

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
NÍVEL MESTRADO

JOSÉ MAURÍCIO DE MOURA LEITÃO

ESTUDO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS PARA A APLICAÇÃO EM
COLETORES SOLARES PLANOS

São Leopoldo, Janeiro 2019

L533e Leitão, José Maurício de Moura.

Estudo de materiais poliméricos para a aplicação em coletores solares planos / José Maurício de Moura Leitão – 2019.

98 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2019.

“Orientadora: Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan
Coorientador Prof^a. Dr^a. Tatiana Louise Avila de Campos Rocha ”

1.Coletor solar. 2. Coletores poliméricos. 3. Energia solar. 4. Envelhecimento acelerado. I. Título.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Silvana Teresinha Dornelles Studzinski – CRB 10/2524)

ESTUDO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS PARA A APLICAÇÃO EM UM COLETOR SOLAR PLANO

José Maurício de Moura Leitão

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan

Coorientador: Profa. Dra. Tatiana Louise Avila de Campos Rocha

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Jacqueline Biancon Copetti (PPGEM Unisinos)

Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes (PPGEM Unisinos)

Profa. Dra. Ana Paula Mallmann (Unisinos)

São Leopoldo, Janeiro de 2019

RESUMO

Eficiência e economia na produção de energia são fatores-chave no desenvolvimento social e econômico de um país. A energia solar é uma fonte de energia limpa e renovável, utilizada em sua maior parte para o aquecimento de água por meio de coletores solares. Nos últimos 15 anos, os coletores solares planos vêm, devido ao apelo mundial para o uso de materiais mais facilmente recicláveis e ao baixo custo, utilizando cada vez mais materiais poliméricos, substituindo os convencionais.

Para analisar quais materiais poliméricos podem ser usados em coletores solares planos, este trabalho realizou um teste de intemperismo acelerado nos materiais polissulfona (PSU), polietileno (PE) e policarbonato (PC). Destacam-se o PSU e o PE. O PSU tem o melhor resultado em relação ao nível de degradação, pois sua cadeia polimérica é composta por anéis aromáticos e fortes ligações de carbono, enxofre e oxigênio dentro da espinha dorsal do polímero. Adicionalmente, foram realizadas análises do infravermelho nos materiais envelhecidos na câmara de intemperismo acelerado pelo método ATR ou refletância total atenuada. Eles apresentaram, na cadeia molecular, pequenas mudanças nos espectros na região do infravermelho à medida que o tempo exposto na câmara de envelhecimento aumentava.

Por fim, foi desenvolvida uma simulação numérica de um coletor solar plano na plataforma ESS (*Engineering Equation Solver*) em que foi simulado o efeito do número de tubos no absorvedor com diferentes materiais e foi simulada uma geometria de tubos de seção quadrada no absorvedor. A simulação apresentou o melhor resultado com um absorvedor construído com 100 tubos de seção quadrada de polissulfona, no qual a eficiência teoricamente pode chegar a 81,62%.

Palavras-chave: Energia solar; Coletor solar plano; Coletores poliméricos; Envelhecimento acelerado.

ABSTRACT

Efficiency and economy in energy production are key factors in the social and economic development of a country. Solar energy is a source of clean and renewable energy used for heating water through solar collectors. Over the past 15 years, due to the worldwide appeal for the use of more readily recyclable materials and their low cost, flat solar collectors have increasingly used polymeric materials to replace conventional ones.

In order to assess which polymeric materials can be used in flat-plate solar collectors, an accelerated temperature test has been conducted on polysulfone (PSU), polyethylene (PE), and polycarbonate (PC). PSU and EP have stood out. PSU had the best result for degradation because its polymeric chain is composed of aromatic rings and strong bonds of carbon, sulfur and oxygen within the backbone of the polymer. Additionally, infrared analyses have been made of the materials aged in the accelerated temperature chamber according to the ATR method or attenuated total reflectance. They presented small molecular chain changes in the spectra in the infrared region as exposure time in the UV chamber increased.

Finally, a numerical simulation of a flat solar collector was developed in the ESS (Engineering Equation Solver) platform in which the effect of the number of tubes in the absorber with different materials was simulated as well a geometry of square session tubes in the absorber. The simulation presented the best result with an absorber built with 100 polysulfone square session tubes, in which efficiency can theoretically reach 81.62%.

Keywords: Solar energy; flat-plate solar collector; polymeric collectors; UV exposure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Fontes utilizadas para a produção de eletricidade no mundo em de 2014	13
Figura 1.2 – Produção total de energias renováveis	14
Figura 1.3 – Evolução da demanda total de energia por fonte até 2050	14
Figura 1.4 – Estrutura do consumo de eletricidade na rede por classe.	15
Figura 2.1 – Coletor solar sem cobertura	20
Figura 2.2 – Coletor solar plano	21
Figura 2.3 – Principais componentes de um coletor solar plano	21
Figura 2.4 – Relações Sol – Terra.	22
Figura 2.5 – Variação da radiação solar extraterrestre durante o ano.	23
Figura 2.6 – Relações geométricas do feixe de radiação do Sol.	24
Figura 2.7 – Visualização de dois tipos de coletor solar plano	25
Figura 2.8 – Comportamento da radiação solar sobre uma cobertura de vidro	26
Figura 2.9 – Tipos de configurações de placa plana de coletores solares: (a) tubos como parte integrante da placa; (b) tubos presos à placa; (c) tubos soldados à placa, e (d) tubo retangular extrudado com a placa	28
Figura 2.10 – Configuração geométrica com tubos circulares.	31
Figura 2.11 – Configuração geométrica com tubos de sessão quadrada.	32
Figura 2.12 – Linha do tempo dos materiais	35
Figura 2.13 – Gráfico de barras dos valores da massa específica à temperatura ambiente para vários materiais	36
Figura 2.14 – Preço/m ³ aproximado de materiais	37
Figura 2.15 – Esquema de obtenção de alguns polímeros a partir da destilação do carvão mineral	40
Figura 2.16 – Sequência de obtenção de um polímero a partir do petróleo	41
Figura 2.17 – Sequência de obtenção de um polímero	41
Figura 2.18 – Capacidade total de coletores sem cobertura até o fim de 2013	42
Figura 2.19 – Tensão de ruptura relativa do policarbonato	44
Figura 2.20 – Espectro de transmissão de polímeros ópticos. Espessura da amostra: 3,2 mm	48
Figura 2.21 – Representação esquemática da estrutura do PE de baixa densidade.	50
Figura 2.22 – Representação esquemática da estrutura do PE de alta densidade	50
Figura 3.1 – Ciclo de Shewhart	54
Figura 3.2 – Ciclo PDCA	54

Figura 3.3 – Câmara de intemperismo acelerado	58
Figura 3.4 – Distribuição de potência espectral de lâmpadas UVB e da radiação solar	59
Figura 3.5 – Análise FTIR do PC/ABS	61
Figura 3.6 – Espectrômetro ATR	62
Figura 3.7 – Modelo S-Class, pela RM-solar	65
Figura 3.8 – Coletor Ksole	65
Figura 3.9 – Coletor Kabrasol	65
Figura 4.1 – Sobreposição dos espectros no infravermelho do PE original e exposto por diversas horas	68
Figura 4.2 – Espectro no infravermelho do PE original (sem degradação)	69
Figura 4.3 - Espectroscopia no infravermelho do PC sem degradação	70
Figura 4.4 – Sobreposição dos espectros no infravermelho do PC original e exposto por diversas horas	71
Figura 4.5 – Espectroscopia do infravermelho do PSU	72
Figura 4.7 – Sobreposição dos espectros no infravermelho dos materiais estudados envelhecidos	73
Figura 4.7 – Transmitância versus número de onda entre 4000 e 400 cm^{-1} para o PE durante a exposição na câmara de envelhecimento	74
Figura 4.8 – Transmitância versus número de onda entre 4000 e 400 cm^{-1}	74
Figura 4.9 – Espectro produzido pelo PE de alta densidade	75
Figura 4.10 – Espectro produzido pelo PC	75
Figura 4.11 – Coletor Solar polimérico com oito tubos circulares	77
Figura 4.12 – Coletor solar polimérico com sessenta tubos circulares	77
Figura 4.13 – Eficiência de um coletor solar plano com diferentes composições	78
Figura 4.14 – Eficiência de um coletor solar plano utilizando uma geometria de tubos de seção quadrada com diferentes números de tubos	79
Figura 4.15 – Eficiência versus número de tubos em um coletor solar plano com tubos de seção quadrada	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tipos de coletores solares	19
Tabela 2.2 – Valores de tensão de ruptura para o policarbonato	44
Tabela 2.3 – Materiais para cobertura de coletores solares planos	45
Tabela 2.4 – Materiais para absorvedores de coletores solares planos	47
Tabela 2.5 – Propriedades do PB, PSU e PA66	47
Tabela 2.6 – Propriedades do policarbonato	49
Tabela 2.7 – Propriedades do PE	51
Tabela 2.8 – Propriedades do PSU	52
Tabela 3.1 – Características do TECANAT	56
Tabela 3.2 – Características do TECAFINE	56
Tabela 3.3 – Características do TECASON S	57
Tabela 3.4 – Características de operação da câmara de intemperismo acelerado	58
Tabela 3.5 – Condições de exposição	59
Tabela 3.6 – Intervalo para a retirada das amostras	60
Tabela 3.7 – Especificações dos coletores analisados	64
Tabela 3.8 – Dados de entrada na simulação numérica	67
Tabela 4.1 – Tipos de vibração no espectro do PE	69
Tabela 4.2 – Tipos de vibração no espectro do PC	70
Tabela 4.3 – Tipos de vibração no espectro do PSU	72
Tabela 4.4 – Tipos de vibração ao longo do espectro	76
Tabela 4.5 – Eficiência instantânea máxima de coletores solares planos em diferentes composições de geometria e material	78
Tabela 4.6 – Eficiência máxima de um coletor solar plano com diferentes composições de absorvedor	80

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BB	Banco do Brasil
CRESESB	Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
CSP	Coletor Solar Plano
DASOL	Departamento Nacional de Aquecimento Solar da Abrava
E/TFE	Copolímero de Etileno/Tetrafluoretileno
E-CTFE	Copolímero de Etileno e Chlorotrifluoroetileno
EES	<i>Engineering Equation Solver</i>
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
PA	Poliamida
PA HI	Poliamida HI: resistente ao impacto
PA HT	Poliamida HT: resistente ao calor
PA66	Poliamida 6/6
PB	Polibutileno
PC	Policarbonato
PE	Polietileno
PEI	Polieterimida
PEN	Polietileno naftalato
PET	Polietileno tereftalato
PFA	Copolímero de perfluoroalcoxi
PP	Polipropileno
PPE	Éter de polifenileno
PS	Poliestireno
PSU	Polissulfona
PVC	Policloreto de vinila
PVDF	Fluoreto de polivinilideno
SHC	<i>Solar Heating & Cooling</i>
WRC	<i>The World Radiation Center</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c	Área do coletor solar de placa plana [m ²]
C_b	Condutividade térmica da solda entre placa e tubo absorvedor [W/mK]
C_p	Calor específico do fluido de trabalho [J/kgK]
D	Diâmetro externo do tubo [m]
D_h	Diâmetro hidráulico [m]
D_i	Diâmetro interno do tubo [m]
D_h	Diâmetro hidráulico [m]
F	Fator de eficiência da aleta para tubos circulares [-]
F_x	Fator de eficiência da aleta para tubos de seção quadrada [-]
F'	Fator de eficiência do coletor [-]
F_R	Fator de remoção de calor do coletor [-]
G	Irradiância [W/m ²]
G_{on}	Radiação extraterrestre incidente em uma superfície normal
G_{sc}	Constante solar [W/m ²]
$G_T(\tau\alpha)$	Irradiância solar global incidente na superfície do coletor [W/m ²]
H	Irradiação diária [J/m ²]
h_{fi}	Coefficiente transferência de calor por convecção no interior dos tubos [W/m ² K]
I	Irradiação horária [J/m ²]
k_p	Condutividade térmica da placa absorvedora [W/mK]
$\dot{m}_c$	Taxa de massa de fluido no coletor [kg/s]
n	Número de dias [-]
Q_u	Taxa de transferência de calor útil [W]
R	Fator de inclinação [-]
T_a	Temperatura ambiente [K]
T_i	Temperatura do fluido de entrada do coletor [K]
U_L	Coefficiente global de perdas [W/m ² K]
W	Distância entre centros dos tubos da placa absorvedora [m]

m	Parâmetro de arranjo da aleta [-]
e	Altura da placa absorvedora [m]
L_c	Largura externa do canal [m]
L_{ci}	Largura interna do canal [m]
δ	Espessura da placa absorvedora [m]
t	Espessura da aleta.

Grego

θ_z	Ângulo zênite
γ_s	Ângulo azimuth
α	Absorbância
β	Ângulo do coletor
ω	Declinação solar
λ	Comprimento de onda [nm]
λ	Numero de onda [cm ⁻¹]
ρ	Refletância, refletividade
τ	Transmitância
ϕ	Latitude
η_i	Eficiência instantânea máxima [%]

Subscritos

B	Radiação direta
c	Crítico
D	Radiação difusa
G	Refletida pelo solo
n	Normal
t	Radiação no plano inclinado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivos.....	17
1.1.1 Objetivo Geral	17
1.1.2 Objetivos Específicos	17
1.2 Justificativa	17
1.3 Estrutura da Pesquisa	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Coletores Solares	19
2.1.1 Tipos de Coletores.....	20
2.2 O Sol.....	21
2.2.1 Radiação Solar.....	22
2.2.2 Direção do Feixe de Radiação.....	23
2.2.2.1 <i>Radiação extraterrestre em uma superfície horizontal</i>	24
2.3 Coletor Solar Plano	24
2.3.1 Cobertura.....	26
2.3.2 Absorvedor	26
2.3.3 Modelo matemático para coletores solares planos	28
2.3.3.1 <i>Radiação Solar Absorvida</i>	29
2.3.3.2 <i>Transferência de Calor entre Placa Absorvedora e Fluido de Trabalho</i>	30
2.3.3.3 <i>Eficiência instantânea do coletor</i>	33
2.3.4 Isolamento	33
2.4 Revisão dos coletores solares planos mais recentes	33
2.5 Materiais em Projeto	34
2.6 Polímeros	36
2.6.1 Tipos.....	37
2.6.1.1 <i>Termofixos</i>	38
2.6.1.2 <i>Termoplásticos</i>	38
2.6.1.3 <i>Elastômeros</i>	39
2.6.2 Fonte de matérias-primas	39
2.6.2.1 <i>Produtos naturais</i>	40
2.6.2.2 <i>Hulha ou carvão mineral</i>	40
2.6.2.3 <i>Petróleo</i>	41

2.7 Coletores solares com material polimérico	41
2.8 Características dos polímeros para uso em coletores solares térmicos	44
2.8.1 Cobertura.....	45
2.8.2 Absorvedor.....	46
2.9 Polímeros selecionados.....	47
2.9.1 Policarbonato.....	48
2.9.2 Polietileno.....	49
2.9.3 Polissulfona.....	51
3 MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1 Materiais.....	53
3.2 Procedimentos Metodológicos	53
3.3 Escolha dos materiais	55
3.4 Preparação e execução dos testes	57
3.4.1 Teste de degradação	57
3.4.2 Análise da espectroscopia no infravermelho.....	60
3.5 Simulação numérica	63
4 RESULTADOS	68
4.1 Análise dos resultados (Etapa 3)	68
4.1.1 Espectroscopia no infravermelho	68
4.2 Comparação de resultados (Etapa 4).....	73
4.2.1 Espectroscopia no infravermelho	73
4.3 Resultados da simulação numérica do coletor solar plano.....	76
5 CONCLUSÃO.....	81
REFERÊNCIAS	83
APÊNDICE I – PROGRAMA DE CÁLCULO PARA COLETORES SOLARES DE PLACA PLANA.....	89

1 INTRODUÇÃO

O século XXI está se preparando para o acontecimento de uma grande mudança no panorama global de energia. De acordo com Hinrichs e Kleinbach (2009), a demanda global por energia triplicou nos últimos 50 anos e pode triplicar novamente nos próximos 30 anos. A maioria desta demanda no passado ocorreu em países industrializados em razão da revolução industrial, sendo satisfeita em 90% por combustíveis fósseis. No entanto, com o passar dos anos, a maioria da demanda de energia passou a ocorrer em países em desenvolvimento em razão da expansão tecnológica ocasionada pelo aumento de população nesses países. Essa demanda é satisfeita em cerca de 60% por combustíveis fósseis. Este valor tem a tendência de diminuir gradativamente devido aos incentivos para a utilização de fontes alternativas de energia que não agredem o meio ambiente e às preocupações crescentes com o impacto da queima de combustíveis fósseis no clima global.

Segundo a International Energy Agency (IEA-2014), em 2014 mais de 65% da geração de energia era provida por fontes de energia fóssil, como mostra a Figura 1.1. Como solução para diminuir o uso desses tipos de fontes, existem energias renováveis, como, por exemplo a energia solar, a eólica, a geotérmica e a hidráulica, que, em contrapartida às outras fontes, têm recursos de longa duração e, como principal vantagem, são consideravelmente menos poluentes ao meio ambiente.

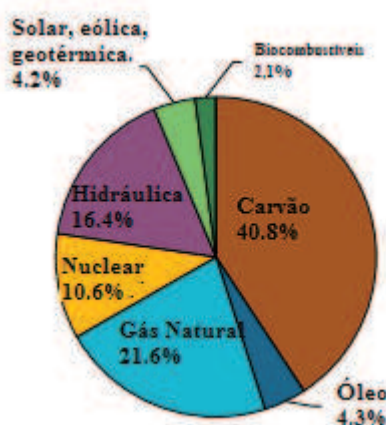


Figura 1.1 – Fontes utilizadas para a produção de eletricidade no mundo em de 2014

Fonte: Adaptado, International Energy Agency (2014).

O uso de fontes de energias renováveis vem crescendo não só no Brasil, mas em países de alto desenvolvimento econômico, como Estados Unidos e Alemanha, conforme mostra a Figura 1.2. Incentivos no mundo, como o Protocolo de Quioto no final da década de 90, provocam essa procura por novas fontes de energia limpa.

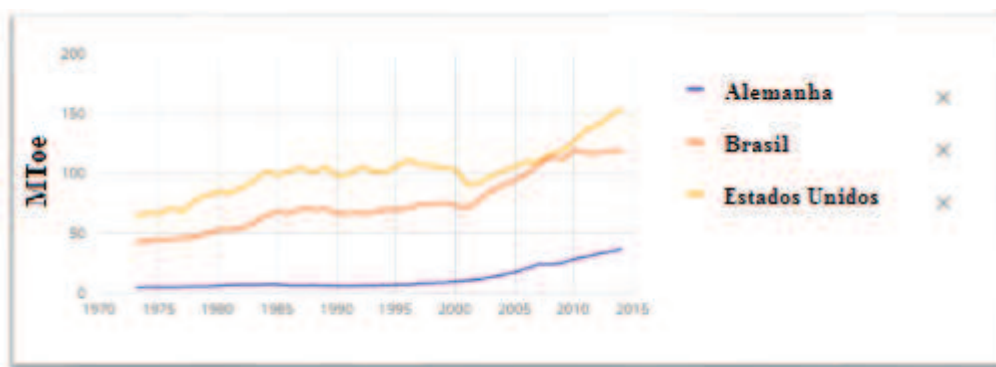


Figura 1.2 – Produção total de energias renováveis

Fonte: Energy Atlas, IEA (2014).

A demanda total de energia no Brasil, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2014), aumentará pouco mais de duas vezes no período de 2013-2050, com destaque para o avanço da maior parte das fontes de energia, conforme mostra a Figura 1.3.

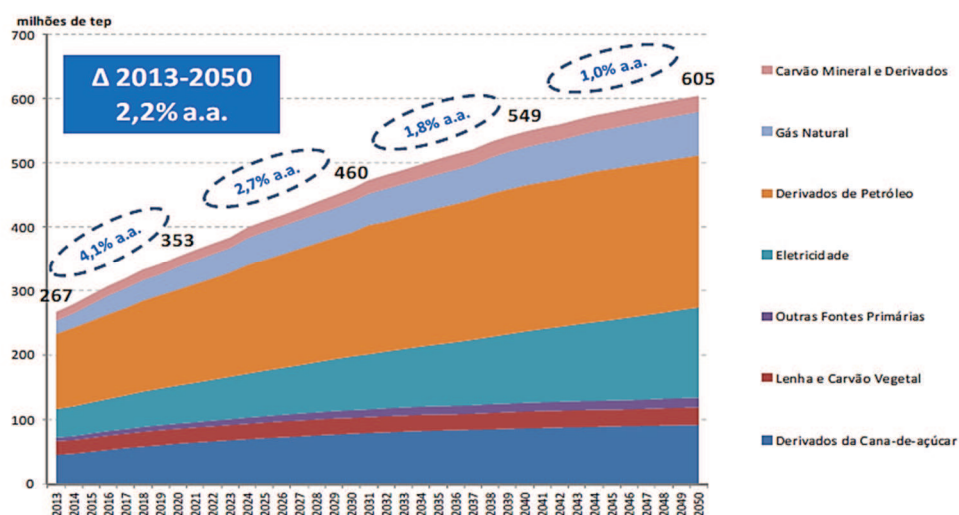


Figura 1.3 – Evolução da demanda total de energia por fonte até 2050

Fonte: EPE (2015).

Segundo a EPE (2015), a classe comercial apresenta o maior crescimento do consumo de energia para o período 2010-2020: 4,4%. Entre 2010 e 2015, a classe residencial teve um crescimento de 3,8% e a classe industrial teve uma diminuição de 2,5% no consumo de energia. Conforme se pode observar na Figura 1.4, o consumo de energia praticamente manterá a mesma porcentagem de energia consumida por cada classe nos próximos três anos. O fato de a classe comercial ter o maior crescimento provém do desenvolvimento da economia nacional e de uma melhor distribuição de renda. A solicitação de serviços e segmentos comerciais de maior sofisticação contribui para o crescimento acelerado do consumo de eletricidade neste setor.

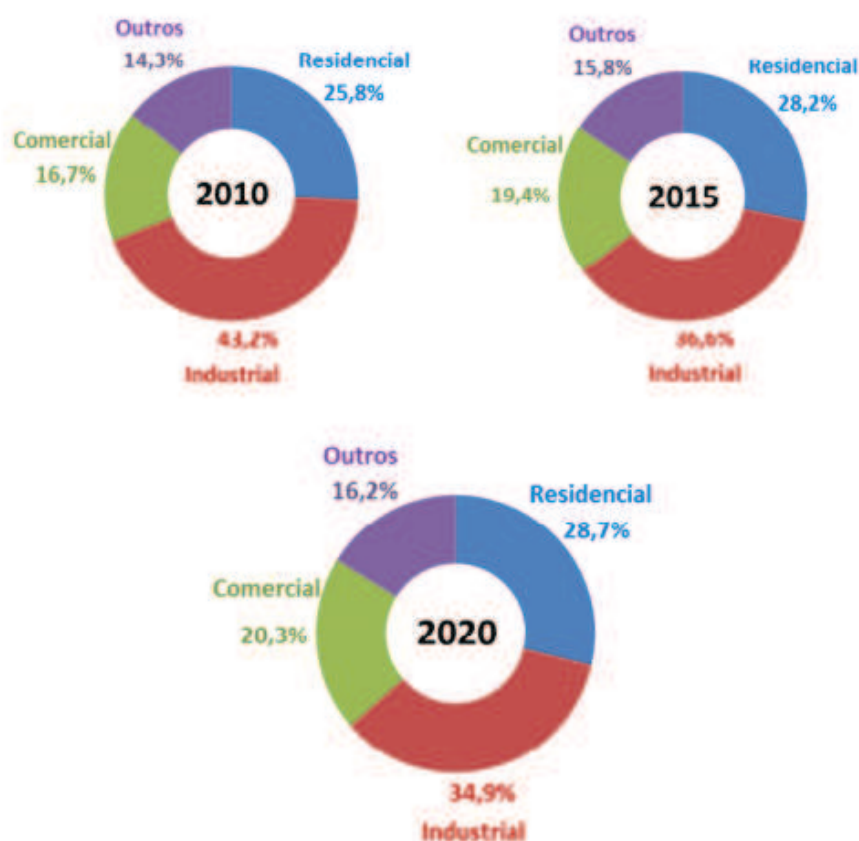


Figura 1.4 – Estrutura do consumo de eletricidade na rede por classe.

Fonte: EPE (2015).

Um fator estimulante para o uso de energias renováveis é a possibilidade de utilização no setor comercial e no setor residencial. Geração de energia utilizando como fonte o sol e o vento ~~possibilita~~ possibilitam a utilização de equipamentos de pequena escala, o que possibilita sua instalação em prédios e casas, por exemplo.

O maior fluxo de energia disponível na Terra é a irradiação solar; a potência total é de aproximadamente 380×10^{18} MW. A energia solar, de acordo com Lopez (2012), é a fonte de energia mais atrativa, pois é menos poluente e menos finita comparada a qualquer outra fonte conhecida até o momento.

Atualmente, o uso mais difundido da energia solar no país é para o aquecimento de água em residências, hotéis, hospitais e piscinas. Existem algumas empresas no país que fabricam e instalam diversos tipos de coletores. De acordo com Mesquita (2017), em 2013 o Brasil possuía 6 milhões de metros quadrados de área acumulada de aquecedores solares instalados, gerando 4.000 MW de energia térmica. Em 2015, esse número chegaria aos 15 milhões de metros quadrados de coletores, caso se mantivessem os índices de crescimento do setor. Entretanto, o elevado investimento inicial é ainda um obstáculo importante, pois faltam mecanismos de

financiamento para o consumidor, e isso também acontece com as outras fontes não convencionais de energia.

A energia solar é principalmente utilizada de duas maneiras: no aquecimento de algum fluido e no fornecimento de energia elétrica. Essas duas aplicações são representações de dois métodos de aproveitamento da energia solar, tal como o sistema térmico e o sistema fotovoltaico.

