor deve apresentar alta transmissividade à radiação solar ($0,25\mu\text{m} < \lambda < 3\mu\text{m}$), aumentando a radiação solar absorvida pela placa absorvedora, e baixa transmissividade à radiação infra-vermelho ($\lambda > 3\mu\text{m}$), de forma a reduzir perdas de radiação térmica emitida pelo absorvedor para o ambiente, passando através da cobertura.

Em geral, os vidros apresentam estas características, mas dificilmente são encontrados dados na literatura sobre a transmissividade espectral dos vidros para diferentes comprimentos de ondas de radiação. Palz (1981) apresenta a transmissividade espectral de um tipo de vidro, com características físicas e geométricas não identificadas, em função do comprimento de onda, como pode ser visto pela Figura 20.

Figura 20 - Transmissividade do vidro em função do comprimento de onda



Fonte: Adaptado de Palz (1981)

O conhecimento da transmissividade espectral de materiais translúcidos permite a determinação da transmissividade média destes materiais para a radiação solar e para a radiação infravermelha emitida pelo absorvedor.

4.3 Determinação de transmissividade global de materiais de cobertura

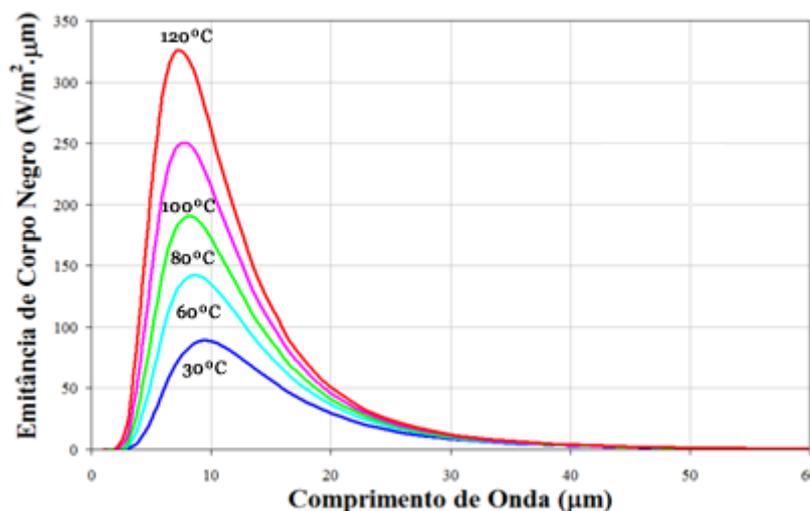
Para analisar a transmissividade média de materiais translúcidos de coberturas (vidros e filmes plásticos) à radiação solar e radiação infravermelha, é necessário determinar a radiação térmica incidente sobre a cobertura, para cada comprimento de onda, isto é, o poder emissivo espectral.

O poder emissivo espectral de corpo negro depende, fundamentalmente, da temperatura da superfície emissora e, segundo Incropera *et al.* (2008), pode ser calculada pela equação de Planck

$$E_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]} \quad \begin{cases} C_1 = 3,742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2 \\ C_2 = 1,439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K} \end{cases} \quad (31)$$

Para o caso específico da radiação infravermelha emitida pelo absorvedor, ensaios experimentais preliminares realizados por Ferreira (2004) no secador construído têm mostrado que a temperatura superficial do absorvedor apresentou variações de temperatura entre 30°C e 120°C. Substituindo cada uma destas temperaturas na Equação 31 de Planck, torna-se possível determinar aproximadamente a radiação incidente sobre a cobertura para cada temperatura do absorvedor. A Figura 21 apresenta a estimativa da radiação emitida pelo absorvedor, em direção à cobertura, em função da temperatura do absorvedor.

Figura 21 - Poder emissivo espectral de corpo negro de 30°C a 120°C



Fonte: Ferreira (2004)

Já a radiação solar incidente sobre a superfície pode ser aproximada pelo poder emissivo espectral de um corpo negro a 5777K (DUFFIE E BECKMAN, 1991). Deve ser observado que esta radiação sofre significativas reduções em virtude da atenuação atmosférica e do ângulo de incidência, mas mantém os comprimentos de onda da radiação oriunda do sol.

A transmissividade média de cada material de cobertura em função da temperatura pode ser determinada pela razão entre a energia transmitida de cada material e a energia incidente proveniente de cada fonte emissora de radiação (INCROPERA *et al.*, 2008), conforme a Equação 32.

$$\tau(T) \approx \frac{\int_0^{\infty} \tau(\lambda) E_{\lambda}(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\lambda}(\lambda, T) d\lambda} \quad (32)$$

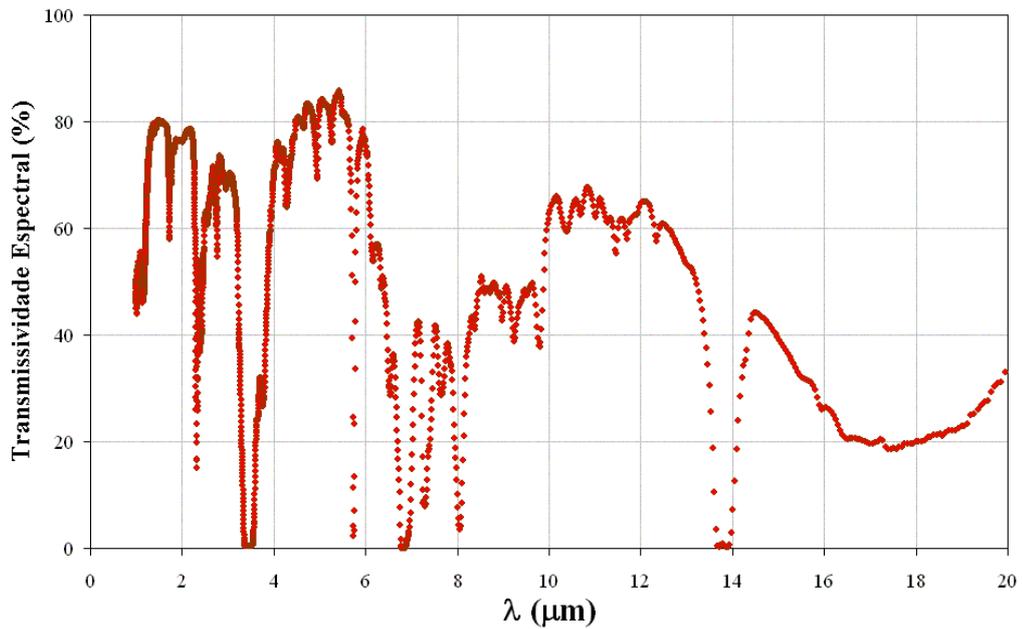
Conhecida a transmissividade espectral do material da cobertura, $\tau(\lambda)$, para a determinação da transmissividade média à radiação infravermelha utiliza-se como energia incidente, $E_{\lambda}(\mathbf{T}, \lambda)$, o poder emissivo do absorvedor aquecido. E para determinação da transmissividade média à radiação solar, utiliza-se como energia incidente do poder emissivo do sol.

4.4 Transmissividade Espectral de materiais para a cobertura

Neste item serão apresentadas as curvas de transmissividade espectral de materiais pesquisados para cobertura, que serão utilizados para determinação de valores médios de transmissividade solar e infravermelha.

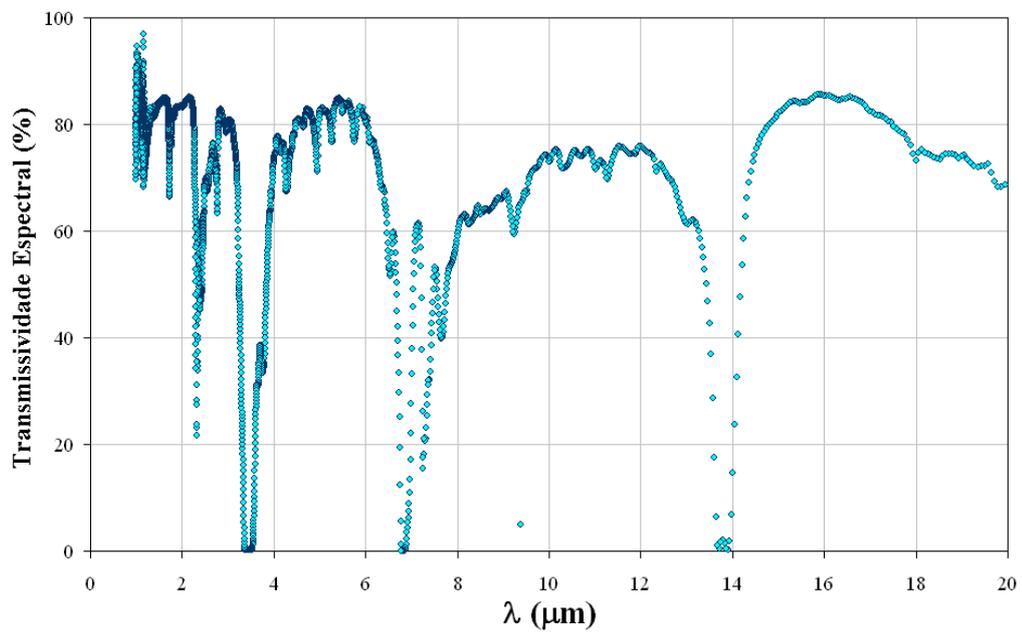
Em relação a filmes plásticos foram pesquisados o filme plástico termodifusor e o filme plástico para estufa (ambos da empresa Nortène). As transmissividades espectrais destes filmes na faixa do infravermelho (comprimentos de onda de 1 μm a 20 μm) foram obtidas por Ferreira (2004). A transmissividade espectral (em função do comprimento de onda) do plástico termodifusor da Nortène pode ser observada na Figura 22. A transmissividade espectral do plástico tipo estufa da Nortène pode ser observada na Figura 23.