O sistema térmico, que será a base deste trabalho, transforma a radiação solar incidente em um absorvedor em energia térmica. Essa energia é usada para o aquecimento de um fluido. Esse aproveitamento térmico é feito com o uso de coletores ou concentradores solares.

O coletor solar plano tem como função aquecer um fluido pela radiação do Sol, normalmente utilizando água como fluido de trabalho. É um equipamento usado há mais de 150 anos, desenvolvido em 1867 pelo cientista suíço Horace de Saussure. Seu conceito de aquecer água substitui outras formas convencionais de aquecimento, como o gás, cuja obtenção e queima apresentam são prejudiciais ao meio ambiente. A principal desvantagem é o alto custo do equipamento, comparado ao de aquecedores de água convencionais. O *payback* na instalação de um coletor solar plano convencional, ou seja, com cobertura de vidro e absorvedor de material metálico e tubos de cobre, é de 4 a 8 anos em média. Por este motivo, nos últimos 10 anos foram intensificados os estudos de novos materiais que possam substituir os convencionais e, como melhor opção até o momento, surge a utilização de materiais poliméricos. Além de possuírem um preço relativamente mais baixo, são de menor peso, pois polímeros têm baixa densidade, o que facilita o transporte e a instalação dos coletores.

1.1 Objetivos

Os objetivos do trabalho estão subdivididos em Objetivo Geral e Objetivos Específicos, descritos a seguir.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é analisar as propriedades de materiais poliméricos para serem utilizados como alternativas para a confecção de coletores solares planos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Selecionar materiais com propriedades térmicas e físicas adequadas para o uso em coletores solares planos;
- Avaliar a degradação dos materiais selecionados em testes de intemperismo acelerado;
- Analisar as bandas do espectro no infravermelho dos materiais envelhecidos por meio de uma espectroscopia no infravermelho.
- Verificar o efeito da geometria e do material utilizado no absorvedor de um coletor solar plano por meio de uma simulação numérica na plataforma ESS.
- Validar o uso do material e da geometria utilizada no absorvedor para aplicação em um coletor solar plano polimérico.

1.2 Justificativa

Produção de energia, eficiência e economia são fatores-chave para o desenvolvimento social e econômico de um país. Nos últimos dez anos acompanhou-se o desenvolvimento de diversas tecnologias no campo de energias renováveis. Isso ocorreu em razão de uma mudança do pensamento mundial que se deu com uma nova visão política e econômica do desenvolvimento no mundo: a visão do desenvolvimento sustentável (COLANGELO *et al.*, 2016).

Para a produção de energia solar renovável, parte dos componentes do sistema para conversão consiste no uso de metais. A tubulação nos coletores solares e trocadores de calor são feitas de cobre. O alumínio é usado para o absorvedor e para a carcaça. O uso continuado desses materiais para atender a demanda do mercado térmico solar, ainda em crescimento,

levaria a um consumo anual de cobre na ordem da produção anual atual em todo o mundo (Mauthner, 2015). O crescimento dos preços que se enfrentaria leva a uma questão óbvia – aumentar os preços em função das necessidades políticas – e colocaria claramente em risco a implantação do mercado solar (SHC TASK 39, 2015).

Por este motivo são procurados materiais que possam substituir os convencionais. Para a implementação destes, entretanto, o material selecionado deve ser competitivo térmica e fisicamente com os materiais já utilizados. Os absorvedores solares poliméricos têm sido reconhecidos como uma alternativa promissora para reduzir o custo dos coletores solares. Os absorvedores poliméricos em coletores solares sem cobertura, por exemplo, são utilizados para aquecimento de piscinas e estão no mercado há muitos anos (OLIVARES *et al.*, 2010).

A utilização de um polímero para o absorvedor ocasiona uma vantagem no custo, mas uma desvantagem no tempo de vida, devido a degradação do material. Os níveis de degradação dependem de cada tipo de polímero utilizado e do aditivo adicionado ao material.

O coletor solar plano é uma tecnologia amplamente utilizada em todo o mundo pela facilidade de manutenção e pelo baixo custo. A exploração de coletores solares térmicos planos assumiu uma grande importância não só em aplicações residenciais, mas também em aplicações industriais e comerciais.

A utilização de um material com menor custo e competitivo com os coletores solares planos convencionais tem como solução o uso do polímero em seu absorvedor e cobertura, mas não se restringe apenas ao material selecionado. São estudadas diversas formas estruturais a fim de aumentar a eficiência e, como ferramenta para facilitar a procura da combinação ideal, são utilizados programas de simulação aos quais são fornecidos diversos parâmetros estruturais e térmicos para se encontrar a combinação estrutural ideal.

1.3 Estrutura da Pesquisa

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos. A partir do segundo capítulo é apresentado o referencial bibliográfico sobre os temas: coletores solares, coletores solares planos, materiais em projeto, polímeros e coletores solares com material polimérico. No terceiro capítulo apresenta-se a metodologia aplicada para a pesquisa. No quarto capítulo são apresentados e analisados os resultados do trabalho e, finalmente, no quinto capítulo se apresenta a conclusão da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Coletores Solares

De acordo com Duffie e Beckman (2013), coletor solar é um tipo especial de trocador de calor que transforma a radiação solar em energia térmica. O coletor solar difere em muitos aspectos a um trocador de calor convencional que, na maioria das vezes, troca calor de um fluido para outro, diferente de um coletor solar, que absorve a radiação solar e transmite para o fluido em forma de calor. Segundo Köhl *et al.* (2012), a particularidade e importância de um coletor solar térmico se dá devido ao fato de ser um dispositivo que converte a radiação da fonte de energia mais duradoura, o Sol, na forma de calor e utilizando o seu melhor potencial como o aquecimento de um fluido.

Existem basicamente dois tipos de coletores solares: os planos e os concentradores. Um coletor plano, também chamado de “não concentrador”, tem a mesma área de interceptação e de absorção de radiação, ou seja, o tamanho do absorvedor é o tamanho do próprio coletor. Nos coletores concentradores, normalmente a área de interceptação da radiação é maior que a área de absorção. Isso se dá devido à presença de superfícies refletivas, que refletem todo o feixe de radiação na área total do coletor para uma área normalmente no centro, pequena, onde está localizado o absorvedor, ocasionando um fluxo de radiação muito maior se comparado ao de um coletor plano. Dentre os coletores planos e concentrados, existe um grande número de tipos diferentes, conforme lista a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Tipos de coletores solares

Tipos	Tipos de coletor	Tipos de absorvedor	Relação de concentração	Escala de temperatura indicativa (°C)
Planos	Coletor solar plano	Plano	1	30-80
	Coletor de tubo evacuado	Plano	1	50-200
	Coletor parabólico composto	Tubular	1-5	60-240
Concentrador de eixo único	Refletor linear Fresnel	Tubular	10-40	60-250
	Coletor de calha parabólica	Tubular	15-45	60-300
	Coletor de calha cilíndrica	Tubular	10-50	60-300
Concentrador de dois eixos	Refletor parabólico	Ponto	100-1000	100-500
	Coletor de campo helióstato	Ponto	100-1500	150-2000

Fonte: Adaptado Kalogirou (2004).

Como é possível observar na Tabela 2.1, os coletores planos operam com uma temperatura menor de trabalho do que os concentradores solares. Isto se deve ao fato de que os concentradores possuem uma maior área de interceptação, que ocasiona um fluxo de radiação maior. No entanto, para usos específicos, um coletor plano tem vantagens, como baixo custo, baixa manutenção e facilidade de instalação.

2.1.1 Tipos de Coletores

Existem vários tipos e tamanhos de coletores solares, desde coletores planos a concentradores. Os coletores mais comuns são os coletores sem cobertura, usados em sua maioria para o aquecimento de piscinas por serem de baixo custo e de fácil instalação (Figura 2.1).



Figura 2.1 – Coletor solar sem cobertura

Fonte: Building America (2007).

Esse tipo de coletor normalmente utiliza materiais poliméricos. O absorvedor geralmente utiliza o elastômero do tipo etileno-propileno-dieno (EPDM), mas também pode-se utilizar o polietileno (PE) e o polipropileno (PP). Segundo Sopian *et al.* (2002), a aplicação mais comum para o uso de materiais poliméricos envolve baixas temperaturas, como o aquecimento de piscinas. A razão é que para este tipo de aplicação o coletor solar não utiliza uma cobertura, sendo assim o material utilizado deve ter uma alta resistência às intempéries do dia.

Então, na busca de temperaturas mais altas, o coletor do tipo com cobertura ou, como normalmente chamado, “coletor solar plano” (Figura 2.2) surge como opção. Nesse tipo de coletor, as perdas por convecção são minimizadas pela presença da cobertura. Consiste basicamente em um absorvedor, normalmente de material metálico ou polimérico, uma cobertura feita de vidro ou um polímero e um isolamento térmico, normalmente lã mineral ou espuma de poliuretano (Figura 2.3).

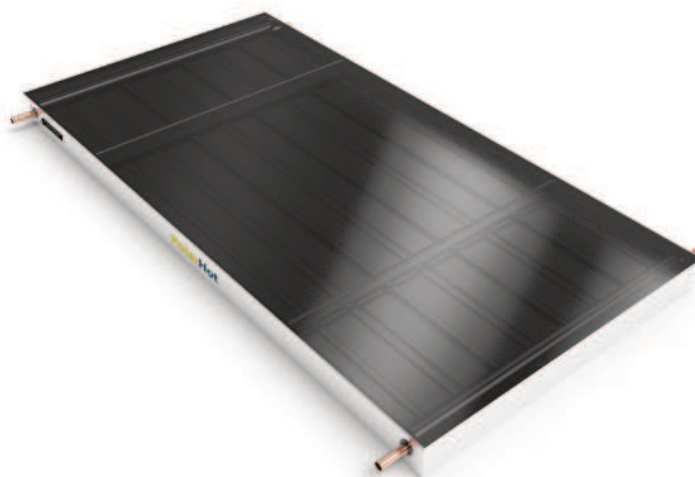


Figura 2.2 – Coletor solar plano

Fonte: Solis (2016).

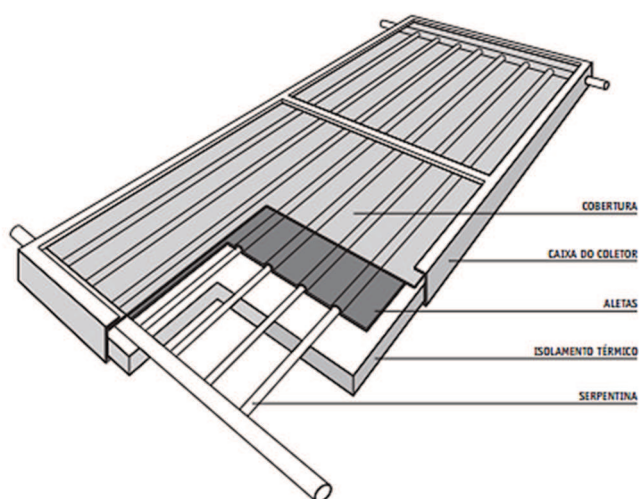


Figura 2.3 – Principais componentes de um coletor solar plano

Fonte: Ecoenergia (2016).

2.2 O Sol

Segundo Faninger (2010), o sol como fonte de radiação solar é um reator de fusão contínua. Diversas reações de fusão fornecem radiação solar em forma de conversões de energia. A mais importante reação de fusão é o processo em qual quatro prótons ou núcleos de átomos de hidrogênio se transformam em uma partícula alfa que é o núcleo de um átomo de hélio, a massa nuclear do hélio é aproximadamente 0,7% menos massiva do que os quatro prótons. Essa diferença de massa é expelida como energia e carregada do centro da reação até

a superfície do Sol, através de um processo conhecido como convecção, e é liberada em forma de luz e calor.

Segundo Hamilton (1997), a energia gerada no interior do Sol leva um milhão de anos para chegar à superfície. A cada segundo 700 milhões de toneladas de hidrogênio são convertidos em cinza de hélio. Durante este processo 5 milhões de toneladas de energia pura são liberados; portanto, com o passar do tempo, o Sol está se tornando mais leve.

A energia solar é essencialmente uma radiação de um corpo negro correspondente a uma temperatura de 6000 K aproximadamente. O Sol é uma esfera de matéria gasosa intensamente quente, com um diâmetro de 1.39×10^9 m e está aproximadamente $1,5 \times 10^{11}$ m da terra, conforme Figura 2.4 (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

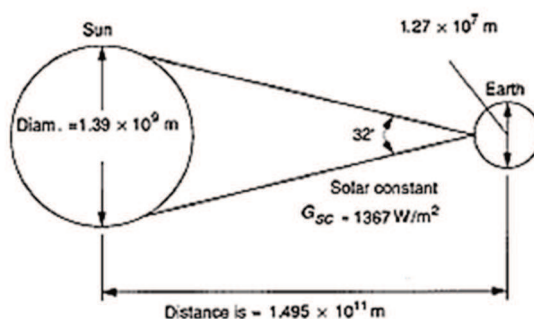


Figura 2.4 – Relações Sol – Terra.

Fonte: Adaptado de Durfe (2013).

A constante solar G_{sc} , é a energia proveniente do Sol recebida, por uma unidade de tempo, em uma unidade de área perpendicular à direção da radiação propagada, sobre a parte externa da atmosfera. O valor da constante solar foi discutido por muitos anos, através de experimentos e estudos realizados. De acordo com Duncan *et al.* (1982), três valores foram estimados com um erro de $\pm 0,5\%$, são eles 1374 W/m^2 , 1372 W/m^2 e 1367 W/m^2 . O valor adotado pela *The World Radiation Center* (WRC) é de 1367 W/m^2 , com um erro de 1% , que será o valor adotado para futuros cálculos neste trabalho.

2.2.1 Radiação Solar

A radiação solar incidente na superfície da Terra é essencial para diversas aplicações, desde a agricultura, passando pelo fornecimento de energia. Segundo Duffie e Beckman (2013), a radiação solar extraterrestre varia ao longo do ano, como mostrado na Figura 2.5, apresentando valores máximos no período em torno ao solstício de verão e mínimos em torno do solstício de inverno.

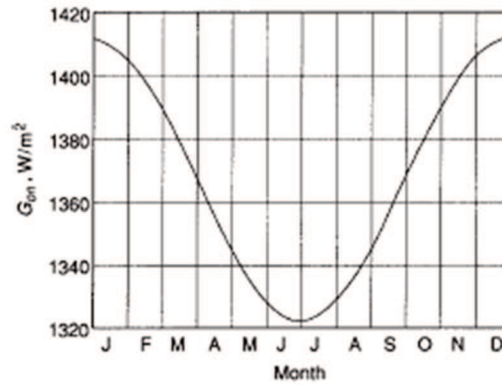


Figura 2.5 – Variação da radiação solar extraterrestre durante o ano.

Fonte: Duffie e Beckman (2013).

Para cálculos mais precisos, Spencer (1971) forneceu uma equação na qual é possível se calcular a radiação extraterrestre incidente em um plano normal em um dia do ano (G_{on}). O cálculo da radiação é dado pela Equação (2.1), onde G_{sc} é a constante solar, n é o dia do ano e B é dado pela Equação (2.2).

$$G_{on} = G_{sc} \left(\frac{1,000110 + 0,03221 \cos(B) + \sin(B)}{0,000719 \cos(2B) + 0,000077 \sin(2B)} \right) \quad (2.1)$$

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (2.2)$$

2.2.2 Direção do Feixe de Radiação

O cálculo da radiação solar que atinge uma superfície horizontal na Terra, é obtido através de relações geométricas entre a posição do sol com a superfície da Terra. Essas relações são observadas na Figura 2.6, nas quais o ângulo azimute do Sol γ_s é o ângulo ao sul da projeção do feixe, este ângulo é positivo a oeste e negativo a leste, ω é o ângulo horário, entre sul ou oeste do meridiano, ele altera 15° por hora, sendo positivo à tarde, negativo pela manhã e 0° ao meio dia, θ_z é o ângulo zênite, o qual é o ângulo entre a linha vertical e a linha do feixe do sol. Este é o ângulo do feixe de radiação incidente na superfície, β é o ângulo entre a superfície e o plano em questão como exemplo um coletor solar. O ângulo α_s é complementar ao θ_z , ou seja, é o ângulo entre o feixe e a superfície horizontal e o γ é o ângulo azimute da superfície, que é o ângulo entre o meridiano e o plano horizontal da superfície em questão (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

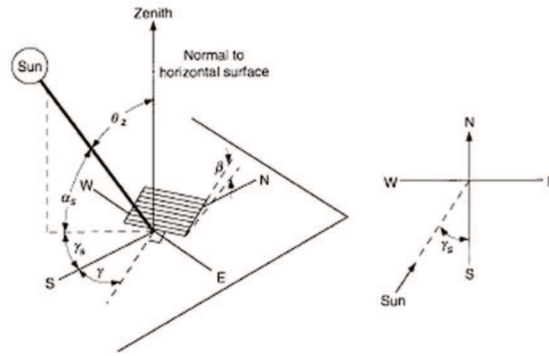


Figura 2.6 – Relações geométricas do feixe de radiação do Sol.

Fonte: Duffie e Beckman, (2013).

2.2.2.1 Radiação extraterrestre em uma superfície horizontal

O cálculo da radiação incidente em uma superfície plana é efetuado desconsiderando a atmosfera, deste modo ele é apenas teoricamente possível. O cálculo é efetuado usando as relações geométricas descritas anteriormente, na qual G_o é a radiação horizontal para qualquer horário entre o nascer e o pôr do sol, calculado pela Equação (2.3), onde ϕ é a latitude e ω é a declinação solar, ela é obtida através da Equação (2.4).

$$G_o = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\cos \phi \cos \omega \cos \omega_s + \sin \phi \sin \omega) \quad (2.3)$$

$$\omega = 23,45 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2.4)$$

Pode ser calculada a irradiação solar diária (H_o) pela Equação (2.5):

$$H_o = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \left(\cos \phi \cos \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \omega \right) \quad (2.5)$$

O valor de ω_s é encontrado pela Equação (2.6).

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \omega \quad (2.6)$$

2.3 Coletor Solar Plano

Conforme apresentado no capítulo anterior, o coletor solar plano é constituído por uma caixa isolada à prova d'água, normalmente de alumínio, aço inox ou algum material polimérico,

uma placa de absorção de cor escura, ligada diretamente a uma tubulação de cobre onde o fluido circula, e uma cobertura feita normalmente de vidro com uma ou mais camadas. No absorvedor as placas são tipicamente feitas de metal devido à sua alta condutividade térmica e pintadas com revestimentos específicos a fim de aumentar a absorbância para que o fluido possa atingir temperaturas mais altas.

Quando a radiação solar passa através da cobertura e colide contra o absorvedor negro de alta absorbância, uma larga porção dessa energia é absorvida pela placa e transferida em forma de calor para o fluido contido nos tubos. A parte inferior e as laterais do absorvedor são isoladas para se reduzir as perdas por condução (KALOGIROU, 2009).

Existem vários tipos de design, principalmente em relação ao absorvedor, e diversos materiais podem ser utilizados tanto no absorvedor como na cobertura. O maior propósito de um coletor é coletar o máximo de energia solar possível e transferi-la o mais eficientemente possível para o fluido de trabalho com um custo total baixo.

Por este motivo, o design do absorvedor e da tubulação possui grande importância (Figura 2.7).

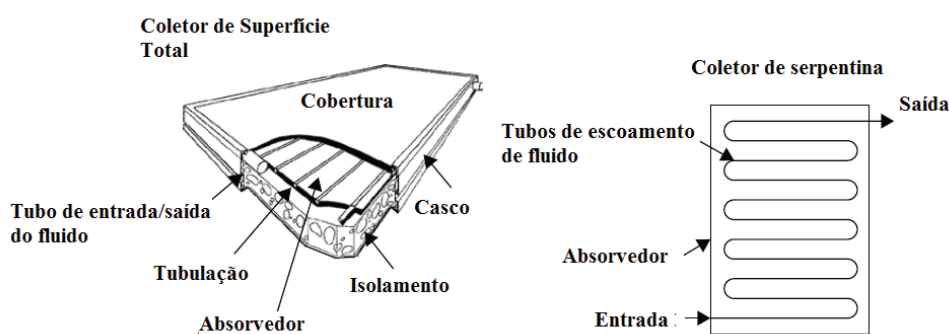


Figura 2.7 – Visualização de dois tipos de coletor solar plano

Fonte: Adaptado de Kalogirou (2009).

Os dois principais designs para uma tubulação de um coletor podem ter tubos soldados à placa absorvedora ou tubos integrados na própria placa.

Os coletores de superfície total têm tubos paralelos conectados em dois tubos com diâmetro superior localizados nas extremidades. Sua vantagem é não necessitar de bomba, pois utilizam o sistema de termossifão, que circula o fluido pelo fenômeno das correntes de convecção naturais dos fluidos, mas sua desvantagem é ter menor eficiência térmica.

Os coletores com serpentina não possuem conexões, apenas uma entrada e uma saída de fluido, o que faz com que o fluido permaneça maior tempo dentro do coletor e haja maior

absorção de energia térmica, mas eles têm a desvantagem da necessidade da utilização de uma bomba para fazer circular o fluido na serpentina.

2.3.1 Cobertura

A cobertura de um coletor solar tem como principais objetivos proteger a placa absorvedora das intempéries, reduzir as perdas de calor por convecção através da camada de ar estagnada entre a placa absorvedora e a cobertura e reduzir as perdas de calor por radiação entre o absorvedor e o meio externo.

O material mais usado é o vidro, por ter uma boa transmitância: ele é transparente para a radiação de baixo comprimento de onda proveniente do Sol e opaco para a radiação no espectro infravermelho, provinda da placa absorvedora, como mostra a Figura 2.8. Além disso, tem resistência mecânica suficiente para suportar as intempéries ao longo do ano, protegendo, assim, a placa absorvedora (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

A transmitância, a refletância e a absorptância são funções da radiação de entrada. Geralmente o índice de refração, n , e o coeficiente de extinção, K , do material da cobertura são funções do comprimento de onda da radiação (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

Alguns materiais de cobertura têm variações de propriedades ópticas significativas, como os materiais poliméricos, cuja transmitância não possui o mesmo comportamento em relação ao comprimento de onda, tal como acontece com o vidro.

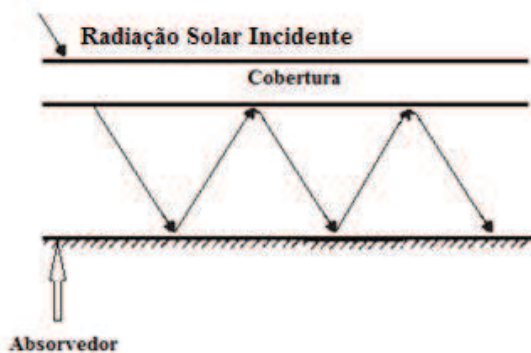


Figura 2.8 – Comportamento da radiação solar sobre uma cobertura de vidro

Fonte: Adaptado de Duffie e Beckman (2013).

2.3.2 Absorvedor

O absorvedor, como o próprio nome esclarece, tem como objetivo absorver a radiação incidente e transferi-la para o fluido em forma de calor para aquecê-lo. O absorvedor pode ter

vários formatos; cada um depende da aplicação e do custo aplicado no coletor, ou seja, quanto mais complexa a geometria a fim de maximizar a transmissão de calor para o fluido, mais caro será o projeto.

Os absorvedores são geralmente de cor preta para se obter a máxima absorção de radiação solar. Para aumentar a eficiência dos absorvedores, utilizam-se na superfície revestimentos seletivos, que permitem uma conversão maior de radiação em calor, pois, além de aumentar a absorptância, diminuem a emissividade no espectro infravermelho. Também existem os revestimentos não seletivos, que não são tão aconselháveis, pois, mesmo tendo alta absorptância, têm alta emissividade no espectro infravermelho, ocasionando perda de calor da placa, o que diminui sua eficiência, se comparada à dos revestimentos seletivos. Os revestimentos seletivos aplicados galvanicamente incluem o cromo preto, níquel preto e óxido de alumínio com níquel. Mais recentemente, utilizam-se deposições a base de PDV. Essa deposição, do inglês *physical vapor deposition*, consiste em depositar filmes finos de materiais metálicos ou cerâmicos pela vaporização. O material sólido de alta dureza é evaporado por calor e ao mesmo tempo é introduzido um gás reativo, formando, assim, um composto metálico que se deposita na placa absorvedora na forma de um revestimento altamente aderente.

Para coletores de aquecimento de fluido, as passagens devem ser integrais ou fortemente ligadas à placa absorvedora. O maior problema é obter uma boa ligação térmica entre os tubos e o absorvedor sem acarretar custos excessivos de fabricação e com materiais. Os materiais mais frequentes usados para os tubos são cobre, alumínio e aço inoxidável.

A Figura 2.9 mostra alguns designs de absorvedores: o primeiro, (a), são tubos como parte integrante da placa; o segundo, (b), são tubos presos à placa; o terceiro, (c), são tubos soldados à placa, e o último, (d), são canais retangulares extrudados com a placa.

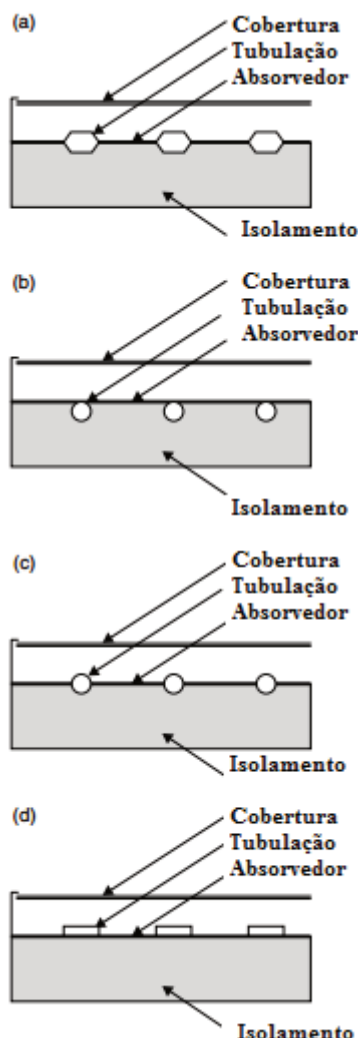


Figura 2.9 – Tipos de configurações de placa plana de coletores solares: (a) tubos como parte integrante da placa; (b) tubos presos à placa; (c) tubos soldados à placa, e (d) tubo retangular extrudado com a placa

Fonte: Adaptado de Kalogirou (2009).