Figura 22 - Transmissividade espectral ao infravermelho do plástico termofusor da Nortène



Fonte: Ferreira (2004)

Figura 23 - Transmissividade espectral ao infravermelho do plástico de estufa da Nortène

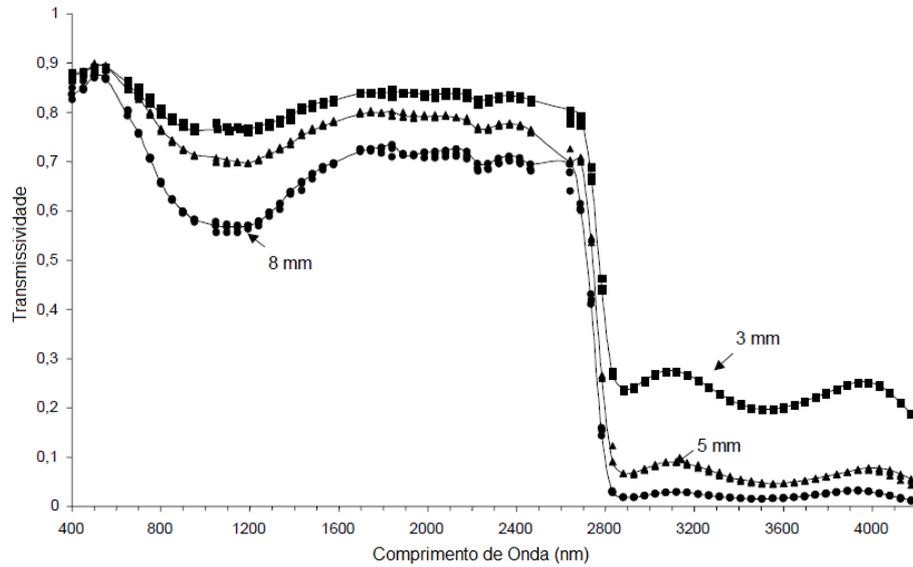


Fonte: Ferreira (2004)

Já a transmissividade espectral para placas de vidro para diferentes espessuras foi apresentada por Nicolau *et al.* (2000), na Figura 24. Enquanto, na Figura 25 é apresentada a comparação

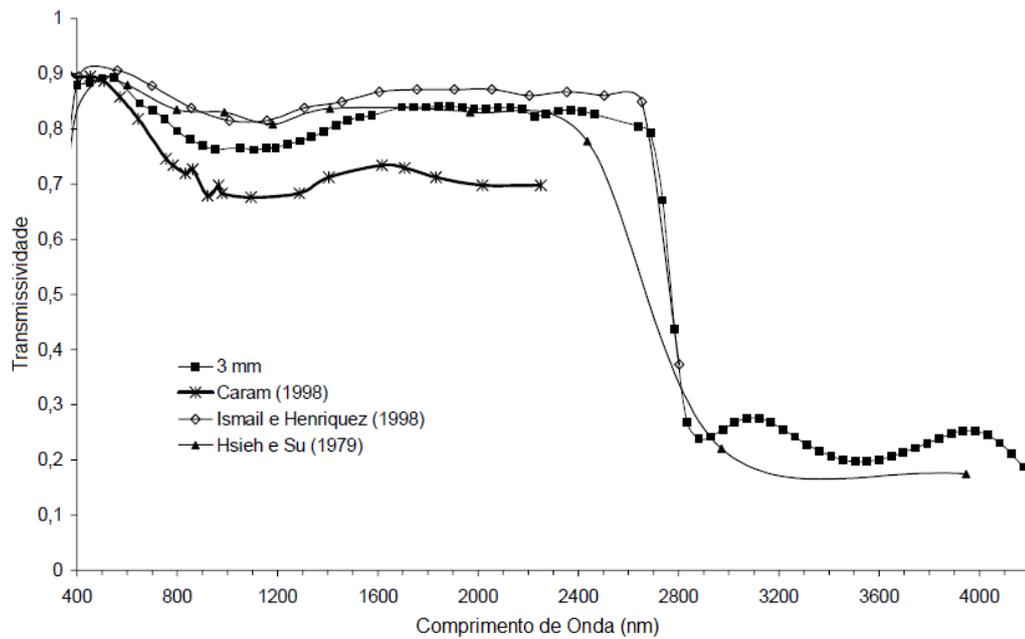
dos resultados obtidos com o vidro 3mm de Nicolau *et al.* (2000) com outros autores pesquisados por ele.

Figura 24 - Transmissividade espectral do vidro em função da espessura



Fonte: Nicolau *et al.* (2000)

Figura 25 - Transmissividade espectral de vidro 3mm obtida por diferentes autores



Fonte: Nicolau *et al.* (2000)

Os valores de transmissividade espectral $\tau(\lambda)$ de cada material pesquisado, foi obtido variando-se o comprimento de onda em $0,5 \mu\text{m}$, e colocados na Equação 32, utilizando-se desta mesma variação para obter a emissividade espectral específica (superfície absorvedora e solar obtida pela Equação 31) deste comprimento de onda e assim calcular a transmissividade média conforme representa a Equação 32, que é o somatório de radiação incidente transmitida pelo material sobre a radiação emitida pela superfície seja ela a absorvedora ou a solar.

Após o processamento e a análise dos dados pesquisados, a transmissividade média à radiação infravermelha e à radiação solar será obtida para cada material estudado de cobertura.

5 RESULTADOS

5.1 Considerações Iniciais

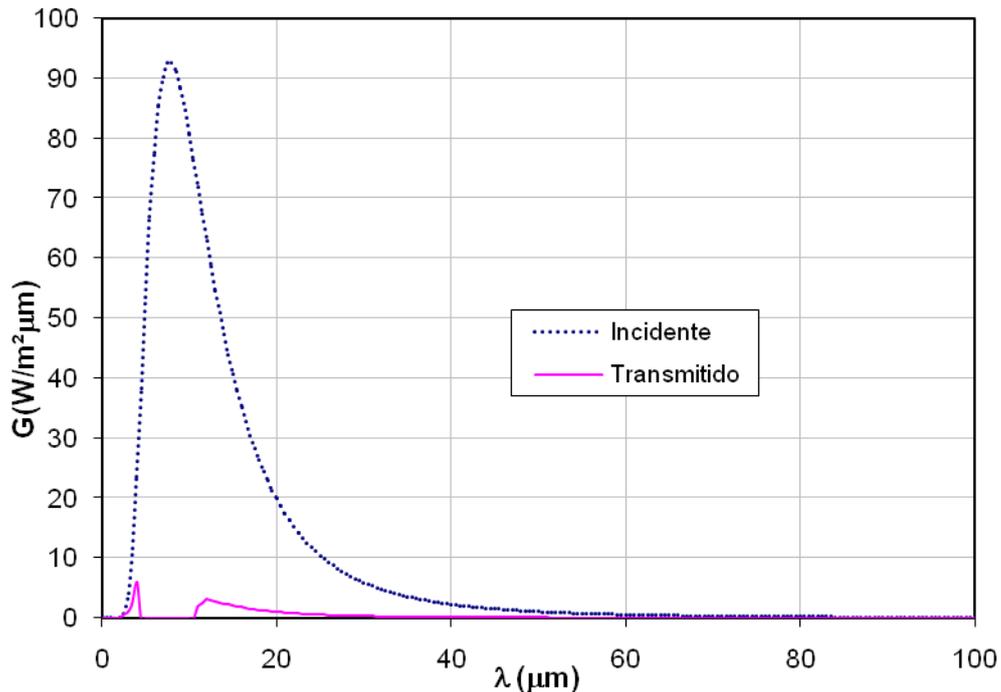
Os resultados foram obtidos a partir de simulações dos dados coletados dos gráficos de transmissividade espectral disponível na literatura para cada material. Para as análises de transmissividade ao infravermelho foi utilizado como fonte térmica o absorvedor do secador estudado com a temperatura média de 373K (100°C), para caracterizar a radiação infravermelha emitida pelo absorvedor, que será transmitida para o ambiente. Esta radiação transmitida será uma fonte de perda de energia do dispositivo e contribuirá para a redução de sua eficiência. Em seguida, será utilizada como fonte térmica a radiação solar, considerando a temperatura superficial do sol de 5777K e intensidade igual à constante solar de 1367W/m² determinados por Duffie e Beckman (1991), incidente sobre a superfície. A parte desta radiação transmitida pela cobertura para o absorvedor será convertida em calor e sua maximização proporcionará o aumento da eficiência térmica do secador.

Devido à falta de dados para a análise das transmissividades espectrais para comprimento de onda acima de 4μm, conforme dados fornecidos por Nicolau *et al.* (2000) nas Figuras 24 e 25, os valores de transmissividade espectral foram complementados pelos dados de transmissividade do vidro fornecido por Palz (1981) da Figura 20. A análise dos dados de Caram (1998) da Figura 24 foi descartada por insuficiência de dados.

5.2 Transmissividade média à radiação infravermelha de uma fonte a 373K

A Figura 26 mostra os resultados numéricos obtidos para o poder emissivo espectral da superfície absorvedora à temperatura de 373K (uso da Equação 31 de Planck) em função do comprimento de onda, incidente sobre a superfície de vidro de 3mm e a radiação infravermelho transmitida, para cada comprimento de onda do espectro de radiação térmica.

Figura 26 - Poder emissivo espectral da superfície absorvedora e a radiação transmitida do vidro 3mm

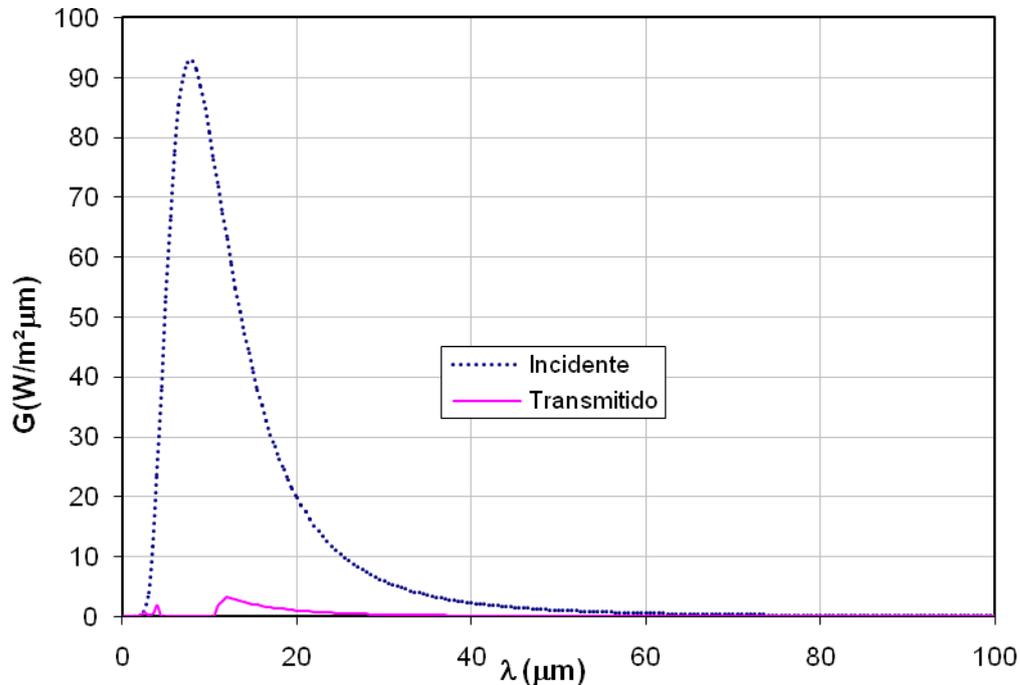


Fonte: Produzido pelo Autor

Pode ser observado, na Figura 26, que grande parte da radiação térmica que é emitida pelo absorvedor é retida pelo vidro. Há uma pequena concentração de perdas de radiação térmica compreendida na faixa da luz ultravioleta até uma parcela da região do infravermelho (0,1 a $4\mu\text{m}$), além da região acima do comprimento de onda de $10\mu\text{m}$. Há boa conservação de energia na região de maior incidência (entre 4 e $11\mu\text{m}$). Utilizando-se a Equação 32 foi possível determinar a transmissividade média do material vidro 3mm para a radiação infravermelha, no valor de 2,91%. É interessante observar que da radiação emitida pela placa absorvedora a 100°C (373K) em direção a uma placa de vidro de 3mm, apenas 2,91% desta energia é perdida diretamente para o ambiente (97,09% da radiação emitida pelo absorvedor é absorvida ou refletida pela cobertura de vidro em direção ao absorvedor, ficando retida no interior do secador).

Na Figura 27 são mostrados também os resultados numéricos obtidos para o poder emissivo espectral da superfície absorvedora à temperatura de 373K (uso da Equação 31 de Planck) em função do comprimento de onda, incidente agora sobre a superfície de vidro de 5 mm e a radiação infravermelha transmitida, para cada comprimento de onda do espectro de radiação térmica.

Figura 27 - Poder emissivo spectral da superfície absorvedora e a transmissividade do vidro 5mm

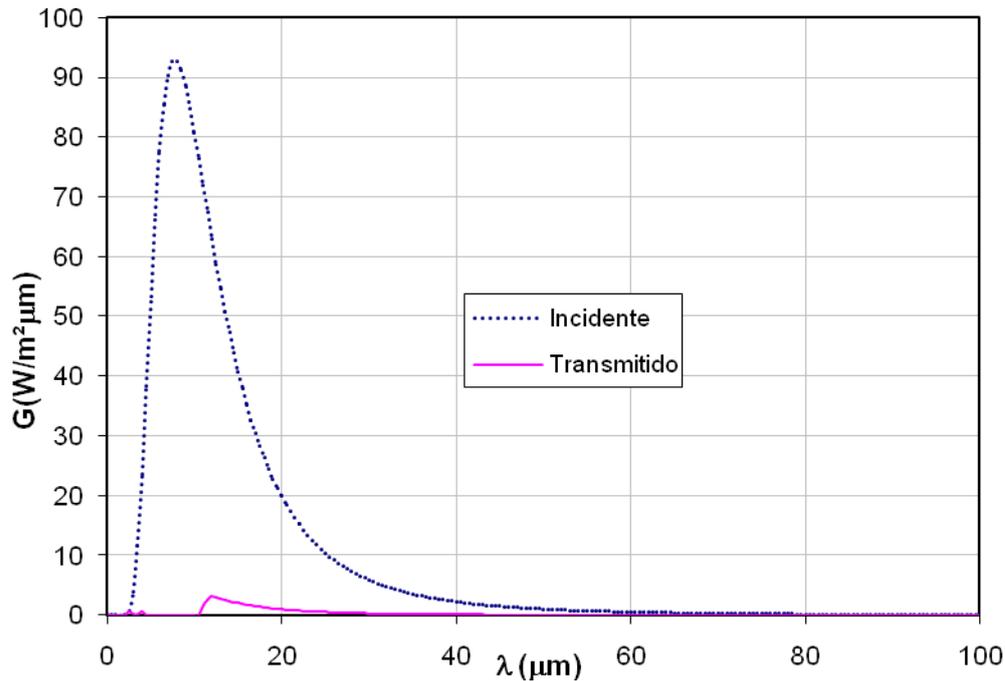


Fonte: Produzido pelo Autor

Na Figura 27, a maior parte da radiação térmica que é emitida pelo absorvedor é retida pelo vidro. Existe uma redução nas perdas de radiação térmica compreendida na faixa da luz ultravioleta até uma parcela da região do infravermelho (0,1 a 4 μm), sendo ela observada pela diminuição do pico, comparando-se com o vidro de 3mm da Figura 26. Há também perdas na região compreendida acima do comprimento de onda de 10 μm . Ocorre boa conservação de energia na região de maior incidência (entre 4 e 11 μm). Utilizando-se da Equação 32, foi determinada a transmissividade média da placa de vidro 5mm para a radiação infravermelha, no valor de 2,61%. Este valor representa a porcentagem de energia perdida para o ambiente pela placa de vidro de 5 mm, sendo ela menor que as perdas do vidro de 3mm (2,91%).

A Figura 28 mostra os valores de transmissividade espectral para o vidro de 8mm, relacionados a radiação infravermelha transmitida e a poder emissivo spectral da superfície absorvedora à temperatura de 373K incidente sobre a superfície do vidro, ambos em função de cada comprimento de onda do espectro de radiação.

Figura 28 - Poder emissivo espectral da superfície absorvedora e a transmissividade do vidro 8 mm

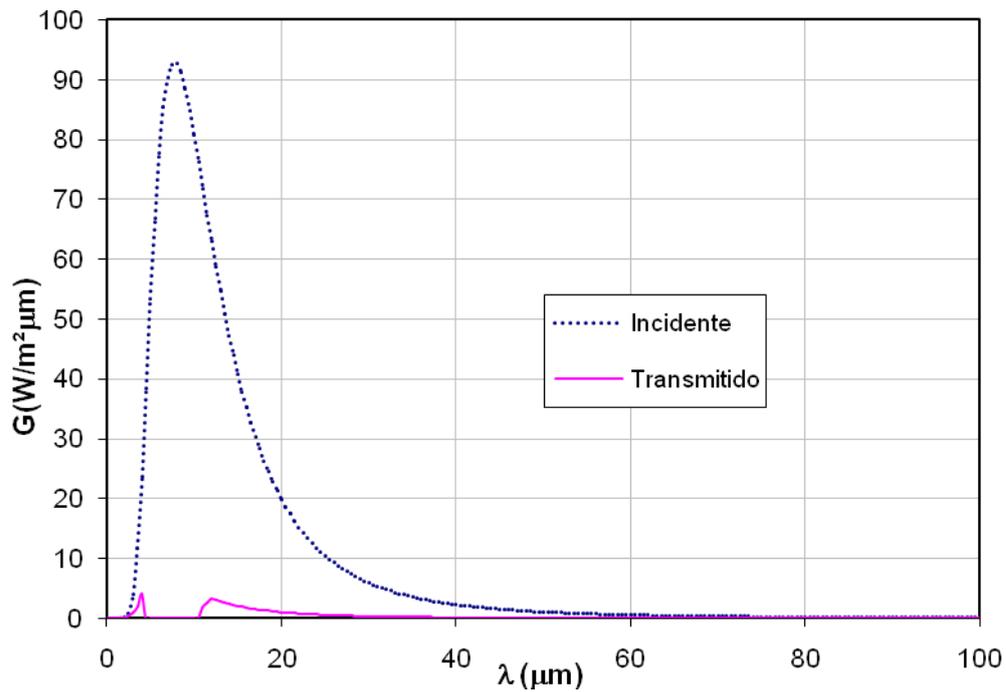


Fonte: Produzido pelo Autor

Na Figura 28, verifica-se que a radiação térmica que é emitida pelo absorvedor à temperatura média de 100°C (373K) é ainda mais absorvida pela placa de vidro de 8mm. As perdas de radiação térmica compreendida na faixa da luz ultravioleta até uma parcela da região do infravermelho ($0,1$ a $4\mu\text{m}$) são ainda menores, comparadas com a do vidro de 5mm da Figura 26. Ocorrem perdas de radiação térmica também na região acima do comprimento de onda de $10\mu\text{m}$. Na região de maior incidência da radiação térmica (entre 4 e $11\mu\text{m}$) há boa conservação de energia, sendo ela observada pela baixa transmissividade do material. A Equação 32 foi utilizada também para determinar a transmissividade média do material vidro 8mm para a radiação infravermelha, resultando no valor de 2,52%. Este valor representa as perdas radiantes emitidas da placa absorvedora pela placa de vidro para o ambiente.