Como já foi dito, os coletores solares planos podem ter diversas geometrias no absorvedor. A fim de otimizar sua eficiência quando utilizado um absorvedor de material polimérico, neste trabalho foi proposta uma simulação numérica de um coletor solar plano com a geometria de tubos de sessão quadrada, que difere na eficiência da aleta no absorvedor. O modelo matemático da eficiência da aleta foi inserido na simulação numérica com base no modelo apresentado por Duffie e Beckhan (2013) e modificado para sessões quadradas.

2.3.3 Modelo matemático para coletores solares planos

O modelo matemático utilizado segue os passos de Duffie e Beckhan (2013) o modificando para o uso de absorvedores com tubos de sessão quadrada. A eficiência da aleta

em um coletor solar plano sofre uma alteração quando utilizado esse *design*, as equações modificadas para o uso de um absorvedor de tubos de sessão quadrada são apresentadas a seguir.

2.3.3.1 Radiação Solar Absorvida

Segundo Kalogirou (2009), a previsão do desempenho dos coletores requer uma informação da energia absorvida pela placa absorvedora do coletor. A radiação incidente sobre o coletor solar tem três componentes que precisam ser levados em conta, a radiação direta (B) a difusa (D) e a refletida (G). Usando um modelo isotrópico, pode se calcular a radiação absorvida (S), multiplicando cada termo pelo produto de transmitância (τ) e absorbância (α), seguindo a Equação (2.7):

$$S = I_B R_B (\tau\alpha)_B + I_D (\tau\alpha)_D \left[\frac{1 + \cos\beta}{2} \right] + \rho_G (I_B + I_D) (\tau\alpha)_G \left[\frac{1 - \cos\beta}{2} \right] \quad (2.7)$$

onde I_B é a irradiação direta, I_D é a irradiação difusa, R_B é a relação entre a irradiância direta em uma superfície inclinada e a irradiância direta em uma superfície horizontal, ρ_G é a refletância do solo e β é o ângulo de inclinação do coletor em relação à horizontal. Nessa equação, os termos $[1 + \cos(\beta)/2]$ e $[1 - \cos(\beta)/2]$ são os fatores de visão do coletor ao céu e do coletor ao solo, respectivamente.

Da energia incidente sobre a superfície de um coletor, a fração $(\tau\alpha)$ é absorvida pela placa absorvedora enquanto que a fração $(1-\alpha)\tau$ é refletida de volta para a cobertura, na forma de radiação difusa. Essa fração é então refletida de volta para a placa absorvedora como $(1-\alpha)\tau\rho_D$. A reflexão múltipla de radiação difusa no coletor continua de modo que a energia absorvida pelo absorvedor pode ser calculada pela Equação (2.8), conforme KALOGIROU (2009):

$$(\tau\alpha) = \tau\alpha \sum_{n=1}^{\infty} [(1-\alpha)\rho_D]^n = \frac{\tau\alpha}{1 - (1-\alpha)\rho_D} \quad (2.8)$$

Valores típicos de $(\tau\alpha)$ para vidro de janela ficam entre 0,7 a 0,75 e para vidros com baixo teor de ferro ficam entre 0,85 a 0,9. Para coberturas usadas em coletores solares planos convencionais, a Equação (2.8) pode ser aproximada pela Equação (2.9).

$$(\tau\alpha) = 1,01\tau\alpha \quad (2.9)$$

2.3.3.2 *Transferência de Calor entre Placa Absorvedora e Fluido de Trabalho*

Entre a placa absorvedora e o fluido, a taxa de transferência de calor geralmente é referida como taxa de calor útil. A máxima taxa de transferência de calor no coletor solar ocorre quando toda a superfície do coletor se encontra na temperatura de entrada do fluido de trabalho, condições na qual as perdas para o meio são mínimas.

A taxa de calor útil pode ser encontrada pela Equação (2.10), na qual F_R é o fator de remoção de calor do coletor, A_c é a área total útil do coletor S é a radiação absorvida pela placa absorvedora por unidade de área, T_i e T_a são as temperaturas de entrada do fluido de trabalho e do ambiente, respectivamente e U_L é o coeficiente global de perdas térmicas.

$$\dot{Q}_u = A_c F_R [S - U_L (T_i - T_a)] \quad (2.10)$$

O fator de remoção de calor, F_R , é definido pela Equação (2.11), representando a relação entre a taxa de calor útil real em relação à taxa de calor se toda a superfície absorvedora do coletor estivesse na temperatura local do fluido de trabalho na condição de entrada.

$$F_R = \frac{\dot{m}_c C_p (T_o - T_i)}{A_c [S - U_L (T_o - T_i)]} \quad (2.11)$$

onde $\dot{m}_c$ é a taxa de massa do fluido, T_o é a temperatura do fluido na saída do coletor e C_p o calor específico do fluido. O fator de remoção de calor pode ser calculado utilizando-se a Equação (2.12):

$$F_R = \frac{\dot{m}_c C_p}{A_c U_L F'} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_c U_L F'}{\dot{m}_c C_p} \right) \right] \quad (2.12)$$

onde F' é chamado de “fator de eficiência do coletor solar”. Ele representa a relação entre o ganho de energia útil real e o ganho de energia se toda a placa absorvedora estivesse na temperatura local do fluido. Para um design conforme o da Figura 2.10 o fator de eficiência do coletor pode ser calculado pela Equação (2.13).

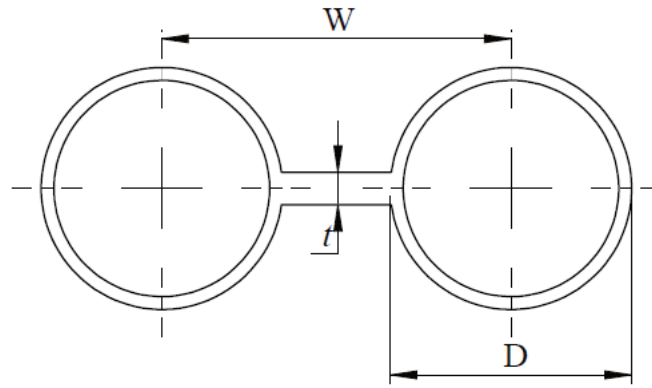


Figura 2.10 – Configuração geométrica com tubos circulares.

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[\frac{1}{U_L [D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]} \quad (2.13)$$

Nessa equação, W representa a distância entre os centros dos tubos e D o diâmetro externo dos tubos, D_i é o diâmetro interno dos tubos, C_b é a condutância térmica de contato entre a placa e o tubo e h_{fi} é o coeficiente de transferência de calor convectivo para escoamento interno e F é eficiência da aleta, dada pela Equação (2.14).

$$F = \frac{\tanh \left[m \left(\frac{W - D}{2} \right) \right]}{m \left(\frac{W - D}{2} \right)} \quad (2.14)$$

O termo m é um parâmetro de arranjo da aleta e é calculado pela Equação (2.15), onde k_p é a condutividade térmica do material da placa absorvedora e t a espessura da aleta.

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k_p t}} \quad (2.15)$$

A eficiência da aleta sofre uma influência significativa da condutividade térmica do material utilizado, como observado na Equação 2.14. No caso do uso de absorvedores poliméricos, quando utilizada uma geometria com tubos circulares, similar à de coletores convencionais, a eficiência do coletor sofre uma perda significativa devido à baixa condutividade térmica dos materiais poliméricos.

Como solução, o aumento no número de tubos no absorvedor é uma alternativa, pelo fato de diminuir a distância entre os tubos, ocasionando assim uma diminuição do efeito de aletas entre os tubos.

Outra forma de melhorar a eficiência do coletor é utilizar uma diferente geometria no absorvedor, na qual resulta uma modificação no modelo matemático de eficiência de aletas de Duffie e Beckman (2013). Foi proposto um modelo matemático da eficiência da aleta para tubos de sessão quadrada, baseado no modelo apresentado por Duffie e Beckhan (2013), conforme a Figura 2.11.

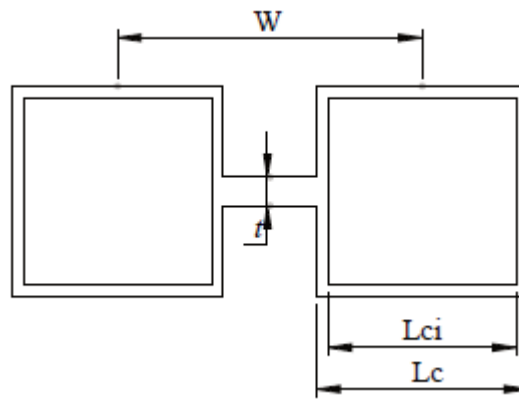


Figura 2.11 – Configuração geométrica com tubos de sessão quadrada.

Fonte: Adaptado de Soave, 2014.

Na Figura 2.9 L_c e L_{ci} representam a largura externa e interna da sessão, respectivamente, e t a espessura da aleta. Com a alteração na geometria da placa absorvedora, a eficiência da aleta, dada pela Equação (2.14), é reescrita conforme a Equação (2.16):

$$F_x = \frac{\tanh\left[m\left(\frac{W-L_c}{2}\right)\right]}{m\left(\frac{W-L_c}{2}\right)} \quad (2.16)$$

O fator de eficiência do coletor, F' é reescrito conforme a Equação (2.17).

$$F' = \frac{1/U_L}{W\left[\frac{1}{U_L[L_C + (W-L_C)F_x]} + \frac{1}{D_h h_{fi}}\right]} \quad (2.17)$$

onde D_h é o diâmetro hidráulico do canal de escoamento e pode ser encontrado pela Equação (2.18) para sessões quadradas

$$D_h = Lc \quad (2.18)$$

2.3.3.3 Eficiência instantânea do coletor

Para avaliar o desempenho dos coletores é calculada a eficiência instantânea, ela é dada pela Equação 2.19, no qual G_T é o coeficiente de irradiação global e A_c é a área do coletor.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_c G_T} \quad (2.19)$$

2.3.4 Isolamento

O isolamento tem como principal função minimizar a transferência de calor da placa para o meio externo pelas laterais e pelo fundo do coletor. Outra função do isolamento é a contribuição para a estrutura do conjunto, já que melhora a fixação em telhados e afins. Os materiais mais comuns utilizados no isolamento dos coletores são lã de rocha, lã de vidro e poliuretano expandido.

2.4 Revisão dos coletores solares planos mais recentes

Nos últimos 15 anos foram realizados diversos estudos na área de coletores solares planos abrangendo desde formas estruturais diferentes a diferentes tipos de materiais. Colangelo *et al.* (2016) realizaram uma revisão sobre coletores solares térmicos e apresentaram informações de literaturas sobre as diferentes geometrias e os diferentes materiais estudados ao longo destes anos.

Na área de inovação de materiais, em um estudo realizado por Ehrmann e Reineke-koch (2012), foram investigadas as propriedades de óxidos condutores transparentes utilizados como revestimentos antirreflexivos. Esse revestimento é aplicado sobre a cobertura por meio de uma técnica de deposição física chamada “pulverização magnética” (*magnetron sputtering* em inglês) e consiste em um processo em que o plasma é criado e os íons carregados positivamente são acelerados e, por meio de um campo elétrico, são depositados no alvo, condensando-se em

superfícies e assim criando uma película fina. As vantagens deste método de deposição são: alta aderência, resistência ao desgaste e suavidade.

2.5 Materiais em Projeto

Segundo Ashby (2012), projeto é o processo de traduzir uma nova ideia ou uma necessidade de mercado em informações detalhadas com as quais se pode fabricar um produto. Cada um de seus estágios exige decisões sobre quais materiais serão utilizados no produto e sua forma de confecção. Normalmente a escolha do material é ditada pelo projeto, pela necessidade de uma característica específica do material, como exemplo. Porém, às vezes ocorre o contrário: um novo produto, ou a evolução de um já existente, foi sugerido ou possibilitado pela existência de um novo material.

A evolução dos materiais ao longo do tempo sempre foi significativa para a devida época, como mostra a Figura 2.12. O número de materiais disponíveis para os engenheiros é amplo: 160 mil ou mais (ASHBY, 2012).

Como se pode observar na Figura 2.12, o polímero foi descoberto recentemente, se comparado à descoberta do cobre, que data dos primórdios da humanidade. O cobre usado nos dias atuais é praticamente o mesmo usado há 30 anos, por exemplo, diferenciando-se sua técnica de manufatura e a forma de obtê-lo. No entanto, o polímero tem ainda um longo caminho pela frente, seja na obtenção de novos tipos ou no aperfeiçoamento de aditivos que melhorem sua composição química.

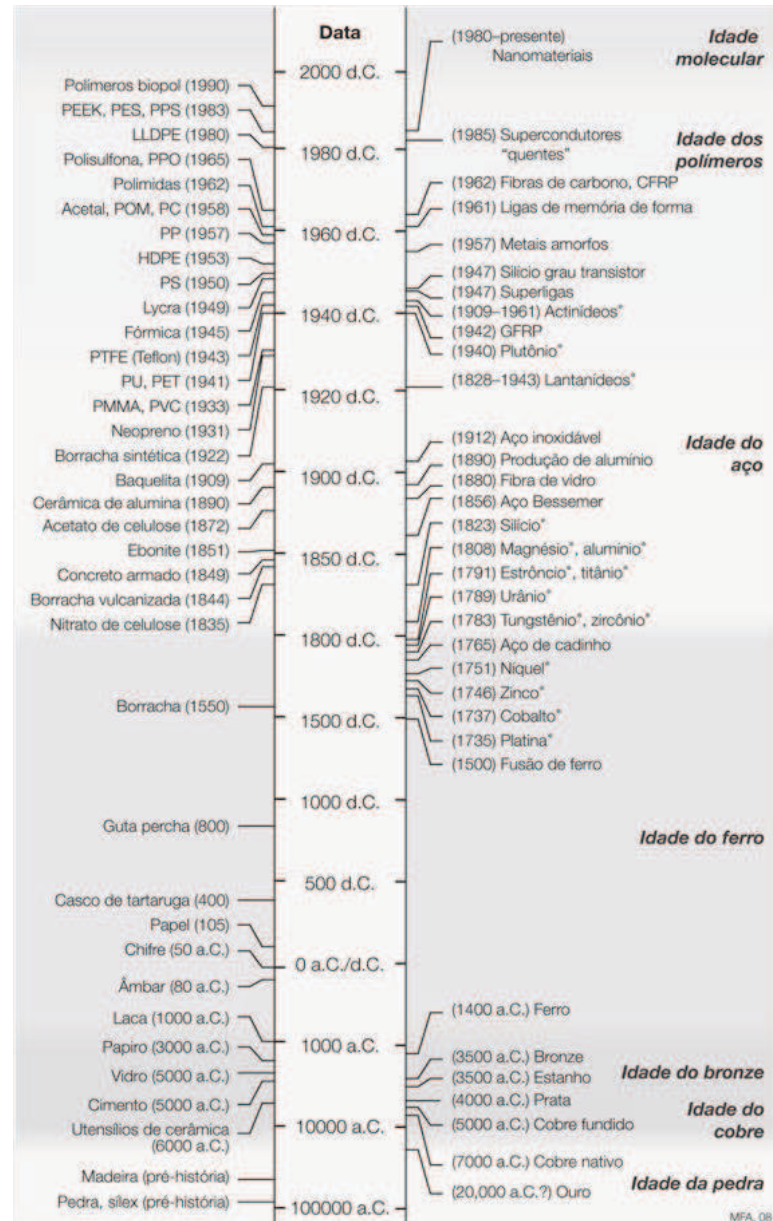


Figura 2.12 – Linha do tempo dos materiais

Fonte: Ashby (2012).

O ponto de partida de um projeto é uma necessidade de mercado ou uma nova ideia, seja para aperfeiçoar o material ou a geometria do equipamento projetado. A escolha do material se dá pela especificação do projeto e sua condição de operação, como coletores solares que necessitam de materiais que resistam às intempéries. O seu ponto final é a especificação completa do produto, que supriu a necessidade ou atendeu à ideia inicial.

Os materiais sólidos podem ser agrupados convenientemente em três categorias básicas: metais, cerâmicas e polímeros. Essa separação é baseada principalmente na composição química e na estrutura atômica de cada classe. A maioria dos materiais se enquadra em um ou

outro grupo distinto. Adicionalmente, existem os compósitos, que são combinações de dois ou mais materiais diferentes.

2.6 Polímeros

Polímero é uma classe de material que inclui materiais plásticos e borrachas. Muitos dos polímeros são compostos orgânicos que têm sua química baseada no carbono, no hidrogênio e em outros elementos não metálicos, como, por exemplo, oxigênio, nitrogênio e silício. Além disso, eles têm estruturas moleculares muito grandes, com frequência na forma de cadeias e com estrutura composta por átomos de carbono (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Os polímeros podem ser tanto naturais como sintéticos, de acordo com sua origem. Apesar de a quantidade de polímeros naturais exceder de longe a produção de polímeros sintéticos da indústria moderna, os polímeros naturais perderam sua importância econômica com o advento da tecnologia dos sintéticos. No entanto, os polímeros naturais estão retomando sua importância econômica com a mudança de atitude da humanidade pela conscientização ecológica. Os polímeros naturais mais conhecidos e utilizados são: a borracha natural, a celulose e as proteínas. Entre os polímeros sintéticos, tem-se o polietileno (PE), o polipropileno (PP), o polietileno tereftalato (PET).

Tipicamente, esses materiais possuem baixas massas específicas, conforme mostra a Figura 2.13, enquanto suas características mecânicas são, em geral, diferentes das características exibidas pelos materiais metálicos e cerâmicos (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

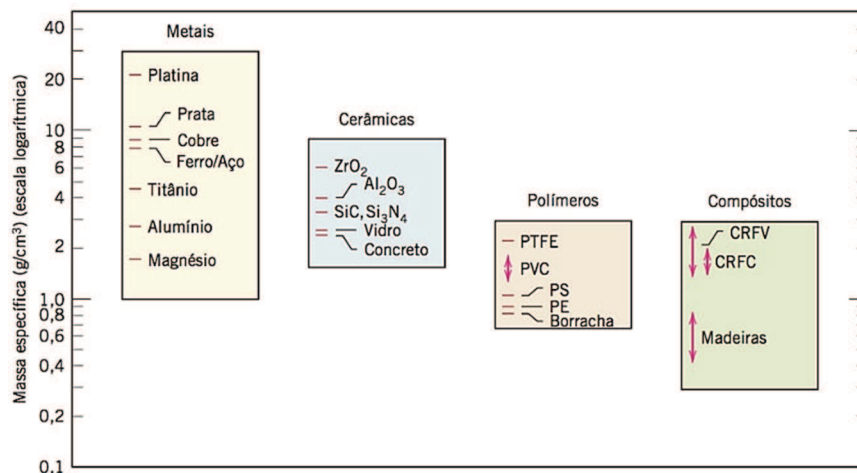


Figura 2.13 – Gráfico de barras dos valores da massa específica à temperatura ambiente para vários materiais

Fonte: Callister; Rethwisch (2012).

Muitos dos polímeros são extremamente dúcteis e flexíveis, o que constitui uma vantagem para serem conformados em formas complexas, isto é, podem tomar formas em processos mais simples se comparados aos dos metais.

A escolha do uso de um polímero em um projeto se dá principalmente pelo baixo custo e por sua baixa massa específica. Conforme mostra a Figura 2.14, as duas características estão relacionadas de modo que, em razão de ter uma baixa massa específica, o material tem um menor valor por unidade de volume do que a maioria dos outros materiais. Contudo, as suas características divergem das de outros tipos de materiais. No gráfico da Figura 2.14 são comparados diversos tipos de materiais em relação ao preço por unidade de volume. Como o exemplo do cobre e do policarbonato sinalizam, ambos podem ser utilizados como absorvedores em um sistema de coletor solar plano; o policarbonato, por sua baixa massa específica, tem um preço menor e, portanto, é vantajoso.



Figura 2.14 – Preço/ m^3 aproximado de materiais

Fonte: Ashby (2012).

2.6.1 Tipos

Os polímeros podem ser classificados de várias formas: quanto à origem; quanto à estrutura química; quanto ao grupo funcional que constituem o polímero; quanto à forma da cadeia polimérica e quanto ao tipo de aplicação (uso geral ou de engenharia).

Os polímeros também podem ser classificados quanto às características distintas de cada grupo e se dividem em termofixos, termoplásticos e elastômeros. Isso se deve, de acordo com Callister e Rethwisch (2012), ao fato de que a resposta de um polímero a forças mecânicas em temperaturas elevadas está relacionada à sua estrutura molecular dominante. De fato, um

esquema de classificação para esses materiais é feito de acordo com seu comportamento frente a uma elevação na temperatura.

2.6.1.1 *Termofixos*

Os termofixos ou termorrígidos, como também podem ser chamados, são infusíveis e insolúveis, solventes orgânicos em geral. Sob aquecimento, esses polímeros acabam se decompondo sem fundir. Esses polímeros possuem cadeias com ligações cruzadas.

Segundo Callister e Rethwisch (2012), os polímeros termofixos possuem a cadeia polimérica em rede. Eles tornam-se permanentemente rígidos durante sua formação e não amolecem sob aquecimento. Os polímeros em rede apresentam ligações cruzadas covalentes entre as cadeias moleculares adjacentes. Durante os tratamentos térmicos, essas ligações prendem as cadeias umas às outras para resistir a seus movimentos de vibração e de rotação em temperaturas elevadas. Dessa forma, os materiais não amolecem quando são aquecidos. A densidade de ligações cruzadas é geralmente elevada: entre 10% e 50% das unidades repetidas na cadeia têm ligações cruzadas. Apenas o aquecimento até temperaturas máximas de trabalho causará o rompimento dessas ligações cruzadas e a degradação do polímero.

Os polímeros termofixos apresentam uma vantagem em relação aos termoplásticos por serem, em geral, mais rígidos (ou com maior módulo de elasticidade), resistentes e possuírem melhor estabilidade dimensional. São exemplos de termofixos: epóxis, resinas fenólicas e baquelite. A principal desvantagem é que são de difícil reciclagem, sendo que a maioria não é reciclável. Isso acontece porque, depois de reticulados, não fundem e, se expostos a temperaturas muito elevadas, se decompõem e não voltam à sua característica original, diferentemente dos termoplásticos.

2.6.1.2 *Termoplásticos*

Estes polímeros são fusíveis e solúveis em solventes orgânicos, podem ser fundidos sob aquecimento e solidificados por resfriamento e não possuem uma decomposição generalizada. Do ponto de vista estrutural, são polímeros com macromoléculas lineares e podem conter ou não ramificações.

Os termoplásticos, quando aquecidos, podem ser fundidos pela questão de amolecerem e por fim se liquefazerem. Eles fundem, pois possuem ligações intermoleculares mais fracas, que possibilitam a mistura em estado fundido com outro polímero, e endurecem quando

resfriados. Este processo é totalmente reversível e pode ser repetido sem perda significativa de propriedades, se conduzido de maneira correta. Por possuírem maior capacidade de reciclagem, os polímeros termoplásticos se apresentam muito vantajosos em termos de escolha do material. Isso se deve ao fato de atualmente a consciência ecológica ter um grande peso na escolha de um material para um projeto.

Segundo Callister e Rethwisch (2012), em uma escala molecular, conforme a temperatura é elevada, as forças de ligação secundárias diminuem, ocasionando a quebra das ligações secundárias existentes entre as cadeias poliméricas, o que resulta na fusão do material. Uma degradação irreversível ocorre quando a temperatura de um polímero termoplástico fundido for aumentada excessivamente. Além disso, os termoplásticos são relativamente macios. A maioria dos polímeros lineares e aqueles que têm algumas estruturas ramificadas com cadeias flexíveis são termoplásticos. Esses materiais são conformados ou processados normalmente com aplicação simultânea de calor e pressão. Exemplos de polímeros termoplásticos comuns incluem polietileno (PE), poliestireno (PS), polietileno tereftalato (PET) e cloreto de polivinila (PVC).

2.6.1.3 *Elastômeros*

Elastômeros pertencem à categoria de polímeros flexíveis, são bons em isolamento térmico e elétrico, apresentam baixa deformação plástica e podem ser moldados em diferentes formas. Os elastômeros incluem borracha natural e sintética. Possuem ampla variedade de aplicações, desde em solados de tênis até em coletores solares sem cobertura, usados no aquecimento de piscinas.

Como particularidade, exibem comportamento elástico na temperatura ambiente, recuperam-se rapidamente de grandes deformações, voltando ao normal após o término da aplicação de tensão. Exemplos de artefatos feitos com elastômeros incluem atilhos, pneus, e anéis o'ring.

2.6.2 Fonte de matérias-primas

A utilização do polímero depende basicamente do baixo custo, se comparado a outros materiais. O custo de um polímero é resultante de seu processo de polimerização e da disponibilidade do monômero, matéria-prima para sua obtenção. As principais fontes para a obtenção da matéria-prima do polímero, o monômero, podem ser divididas, de acordo com

Canevarolo Junior (2013), em três grupos: produtos naturais, hulha ou carvão mineral e petróleo.

2.6.2.1 *Produtos naturais*

Neste grupo são encontradas matérias-primas existentes na natureza que, com algumas modificações, se prestam para a produção de polímeros comerciais.