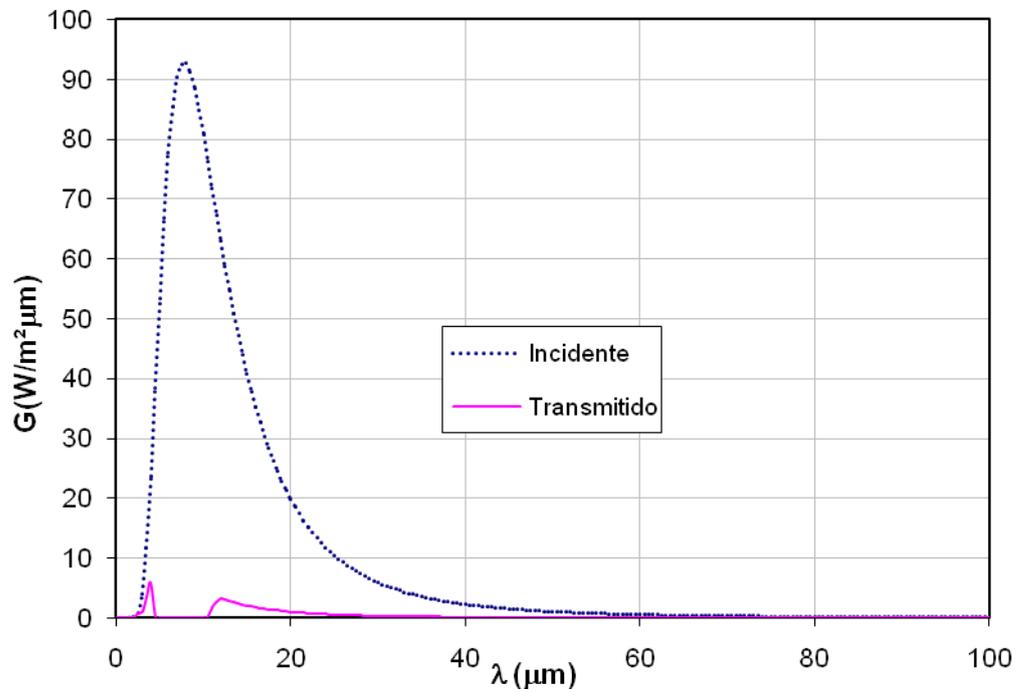
As Figuras 29 e 30 apresentam os resultados numéricos obtidos para a radiação infravermelha transmitida para cada comprimento de onda no espectro da radiação térmica do vidro de 3 mm dos autores Hsieh e Su / Ismail e Henríquez, respectivamente, e o poder emissivo espectral da superfície absorvedora à temperatura de 373K em função do comprimento de onda.

Figura 29 - Poder emissivo espectral da superfície absorvedora e a transmissividade do vidro 3mm de Hsieh e Su



Fonte: Produzido pelo Autor

Figura 30 - Poder emissivo espectral da superfície absorvedora e a transmissividade do vidro 3 mm de Ismail e Henríquez

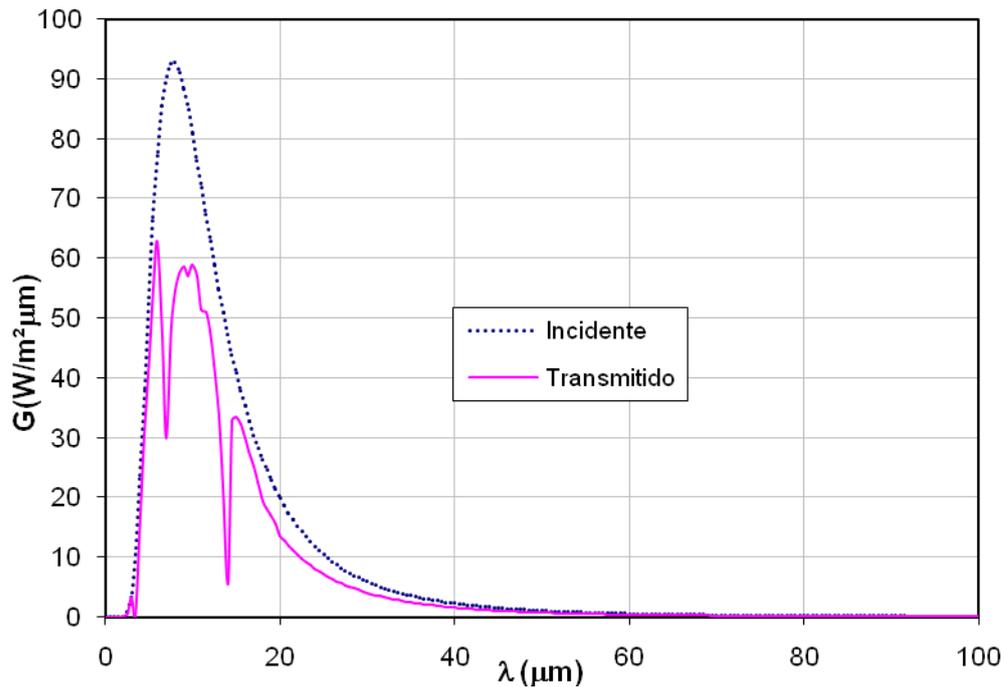


Fonte: Produzido pelo Autor

As Figura 29 e 30 apresentam características semelhantes aos analisados pelos vidros de diferentes espessuras, com proximidade ainda maior ao vidro de 3 mm. A diferença existente ocorre na região na faixa da luz ultravioleta até uma parte da região do infravermelho (0,1 a $4\mu\text{m}$), no qual o vidro de Ismail e Henríquez apresenta um pico de perda de radiação térmica maior que a do Hsieh Su. As perdas são praticamente as mesmas na região acima do comprimento de onda de $10\mu\text{m}$, além de grande conservação de energia na região de maior incidência (entre 4 e $11\mu\text{m}$). Ao utilizar a Equação 32, a transmissividade média do vidro de Hsieh Su foi de 2,80% e a transmissividade média de Ismail e Henríquez foi de 2,97%, mostrando que a radiação emitida pela placa absorvedora a 100°C (373K) em direção a placa de vidro, 2,96% será perdido pelo vidro de Ismail e Henríquez, enquanto que 2,79% será perdido pelo vidro do Hsieh Su. Foi possível analisar também que com os tipos de vidros dos diferentes autores, Hsieh e Su, Ismail e Henríquez e o Nicolau, de mesmas espessuras (3mm), as características de transmissividade para a radiação infravermelha apresentadas foram bem semelhantes.

Os resultados obtidos para os filmes plásticos Estufa e Termodifusor foram os que apresentaram maiores valores de transmissividade para a radiação infravermelha oriunda de uma fonte à temperatura de 373K. A Figura 31 mostra como grande parte da energia incidente sobre o filme plástico tipo Estufa acaba sendo transmitido para o ambiente, reduzindo a necessária manutenção da temperatura interna do dispositivo e a eficiência do secador.

Figura 31 - Poder emissivo espectral da superfície absorvedora e a transmissividade do plástico Filme estufa

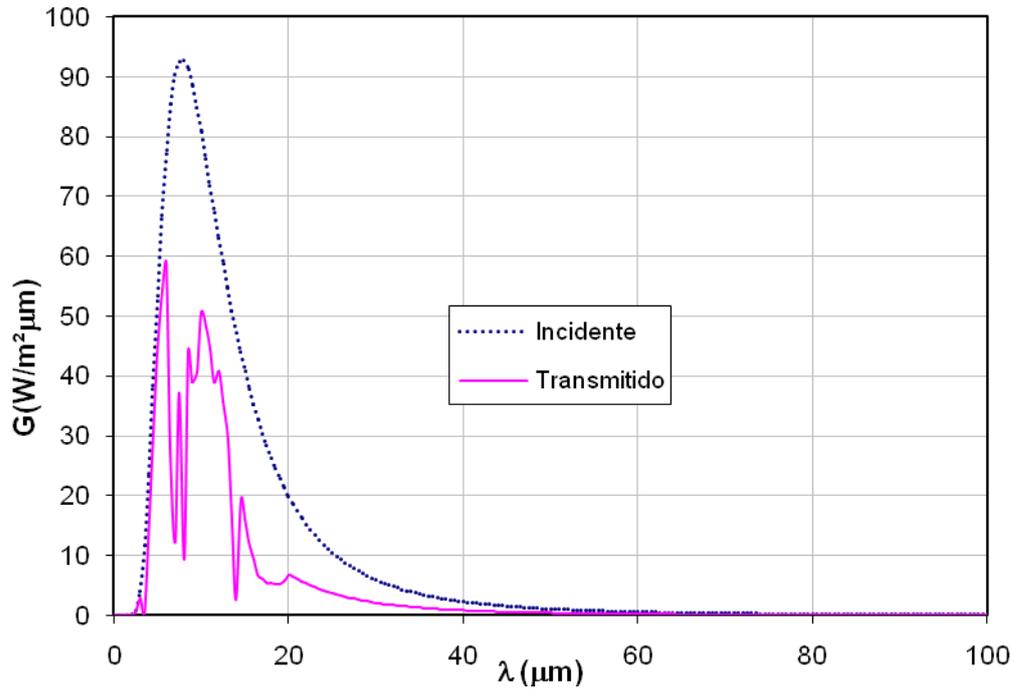


Fonte: Produzido pelo Autor

O pequeno efeito de absorção e reflexão dificulta que a energia possa permanecer entre o absorvedor e a cobertura, aumentando perdas e a dissipação térmica acaba ocorrendo em maior intensidade. A transmissividade média obtida para o Filme Estufa, para uma fonte de emissão a 373K foi de 66,9%.