A borracha natural, por exemplo, é encontrada no látex da seringueira. Entre a metade do século XIX até o início do século XX, o Brasil era o maior produtor e exportador de borracha natural do mundo, gerando o chamado Ciclo da Borracha Amazônica. Com o passar do tempo, a produção deixou de ser extrativista e hoje em dia passou a ser encarada como um produto de agronegócio, apesar, entretanto, de existirem empresas que dão importância à sustentabilidade e utilizam ações sociais para dar promover a produção de borracha natural em seringueiras principalmente na Amazônia, com incentivos focados em gerar trabalhos para a população local.

2.6.2.2 *Hulha ou carvão mineral*

A hulha, ou carvão mineral, quando submetida a uma destilação seca, pode produzir gases de hulha, amônia, alcatrão da hulha e coque. Do gás de hulha é possível se separar etileno, matéria básica para a obtenção do polietileno (PE), e metano, que, por oxidação, produz formaldeído, matéria-prima básica para a formação de resinas fenol-formaldeído. A amônia, o alcatrão da hulha e o coque, por meio de processos, produzem outras matérias básicas para a obtenção de outros polímeros, como mostra a Figura 2.15.

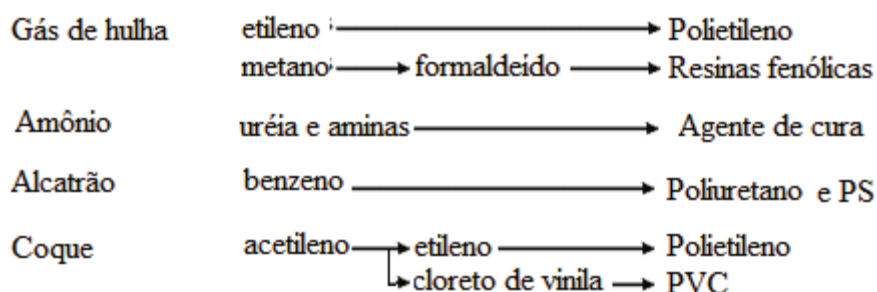


Figura 2.15 – Esquema de obtenção de alguns polímeros a partir da destilação do carvão mineral

Fonte: Canevarolo Junior (2013).

2.6.2.3 Petróleo

O petróleo é a fonte mais importante na obtenção de matéria-prima para a produção de polímeros. Pela destilação fracionada do óleo cru, podem ser obtidas várias frações, sendo que a fração de interesse é a nafta, que, após um craqueamento térmico apropriado, gera frações gasosas contendo moléculas saturadas e insaturadas. Das insaturadas se obtêm etileno, propileno, butadieno, buteno, etc. A Figura 2.16 e Figura 2.17 mostram a sequência desde o óleo cru até a obtenção de um polímero característico.

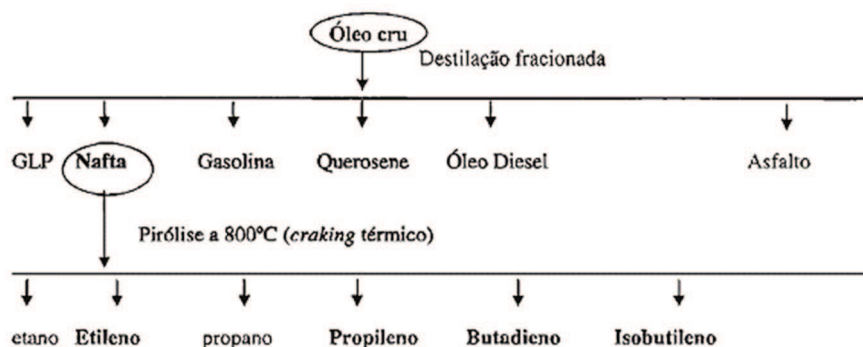


Figura 2.16 – Sequência de obtenção de um polímero a partir do petróleo

Fonte: Canevarolo Junior (2013)

Etileno	→		→	PE e copolímeros
+ Cloro	→	Cloreto de vinila	→	PVC
+ Benzeno	→	Estireno	→	PS
+ Oxigênio	→	Óxido de etileno	→	Poliéteres e Poliésteres
Propileno	→		→	PP
+ Amônio	→	Acrilonitrila	→	Resinas acrílicas
+ Benzeno	→	Fenol	→	Resinas fenólicas
+ HCN	→		→	PMMA
+ Oxigênio	→	Óxido de propileno	→	PU
Butadieno	→		→	PB
+ Amônio	→	Hexametileno diamina	→	PA6,6
+ Cloro	→	Cloropreno	→	Neopreno
+ Estireno	→		→	SBR

Figura 2.17 – Sequência de obtenção de um polímero

Fonte: Canevarolo Junior (2013).

2.7 Coletores solares com material polimérico

Na área de coletores solares, os polímeros têm duas grandes vantagens: seu baixo custo, se comparado ao dos coletores convencionais e, sua massa, fator importante presente na instalação de um coletor, pois facilita a instalação em lugares de difícil acesso.

Segundo Piekarczyk (2014), aplicações de materiais poliméricos foram bem sucedidas em sistemas térmicos em termos tanto de economia de energia convencional e redução de custos de produção e transporte quanto de instalação.

De acordo com o *Solar Heating & Cooling* (SHC), da Agência Internacional de Energia, em seu evento Task 39, onde foi discutida a aplicação de materiais poliméricos para sistemas térmicos, os plásticos são os materiais-chave em termos de confiabilidade e custo-benefício na aplicação de aquecimento de água ao redor do mundo, com custo reduzido de fabricação, processo e material a ser usado. Essa combinação resulta na fabricação de um coletor solar completamente inovador, que permite criar projetos competitivos na aplicação de coletores em novos edifícios. A procura é por soluções para custo, eficiência e durabilidade, e o material polimérico facilita a integração de um sistema térmico no projeto de um edifício, reduzindo, assim, a poluição para o meio ambiente, ocasionada, por exemplo, pela queima de gás em sistemas de aquecimento. Ele também possibilita a integração de sistemas térmicos em edifícios e residências de baixo custo.

Absorvedores de material polimérico para aquecimento de piscinas são produzidos desde o início da década de 1970. O coletor solar sem cobertura, usado para este tipo de aplicação, é o sistema ideal para o uso de materiais de baixo custo, tais como os polímeros. O alto volume de produção também traz vantagens na confecção deste tipo de coletor, reduzindo custos de produção e padronizando modelos. Conforme MAUTHNER; WEISS e SPÖRK-DUR (2015), eles representam uma tecnologia com a maior capacidade instalada nos EUA e Austrália em termos de potência térmica, como mostra a Figura 2.18:

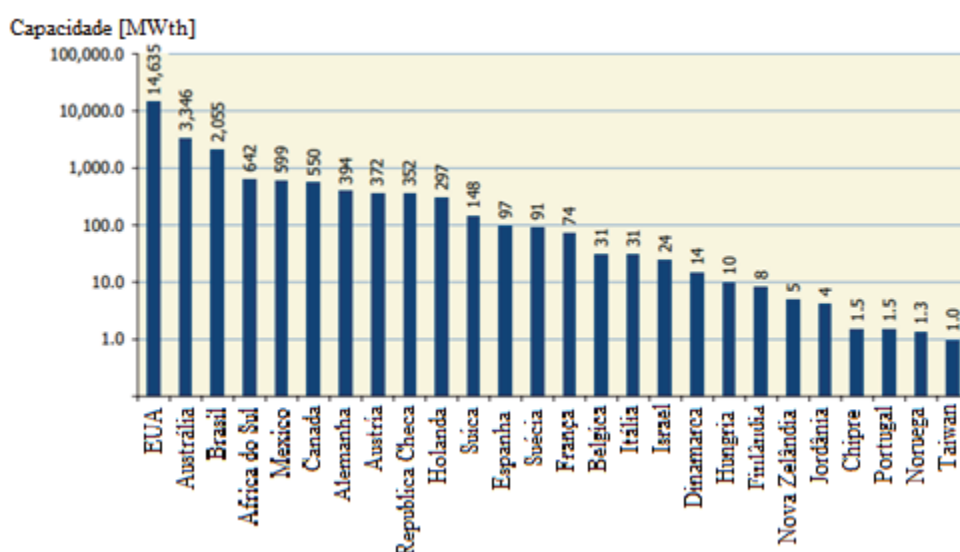


Figura 2.18 – Capacidade total de coletores sem cobertura até o fim de 2013

Fonte: adaptado de Mauthner; Weiss; Spörk-Dur (2015).

Coletores solares de alto desempenho feitos com materiais poliméricos são o maior desafio desta última década do ponto de vista tecnológico e mais interessante ainda devido ao potencial de mercado.

Nos últimos 15 anos, diversos estudos foram realizados buscando a melhor eficiência em um coletor solar plano de alto desempenho. Diversos tipos de polímeros foram estudados, tanto para a cobertura como para o absorvedor, que são as duas partes mais estudadas do coletor e aquelas para as se buscam sempre características essenciais para poderem ser equiparadas às de um coletor solar convencional, que geralmente utiliza cobre ou alumínio para o absorvedor e vidro para a cobertura.

As principais características que se buscam no absorvedor são relacionadas ao desempenho térmico, sua absorptância e refletância e principalmente seu nível de degradação com o tempo. Já para a cobertura se busca um material transparente que tenha uma elevada transmitância em comprimentos de ondas de até 2,5 μm e uma transmitância baixa em comprimentos de onda acima de 2,5 μm . Isso se justifica pelo fato de que a cobertura deve ser transparente para a radiação proveniente do Sol (baixos comprimentos de onda) e ser opaca para a radiação originada do absorvedor (comprimentos de onda elevados).

Vários estudos já feitos com materiais poliméricos apresentaram conclusões sobre o melhor material a ser utilizado em um coletor solar plano. É o caso do estudo realizado por Kahlen, Wallner e Lang (2010), que determinou o comportamento do envelhecimento de um policarbonato exposto ao ar, em uma temperatura entre 120 a 140°C por 4.500 h, e à água, em uma temperatura entre 70 a 95°C por 16.000 h. O estudo foi realizado com três temperaturas para cada ambiente. Foi utilizado um forno de circulação de ar para ambos os ambientes. Os corpos de prova expostos ao ar quente foram colocados sobre uma grelha metálica, e os expostos à água quente foram colocados em um recipiente de vidro cheio de água e coberto por uma tampa de rosca. A água destilada do recipiente foi substituída a cada 2.000 h no intuito de reduzir ou evitar efeitos de saturação por lixiviação de aditivos. Para determinar o tempo de vida do material, foi utilizado o modelo de Arrhenius, que é baseado em uma relação teórica entre as taxas de reação química e a temperatura, geralmente utilizado para materiais que degradam e quebram como resultado de um processo químico (Nelson, 1971).

Os resultados do efeito de envelhecimento sobre a tensão de ruptura relativa do material são listados quantitativamente na Tabela 2.2. A relação quantitativa que o material atinge na curva de ruptura antes que ela ocorra é fornecida em tempo máximo de exposição e em diferentes temperaturas nos dois ambientes. O material de referência tem um valor de $105 \pm 2\%$, ou seja, o material atinge o máximo da curva de ruptura.

Tabela 2.2 – Valores de tensão de ruptura para o polycarbonato

Material	Tensão de ruptura em %							
	Não envelhecido	Envelhecido no ar			Envelhecido na água			
		120°C, 4500 h	130°C, 1500 h	140°C, 500h	70°C, 6000 h	80°C, 6000 h	90°C, 2000 h	95°C, 4000 h
PC	105±2	21±14	5	(11±8) 47±29	74±33	22±14	40±38	-

Fonte: Kahlen, Wallner e Lang (2010).

Além disso, os efeitos do envelhecimento em função do tempo de exposição às várias condições de envelhecimento pela temperatura e pelo ambiente são mostrados na Figura 2.19.

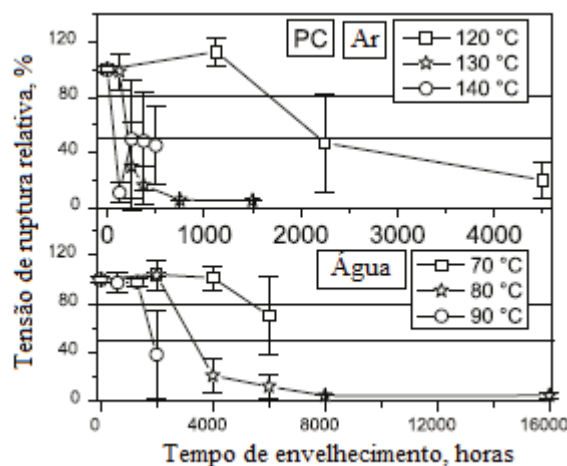


Figura 2.19 – Tensão de ruptura relativa do polycarbonato

Fonte: Kahlen, Wallner e Lang (2010).

Para o PC, a tensão de ruptura máxima apresentou um declínio contínuo para todas as condições de envelhecimento em água quente. No entanto, nas condições de envelhecimento no ar quente, os valores de tensão de ruptura relativa na condição de 140°C e um tempo de 500 h inicialmente diminuíram para 11±8% e, em seguida, aumentaram novamente até quase 47±29%, ou seja, essa porcentagem exemplifica que a tensão de ruptura inicialmente diminuiu para 11% da sua capacidade máxima de tensão antes de romper e, após o decorrer do tempo, se elevou até 47% da capacidade.

Segundo Kahlen, Wallner e Lang (2010), o PC não é realmente um candidato adequado para aplicações em absorvedores, uma vez que sua vida em temperaturas elevadas em água é muito limitada. Por outro lado, quando modificado com aditivos em conformidade para resistir a radiações UV e intempéries, o PC pode ser um candidato para coberturas em coletores.

2.8 Características dos polímeros para uso em coletores solares térmicos

O coletor solar plano pode ser dividido em três partes distintas: uma cobertura de material transparente, cujo objetivo é reduzir as perdas de energia por radiação e convecção;

uma superfície absorvedora, capaz de absorver a maior parte da radiação solar recebida e transferi-la para um fluido de trabalho, e isolamento térmica, com o intuito de reduzir as perdas por convecção pela base e laterais do coletor. Os materiais designados para cada uma dessas partes necessitam possuir propriedades adequadas para manter o desempenho do sistema em valores desejados.

2.8.1 Cobertura

Como citado anteriormente, o vidro é o material mais utilizado na cobertura, mas a busca por materiais poliméricos para a substituição do vidro é longa e muitas vezes decepcionante em função da elevada degradação que o material apresenta pelo efeito da temperatura de operação e principalmente pela ação da radiação UV. Como indicadores da degradação dos materiais para essa aplicação, utilizam-se a transmitância solar ponderada, integrada no espectro solar (τ_{sol}) e valores integrais na faixa de comprimentos de onda entre 400 e 600 nm ($\tau_{400-600}$). A largura de banda entre 400 e 600 nm é utilizada, uma vez que a degradação da transmitância de muitos materiais poliméricos é mais pronunciada nessa faixa espectral (Köhl *et al.*, 2005). Na Tabela 2.3 são apresentadas algumas características dos materiais que podem ser utilizados como cobertura.

Tabela 2.3 – Materiais para cobertura de coletores solares planos

Material	Nomes comerciais	Características	Espessura (mm)	τ_{sol} ($\lambda=300$ a 2500 nm)	Tipo
PET ^a	Mylar D	Não estável UV	0,18	86,7	Filme
PET ^a	Melinex 442/400	Não estável UV	0,10	86,2	Filme
PET ^a	Melinex D 387	Estabilizado UV	0,03	85,4	Filme
PET ^a	Melinex D 389	Estabilizado UV	0,03	85,4	Filme
PEN ^a	Kaladex	Orientado biaxialmente	0,10	84,6	Filme
PEN	Teonex Q65F	Orientado biaxialmente	0,24	87,0	Filme
E/TFE ^a	Tefzel 150 ZMC	Estabilizado termicamente	0,04	93,8	Filme
E/TFE ^a	Tefzel 250 ZMC	Estabilizado termicamente	0,06	94,0	Filme
E/TFE ^a	Duralar CS50	Não orientado	0,05	93,7	Filme
E/TFE ^a	Duralar E	Orientado mono axialmente	0,05	93,9	Filme
E-CTFE ^a	Halar Clear NP		0,05	92,9	Filme
PFA ^a	Teflon PM	Estabilizado termicamente	0,05	95,8	Filme
PFA ^a	Teflon PH	Termo-retrátil	0,05	95,7	Filme
PVDF ^a	Kynar		0,03	93,9	Filme

Material	Nomes comerciais	Características	Espessura (mm)	τ_{sol} ($\lambda=300$ a 2500 nm)	Tipo
Acrílico ^a	Korad Clear	Absorvedor de UV	0,05	89,3	Filme
PC ^a	Lexan HP92WDB	Cobertura UV	0,18	89,2	Filme
PC ^a	Lexan HP92WDB	Cobertura UV	0,51	86,6	Filme
PC ^a	Lexan Thermoclear	Cobertura UV	5,99	74,8	Parede dupla
PC ^a	Lexan Thermoclear	Cobertura UV	7,92	77,0	Parede dupla
PC ^a	Lexan XL10	Cobertura UV	3,00	79,6	Folha
PC ^a	APEC 9351	Estabilizado termicamente	3,18	83,0	Folha
PC ^a	APEC 9353	UV e estabil. term.	3,35	79,9	Folha
PEI ^a	Ultem 1000		0,10	83,5	Filme
PEI ^a	Ultem 1000		0,18	78,7	Filme
PE ^a		Cobertura UV	0,13	86,8	Filme
PS ^a		Cobertura UV		85,1	Folha
PVC ^a	DuraGlas		1,02	82,9	Folha

Fonte: Raman *et al.* (2000).

2.8.2 Absorvedor

Os materiais utilizados comumente em absorvedores são o cobre ou o alumínio. Há uma dificuldade grande em selecionar um material polimérico, pois ele não é comparável em termos térmicos, mas leva como vantagem o fato de seu preço e sua massa serem muito menores. Os materiais poliméricos selecionados devem manter o desempenho térmico adequado e assegurar uma durabilidade por longo prazo. A principal desvantagem desses materiais é a ruptura ou deformação excessiva devido a altas temperaturas, que ocasionam o colapso da passagem do fluido. O absorvedor sofrerá deformação se a temperatura se aproximar da temperatura de fusão do material, particularmente se ela se mantiver elevada. A pior situação no uso de polímeros acontece durante a condição de estagnação, isto é, quando existe uma radiação incidente no coletor elevada e um fluxo de fluido nulo.

De acordo com Silva (2012), um parâmetro importante para esta análise é a definição de uma temperatura máxima de serviço, chamada “índice térmico relativo (RTI)”. Este índice é definido pela temperatura em que o material perde 50% de suas propriedades mecânicas (resistência ao impacto, tensão ou rigidez) após ser mantido 100.000 horas nela. Como exemplo, a RTI do óxido de polifenileno (PPO ou PPE) e do propileno (PP), dois materiais utilizados como absorvedores são, respectivamente, de 105°C e 115°C. As temperaturas de fusão desses materiais são 280°C e 193°C, respectivamente. As outras temperaturas-limite

típicas disponíveis são úteis quando se comparam diferentes materiais poliméricos (Kearney *et al.*, 2005), mas não indicam efeitos de longo prazo.

Como solução para a baixa temperatura de fusão de materiais poliméricos, são estudadas possibilidades de utilizar ventilação forçada, isto é, o uso de fluxo de ar ambiente, induzido pela convecção natural pelo coletor para controle da temperatura do absorvedor. Alguns materiais já testados anteriormente por Kahlen *et al.* (2010) são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Materiais para absorvedores de coletores solares planos

Material	Nomes comerciais	RTI, (°C)	Temp. fusão (°C)	Condutividade térmica (W/mK)
PPE+PS ^b	Noryl EN 150SP	104	154	0,28
PC ^b	Makrolon 3103	115	> 138	0,20
PA12 HI ^b	Grilamid L25ANZ	110	179	0,23
PA12 HT ^b	Grilamid L25H	110	179	0,23
PE-X1 ^c	Taborex	-	126	0,46 – 0,48
PE-X2 ^c	Polidan T/A-HF	-	126	0,46 – 0,48
PP-1 ^c	RA130E-8427	105	165	0,12 – 0,22
PP-2 ^c	Beta-PPR RA 7050	105	165	0,12 – 0,22

Fonte: Kahlen *et al.* (2010).

2.9 Polímeros selecionados

Dentre os polímeros selecionados, são quatro os que se destacam no estudo do material ideal para um coletor solar plano. Um dos fatores que se leva em conta na seleção do polímero é seu nível de degradação com o tempo. Um estudo experimental realizado por Freeman, Mantell e Davidson (2005) para avaliar o desempenho mecânico da polissulfona (PSU), do polibutileno (PB) e da poliamida 6/6 (PA66), quando em contato com água clorada quente, apresentou a polissulfona como o melhor resultado no nível de resistência à degradação, pois sua cadeia polimérica é composta por anéis aromáticos e fortes ligações de carbono, enxofre e oxigênio dentro da cadeia principal do polímero. No caso do polibutileno, o tempo de vida em um ambiente oxidante é estendido quando se inclui um antioxidante: o polímero não degradará significativamente até que o antioxidante se esgote. A poliamida 6/6 tem a pior resistência à degradação, o que a leva a ser excluída como material selecionado para um coletor solar plano. As propriedades dos polímeros são apresentadas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Propriedades do PB, PSU e PA66

	PSU	PB	PA66
Módulo de tensão (MPa)	2480	290-295	1250
Resistência à tração (MPa)	70,3	36,5	85

Peso molecular (g/mol)	45.000	725.000	12.000-20.000
% Cristalinidade	Amorfo	48-55	40-60
Temperatura de fusão (°C)	-	124-126	263
Absorção de água (%)	0,3	<0,03	8,5
Transição vítrea (°C)	186	-25 até -17	35
Condutividade térmica, W.m ⁻¹ .K ⁻¹	0,26	0,22	0,25
Referências	(Madkour, 1999; Solvay Advanced Polymers, 2002)	(Basell Polylefins; Panse and Phillips, 1999)	(DuPont, 2004; Viers, 1999)

Fonte: Adaptado Freeman, Mantell e Davidson (2005).

Para a cobertura, são selecionados os polímeros ópticos que apresentam uma transmitância elevada em comprimentos de onda baixos na região do espectro solar, mas uma transmitância baixa em comprimentos de onda alto na região do infravermelho. A transmitância baixa no infravermelho próximo (1600-2200 nm) é uma característica importante em uma cobertura, já que a cobertura deve ser opaca para as radiações providas do absorvedor e presentes na faixa do infravermelho. No entanto, absorver fortemente no ultravioleta (200-400 nm), como mostra a Figura 2.20, ocasiona uma degradação excessiva na maioria dos polímeros tanto em suas propriedades físicas como ópticas.

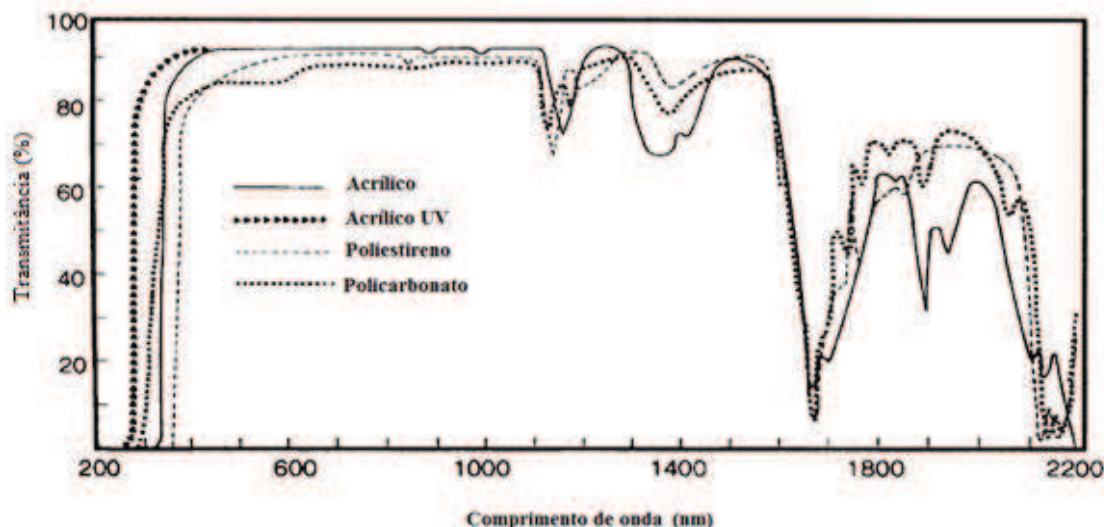


Figura 2.20 – Espectro de transmissão de polímeros ópticos. Espessura da amostra: 3,2 mm

Fonte: Adaptado Weber (2003).

2.9.1 Policarbonato

O policarbonato é um termoplástico de engenharia obtido da policondensação do fosgênio e do bisfenol-A. É um material de alto desempenho, sustentável e ecoeficiente. O PC oferece boa durabilidade, resistência ao calor e à quebra e, além de ser transparente, possui um

comprimento de onda ideal para ser utilizado na cobertura de coletores solares planos. Produtos confeccionados com PC incluem folhas para telhados e vidros, mídia óptica, IT-peças, lentes de óculos, etc. (PLASTICSEUROPE, 2017).

O policarbonato é um polímero extremamente claro, que oferece excelente visibilidade e transmitância elevada, em comprimentos de ondas até 2000 nm, e transmitância baixa, em comprimentos de onda com mais de 2000 nm, sendo assim ideal para utilização em coletores solares. A baixa densidade do policarbonato leva a uma maior eficiência dos recursos e a uma redução dos custos financeiros e ambientais com transporte. Existem dois processos dominantes envolvidos na fabricação de produtos de policarbonato: a extrusão e a injeção. Algumas propriedades do PC são descritas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Propriedades do policarbonato

Propriedades	Policarbonato, PC	
	Baixa viscosidade	Reforçado com 30% fibra de vidro
<u>Físicas</u>		
Temperatura de fusão °C	140	150
Gravidade específica	1,2	1,4
Absorção de água (24h), %	0,15	0,14
Rigidez dielétrica, kVmm ⁻¹	15	19
<u>Mecânica</u>		
Resistência ao impacto (Izod) a 23°C, Jm ⁻¹	14	107
<u>Térmica</u>		
Coefficiente de expansão térmica linear, 10 ⁻⁶ °C	68	22
Temperatura de serviço máxima recomendada, °C	143	-
Condutividade térmica, Wm ⁻¹ K ⁻¹	0,20	0,22

Fonte: Adaptado de Dean (1999).

2.9.2 Polietileno

Os polímeros em geral apresentam ramificações ao longo da sua estrutura, importantes por lhes conferir propriedades como maior capacidade de absorção de energia de deformação e melhor processabilidade quando forem injetados. O PE, que é o resultado da polimerização do etileno, resulta essencialmente de uma estrutura de cadeia linear ramificada de hidrocarbonetos de peso molecular elevado.

Existem diversos tipos de PE produzidos atualmente, e a diferença está no nível de ramificações presentes ao longo de sua estrutura molecular e tamanho de cadeia. Quando produzido, o PE pode ter ramificações curtas, sendo cadeias de menor tamanho com uma

quantidade limitada de carbonos ligados, e ramificações de cadeia longa, com quantidade maior de carbonos ligados (DARTORA, 2014).

A ramificação pode ser controlada dependendo do tipo de processo aplicado na fabricação do polímero. Quando o polietileno obtido é altamente ramificado, possuindo ramificações curtas e longas, é chamado de “polietileno de baixa densidade”, conforme a representação da Figura 2.21 (DARTORA, 2014).



Figura 2.21 – Representação esquemática da estrutura do PE de baixa densidade.

Fonte: Dartora (2014).

Quanto menor o nível de ramificações presentes na estrutura, maior é a densidade, sendo que a ramificação mínima resulta no polietileno de alta densidade, que é praticamente linear e no qual ramificações curtas raramente aparecem, conforme mostra a Figura 2.22 (DARTORA, 2014).



Figura 2.22 – Representação esquemática da estrutura do PE de alta densidade

Fonte: Dartora (2014).

O polietileno tem boa resistência à baixa temperatura, baixa absorção de água e boa flexibilidade a temperaturas inferiores a zero. Algumas propriedades do PE são mostradas na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Propriedades do PE

Propriedades	Polietileno (PE)			
	Baixa densidade	Média densidade	Alta densidade	Reforçado com fibra de vidro e de alta densidade
<u>Físicas</u>				
Temperatura de fusão °C	95-130	120-140	120-140	120-140
Gravidade específica	0,910-0,925	0,926-0,94	0,941-0,965	1,28
Absorção de água (24h), %	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,02
Rigidez dielétrica, kVmm ⁻¹	18-39	18-39	18-39	20
<u>Mecânica</u>				
Resistência ao impacto (Izod) a 23°C, Jm ⁻¹	-	27-854	27-1068	59
<u>Térmica</u>				
Coefficiente de expansão térmica linear, 10 ⁻⁶ °C	100-220	140-160	110-130	48
Temperatura de serviço máxima recomendada, °C	70	93	200	-
Condutividade térmica, Wm ⁻¹ K ⁻¹	0,34	0,34-0,42	0,42-0,52	0,46

Fonte: Adaptado de Dean (1999).

2.9.3 Polissulfona

A polissulfona (PSU) é um importante termoplástico da engenharia, pois possui excelente estabilidade química e térmica e ótima resistência mecânica. Ela é muito utilizada como material na fabricação de membranas. São três ligações estruturais que conferem essas propriedades e dão origem ao polímero PSU: a ligação isopropilideno confere resistência química; a ligação éter confere resistência à temperatura, e a ligação sulfona confere resistência ao impacto. As polissulfonas são claras, não tóxicas e têm ótima resistência mecânica, são resistentes a ácidos, bases e soluções aquosas, conforme DEAN (1999).

Devido ao alto custo de matéria-prima e processamento, as polissulfonas são usadas em aplicações especiais e muitas vezes são um substituto superior para policarbonatos. Estes polímeros são rígidos e transparentes, propriedades que se mantêm entre -100°C e 150°C. Algumas propriedades do PSU são mostradas na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Propriedades do PSU

Propriedades	Polissulfona (PSU)	
	Não reforçado	Reforçado com 20% de fibra de vidro
<u>Físicas</u>		
Temperatura de Fusão °C	200	200
Gravidade específica	1,24	1,46
Absorção de água (24h), %	0,22	0,23
Rigidez dielétrica, kVmm ⁻¹	17	17
<u>Mecânica</u>		
Resistência ao impacto (Izod) a 23°C, J.m ⁻¹	64	59
<u>Térmica</u>		
Coefficiente de expansão térmica linear, 10 ⁻⁶ °C	52-56	25
Temperatura de serviço máxima recomendada, °C	149	-
Condutividade térmica, Wm ⁻¹ K ⁻¹	0,12	0,38-0,42

Fonte: Adaptado de Dean (1999).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Quanto aos objetivos, esta pesquisa se caracteriza como de predição, pois visa, ao final deste estudo, avaliar a viabilidade futura de aplicação dos materiais selecionados em um coletor solar plano, de tal forma que permita a sua utilização em termos de eficiência.

No que se refere à coleta de dados e fontes de informações, inicialmente a pesquisa se caracteriza como documental e bibliográfica, progredindo para uma pesquisa experimental com PC, PE e PSU em que eles foram analisados qualitativamente com um teste de degradação, seguido de uma espectroscopia do infravermelho. Foram então selecionados os materiais da cobertura e do absorvedor que obtiveram os melhores resultados.

Por fim, eles foram aplicados em uma simulação numérica a fim de concluir qual o melhor material a ser utilizado e a melhor geometria a ser aplicada em um coletor solar plano.

3.1 Materiais

Quanto aos materiais, na parte experimental este trabalho utilizou equipamentos para a realização dos testes de intemperismo acelerado e de espectroscopia do infravermelho disponibilizados pelo Instituto Tecnológico de Micropaleontologia da Unisinos e pelo departamento de Biologia Molecular e Toxicologia da Unisinos, respectivamente. Foram adquiridos resíduos de PC, PE e PSU com a empresa Ensiger para a realização dos testes. Por fim, foi realizada uma simulação numérica na plataforma ESS.

3.2 Procedimentos Metodológicos

Desde o início do século passado, as organizações industriais já conheciam uma filosofia baseada em especificação, produção e inspeção e se beneficiavam dela. Ishikawa (1986) mencionava a estrutura de funcionamento das indústrias daquela época: simples e formada por três elementos.

Mais tarde, no final da década de 30, o norte-americano Walter A. Shewhart, em sua obra intitulada *Statistical method from the viewpoint of quality control*, propõe o modelo de produção visto como um sistema, que representa os mesmos elementos, especificação, produção e inspeção, porém de forma cíclica, como mostra a Figura 3.1.

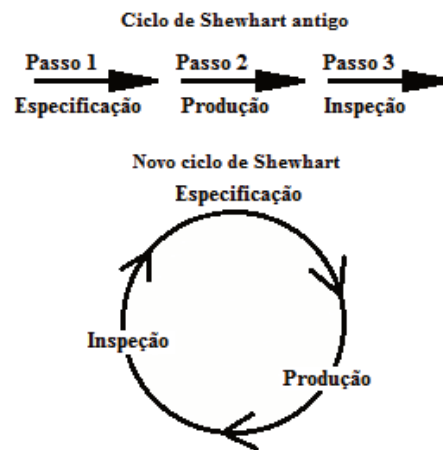


Figura 3.1 – Ciclo de Shewhart

Fonte: Adaptado de Shewhart (1939).

Shewhart (1939) argumenta que esses três passos devem fazer um círculo em vez de uma linha reta, pois eles constituem um “processo científico dinâmico de aquisição de conhecimento”. Essa pequena modificação transformou o modelo de ciclo aberto em um ciclo fechado cujos resultados obtidos numa passagem são considerados no planejamento da próxima passagem. Isso realimenta o processo e permite que ele seja aprimorado pela análise dos erros e problemas do ciclo anterior. Este modelo é denominado Ciclo de Shewhart.

Na década de 50 Deming (1950) acrescentou mais uma etapa a este círculo. Ele salientou a importância da interação constante e que os quatro passos devem ser repetidos constantemente.

O ciclo foi incorporado à cultura japonesa em 1951 por Ishikawa e foi ligeiramente modificado. Passou, então, a ser conhecido como PDCA (*plan; do; check; act*), ou seja, planejar, fazer, checar e agir, conforme a Figura 3.2.

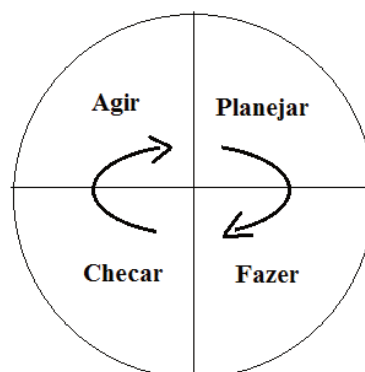


Figura 3.2 – Ciclo PDCA

Fonte: Adaptado Ishikawa (1986).

Portanto, o uso deste ciclo em uma pesquisa pode ter seus benefícios. Primeiramente, é feito um planejamento com o objetivo de definir qual será o caminho do estudo; em seguida, aplica-se este estudo realizando-se testes; então são analisados os resultados, e por último o estudo pode ser validado ou não. Caso não seja, faz-se tudo novamente, ou seja, a pesquisa, os testes e a validação. Desse modo, não se difere muito do ciclo proposto por Ishikawa, mas ele pode ser aplicado em pesquisas científicas.

Sendo assim, o desenvolvimento desta pesquisa seguiu os passos do ciclo PDCA, cujas etapas serviram para estudar o material adquirido, aplicá-lo em testes de degradação, realizar uma espectroscopia do infravermelho, por fim, realizar uma simulação numérica para concluir, com base nos resultados, se o coletor solar plano feito de material polimérico é comparável aos coletores solares planos convencionais.

3.3 Escolha dos materiais

Nessa fase do projeto foram selecionados os materiais a serem usados nos testes. Os materiais foram disponibilizados pela empresa Ensiger, empresa com 50 anos de mercado e que há 20 anos possui uma sede localizada na cidade de São Leopoldo.

Os materiais foram obtidos através de uma doação da empresa, por serem resíduos de cortes, os materiais não sofreram qualquer alteração, suficientes assim para a realização do teste de intemperismo acelerado

Diante do estudo realizado e com base em pesquisas de outros autores citados ao longo do trabalho os materiais escolhidos foram o policarbonato (PC), o polietileno de alta densidade (HDPE) e a polissulfona (PSU).

O PC, denominado pelo fabricante de TECANAT natural (Tabela 3.1), foi obtido na forma cilíndrica de dimensões (10 x 105) mm.

O PC é o principal material a ser utilizado na cobertura por ter boa transmitância para a radiação solar, como já citado anteriormente. Este material pode ser obtido em grande parte das empresas que trabalham com polímeros, se comparado ao PE e principalmente ao PSU, que podem ser utilizados também na cobertura, mas têm como desvantagens, se comparados ao PC, preço superior e difícil obtenção.

Tabela 3.1 – Características do TECANAT

TECANAT natural		
Denominação química:	Policarbonato	
Abreviação DIN:	PC	
Cores, aditivos:	Transparente	
Medidas de estoque:	Tarugos	Chapas
	Diâmetro: 4 – 250 mm	Espessura: 1 – 100 mm
	Comprimento: 3,0 m	Largura: 500 – 1250 mm
		Comprimento: 3,0 m
Principais características	Material resistente; bom isolante elétrico; compatível com processos de soldagem e colagem; sensível à quebra por estresse; boa resistência à deformação térmica; boa usinabilidade e polimento.	
Propriedades térmicas	Temperatura de distorção por calor (HDT)	140°C
	Máxima temperatura de serviço	140°C
	Coefficiente de condutividade térmica	0,19 W/mK

Fonte: Ensinger (2017).

O PE, denominado pelo fabricante de TECAFINE (Tabela 3.2), foi obtido na forma de chapa de dimensões (40 x 500 x 200) mm.

Tabela 3.2 – Características do TECAFINE

TECAFINE HDPE		
Denominação química:	Polietileno de ultra-alto peso molecular	
Abreviação DIN:	HDPE	
Cores, aditivos:	-	
Medidas de estoque:	Chapas	
	Espessura: 6 – 50 mm	
	Largura: 500 – 1200 mm	
	Comprimento: 3000 mm	
Principais características	Boa resistência química; autolubrificação; baixo coeficiente de atrito; material atóxico (natural); elevada resistência à fadiga; elevada resistência ao desgaste; resistente a impactos; antiaderente; resistente à quebra por pressão; boa usinabilidade.	
Propriedades térmicas	Temperatura de distorção por calor (HDT)	128°C
	Máxima temperatura de serviço	120°C
	Coefficiente de condutividade térmica	0,4 W/mK

Fonte: Ensinger (2017).

O PSU, denominado pelo fabricante como TECASON S (Tabela 3.3), não tem muita procura e tem preço elevado. Por isso a empresa disponibilizou apenas um pequeno retalho de 30 x 50 x 40 mm.

Tabela 3.3 – Características do TECASON S

TECASON S natural			
Denominação química:	Polissulfona		
Abreviação DIN:	PSU		
Cores, aditivos:	Transparente; amarelado		
Medidas de estoque:	Tarugos	Chapas	Tubos e perfis
	Diâmetro: 4 – 200 mm	Espessura: 5 – 80 mm	
	Comprimento: 3,0 m	Largura: 300 – 500 mm	
		Comprimento: 3,0 m	
Principais características	Elevada capacidade termomecânica; elevada dureza e rigidez; retardante de chama classificação UL-94 V-0; elevada estabilidade dimensional; boa isolamento elétrica; elevada temperatura de deflexão; resistência à radiação gama; boa soldagem.		
Propriedades térmicas	Temperatura de distorção por calor (HDT)	181°C	
	Máxima temperatura de serviço	180°C	
	Coeficiente de condutividade térmica	0,25 W/mK	

Fonte: Ensinger (2017).

3.4 Preparação e execução dos testes

Esta etapa consiste na realização dos testes. Foi realizado primeiramente um ensaio de envelhecimento e intemperismo acelerado para determinar o nível de degradação dos três materiais obtidos: o PC, o PE e o PSU. Depois realizou-se uma espectroscopia do infravermelho nos materiais em diferentes estados de degradação.

3.4.1 Teste de degradação

Para a preparação dos ensaios, foi utilizada a norma ASTM G154, de acordo com a qual os ensaios consistem em expor o material a uma lâmpada que emite radiação em comprimentos de onda superiores a 300 nm. O ensaio foi realizado no Instituto Tecnológico de Micropaleontologia (Itt Fossil) da Unisinos.

O ensaio tem por objetivo realizar um envelhecimento acelerado pela irradiação UVA e UVB. O equipamento acelera o processo de deterioração do material, ocasionando perda de brilho e fragilização. A câmara de intemperismo acelerado utilizada é do modelo EQUV-RC, do fabricante Equilam, ilustrada na Figura 3.3. As características do equipamento são apresentadas na Tabela 3.4.



Figura 3.3 – Câmara de intemperismo acelerado

Fonte: Equilam (2017).

Tabela 3.4 – Características de operação da câmara de intemperismo acelerado

Modo de operação	Temperatura da câmara	Potência de irradiação	Comprimento de onda máximo das lâmpadas
Secagem por irradiação UV-A	Ambiente + 5°C ~80°C	0,47 a 1,60 Wm ⁻² nm ⁻¹	340, 351 e 365 nm
Secagem por irradiação UV-B	Ambiente + 5°C ~80°C	0,47 a 1,20 Wm ⁻² nm ⁻¹	313 nm
Condensação	Ambiente + 5°C ~60°C	-	-
Choque térmico	Ambiente	-	-
Choque térmico por irradiação UV-A	Ambiente	0,47 a 1,6 Wm ⁻² nm ⁻¹	340, 351 e 365 nm
Choque térmico por irradiação UV-B	Ambiente	0,47 a 1,20 Wm ⁻² nm ⁻¹	313 nm

Fonte: Itt Fossil (2017).

Os testes foram feitos conforme as condições estipuladas na norma ASTM G154 (2016) para operações de exposição UV em materiais não metálicos com lâmpadas fluorescentes. As lâmpadas utilizadas de radiação UVB devem estar na região UVB (280 a 315 nm), que inclui os comprimentos de onda mais curtos encontrados na radiação solar na superfície terrestre e é responsável por consideráveis danos aos polímeros. Existem dois tipos comumente disponíveis de lâmpadas que atendem aos requisitos do documento. Eles são conhecidos comercialmente como UVB-313 e FS-40. Essas lâmpadas emitem quantidades diferentes de energia total, mas ambas têm um comprimento de onda máximo de 313 nm e produzem os mesmos comprimentos de onda UV nas mesmas proporções relativas (ASTM G154, 2016).

De acordo com a norma G154, todas as lâmpadas UVB-313 emitem UV abaixo do corte normal da radiação solar, conforme a Figura 3.4. Esta radiação UV de curto comprimento de onda pode produzir uma rápida degradação do polímero, possibilitando resultados mais imediatos.

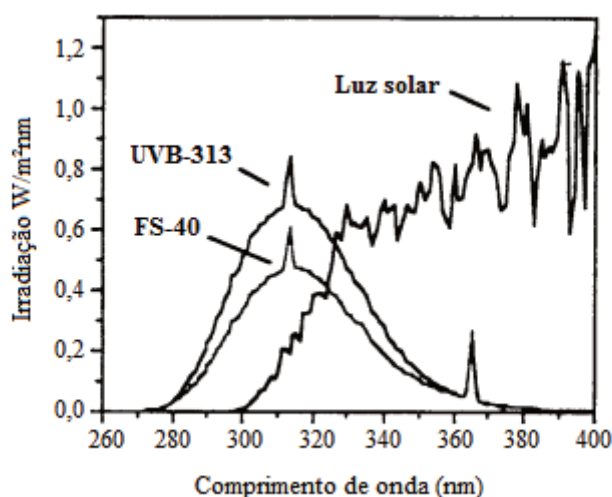


Figura 3.4 – Distribuição de potência espectral de lâmpadas UVB e da radiação solar

Fonte: ASTM G154 (2006).

O ciclo de exposição das amostras no teste é estipulado pela norma G154. Conforme a Tabela 3.5, foi selecionado o ciclo 1. O teste teve um ciclo de 4 h em secagem por irradiação UVB a aproximadamente 60°C e 4 h em condensação a 50°C aproximadamente, repetindo-se até que sejam atingidas as 800 h no total. A irradiação selecionada foi de 0,63 W/m²nm.

Tabela 3.5 – Condições de exposição

Ciclo	Lâmpada	Irradiação típica, W/m ² nm	Comprimento de onda aproximado, nm	Ciclo de exposição
1	UVB-313	0,62 - 0,71	310	4 h UVB a 60 °C (±3°C) 4 h condensação a 50 °C (±3°C)
2	UVB-313	0,49	310	8 h UVB a 70 °C (±3°C) 4 h condensação a 50 °C (±3°C)
3	UVB-313	0,62	310	20 h UVB a 80 °C (±3 °C) 4 h condensação a 50 °C (±3°C)

Fonte: ASTM G154 (2006).

Para efeito de análise, foram preparadas mais de uma amostra para cada material. As amostras de PE e PSU foram confeccionadas em formatos retangulares de 40 x 200 x 10 mm. Apenas as amostras do PSU, por haver menor quantidade disponível, foram confeccionadas em formatos retangulares de 40 x 50 x 10 mm. No total foram colocadas sete amostras no equipamento: quatro amostras de PE, duas amostras de PC e uma amostra de PCU. As amostras foram retiradas separadamente seguindo intervalos de tempos estipulados, conforme mostra a Tabela 3.6. Foram deixadas de fora do equipamento uma amostra de cada material para que eles fossem analisados sem nenhuma degradação.

Tabela 3.6 – Intervalo para a retirada das amostras

Material	Intervalo
PE	A cada 200 h
PC	A cada 350 h
PSU	A cada 650 h

3.4.2 Análise da espectroscopia no infravermelho

Para a análise da espectroscopia do infravermelho, foi utilizado o método de refletância total atenuada (ATR). Este tipo de análise estuda a interação da radiação eletromagnética com a matéria e tem como objetivo o estudo dos níveis de energia de átomos ou moléculas. A espectroscopia vibracional de absorção no infravermelho é uma ferramenta essencial para o estudo de materiais, de especial interesse na área de polímeros, sendo poderosa para identificar e determinar grupos funcionais e estudar a conformação e a estrutura de macromoléculas (CANEVAROLO, 2007).

Normalmente, as transições eletrônicas são situadas na região do ultravioleta ou visível; as vibracionais, na região do infravermelho, e as rotacionais, na região de micro-ondas e, em casos particulares, também na região do infravermelho longínquo (LUZ, 2003). Os átomos possuem frequências específicas de vibração que variam de acordo com a estrutura, composição e modo de vibração da amostra. Então, para observar essa gama de frequências, utiliza-se o infravermelho (FIORINI, 2000).

Os instrumentos usados são chamados “espectrofotômetros de infravermelho” e a propriedade física medida é a capacidade da substância para transmitir, absorver ou refletir a radiação infravermelha.

Segundo Canevarolo (2007), existem espectrofotômetros dispersivos, por transformada de Fourier (FTIR) e por refletância atenuada (ATR). O dispersivo utiliza um monocromador com rede de difração para decompor a radiação infravermelha e, por ser lento, caro e depender de mecânica de alta precisão, encontra-se em desuso. O aparelho de FTIR é constituído por uma fonte de radiação, um interferômetro, um compartimento de amostra e um detector de radiação infravermelha. Os elementos de um FTIR variam de acordo com as regiões do infravermelho em estudo, mas os de rotina possuem elementos fixos e operam na região do infravermelho médio (MIR).

O equipamento de FTIR obtém o interferograma e, a partir deste, pela operação de transformada de Fourier feita pelo computador, obtém-se o espectro natural, que é o perfil espectral da transmitância *versus* número de onda. Desta operação surgiu o nome “FTIR

(*Fourier Transform Infrared Radiation*)”, ou espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier.

O FTIR consiste em um método para análise qualitativa e determinações quantitativas de traços de elementos moleculares, ou seja, com ele é possível determinar o comportamento dos átomos que formam as moléculas. O objetivo do método FTIR é medir a intensidade que uma amostra absorve radiação na região do infravermelho médio a um determinado intervalo de comprimento de onda. Esta técnica usa um feixe de luz composto com diversos comprimentos de onda (na região do infravermelho). Depois de feita a medição da absorptância em um comprimento de onda, o feixe de luz é modificado para se medir a absorptância em outro comprimento de onda. Este processo é repetido várias vezes e, ao final, os dados são recolhidos por um computador, que, a partir dos dados coletados, inferirá a absorptância do material ao longo de um determinado comprimento de onda. Como exemplo, a Figura 3.5 apresenta um estudo realizado por Haghighi-Yazdi e Lee-Sullivan (2014), que utilizou o método FTIR em uma amostra de PC/ABS, constituída em 75% de PC e 25% de ABS. A figura ilustra a absorptância do material ao longo de um comprimento de onda estipulado.

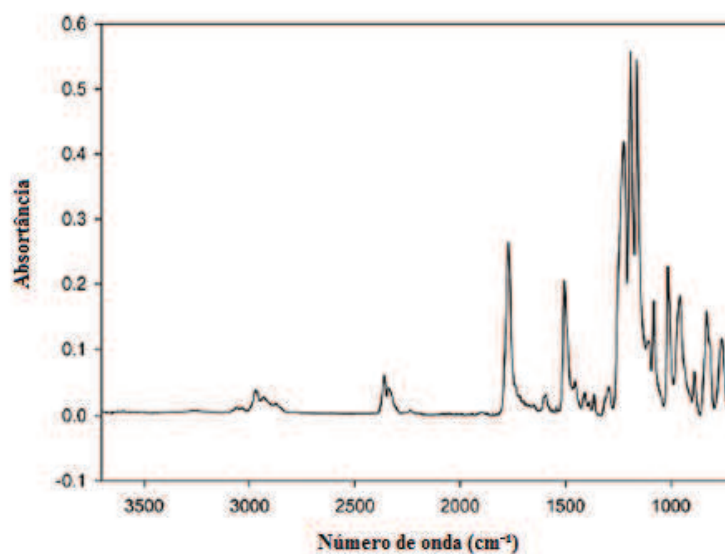


Figura 3.5 – Análise FTIR do PC/ABS

Fonte: Haghighi-Yazdi e Lee-Sullivan (2014).

Já a espectroscopia utilizando o acessório ATR (*Attenuated Total Reflectance*), ou refletância total atenuada, é uma técnica utilizada para se obter espectros no infravermelho de amostras que não podem ser analisadas pelos métodos normais de transmissão, como pastilhas ou filmes espessos e materiais opacos. O princípio deste tipo de espectroscopia baseia-se no fato de que, quando um feixe de radiação passa de um meio mais denso (no caso o cristal padrão do equipamento) para um meio menos denso (no caso a amostra), ocorre uma reflexão. Essa

fração do feixe de luz incidente que é refletida aumenta conforme aumenta o ângulo de incidência e, quando ela excede um determinado ângulo crítico, a reflexão é completa. A radiação de penetração é chamada “onda evanescente”. Se a amostra absorve em certo comprimento de onda evanescente, há uma atenuação do feixe a um determinado comprimento de onda. Essa atenuação a comprimentos de ondas correspondentes às bandas de absorção no infravermelho originam o espectro (LUZ, 2003).

Esta técnica é muito utilizada para análise de superfícies de polímeros. Os equipamentos são configurados com um cristal de índice de refração superior ao da amostra e com uma baixa absorção na região do infravermelho, como, por exemplo, o seleneto de zinco (ZnSe), sulfeto de zinco (ZnS), bromiodeto de tálio (KRS-5), silício (Si) ou safira. Há um contato físico íntimo com a amostra para proceder o teste.