A Figura 32 apresenta o comportamento do filme plástico Termodifusor, à incidência de radiação infravermelha de uma fonte a 373K. Comparativamente com o filme Estufa da Figura 31, o filme Termodifusor apresenta características semelhantes em relação a altos valores de perdas, mas com picos da energia transmitida menores. A transmissividade média à radiação infravermelha de uma fonte emissora a 373K obtida pelo plástico Termodifusor foi de 43,4%, inferior ao filme Estufa, mas muito superior às placas de vidro.

Figura 32 - Poder emissivo espectral da superfície absorvedora e a transmissividade do plástico Termodifusor

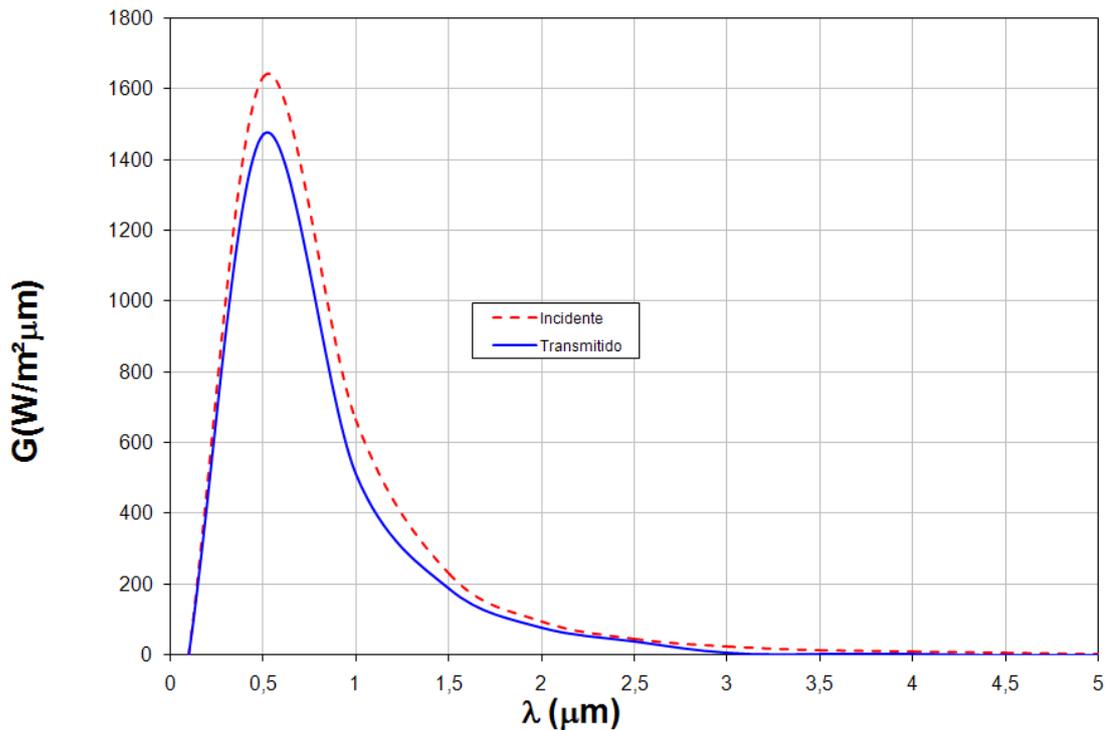


Fonte: Produzido pelo Autor

5.3 Transmissividade média à radiação solar

A Figura 33 mostra os resultados numéricos obtidos para o poder emissivo espectral da radiação solar máxima, em função do comprimento de onda, incidente sobre a superfície de vidro de 3mm e a radiação solar transmitida para cada comprimento de onda do espectro de radiação térmica.

Figura 33 - Poder emissivo espectral da superfície solar e a transmissividade do vidro 3mm

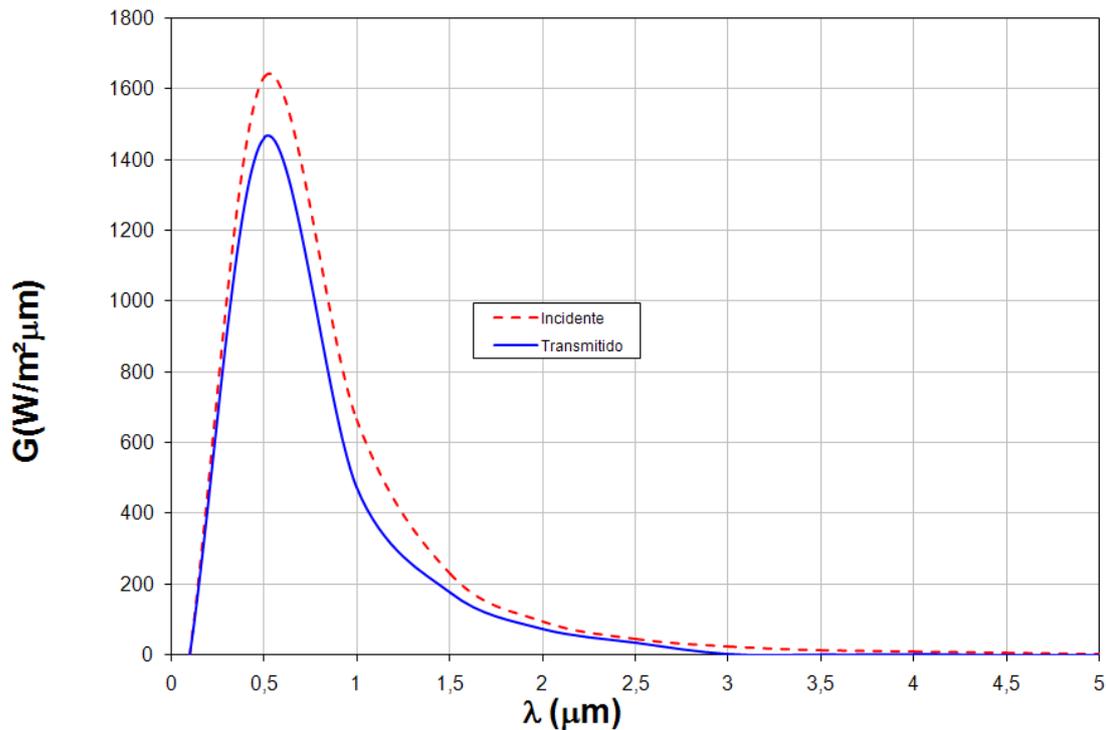


Fonte: Produzido pelo Autor

Pode ser observado na Figura 33 que grande parte da radiação solar incidente é transmitida pelo vidro. A curva de radiação solar incidente sobre o vidro de 3mm é bem acompanhada pela sua transmissividade. No entanto, a partir do ponto de maior incidência compreendido pela faixa de luz visível ($0,4\mu\text{m}$ a $0,7\mu\text{m}$) até a faixa do infravermelho ($5\mu\text{m}$) ocorrem perdas de radiação solar, que podem ser tanto refletidas como absorvidas pelo vidro. Os pontos acima dos $5\mu\text{m}$ representam a faixa do infravermelho, no qual os valores de incidência da radiação solar em função do comprimento de onda são mínimos. Conseqüentemente a transmissividade do material também serão mínimas, sendo desprezíveis para as avaliações dos resultados. Utilizando-se a Equação 32 foi possível determinar a transmissividade média do material vidro 3mm para a radiação solar no valor de 84,1%. É possível observar que, da radiação solar incidente sobre uma placa de vidro de 3mm, 84,1% desta energia é convertida em calor, na qual influenciará diretamente na eficiência térmica do secador solar.

Na Figura 34, está representado a transmissividade da radiação solar para cada comprimento de onda do espectro de radiação térmica do vidro de 5mm, e também a radiação solar máxima incidente em função do comprimento de onda.