Segundo Fiorini (2000), esta técnica tem se tornado cada vez mais importante e útil na análise qualitativa e quantitativa de materiais. A sua utilização vai além da análise térmica do material e já existem estudos para outras áreas, tais como medidas de espessuras, refletividade e índice refrativo. A análise no infravermelho é um tipo de análise não destrutiva e pode ser realizada em microamostras.

A análise espectroscópica foi realizada no departamento de Biologia Molecular e Toxicologia da Unisinos, e a técnica utilizada foi a ATR. O equipamento empregado é o espectrofotômetro fabricado pela empresa Agilent, modelo Cary 630 (Figura 3.6), que utiliza o cristal de seleneto de zinco (ZnSe).

As amostras foram preparadas após serem retiradas do equipamento de intemperismo acelerado. De cada amostra foi retirada uma lâmina do material, e essa lâmina foi colocada no equipamento para a realização da espectroscopia. Também foram analisadas lâminas dos materiais que não sofreram nenhuma degradação.



Figura 3.6 – Espectrômetro ATR

Fonte: Agilent (2017).

3.5 Simulação numérica

Conforme comentado nos trabalhos de Silva (2012) e Soave (2014), uma das desvantagens apresentadas pelos materiais poliméricos é a baixa condutividade térmica. Isso faz com que o projeto de um coletor solar polimérico não siga o conceito de tubos-aletas, como é convencional em um coletor solar metálico. Dessa forma, é importante estudar novas geometrias de coletores solares para minimizar o efeito da baixa condutividade térmica do material.

Utilizando a plataforma EES (*Engineering Equation Solver*), criou-se uma simulação numérica a fim de fazer estimativas do rendimento térmico de um coletor solar plano. Foram utilizadas diferentes composições estruturais, tais como a geometria do absorvedor e o uso de diferentes materiais tanto no absorvedor como na cobertura com o intuito de selecionar a melhor composição geométrica e a melhor escolha do material para ambas as partes do coletor.

A validação da simulação numérica foi efetuada pela comparação de dados fornecidos de testes experimentais com dados calculados na simulação numérica para o mesmo coletor solar plano. Silva (2012) já demonstrava uma simulação de um coletor solar plano em que a simulação foi validada por testes experimentais em três tipos de coletores comerciais. Os dados usados correspondem ao teste de um coletor solar modelo S-Class, fabricado pela RM-solar, realizado pelo *Test Center for Thermal Solar System* do *Fraunhofer Institut Solare Energie Systeme* (2006), da Alemanha, de um coletor Ksole, pelo *Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik* (ITW, 2002), e de um coletor Solares, fabricado pela Kabrasol de Santa Catarina, testado também pelo *Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik* (ITW, 2002). Os resultados são apresentados nas Figura 3.7, Figura 3.8 e Figura 3.9, respectivamente.

Os testes foram realizados com uma pressão de trabalho de até 1000 kPa, velocidade do vento entre 2 e 3 m/s, refletância do solo de 0,4, ângulo de incidência da radiação solar igual a zero, temperatura de trabalho de 30 °C, umidade do ar de 70% e radiação incidente de 975 W/m² para o coletor S-class e 800 W/m² para os demais. Na Tabela 3.7 são apresentadas as características dos coletores que foram analisados experimentalmente e cujos os dados são utilizados na simulação numérica. Os resultados de eficiência de cada coletor, tanto nos testes experimentais como na simulação realizada na plataforma ESS, são mostrados nas Figura 3.7, Figura 3.8 e Figura 3.9.

Tabela 3.7 – Especificações dos coletores analisados

S-class	Ksole	Solares	Variável de entrada
<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Cu</i>	Material da placa absorvedora
<i>Cu</i>	<i>Cu</i>	<i>Cu</i>	Material dos tubos
$\alpha_n = 0,95$	$\alpha_n = 0,94$	$\alpha_n = 0,95$	Absortância da placa
$\beta = 45^\circ$	$\beta = 45^\circ$	$\beta = 45^\circ$	Inclinação do coletor
$L = 2,008\text{ m}$	$L = 2,007\text{ m}$	$L = 1,415\text{ m}$	Comprimento coletor
$L_p = 1,91\text{ m}$	$L_p = 1,967\text{ m}$	$L_p = 1,385\text{ m}$	Comprimento da placa
$k_b = 0,05\text{ W/(mK)}$	$k_b = 0,038\text{ W/(mK)}$	$k_b = 0,05\text{ W/(mK)}$	Condutividade térmica do isolamento de base
$k_c = 0,05\text{ W/(mK)}$	$k_c = 0,038\text{ W/(mK)}$	$k_c = 0,05\text{ W/(mK)}$	Condutividade térmica do isolamento lateral
$k_p = 211\text{ W/(mK)}$	$k_p = 385\text{ W/(mK)}$	$k_p = 385\text{ W/(mK)}$	Condutividade térmica da placa absorvedora
$L_{cp} = 24\text{ mm}$	$L_{cp} = 3,7\text{ mm}$	$L_{cp} = 10\text{ mm}$	Distância entre placa absorvedora e a cobertura
$\varepsilon_{cl} = 0,88$	$\varepsilon_{cl} = 0,82$	$\varepsilon_{cl} = 0,88$	Emitância da cobertura
$\varepsilon_p = 0,16$	$\varepsilon_p = 0,04$	$\varepsilon_p = 0,86$	Emitância da placa
$th_{cl} = 72\text{ mm}$	$th_{cl} = 09\text{ mm}$	$th_{cl} = 79\text{ mm}$	Espessura total do coletor
$th_{ib} = 40\text{ mm}$	$th_{ib} = 50\text{ mm}$	$th_{ib} = 50\text{ mm}$	Espessura do isolamento de base
$th_{ie} = 15\text{ mm}$	$th_{ie} = 50\text{ mm}$	$th_{ie} = 5\text{ mm}$	Espessura do isolamento lateral
$th_p = 0,4\text{ mm}$	$th_p = 0,22\text{ mm}$	$th_p = 0,2\text{ mm}$	Espessura da placa coletora
$W = 0,04338\text{ m}$	$W = 0,1076\text{ m}$	$W = 0,123\text{ m}$	Distanciamento entre tubos
$L_c = 1,01\text{ m}$	$L_c = 1,008\text{ m}$	$L_c = 1,014\text{ m}$	Largura do coletor
$L_{pl} = 0,911\text{ m}$	$L_{pl} = 0,968\text{ m}$	$L_{pl} = 0,984\text{ m}$	Largura da placa
$\dot{m} = 0,01701\text{ kg/s}$	$\dot{m} = 0,01702\text{ kg/s}$	$\dot{m} = 0,01586\text{ kg/s}$	Taxa mássica da água
$N_{tubos} = 21$	$N_{tubos} = 9$	$N_{tubos} = 8$	Número de tubos
$\tau_{cl} = 0,905$	$\tau_{cl} = 0,91$	$\tau_{cl} = 0,82$	
$D = 10\text{ mm}$	$D = 8\text{ mm}$	$D = 15\text{ mm}$	Diâmetro externo do tubo
$D_i = 7\text{ mm}$	$D_i = 6,6\text{ mm}$	$D_i = 14,2\text{ mm}$	Diâmetro interno do tubo

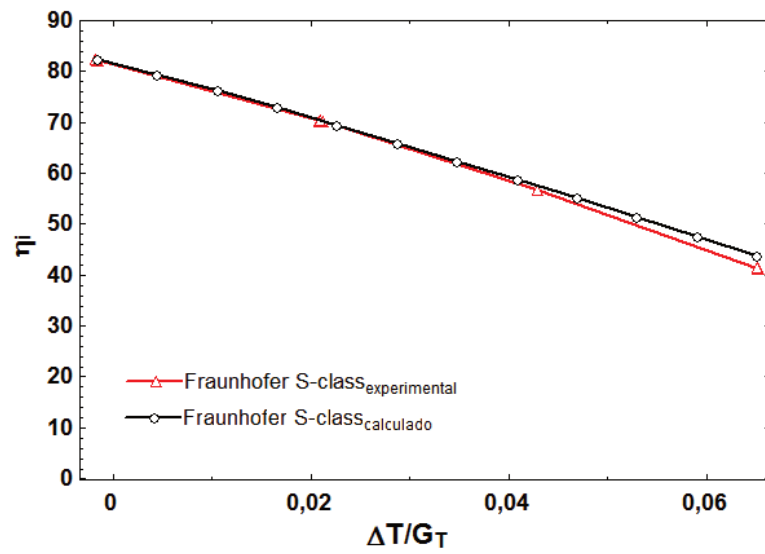


Figura 3.7 – Modelo S-Class, pela RM-solar

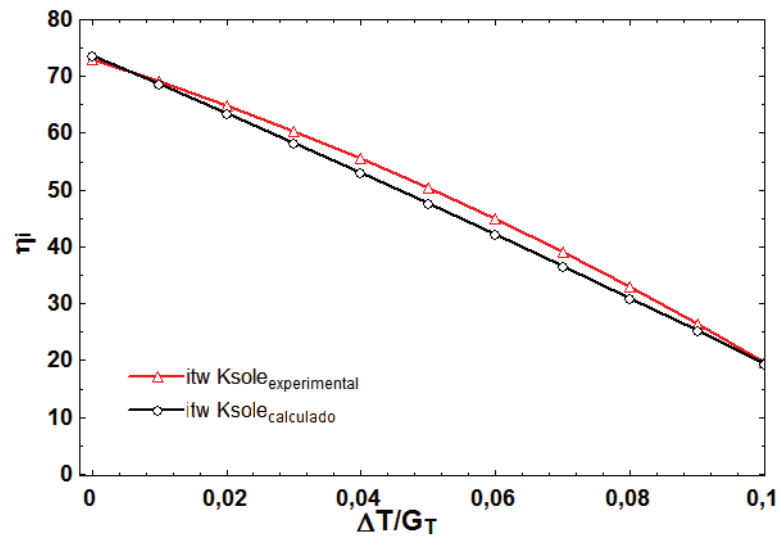


Figura 3.8 – Coletor Ksole

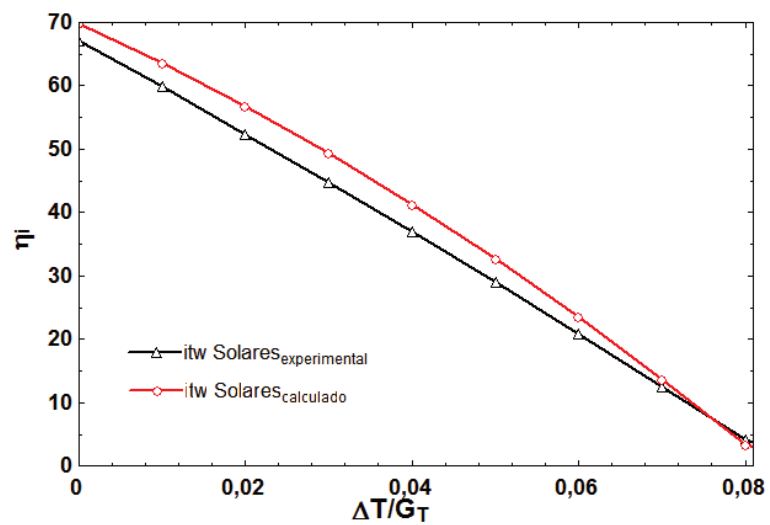


Figura 3.9 – Coletor Kabrasol

Os valores estimados da eficiência dos coletores são lineares, ao contrário dos valores que foram obtidos pelos testes. Esse efeito ocorre em razão da adoção no modelo numérico de um coeficiente de transferência de calor, que é considerado como uma função linear da diferença de temperatura entre a placa coletora e o meio. Como as perdas térmicas do coletor ocorrem pela combinação de dois processos não-lineares, convecção e radiação, os resultados apresentam pequenas diferenças. Contudo para fins de dimensionamento e o estudo de diversos parâmetros de projeto do coletor, os resultados obtidos são satisfatórios para a validação da simulação numérica.

Dado a validação da simulação numérica, foram realizadas simulações com os dados dos materiais estudados afim de obter a eficiência de coletor solar plano em diversas combinações de material e geometria em um absorvedor.

A simulação foi realizada seguindo os passos de Duffie (2013), e rotinas adaptadas de CoDePro e bibliotecas do EES. Foram analisados coletores com 8, 60 e 100 tubos de PE, PC e PSU, com tubos integrantes à placa, os dados de entrada utilizados na simulação são observados na Tabela 3.6. Para resolução da simulação, foi estipulado um valor da diferença da temperatura média do fluido e a temperatura ambiente sobre o coeficiente de irradiação global, para assim estimar a eficiência máxima calculada de um coletor solar plano. Foi utilizado um intervalo de 0 à 0,1.

Tabela 3.8 – Dados de entrada na simulação numérica

Variável de entrada	Unidade	Valor
Coeficiente de irradiação global (G_T)	W/m ²	800
Temperatura ambiente	°C	30
Velocidade do vento	m/s	2
Comprimento do coletor	m	1,415
Largura do coletor	m	1,014
Espessura do coletor	m	0,079
Comprimento da placa	m	1,385
Largura da placa	m	0,984
Transmitância	-	0,9
Espessura da placa	m	0,0002
Condutividade da placa	W/mK	0,42 – PSU
		0,52 – PE
		0,20 – PC
		0,42 – PSU
Condutividade da solda	W/mK	0,52 – PE
		0,20 – PC
Número de tubos	-	8
		60
		100
		0,015
		0,0142
		70
		1000
		0,05
		0,05
		0,05
$\frac{(T_{med} - T_{amb})}{G_T}$	-	0,005
		0,01
		0,02
		0,03
		0,04
		0,05
		0,06
		0,07
		0,08
		0,09
		0,1

4 RESULTADOS

4.1 Análise dos resultados (Etapa 3)

Nesta etapa serão analisados os materiais colocados no equipamento de intemperismo acelerado por meio de uma espectroscopia no infravermelho. Também foram realizadas simulações com diferentes geometrias no absorvedor com o uso das características dos materiais estudados.

4.1.1 Espectroscopia no infravermelho

Os resultados da espectroscopia no infravermelho do PE são mostrados nas Figuras (4.1 e 4.2), bem como os espectros do PC são mostrados nas Figuras (4.3 e 4.4) e por fim os resultados do PSU são mostrados nas Figuras (4.5 e 4.6). Os gráficos são de transmitância (%) em função do número de onda (cm^{-1}), o qual possui intervalo de 500 a 4000 cm^{-1} .

Os dados do espectro do PE foram obtidos em uma resolução de 2 cm^{-1} e um número total de acumulações de 3597 pontos. O espectro molecular do PE ao longo do intemperismo acelerado é mostrado na Figura 4.1.

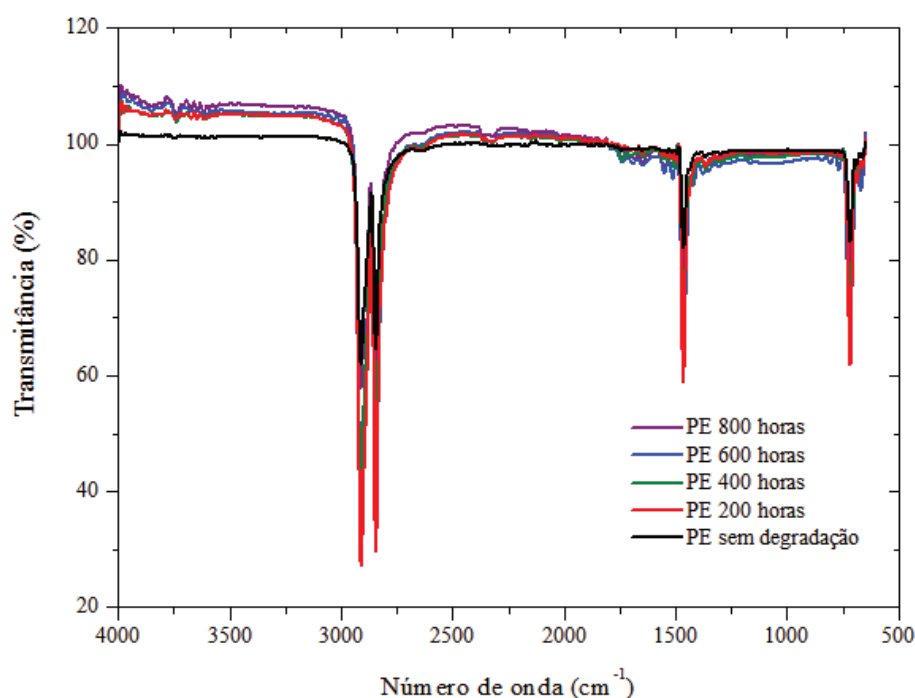


Figura 4.1 – Sobreposição dos espectros no infravermelho do PE original e exposto por diversas horas

Com os resultados obtidos com a espectroscopia no infravermelho realizada no PE, é possível se observar que não surgiram novas bandas significativas ao longo do tempo de exposição do material na câmara de intemperismo. Cada banda apresentada no espectro do PE, conforme a Figura 4.2, corresponde a um grupo funcional. Na Tabela 4.1 são listados os tipos de vibrações correspondentes de cada banda.

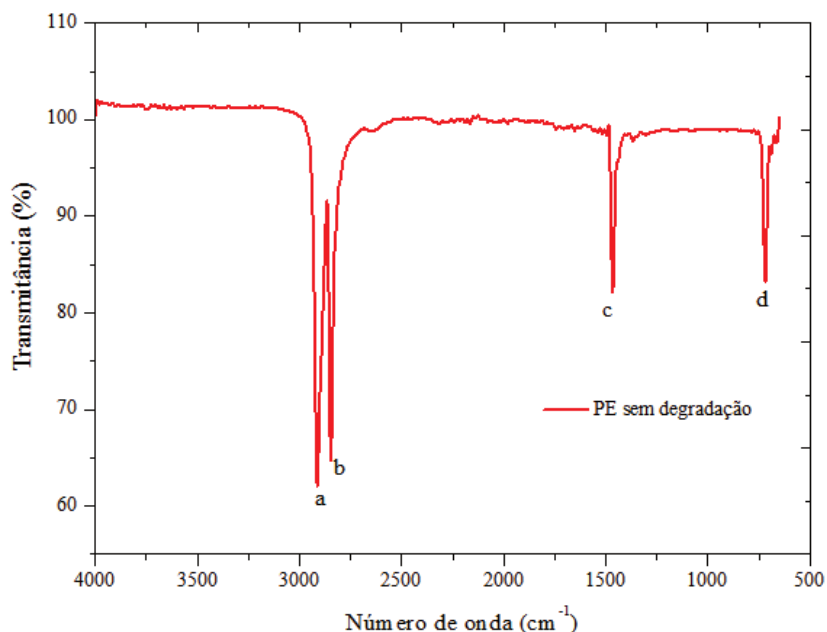


Figura 4.2 – Espectro no infravermelho do PE original (sem degradação)

Tabela 4.1 – Tipos de vibração no espectro do PE

Material	Frequência (cm ⁻¹)	Tipo de vibração
PE	a (2914)	estiramento C – H
	b (2847)	estiramento C – H
	c (1468)	dobramento CH ₂
	d (718)	dobramento <i>rocking</i> CH ₂

O estiramento é uma vibração molecular que ocorre ao longo da ligação molecular e o dobramento ocorre entre as ligações moleculares, cada ligação molecular tem uma vibração característica de estiramento e dobramento, em visto disso, as bandas características foram exemplificadas com o tipo de vibração que o corre na determinada frequência, conforme Tabela 4.1, como observado o estiramento geralmente tem uma maior intensidade, mas essa intensidade não está relacionado a absorção de radiação pelo material, em visto disso o surgimento de uma pequena banda no espectro entre 1750 e 1500 cm⁻¹ (c) a partir de 800 horas, representa o processo de oxidação do material, portanto o material leva um tempo maior para começar a oxidar.

Os dados do espectro do PC foram obtidos em uma resolução de 2 cm^{-1} e um número total de acumulações de 3597 pontos. O resultado para o polycarbonato (PC) sem degradação é mostrado na Figura 4.3 e os espectros do PC ao longo do intemperismo acelerado é mostrado na Figura 4.4. O espectro do PC apresenta bandas de estiramento fortes entre 2000 a 500 cm^{-1} e bandas de dobramento fracas, os demais tipos de vibração em cada banda ao longo do espectro são listados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Tipos de vibração no espectro do PC

Material	Frequência (cm^{-1})	Tipo de vibração
PC	a (2966)	estiramento C – H
	b (1770)	estiramento C = O
	c (1500)	estiramento dos anéis aromáticos
	d (1400)	estiramento dos anéis aromáticos
	e (1300)	dobrimento CH_3
	f (1165)	estiramento C = O
	g (1005)	dobrimento no plano aromático C – H
	h (825)	dobrimento fora do plano aromático C – H

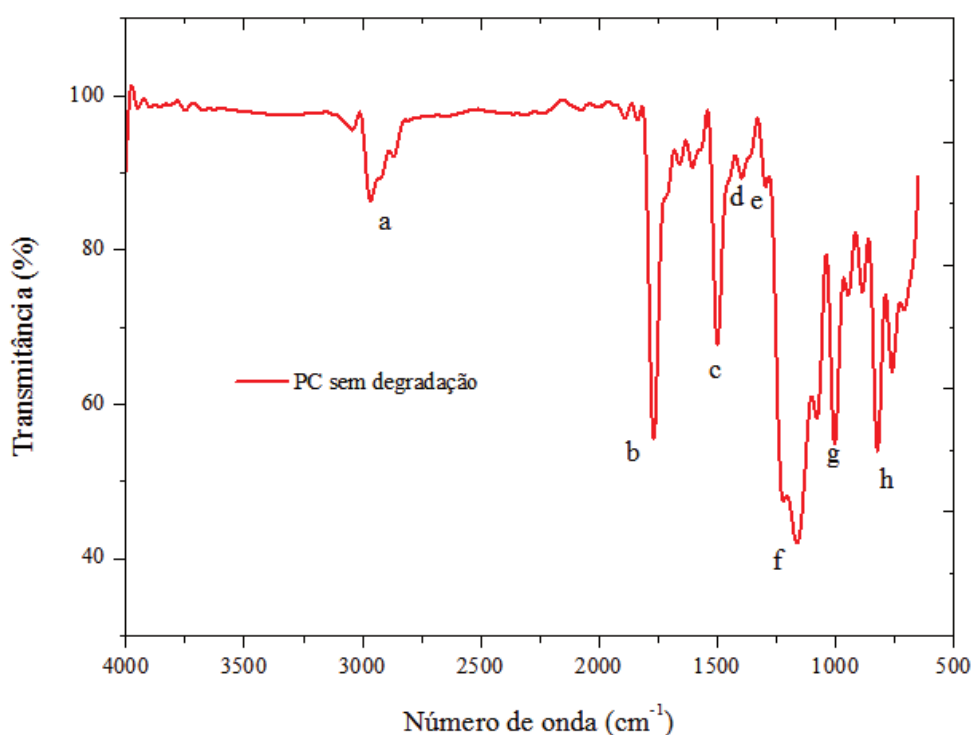


Figura 4.3 - Espectroscopia no infravermelho do PC sem degradação

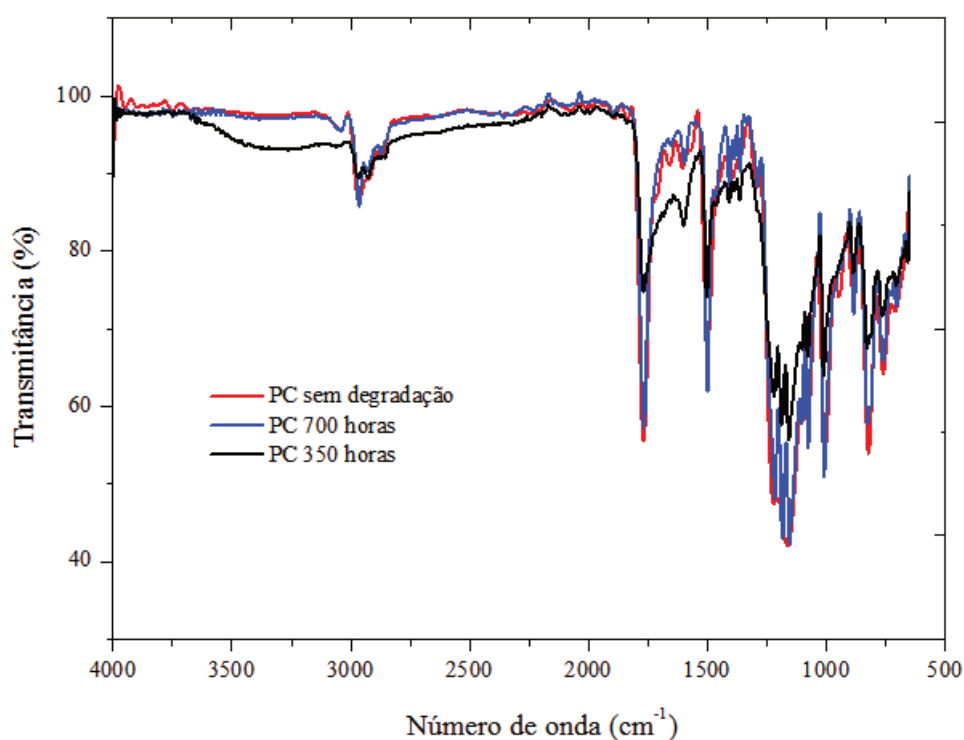


Figura 4.4 – Sobreposição dos espectros no infravermelho do PC original e exposto por diversas horas

A espectroscopia do PC revela uma pequena variação na banda acima de 2000cm^{-1} , tal como é possível visualizar na Figura 4.4. O PC exposto por 350 horas apresenta uma banda de intensidade menor que as demais, mas não contém nenhuma banda nova ao longo do espectro, corroborando para uma ligação molecular ao longo do tempo de exposição sem um surgimento de uma banda de oxidação.

Os dados do espectro do PSU foram obtidos em uma resolução de 8 cm^{-1} e um número total de acumulações de 900 pontos. Os resultados da Polissulfona (PSU) são mostrados na Figura 4.5. O PSU possui uma banda diferente das demais já apresentadas, as vibrações de estiramento que geralmente tem uma maior intensidade, no PSU as bandas de dobramento tem uma maior intensidade entre 2000 e 500 cm^{-1} . Os demais tipos de vibração ao longo do espectro são listados na Tabela 4.3.

O espectro do infravermelho do PSU, conforme Figura 4.5, tem bandas semelhantes nas duas medidas realizadas e não apresenta o surgimento de novas bandas.

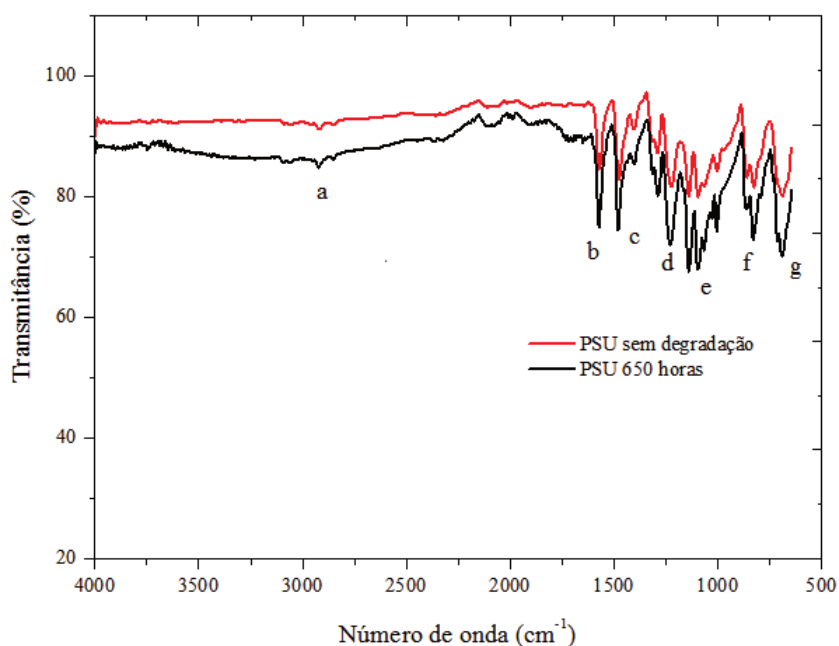


Figura 4.5 – Espectroscopia do infravermelho do PSU

Tabela 4.3 – Tipos de vibração no espectro do PSU

	Frequência (cm ⁻¹)	Tipo de Vibração
PSU	(a) 2920	Estiramento C – H
	(b) 1570	Estiramento dos anéis aromáticos.
	(c) 1480	Estiramento dos anéis aromáticos.
	(d) 1230	C – O
	(e) 1140	C – O
	(f) 831	Dobramento fora do plano aromático do C – H
	(g) 697	Dobramento <i>rocking</i> CH ₂

Os três materiais ensaiados apresentam espectros diferentes, conforme Figura 4.6. Observa-se no espectro do PE uma banda forte no intervalo entre 3000 e 2000 cm⁻¹ no qual ocorre o estiramento do C – H. O PSU apresenta um espectro sem o surgimento de bandas ao longo da exposição na câmara de intemperismo acelerado, assim como o PC, o mesmo apresenta uma banda de dobramento forte entre 1250 e 500 cm⁻¹. A banda localizada entre 1750 e 1500 cm⁻¹(d) que se refere a oxidação do material, está presente no espectro dos três materiais, destacando o surgimento no PE apenas após 600 horas de exposição na câmara.

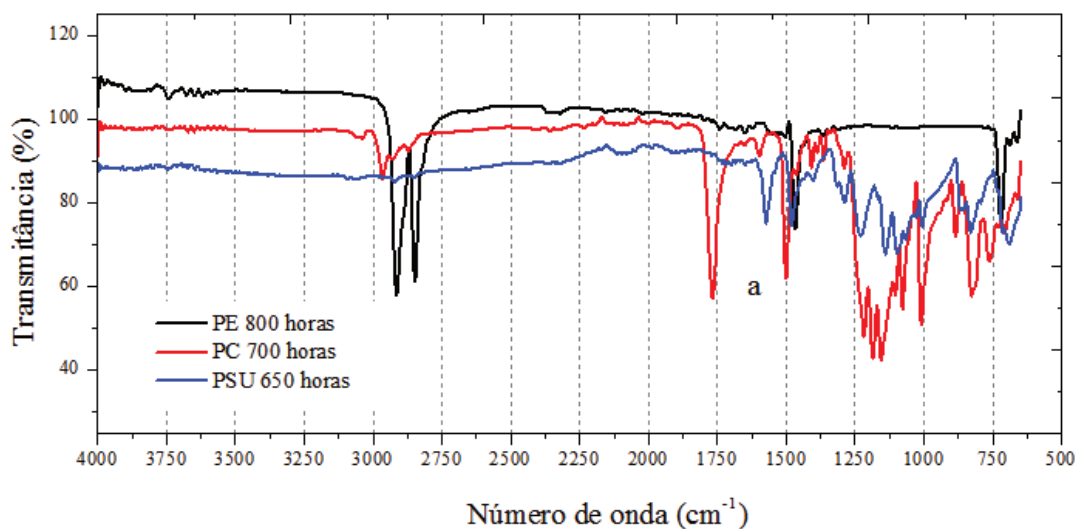


Figura 4.6 – Sobreposição dos espectros no infravermelho dos materiais estudados envelhecidos

4.2 Comparação de resultados (Etapa 4)

Nesta etapa foram comparados os resultados obtidos na espectroscopia no infravermelho confrontados com resultados obtidos por outros autores.

4.2.1 Espectroscopia no infravermelho

Em um estudo realizado por Jelle e Nilsen (2011), foi analisada a transmitância do PE de alta densidade em método de envelhecimento acelerado através do uso do ATR. O estudo se baseou em três métodos de envelhecimento, dos quais o realizado em uma câmara de envelhecimento pode ser usado para efeito de comparação. As amostras de PE foram sujeitas à radiação UV a uma temperatura de ar de 50 °C constante. As intensidades de UVA e UVB são calculadas em média para 28 W m⁻² e 2,8 W m⁻² respectivamente. Os resultados são mostrados na Figura 4.7.

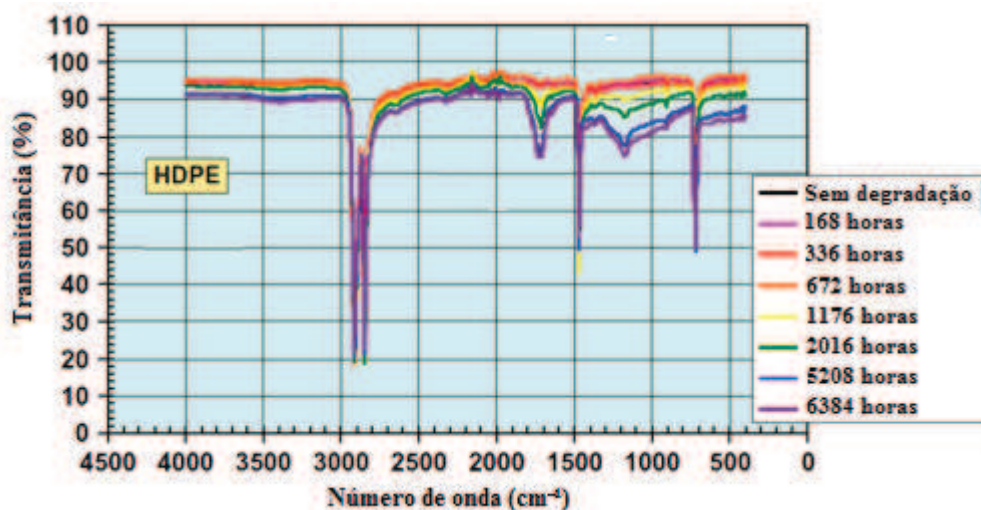


Figura 4.7 – Transmitância versus número de onda entre 4000 e 400 cm^{-1} para o PE durante a exposição na câmara de envelhecimento

Fonte: Adaptado de Jelle e Nilsen (2011)

Conforme a Figura 4.8, as bandas do espectro do PE têm intensidades muito próximas das obtidas na pesquisa de Jelle e Nilsen (2011). Observa-se que no estudo realizado neste trabalho, a duração do intemperismo acelerado foi de 800 horas e o estudo realizado pelo autor foi de 6400 horas. Comparando as duas análises realizadas, é possível concluir que o PE, em relação ao teste de espectroscopia do infravermelho, teve bandas similares. Na Figura 4.7 pode se observar que a banda entre 1750 a 1500 cm^{-1} , que corresponde ao processo de oxidação do material, apenas tem o surgimento após 672 horas, mesma banda localizada no espectro do PE analisado que apresentou um surgimento após 800 horas.

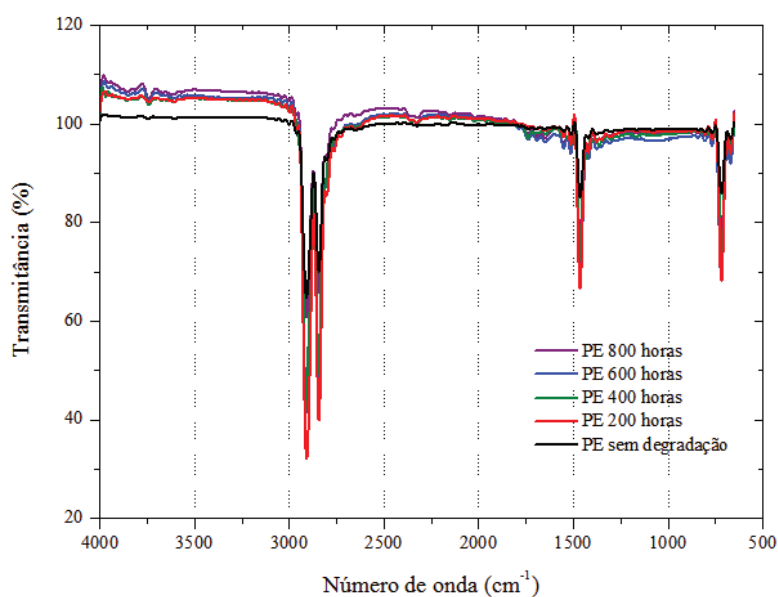


Figura 4.8 – Transmitância versus número de onda entre 4000 e 400 cm^{-1}

Um estudo realizado por Jung *et al.* (2018), no qual foi realizado uma espectroscopia do infravermelho em vários polímeros e, dentre esses, os resultados do PC e do PE são mostrados nas Figura 4.9 e Figura 4.10.

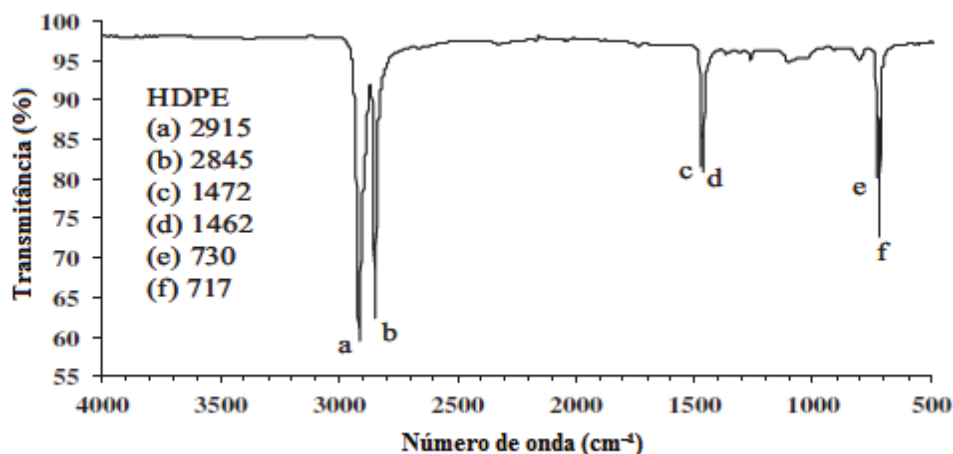


Figura 4.9 – Espectro produzido pelo PE de alta densidade

Fonte: Adaptado de Jung *et al.* (2018)

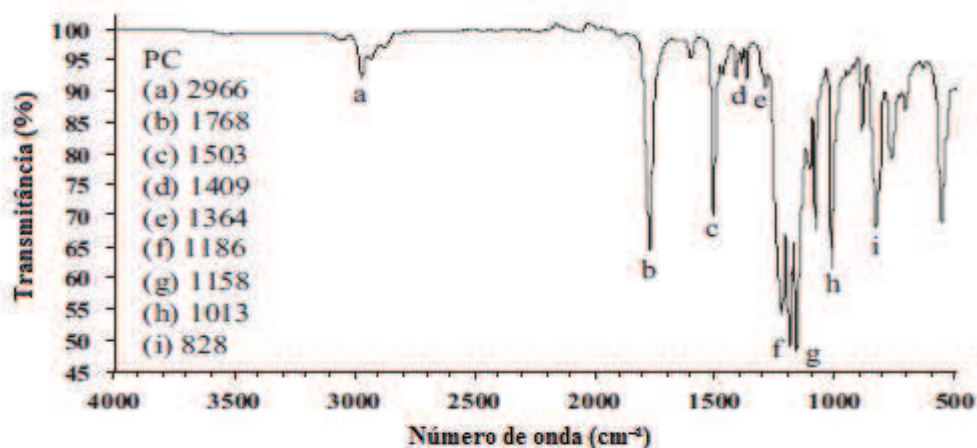


Figura 4.10 – Espectro produzido pelo PC

Fonte: Adaptado de Jung *et al.* (2018)

Os resultados obtidos por Jung *et al.* (2018) são similares aos obtidos nesse trabalho, como se pode observar nas Figuras 4.2 e 4.3, respectivamente. Os espectros do PE e do PC, ambos sem degradação, tem um comportamento quase idêntico, com bandas características ao longo do espectro. Na Figura 4.9 e Figura 4.10 os picos do espectro do PE e PC, respectivamente, correspondem a processos químicos. Cada pico do espectro corresponde a um tipo de vibração e sua respectiva intensidade, conforme a Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Tipos de vibração ao longo do espectro

Material	Frequência (cm ⁻¹)	Tipo de vibração
HDPE	a (2915)	estiramento C – H
	b (2845)	estiramento C – O
	c (1472)	dobramento CH ₂
	d (1462)	dobramento CH ₂
	e (730)	dobramento <i>rocking</i> no plano CH ₂
	f (717)	dobramento <i>rocking</i> no plano CH ₂
PC	a (2966)	estiramento C – H
	b (1768)	estiramento C = O
	c (1503)	estiramento dos anéis aromáticos
	d (1409)	estiramento dos anéis aromáticos
	e (1364)	dobramento CH ₃
	f (1186)	estiramento C = O
	g (1158)	estiramento C = O
	h (1013)	dobramento no plano aromático C – H
	i (828)	dobramento fora do plano aromático C – H

Fonte: Adaptado de Jung *et al.* (2018)

4.3 Resultados da simulação numérica do coletor solar plano

Realizadas simulações para avaliar o rendimento térmico de um coletor solar plano utilizando o polietileno e a polissulfona como materiais para o absorvedor, tanto na placa como nos tubos, e com uma cobertura de vidro, conforme Figura 4.11, o rendimento do coletor solar foi inferior se comparado ao rendimento de um coletor com um absorvedor de cobre, conforme Figura 3.9.

A simulação realizada utilizou a mesma geometria de 8 tubos com o mesmo material para placa e as mesmas dimensões para efeito de comparação. O PE teve uma eficiência máxima de 10,2 % e o PSU de 9,5 %, muito abaixo da eficiência máxima de um coletor convencional, que foi de 67,03 %.

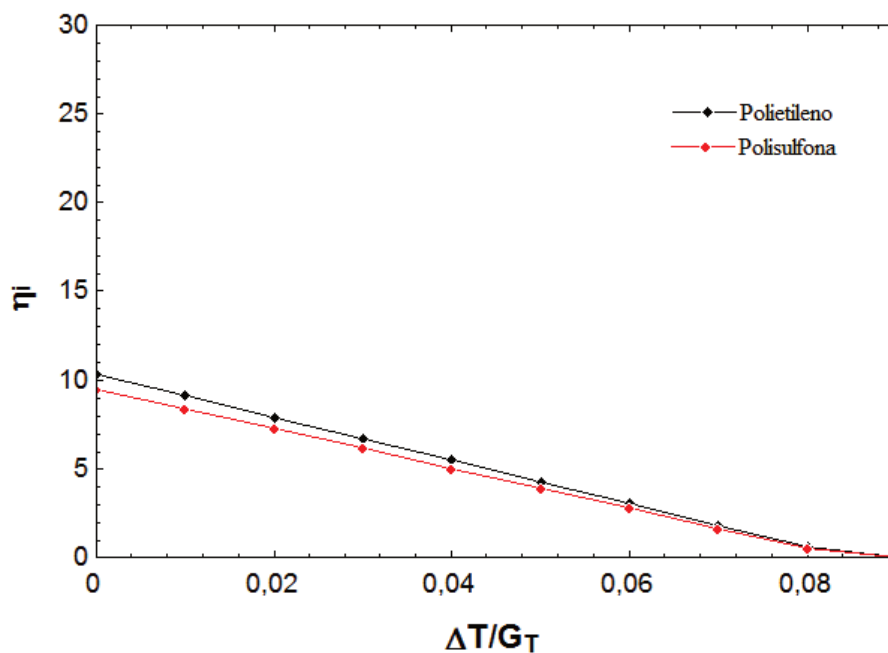


Figura 4.11 – Coletor Solar polimérico com oito tubos circulares

Logo foi simulado o efeito do número de tubos em um absorvedor. Para 60 tubos, o rendimento térmico aumenta, sendo comparável com um coletor convencional, conforme mostrado na Figura 4.12.

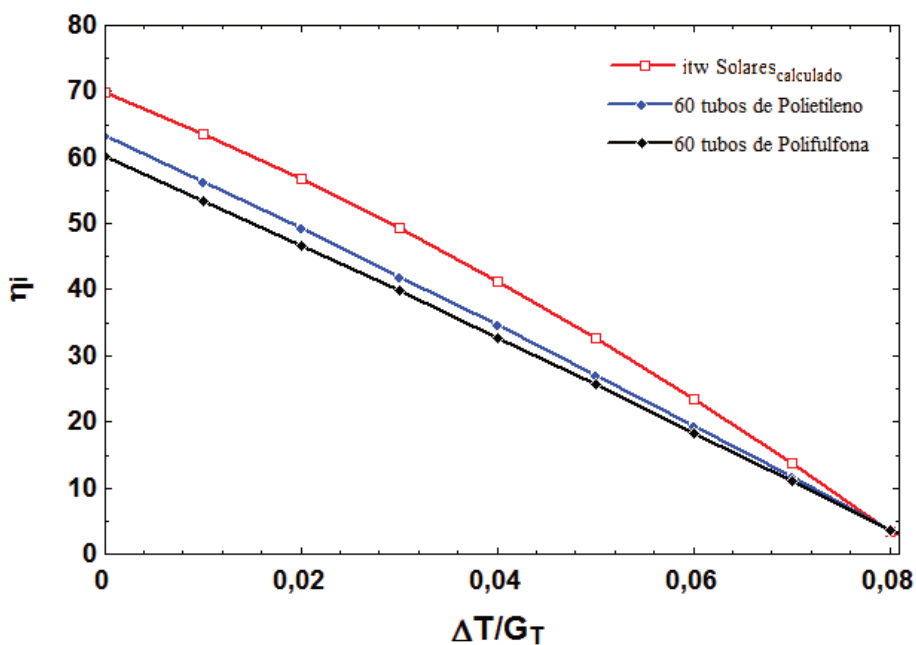


Figura 4.12 – Coletor solar polimérico com sessenta tubos circulares

Nessa geometria, o coletor tem uma eficiência máxima de 60% para o PSU e de 63,4% para o PE. Outra geometria possível de se utilizar são absorvedores com tubos de seção quadrada, como já introduzido no capítulo 2. O cálculo sofre uma alteração na eficiência de

aleta do absorvedor conforme Equação (2.16), o coletor com essa geometria tem um aumento de eficiência, se comparado ao uso de tubos circulares, como é possível visualizar na Figura 4.13, no qual se observa o efeito do número de tubos e da geometria aplicada. A eficiência instantânea máxima de cada composição segue na Tabela 4.5

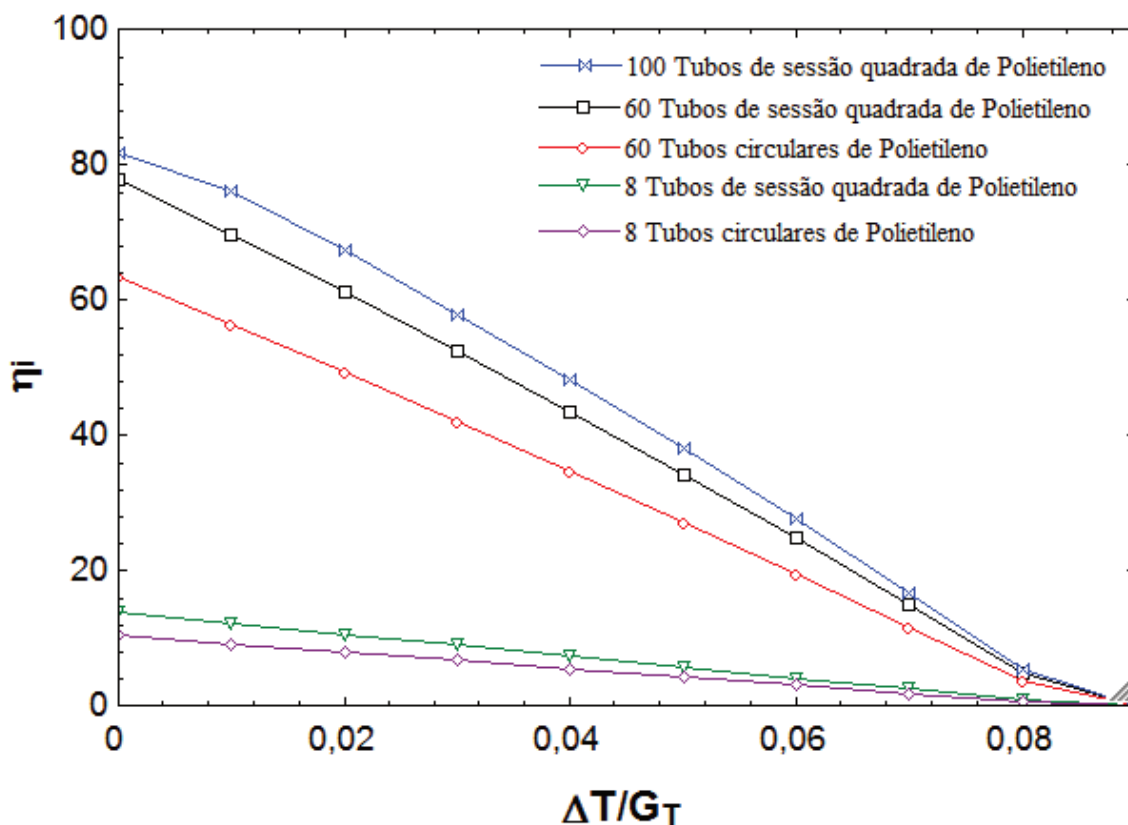


Figura 4.13 – Eficiência de um coletor solar plano com diferentes composições

Tabela 4.5 – Eficiência instantânea máxima de coletores solares planos em diferentes composições de geometria e material

Composição do absorvedor	Eficiência instantânea máxima (%)
100 tubos de sessão quadrada de polietileno	81,58
60 tubos de sessão quadrada de polietileno	77,73
60 tubos circulares de polietileno	63,35
8 tubos de sessão quadrada de polietileno	13,73
8 tubos circulares de polietileno	10,32

Os cálculos foram feitos alterando a equação da eficiência da aleta (Equação 2.13) para tubo circular com a Equação 2.16 para tubos de sessão quadrada. Utilizando então as mesmas variáveis, a eficiência de um coletor de mesmo tamanho, mas com uma geometria com tubos

de sessão quadrada, é maior do que a geometria com tubos circulares. Esse fato ocasiona uma vantagem para o uso dessa geometria, conforme a Figura 4.14.

O melhor rendimento encontrado é com o uso de uma geometria com 100 tubos quadrados de polissulfona que chega a uma eficiência máxima de 81,6 %. Absorvedores com tubos de sessão quadrada tem a vantagem de possuírem uma rigidez mecânica maior e uma complexidade menor, ou seja, o seu processo de fabricação é mais simples que os coletores com tubos circulares.