Figura 34 - Poder emissivo espectral da superfície solar e a transmissividade do vidro 5mm

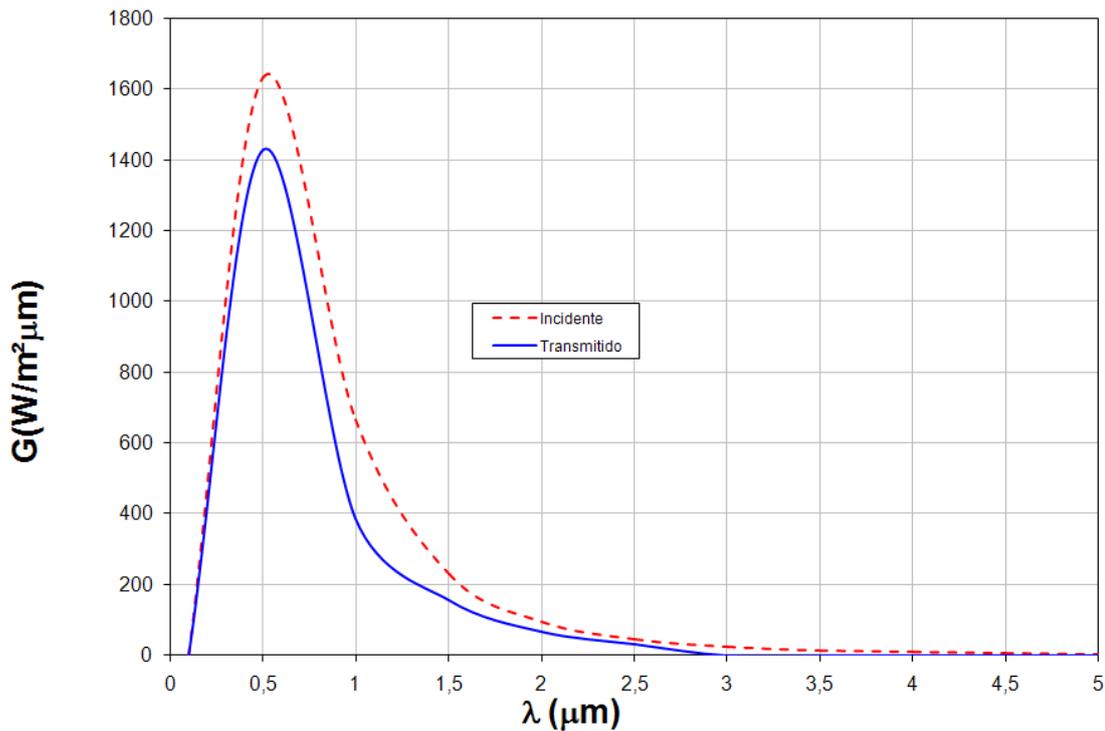


Fonte: Produzido pelo Autor

Com relação à Figura 34, o vidro de 5mm apresenta boa transmissividade à radiação solar incidente sobre ele. A curva da radiação transmitida sofre uma pequena redução e estreitamento do pico quando comparada com a radiação solar incidente sobre a cobertura de vidro. A partir do ponto de maior incidência compreendido pela faixa de luz visível ($0,4\mu\text{m}$ a $0,7\mu\text{m}$) até a faixa do infravermelho ($5\mu\text{m}$) ocorrem perdas de radiação solar um pouco maior se comparadas com as do vidro de 3mm, que podem ser tanto refletidas como absorvidas pelo vidro de maior espessura. Os pontos acima dos $5\mu\text{m}$ representam a faixa do infravermelho, no qual os valores de incidência da radiação solar em função do comprimento de onda são mínimos, conseqüentemente a transmissividade do material também serão mínimas, sendo desprezíveis para as avaliações dos resultados. Utilizando-se a Equação 32 foi possível determinar a transmissividade média do material vidro 5mm para a radiação solar no valor de 81,3%. Logo, 81,3 % desta energia emitida é convertida em calor para a eficiência do secador solar.

O vidro de 8mm também foi simulado e os valores numéricos estão representados na Figura 35, onde estão relacionadas a radiação solar incidente sobre a cobertura de vidro e a radiação solar transmitida pelo vidro, cada comprimento de onda do espectro da radiação térmica.

Figura 35 - Poder emissivo espectral da superfície solar e a transmissividade do vidro 8mm



Fonte: Produzido pelo Autor

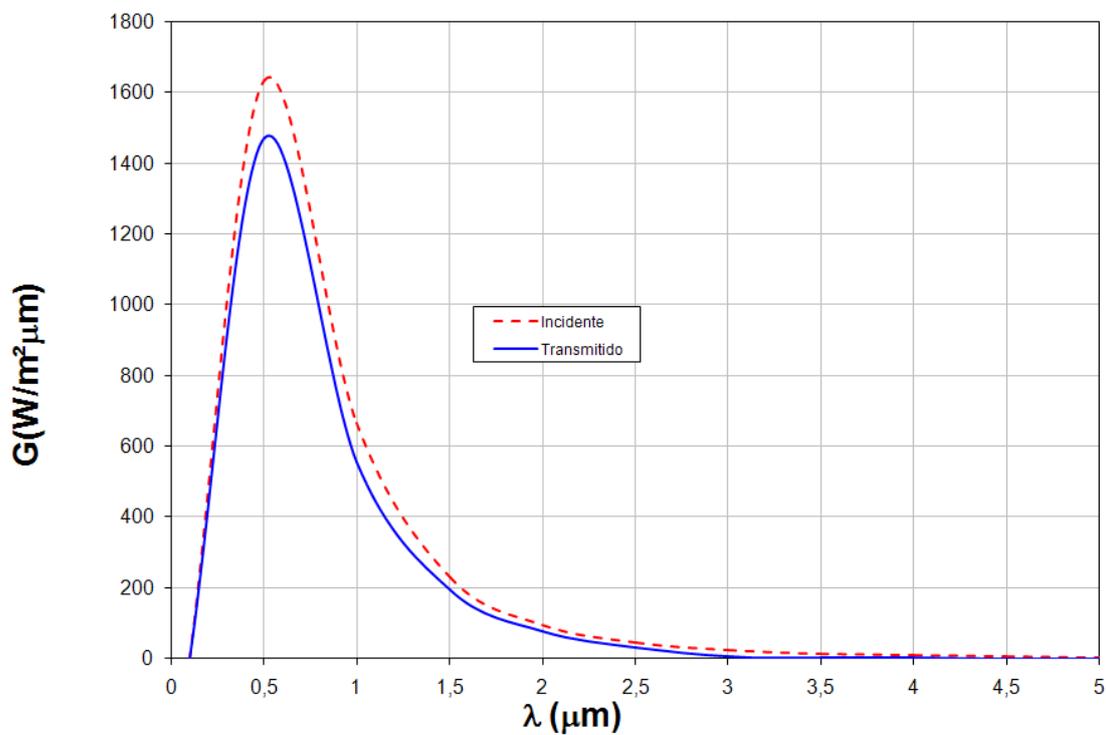
Através da análise gráfica da Figura 35, o vidro de 8mm já não apresenta a mesma qualidade de transmissividade à radiação solar, comparado com os vidros de 3mm e 5mm, mas ainda sim, consegue acompanhar em grande parte a radiação incidente proveniente da superfície solar. A faixa da radiação ultravioleta e a da luz visível (0,1 a 0,7 μm) já apresentam uma queda considerável de energia transmitida pelo vidro, caracterizando perdas de radiação solar que seriam convertidas em calor, reduzindo a eficiência do secador solar. Uma parcela da região do infravermelho compreendida entre 0,7 μm a 5 μm também apresenta quedas consideráveis de transmissividade do material, sendo elas observadas pelo afastamento da curva de transmissividade do vidro comparada com a da radiação solar incidente. Acima do comprimento de onda de 5 μm representa valores de incidência de radiação solar mínimos, consequentemente apresentam valores de transmissividade desprezíveis. Utilizando-se da

Equação 32, foi possível obter a transmissividade média do vidro de 8mm o valor de 75,8%, valor este que representa a energia convertida em calor para a eficiência do secador solar.

Os resultados obtidos para os vidros de 3mm de Hsieh e Su / Ismail e Henríquez foram os que apresentaram características semelhantes e os maiores valores para a transmissividade à radiação solar incidente.

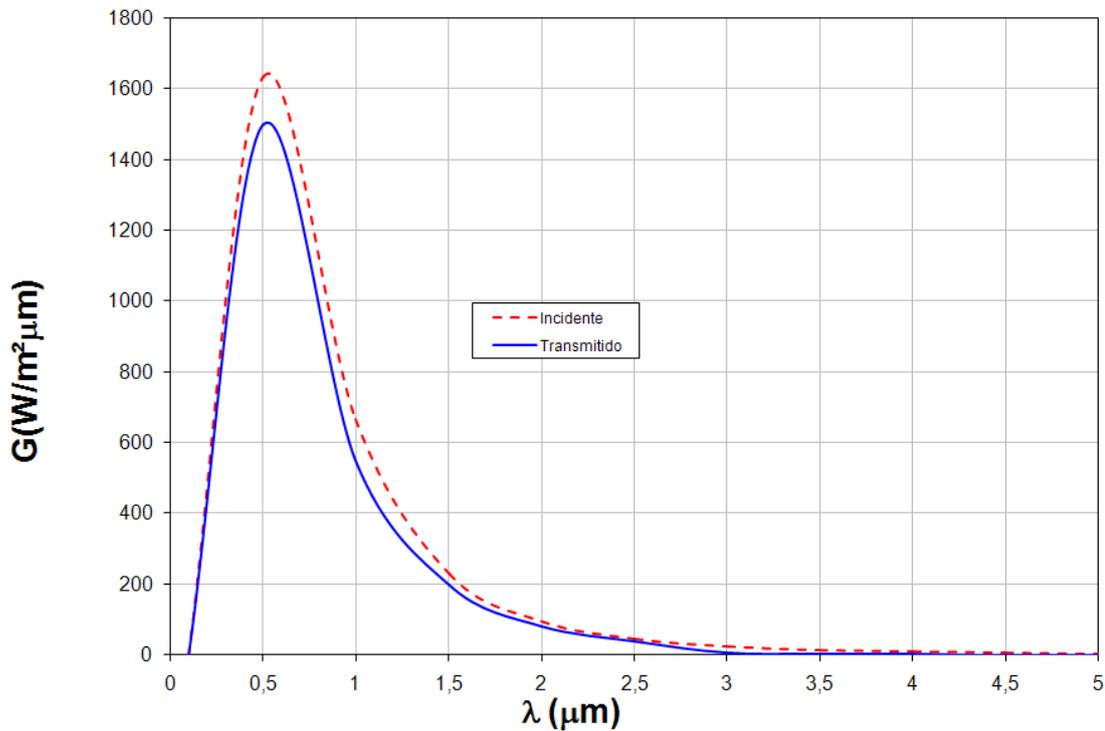
As Figuras 36 e 37 representam, respectivamente, o poder emissivo espectral da superfície solar incidente sobre as coberturas de vidro, e a radiação solar transmitida, ambos para cada comprimento de onda do espectro da radiação térmica.

Figura 36 - Poder emissivo espectral da superfície solar e a transmissividade do vidro de 3mm Hsieh e Su



Fonte: Produzido pelo Autor

Figura 37 - Poder emissivo espectral da superfície solar e a transmissividade do vidro de 3mm Ismail e Henríquez

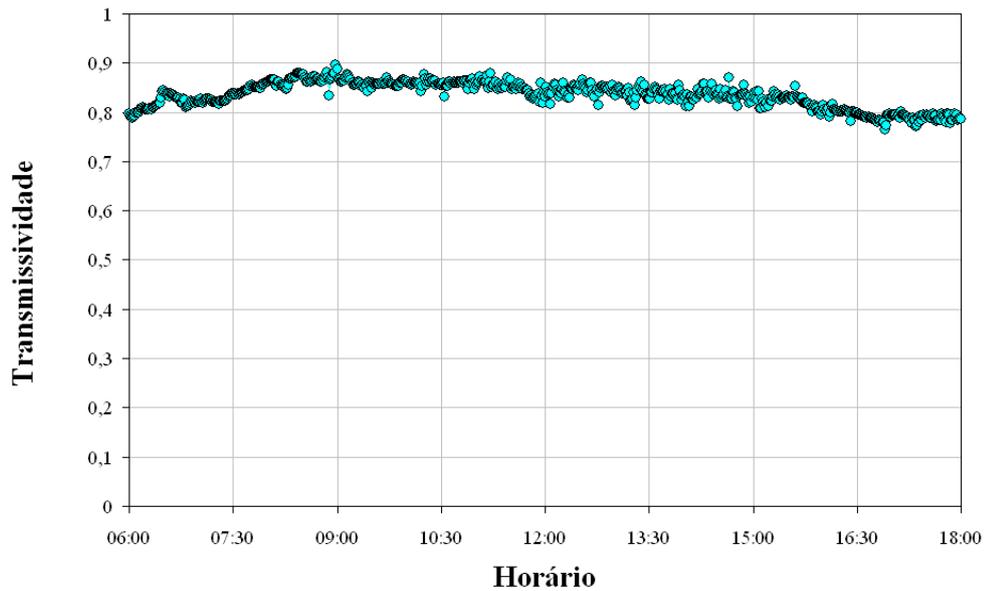


Fonte: Produzido pelo Autor

Ao comparar as Figuras 36 e 37, foi possível verificar que elas apresentam praticamente as mesmas características, fato este se comprovou ao utilizar da Equação 32 para determinar a transmissividade média para a radiação solar incidente na placa de vidro de 3mm, no qual para o Hsieh e Su foi de 85,6% e para Ismail e Henríquez foi 86,9%. Lembrando que estes valores de porcentagem representam a energia convertida em calor para a eficiência do secador solar. Esta pequena diferença de valores pode ser observada por uma aproximação um pouco melhor da curva de transmissividade à radiação solar na Figura 37 de Ismail e Henríquez, no comprimento de onda compreendido entre $0,4\mu\text{m}$ e $0,7\mu\text{m}$ que representa faixa da luz visível e também na região de aproximadamente $2\mu\text{m}$ a $3\mu\text{m}$ relacionados à faixa do infravermelho, quando comparados com a Figura 36 de Hsieh e Su. Os pontos acima de $5\mu\text{m}$ não representam valores significativos para os resultados, pois nesta faixa há pouca incidência de radiação solar para conversão em energia térmica para o secador solar. Como as espessuras do vidro de Hsieh e Su e do Ismail e Henríquez são as mesmas que as do vidro de 3 mm do Nicolau, foi possível observar que as características para a radiação solar apresentou baixa variabilidade.

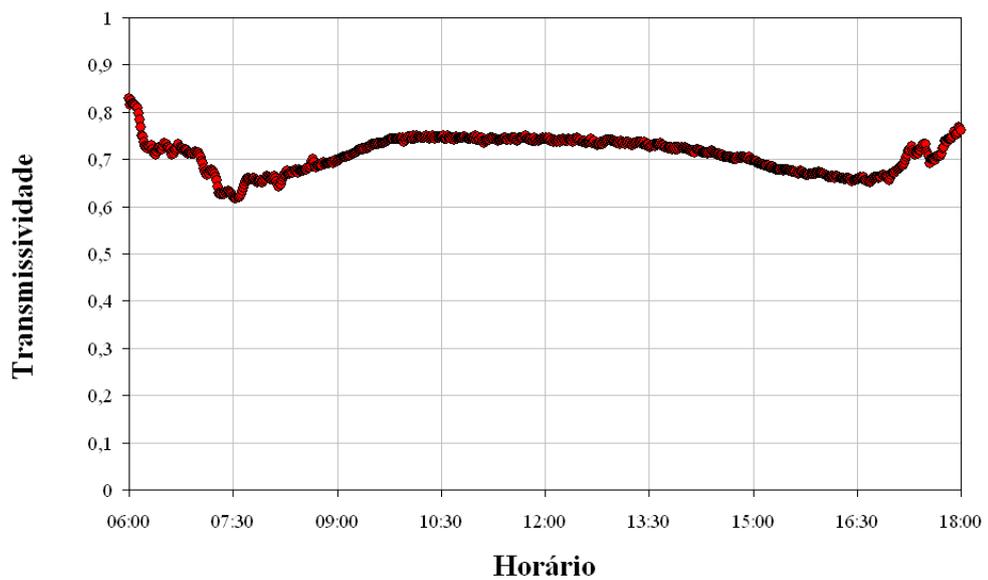
Em função da ausência de dados de transmissividade espectral dos filmes plásticos na região ultravioleta e visível do espectro térmico, são apresentados resultados experimentais de transmissividade solar média obtidos por Ferreira (2004) nas Figuras 38 e 39, através da medição com piranômetros sob a cobertura.

Figura 38 - Transmissividade Média do plástico filme estufa em função do horário



Fonte: Ferreira (2004)

Figura 39 - Transmissividade Média do plástico termodifusor da Nortène em função do horário



Fonte: Ferreira (2004)

Pela Figura 38, em um intervalo de 12 horas, o plástico filme estufa mostrou pouca variabilidade de valores de transmissividade durante o decorrer dos horários analisados, mantendo valores consideravelmente altos e constantes. Enquanto pela Figura 39, o plástico termodifusor apresentou oscilações no período de 6:00 às 9:00 e de 16:30 às 18:00, comprometendo a sua eficiência durante estes períodos. Para o Filme Estufa, o valor médio de transmissividade solar foi de 84%, enquanto que para o filme Termodifusor a transmissividade solar média foi de 72%.

5.4 Análises Comparativas

A Tabela 5 apresenta os valores médios de transmissividade (infravermelha e solar) obtidos dos materiais estudados.

Tabela 5 - Valores médios de transmissividades

Material	Transmissividade Média	
	Radiação infravermelha	Radiação solar
Vidro 3mm	2,91%	84,1%
Vidro 5mm	2,61%	81,3%
Vidro 8mm	2,52%	75,8%
Hsieh e Su	2,80%	85,6%
Ismail e Henriquez	2,97%	86,9%
Filme Estufa	66,9%	84,0%
Filme Termodifusor	43,4%	72,0%

Fonte: Produzido pelo Autor

Dentre os materiais translúcidos analisados o de maior transmissividade solar é o vidro de 3mm de Ismail e Henríquez, com 86,9%. O de menor transmissividade solar é o plástico Termodifusor Nortène com valor de 72%. O que apresentou menores perdas para o ambiente foi o vidro de 8mm com 2,52% , enquanto o que apresentou as maiores perdas foi o plástico Filme Estufa com 66,9%.

Conforme especificado por Nicolau *et al.* (2000), os vidros de diferentes espessuras são comerciais transparentes. Logo, não apresentam nenhuma característica que os tornem diferenciados, sendo acessíveis para qualquer tipo de pessoa que deseja comprá-los, enquanto que as características dos vidros de Ismail e Henríquez e Hsieh e Su não são determinados,

embora a espessura do vidro destes autores sejam de 3mm, apresentando semelhança de valores de transmissividades solares e infravermelhas médias próximas ao do vidro de 3mm de Nicolau *et al* (2000). A pequena diferença entre os vidros de 3mm, de 3,78% para radiação infravermelha e 3,22% para radiação solar, de Ismail e Henríquez, Hsieh e Su e do Nicolau podem ocorrer devido a composição do vidro, impurezas, e outros fatores que influenciam na refletividade, transmissividade e absorção da radiação incidente sobre o material. Com relação às diferenças de espessuras, é possível observar que à medida que se aumenta a espessura do vidro, aumenta-se a capacidade de retenção da radiação infravermelha emitida pelo absorvedor, com diferença de 13,40% de retenção. Consequentemente ocorre redução das perdas de calor para o ambiente externo. Para a radiação solar, é observado que com o aumento da espessura dos vidros, a transmissividade para esta radiação diminui, no qual reduz a quantidade de energia convertida em calor para o interior do secador solar, chegando ao valor de 9,87% de diferença, prejudicando assim, a eficiência do secador solar em questão.

Para os filmes plásticos do tipo Estufa e o Termodifusor, com diferença entre eles de 35,12%, apresentaram um elevado índice de transmissividade para a radiação infravermelha, permitindo assim, grandes perdas para o ambiente externo, se tornando pouco eficiente quanto aos princípios de funcionamento do secador solar, no qual é necessário que exista uma manutenção da temperatura em seu interior. Para a radiação solar, o filme Estufa apresentou maiores índices de transmissividade, permitindo boa passagem da radiação solar para proporcionar a secagem mais eficiente, diferença de 14,28%, comparado com o plástico Termodifusor.

É necessário fazer a comparação entre a eficiência destes materiais para se utilizar na cobertura de um secador solar. O material ideal para a cobertura do secador solar é aquele que deve possuir baixa transmissividade a radiação infravermelha e alta transmissividade à radiação solar. Os vidros apresentam transmissividade média ao infravermelho e solar mais próximo do ideal para a eficiência do secador solar, além de boa resistência mecânica, são materiais refratários, resistentes às altas temperaturas, reduzindo assim os custos para manutenção do material. Dentre as diferenças de espessura, o vidro de 3mm sendo leve, é o mais frágil, podendo se quebrar facilmente durante o manuseio, em chuvas de granizo ou quedas acidentais de materiais. Enquanto que o vidro 8 mm é o menos eficiente para a transmissividade solar, além de mais pesado, é em compensação de boa durabilidade. O vidro de 5 mm apresentou características intermediárias aos dois vidros analisados. Os plásticos apresentam características de transmissividades à radiação infravermelha e solares inferiores

que as dos vidros, são mais leves e menos resistentes, necessitando de uma manutenção periódica, pois a incidência de raios solares e a manutenção da temperatura os degradam mais facilmente, podendo fragilizá-los, ocasionando sua ruptura e/ou comprometendo as suas propriedades mecânicas e assim ocasionando perdas de eficiência para o secador, pois podem não mais transmitir a radiação solar incidente sobre ele ou permitir que toda radiação proveniente do absorvedor passe por ele.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo da influência da transmissividade espectral de diferentes materiais da cobertura na eficiência ótica e nas perdas radiantes de um secador solar.

Os modelos matemáticos para determinação de radiação emitida por superfícies negras foram estudados para a determinação de transmissividades médias de materiais em função do poder emissivo espectral da fonte térmica e da transmissividade espectral do material.

Uma pesquisa bibliográfica sobre transmissividade espectral de materiais translúcidos que podem ser utilizados como cobertura de secadores solares foi realizada. Os materiais pesquisados foram filmes plásticos, placas de vidro de diferentes espessuras, e placas de vidros com espessuras iguais, mas de diferentes autores. Os plásticos foram o Termodifusor e o Filme Estufa. Para os vidros, foram analisados as espessuras de 3, 5 e 8 mm obtidos por Nicolau e os vidros de 3 mm de Ismail e Henríquez e Hsieh e Su (NICOLAU, 2003).

As transmissividades médias foram avaliadas a partir das transmissividades globais de diferentes materiais estudados de cobertura, em relação à radiação solar e à radiação infravermelha, para fonte à 5777K (superfície solar) e a 373K (placa absorvedora) respectivamente. Através dos dados obtidos foi realizada uma análise comparativa entre os materiais estudados, verificando qual apresentava os maiores valores para radiação solar, e os que apresentavam os menores valores para radiação infravermelha, visto que esse tipo de característica seria o mais ideal para o uso em uma cobertura de um secador solar. Para os vidros de espessuras iguais, mas de diferentes autores, foi observado que eles apresentam valores de transmissividades muito semelhantes. O de melhor característica é o vidro 3mm de Ismail e Henríquez com 2,97% de transmissividade a radiação infravermelha e 86,9% para a transmissividade a radiação solar. Não foi confirmado, a princípio, fatores que influenciassem na determinação da escolha de vidros de mesma espessura (3mm) para a cobertura do secador solar.

Nos vidros de diferentes espessuras, relacionando-os com a eficiência na cobertura do secador solar, o vidro de 5mm é o mais adequado para o uso em um secador solar, com valores de 81,3% de transmissividade à radiação solar, e 2,61% para transmissividade à radiação infravermelha, valores estes intermediários aos apresentados pelos vidros de 3mm e

8mm, mas devido ao fácil manuseio e também boa resistência mecânica, durabilidade, como também refratariedade devido às temperaturas que devera suportar, ele consegue suprir perfeitamente as necessidades ideais para o uso de um secador solar, sendo ele intermediário aos dois de diferentes espessuras.

Os filmes plásticos Estufa e o Termodifusor possuem valores consideráveis para a transmissividade a radiação solar (84,0% e 72,0% respectivamente), embora eles apresentaram valores elevados de radiação infravermelha (66,9% e 43,4%), promovendo perdas térmicas para o ambiente externo, com isso, estes dois tipos de filmes devem ser utilizados para ocasiões onde o secador não deve ser tão exigido, tais como curtos períodos de secagem devido a sua degradação em contato com o sol excessivo, fragilizando e comprometendo suas propriedades mecânicas, ou produtos de fácil secagem, que não necessitem de manutenção às alta de temperatura.

A escolha do tipo de material de cobertura para o secador solar vai depender do tipo de necessidade que a pessoa no qual utilizará deste secador. Se ela desejar maior eficiência, menor custo com manutenção e durabilidade, o vidro de 5 mm é o ideal para estes fins, enquanto que o plástico termodifusor apresenta menor valor de eficiência às radiações comparado com os vidros, e requer maior manutenção devido a sua constante degradação, requisitando assim de algum tipo de modificação no secador solar, como por exemplo utilizar de um mecanismo de seletividade do tipo de mudança geométrica na superfície do absorvedor (formatos em V), para que esta radiação solar transmitida possa permanecer ainda mais tempo no secador solar, reduzindo então as perdas térmicas promovidas devido a reflexão da radiação incidente sobre o absorvedor, além das emitidas por ele devido ao seu aumento de temperatura, demandando assim maiores custos para a operação e construção do secador solar, caso seja utilizado para longos períodos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALA, B. K. *et al.* **Solar drying using solar tunnel drier.** *Renewable Energy.* v. 28, p. 183-190. 2003.
- BASUNIA, M. A., ABE, T. **Thin-layer Solar Drying Characteristics of Rough Rice Under Natural Convection.** *Journal of Food Engineering.* v. 4, p. 295-301. 2001.
- BENA, B., FULLER, R.J. **Natural convection solar dryer with biomass back-up heater.** *Solar Energy.* v. 72, p. 75–83. 2002.
- BRASIL, portal. Brasil avança na produção mundial de alimentos. **Portal Brasil.** Disponível em <http://www.brasil.gov.br/noticias/arquivos/2011/06/14/brasil-avanca-na-producao-mundial-de-alimentos>. Acesso em: 25 nov. 2011.
- CONDORÍ, M.; *et al.* **Solar Drying of Sweet Pepper and Garlic using the Tunnel Greenhouse Drier,** *Renewable Energy.* v22, p. 447-460. 2001
- DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A., “**Solar Engineering of Thermal Processes**”, John Wiley & Sons, Inc. 2nd ed., 1991.
- EKECHUKWU, O.V., NORTON, B. **Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology.** *Energy Conversion and Management.* v. 40, Abr.1999, p.615–655.
- EL-SEBAILI, A.A. *et al.* **Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer.** *Energy Conversion and Management.* v. 43, p. 2251–2266. 2002.
- FERREIRA, A.G. **Energia Solar Aplicada à Secagem de Alimentos.** 1ªed. 2004. 87p.
- IVANOVA, D. **Analytical and Experimental Study of Combined Fruit and Vegetable Dryer.** *Energy Conversion and Management.* v.42. p 975-983.2003
- INCROPERA, F. P. *et al.* **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, c2008. xix, cap. 12, p.460-481.
- INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 698 p.
- NICOLAU, P. V. *et al.* **Obtenção de Propriedades Radiativas Espectrais de Vidro Plano,** Porto Alegre, p. 1-10, out. 2000
- OLIVEIRA, M. I.; **Caracterização da secagem do resíduo sólido produzido durante o tratamento de efluentes de uma trefilaria de arames de aço.** 2010. 81 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia – Associação Ampla entre o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e a Universidade Federal de São João Del Rei (CEFET, MG), Minas Gerais, 2010.

PALZ, W. **Energia solar e fontes alternativas.** 1ª ed. Hemus Livraria Editora Limitada,1981. 358p.

SCHIRMER , P. *et al.* **Experimental investigation of the performance of the solar tunnel dryer for drying bananas.** Renewable Energy, v.7, p 119-129. 1996.

SHARMA, V. K. *et al.* **Experimental Investigation of Different Solar Dryers Suitable for Fruit and Vegetable Drying.** Renewable Energy. v.6, p. 413 – 424, 1995.

SIMATE, I.N. **Optimization of mixed-mode and indirect-mode natural convection solar dryers.** Renewable Energy. v. 28, p. 435–453. 2003.