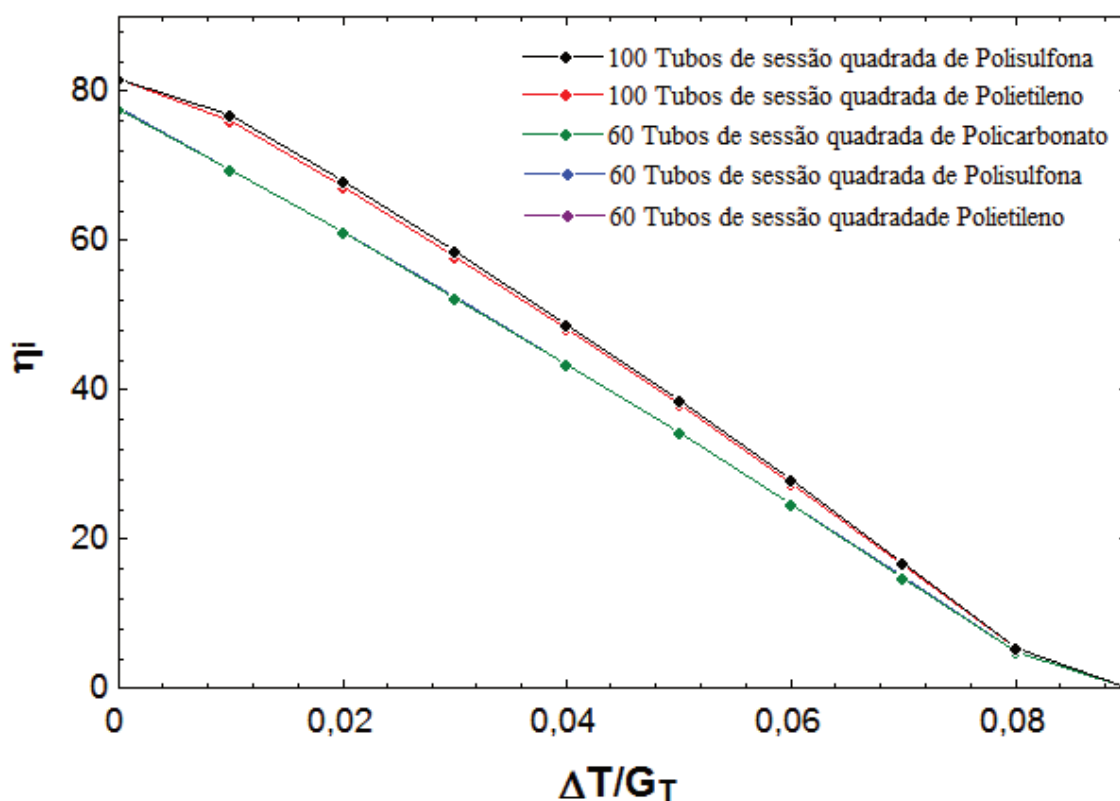


Figura 4.14 – Eficiência de um coletor solar plano utilizando uma geometria de tubos de sessão quadrada com diferentes números de tubos

O resultado de eficiência máxima para cada composição simulada é observado na Tabela 4.6. Pode-se observar que a condutividade térmica do material neste caso não se torna de grande importância, como observado na eficiência máxima do PE e do PSU que respectivamente tem uma condutividade térmica de 0,52 e 0,42 W/mK, isso se leva ao fato de ter um número alto de canais.

Tabela 4.6 – Eficiência máxima de um coletor solar plano com diferentes composições de absorvedor

Composição do absorvedor	Eficiência instantânea máxima (%)
100 tubos de sessão quadrada de polissulfona	81,62
100 tubos de sessão quadrada de polietileno	81,58
60 tubos de sessão quadrada de polietileno	77,73
60 tubos de sessão quadrada de polissulfona	77,71
60 tubos de sessão quadrada de policarbonato	77,61

O número de tubos em um absorvedor influencia na sua eficiência como dito anteriormente, é possível concluir que a eficiência aumenta conforme o número de tubos aumenta mas, conforme a Figura 4.15, quando atingido uma geometria que contém mais de cem tubos, a eficiência não sofre uma alteração significativa.

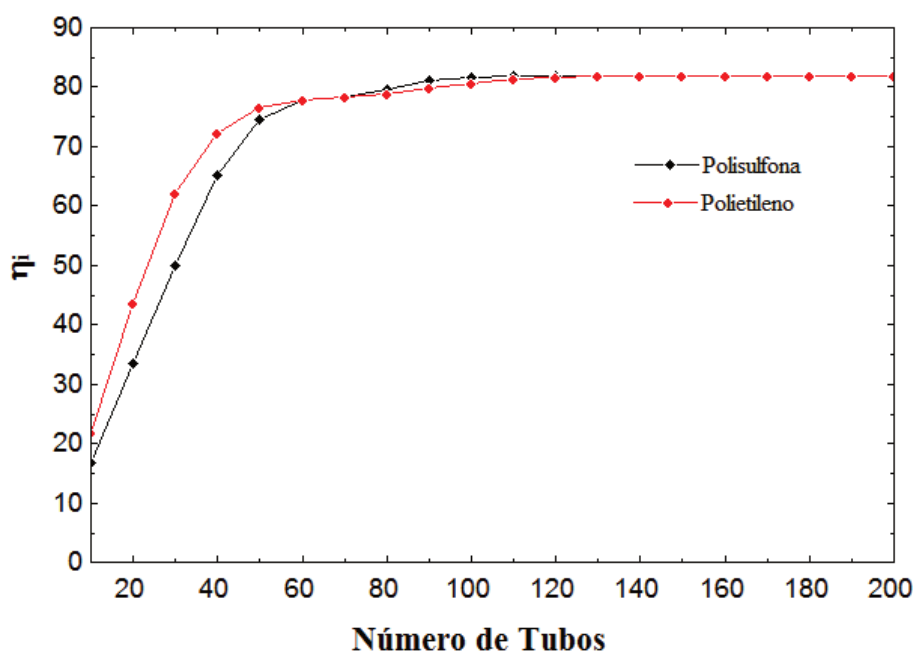


Figura 4.15 – Eficiência versus número de tubos em um coletor solar plano com tubos de sessão quadrada

O uso de absorvedores poliméricos tem como desvantagem a baixa condutividade térmica do material, no entanto, quando aumentado o número de tubos, sua eficiência aumenta de tal forma que pode ser comparável a absorvedores convencionais. Outra opção também é o uso de uma geometria de sessão quadrada, essa geometria ocasiona um aumento na eficiência e corrobora para o uso em um absorvedor polimérico.

5 CONCLUSÃO

O uso de um polímero em um coletor solar é e continuará sendo essencial no futuro, seja em razão dos custos envolvidos na fabricação de um coletor ou mesmo em razão de uma mudança de pensamento mundial devido à nova visão política e econômica de desenvolvimento sustentável do mundo.

Para a utilização de novos materiais em coletores solares planos, diversos fatores são importantes, destacando-se a eficiência térmica, o custo e seu nível de degradação com o tempo. Desse modo, materiais que substituem os convencionais são atualmente estudados. Como sua eficiência térmica dificilmente é comparável à de materiais como cobre e alumínio, o custo é o principal fator procurado, porém a escolha do material não é exclusivamente pelo seu custo, mas sim por uma média entre sua eficiência térmica, seu nível de degradação e seu custo de produção.

Neste trabalho foram realizados testes de envelhecimento acelerado no policarbonato, no polietileno e na polissulfona e as amostras foram analisadas por um espectrômetro de infravermelho a fim de embasar empiricamente a escolha por materiais que sejam substitutos adequados aos atuais materiais utilizados nos coletores solares.

Avaliando o espectro de cada um no infravermelho e comparando com a literatura, os polímeros estudados neste trabalho apresentaram uma pequena mudança nas bandas à medida que o tempo exposto na câmara de envelhecimento aumentava, ou seja, as intensidades das bandas do espectro em cada material não obtiveram uma alteração significativa. Observou-se que o PC e o PSU não demonstraram a formação de novas bandas; o surgimento de novas bandas apenas se originou no PE após 800 horas de exposição na câmara de intemperismo acelerado. Com um tempo maior de exposição, como comparado com estudos realizados por outros autores, o PE apresenta o surgimento de uma banda na faixa de 1750 a 1500 cm^{-1} .

A cobertura de um coletor, como citado no trabalho, deve ter alta transmitância na faixa de comprimentos de onda da banda solar, sendo o policarbonato o material que atende a estes requisitos, uma vez que tem características similares às do vidro, utilizado normalmente em um coletor.

No absorvedor, como citado no trabalho, o material deve ter elevada condutividade térmica, boa transmitância e boa absorvância, e o polietileno seria o material mais adequado pelo fato de ser um polímero com boa resistência à degradação e por apresentar boa condutividade térmica, superior à da polissulfona.

Os resultados apresentados pela simulação numérica para calcular a eficiência de um coletor solar plano com materiais poliméricos mostraram que um coletor solar feito com um absorvedor polimérico tem uma eficiência muito menor do que um coletor convencional, assim tornando muito difícil seu uso em um coletor. No entanto, quando o absorvedor é construído com um número maior de tubos, sua eficiência aumenta a ponto de ser comparável com a de coletores convencionais.

Outra forma de melhorar o rendimento térmico de um coletor polimérico é alterando a geometria do absorvedor. A geometria com tubos de seção quadrada obteve um bom resultado com relação à eficiência, que foi maior que em absorvedores com tubos circulares.

Como sugestões para continuidade do trabalho, podem-se listar:

- Realizar análise térmica nos materiais.
- Realizar análise de resistência mecânica nos materiais.
- Construir um protótipo em escala real para testes e para análise do equipamento em funcionamento.

REFERÊNCIAS

- ASHBY, M. **Seleção de Materiais no Projeto Mecânico**. 4. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2012
- ASTM G154-06, **Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.
- ASTM G154-16, **Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- BOUDADEN, J.;HO, R.S.-C.; OELHAFEN. P.; SCHULER, A.; ROECKER, C.; SCARTEZZINI, J.-L. **Towards coloured glazed thermal solar collectors**. Solar Energy Materials and Solar Cells, [s.l.], v. 84, n. 1-4, p.225-239, out. 2004. Elsevier BV.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 8ª. ed. [s.l.]: LTC, 2012.
- CANEVAROLO JR., SEBASTIÃO V.. **Ciência dos Polímeros**. 3. ed. São Paulo: Artliber, 2013.
- CANEVAROLO JR., SEBASTIÃO V.. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**, Artliber Editora, São Paulo, 2007.
- COLANGELO, G.; FAVALE, E.; MIGLIETTA, P.; RISI, A. **Innovation in flat solar thermal collectors**: A review of the last ten years experimental results. Renewable And Sustainable Energy Reviews, [s.l.], v. 57, p.1141-1159, maio 2016. Elsevier BV.
- CT INGENIEROS, **Concentrador Solar - Tubo calo-portador**. 2016. Disponível em: <www.ctingenieros.es/index.php/nuestra-experiencia/proyectos/energias-renovables>. Acesso em: 13 out. 2016.
- DARTORA, P.C.. **Influência de ramificações longas nas propriedades de filmes de polietileno linear de baixa densidade**. 2014. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de PPG3M, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 2014.
- DEAN, J. A.. **Langes' handbook of chemistry**. 15. ed. [s. L.]: McGraw-Hill, 1999.

DEMING, W E.; RENMEI, N. K. G.. **Elementary principles of the statistical control of quality**: a series of lectures. [s. L.]: Tokyo, Nippon Kagaku Gijutsu Remmei, 1951.

DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A.. **Solar engineering of thermal processes**. 4^a ed. Madison: Wiley, 2013.

DUNCAN, C. H. *et al.* **Latest Rocket Measurements of the solar constant**. Solar Energy, Great Britain, v. 28, n. 5, p. 385-387, 1982.

ECOENERGIA. **Coletor Solar Plano**. 2016. Disponível em: <ecoenergia.eng.br/especificacao/14.pdf>. Acesso em: 13 out. 2016.

EHRMANN, N.; REINEKE-KOCH, R. **Selectively coated high efficiency glazing for solar-thermal flat-plate collectors**. Thin Solid Films, [s.l.], v. 520, n. 12, p.4214-4218, abr. 2012. Elsevier BV.

ENSINGER. **Ficha técnica de produtos**. 2017. Disponível em: <<http://www.ensinger.com.br/site/>>. Acesso em: 17 abr. 2017.

EPE [Empresa De Pesquisa Energética]. **Demanda de energia-2050**. Rio de Janeiro, 2015. 245 p. (Estudos da demanda de energia).

EPE [Empresa De Pesquisa Energética]. **Projeção da demanda de energia elétrica: para os próximos 5 anos**. Rio de Janeiro, 2015. 88 p. (Estudos da demanda).

EQUILAM. **Câmara de intemperismo acelerado**. 2017. Disponível em: <<http://www.equilam.com/produtos.php?id=266>>. Acesso em: 7 jun. 2017.

FANINGER, G. **The Potential of Solar Thermal Technologies in a Sustainable Energy Future**. IEA Solar Heating & Cooling Programme. [s.l.], Fevereiro, 2010.

FIORINI, E. **Fourier Transform Infrared Spectroscopy**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Elétrica, 2000. (Medidas para Caracterização e Análise de Materiais).

FREEMAN, A.; MANTELL, S. C.; DAVIDSON, JANE H.. **Mechanical performance of polysulfone, polybutylene, and polyamide 6/6 in hot chlorinated water**. Solar Energy, [s.l.], v. 79, n. 6, p.624-637, dez. 2005. Elsevier BV.

HAGHIGHI-YAZDI, M.; LEE-SULLIVAN, P. **FTIR analysis of a polycarbonate blend after hygrothermal aging**. Journal Of Applied Polymer Science, [s.l.], v. 132, n. 3, 14 ago. 2014. Wiley-Blackwell.

HAMILTON, C. J. **O sol**. 1997. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/ast/solar/portug/sun.htm>>. Acesso em: 10 out. 2016.

HAROLD K. HUGHES, **Beer's Law and the Optimum Transmittance in Absorption Measurements**, Appl. Opt. 2, 937-945, 1963.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M. **Energia e Meio Ambiente**. 4^a. ed. São Paulo: Cengage, 2009.

IEA [INTERNATINAL ENERGY AGENCY]. **Key Electricity Trends**: Excerpt from: Electricity information. [s.l.], 2016.

IEA [INTERNATINAL ENERGY AGENCY]. **Key Electricity Trends**: Excerpt from: Electricity information. [s.l.], 2014.

IEA SHC TASK 39. IEA. **Polymeric Materials for Solar Thermal Applications. Solar Heating & Cooling Programme**, [s. L.], p.1-11, jun. 2015.

ISHIKAWA, K.; ISHIKAWA, K. **What is Total Quality Control? The Japanese Way**. [s. L.]: Prentice Hall, 1988. Tradução: David J. Lu.

Itt. FOSSIL, **CÂMARA DE ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO E INTEMPERISMO ACELERADO**. 2017. Disponível em: <<http://unisinis.br/itt/ittfossil/equipamentos/camara-de-ensaios-de-envelhecimento-e-intemperismo-acelerado>>. Acesso em: 7 jun. 2017.

JELLE, BJØRN PETTER; NILSEN, TOM-NILS. **Comparison of accelerated climate ageing methods of polymer building materials by attenuated total reflectance Fourier transform infrared radiation spectroscopy**. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 25, n. 4, p.2122-2132, abr. 2011.

JUNG, MELISSA R. *et al.* **Validation of ATR FT-IR to identify polymers of plastic marine debris, including those ingested by marine organisms**. Marine Pollution Bulletin, [s.l.], v. 127, p.704-716, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.12.061>.

KAHLEN, S.; WALLNER, G.M.; LANG, R.W. **Aging behavior and lifetime modeling for polycarbonate**. Solar Energy, [s.l.], v. 84, n. 5, p.755-762, maio 2010. Elsevier BV.

KALOGIROU, S. A. **Solar Energy Engineering: Processes and Systems**. Eua: Academic Press, Elsevier, 2009.

KALOGIROU, S. A. **Solar thermal collectors and applications**. Progress In Energy And Combustion Science, [s.l.], v. 30, n. 3, p.231-295, jan. 2004. Elsevier BV.

KÖHL, M. *et al.* **Polymeric materials for solar thermal applications**. Singapore: Wiley-vch, 2012.

LOPEZ, R. **Energia solar para produção de eletricidade**. São Paulo : Artliber, 2012.

LUZ, E. R. DA. **Predição de propriedades de gasolinas usando espectroscopia FTIR e regressão por mínimos quadrados parciais**. 2003. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Química, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2003.

MAUTHNER, F.; WEISS, W.; SPÖRK-DUR, M.. **Solar Heat Worldwide: Markets and Contribution to the Energy Supply 2013**. Gleisdorf, Austria: Iea Solar Heating & Cooling Programme, 2015.

MESQUITA, MARCELO. **Sistema de aquecimento solar é mais vantajoso que poupança**. 2017. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/sistema-de-aquecimento-solar-e-mais-vantajoso-que-poupanca_11786_10_0>. Acesso em: 10 ago. 2017.

NELSON, W. **Analysis of Accelerated Life Test Data – Part I: The Arrhenius Model and Graphical Methods**, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-6, pp. 165-181, 1971.

OLIVARES, A. *ET AL.* **Degradation model for an extruded polymeric solar thermal absorber**. Solar Energy Materials And Solar Cells, [s.l.], v. 94, n. 6, p.1031-1037, jun. 2010. Elsevier BV.

PIEKARCZYK, **Cost Analysis and Production Cost Optimization of Polymeric Collectors for a Global Market**, GLEISDORF SOLAR 2014, Gleisdorf, Austria, 2014.

PLASTICSEUROPE. **Engineering plastics**. Disponível em: <<http://www.plasticseurope.org/what-is-plastic/types-of-plastics-11148/engineering-plastics/pc.aspx>>. Acesso em: 08 mar. 2017.

PROSPECTOR. **Polibutileno (PB) Plástico.** Disponível em: <<https://plastics.ulprospector.com/es/generics/23/polibutileno-pb>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

RAMAN, R. ET AL, 2000. **A review of polymer materials for solar water heating systems.** Journal of Solar Energy Engineering, vol. 122, pp. 92-100.

REDAÇÃO AECWEB. Abrava. **Já são 6 milhões m² de aquecimento solar.** 2013. Entrevista com Marcelo Mesquita. Disponível em: <<http://abrava.com.br/?p=2023>>. Acesso em: 2 jan. 2017.

SHC, task 39., 2015, Austria. **Polymeric materials for solar thermal applications.** International Energy Agency, 2015.

SHEWHART, W. A. (Ed.). **Statistical Method from the Viewpoint of Quality Control.** New York: Dover, 1986. Department of Agriculture.

SILVA, ANDRÉ LUIS BONFIM BATHISTA E; SILVA, EMERSON OLIVEIRA DA. **Apostila Instituto de Ciências Exatas e da Terra: Conhecendo Materiais Poliméricos.** Cuiabá: Universidade Federal de Mato Grosso, 2003. Grupo de Pesquisa em Novos Materiais.

SILVA, DANIEL DOS SANTOS. **Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para dimensionamento de coletores solares de placa plana.** 2012. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Ppgem, Unisinos, São Leopoldo, 2012.

SKOOG, DOUGLAS A.; NIEMAN, TIMOTHY A.; HOLLER, F. JAMES. **Principles of Instrumental Analysis.** Sierra: Brooks Cole, 1997.

SOAVE, CLAUDIO. **Projeto, simulação e análise de desempenho de coletores solares poliméricos.** 2014. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Ppgem, Unisinos, São Leopoldo, 2014.

SOLIS. **Coletor Solar Plano.** 2016. Disponível em: <www.solis.ind.br/coletor-solar-polar-hot.html>. Acesso em: 13 out. 2016.

SOPIAN, K. ET AL. **Thermal performance of thermoplastic natural rubber solar collector.** Materials Processing Technology, Malaysia, p. 179-184, 25 Jan. 2002.

SPENCER, J. W. **Fourier Series Representation of the Position of the Sun**. USA, Vol. 2(5), pp.172, 1971.

STRAUSS, JAMUARÊ DE ALMEIDA. **Desenvolvimento de um absorvedor solar utilizando placas poliméricas modificadas**. 2013. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação Ciências dos Materiais, UFRGS, Porto Alegre, 2013.

WEBER, M. J.. **Handbook of Optical Materials**. [s.l]: Crc Press, 2003.

APÊNDICE I – PROGRAMA DE CÁLCULO PARA COLETORES SOLARES DE PLACA PLANA

Programa com rotinas adaptadas de CoDePro e bibliotecas do EES

Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

Mestrando – José Mauricio

Orientador: Prof. Dr. Mário Macagnan

“Analisando as dimensões do coletor”

```
Function analise_dim_coletor(Largura_coletor;Comprimento_coletor;espessura_coletor;
Largura_placa; Comprimento_placa; d_cp; espessura_placa; Tubo_diam_i; Tubo_diam_ext;
espessura_isol_base)
if (Largura_coletor<Largura_placa) then CALL ERROR(' A largura da placa absorvedora
(Largura_placa) é maior do que a largura do coletor (Largura_coletor).';Largura_placa)
if (Comprimento_coletor<Comprimento_placa) then CALL ERROR(' O comprimento da
placa absorvedora (Comprimento_placa) é maior do que o comprimento do coletor
(Largura_coletor);Comprimento_placa)
espessura_tot = d_cp + espessura_placa + Tubo_diam_i + espessura_isol_base
if (espessura_coletor<espessura_tot) then CALL ERROR(' A espessura do coletor
(espessura_coletor) é menor do que o somatório dos dados(d_cp + espessura_placa +
Tubo_diam_i + espessura_isol_base).';espessura_coletor)
if (Tubo_diam_ext<Tubo_diam_i) then CALL ERROR(' O diâmetro externo do tubo deve ser
maior do que o interno.';Tubo_diam_ext)
analise_dim_coletor = 0
End
```

“Analisando as propriedades óticas, verifica a coerência de emitância e transmitância da cobertura cuja soma nunca pode ser maior que 1 (100%)”

```
Function analise_prop_oticas(epsilon_IR_c1; tau_IR_c1)
prop_otica = epsilon_IR_c1+tau_IR_c1
if (prop_otica > 1) then CALL ERROR('A Emitancia + transmitancia da cobertura 1 deve ser
menor ou igual a 1.';epsilon_IR_c1)
```

analise_prop_oticas = 0

End

“Reynolds, Prandtl e Nusselt”

Procedure h_tubo_DELTAP(Q_dot; D; L; T; P; Num_tubos : m_dot; C_p; h; DELTAP; Re;
DELTAP_1; DELTAP_2; DELTAP_total)

C_p_ = SPECHEAT(Water; T=T; P=P)

mu_ = VISCOSITY(Water; T=T; P=P)

k_ = CONDUCTIVITY(Water; T=T; P=P)

rho_ = DENSITY(Water; T=T; P=P)

rho=rho_ “densidade da água”

m_dot = rho*Q_dot “razão de fluxo máximo”

C_p = C_p_*convert(kJ; J) “calor específico da água”

mu = mu_ “viscosidade da água”

k_agua = k_ “condutividade térmica da água”

A_tubo = pi*D^2/4*Num_tubos “área transversal total de escoamento”

u = Q_dot/A_tubo “velocidade do fluido em m/s”

D_h=4*(pi*D^2/4)/(pi*D)

Re=rho*u*D_h/mu “número de Reynolds

Pr = mu*C_p/k_agua “número de Prandtl”

“para fluxo turbulento, camada limite hidrodinâmica”

if (Re > 2300) then

fator_atrito= (0,79*ln(Re)-1,64)^(-2)

Nusselt_turb = ((fator_atrito/8)*(Re-1000)*Pr)/(1,07+12,7*sqrt(fator_atrito/8)*(Pr^(2/3) -
1)*((mu/mu)^0,11))

Nusselt = Nusselt_turb*(1+(D/L)^0,7)

else

fator_atrito= 64/Re

“Para fluxo laminar (para este caso é assumido um fluxo de calor constante e totalmente desenvolvido)”

a = 0,00172

b = 0,00281

m = 1,66

$n = 1,29$

$Nusselt = 4,4 + a \cdot (Re \cdot Pr \cdot D/L)^m / (1 + b \cdot (Re \cdot Pr \cdot D/L)^n)$

“Constante 4,4 para fluxo de calor constante”

Endif

“Coeficiente de transferência de calor para o fluido água”

$h = Nusselt \cdot k_{\text{agua}} / D$

“Perdas de pressão”

$DELTA P_1 = \rho \cdot f_{\text{atrito}} \cdot L \cdot u^2 / (2 \cdot D)$ “perda de pressão distribuída”

$K_{\text{pressão}} = 0,5$ “coeficiente de perda localizada em cantos vivos”

$DELTA P_2 = \rho \cdot K_{\text{pressão}} \cdot D \cdot u^2 / (2 \cdot D)$ “perda de carga no canto de entrada da tubulação”

$DELTA P = DELTA P_1 + DELTA P_2$ “perda de pressão no tubo”

$DELTA P_{\text{total}} = DELTA P \cdot \text{Num_tubos}$ “perda total no sistema”

END

“Produto da transmitância-absortância”

Function TauAlpha_(Ncoberturas; theta_1; KL_c1; n_c1; Alpha_n)

if (Ncoberturas = 0) then

$\tau = 1$ “transmitância total”

$\rho_d = 0$ “refletância nula”

Endif

if (Ncoberturas = 1) then

Call Componente_otica_(theta_1; KL_c1; n_c1 : Tau_perp; Tau_para; a; b; c; d)

“transmitância média entre paralela e perpendicular”

$\tau = (\tau_{\text{perp}} + \tau_{\text{para}}) / 2$

“padronizando ângulo de refletância a 60 graus”

Call Componente_otica_(60; KL_c1; n_c1 : a; b; RHO_perp; RHO_para; c; d)

“refletância difusa”

$\rho_d = (RHO_{\text{perp}} + RHO_{\text{para}}) / 2$

Endif

“Dependência angular da absortância da placa”

```
Abs\Abs_n_=1,0000-1,5879e-3*theta_1+2,7314e-4*theta_1^2-2,3026e-
5*theta_1^3+9,0244e-7*theta_1^4-1,8000e-8*theta_1^5+1,7734e-10*theta_1^6-6,9937e-
13*theta_1^7
```

“Produto da dependência angular e absorvência da placa coletora”

```
alpha = Abs\Abs_n_*Alpha_n
TauAlpha_ = (tau*alpha)/(1-(1-Alpha)*rho_d)
END
```

“Cálculo das componentes paralelas e perpendiculares das propriedades óticas”

```
Procedure Componente_otica_(theta_1;KL;n : Tau_perp; Tau_para; RHO_perp; RHO_para;
ALPHA_perp; ALPHA_para)
theta_1 = max(theta_1; 0,0001) “somente para dar condição de zero na
entrada da incidência angular – possibilitar o cálculo”
theta_2= arcsin(sin(theta_1)/n)
R_perp=(sin(theta_2-theta_1)/sin(theta_2+theta_1))^2
R_para=(tan(theta_2-theta_1)/tan(theta_2+theta_1))^2
TAU_abs=exp(-KL/cos(theta_2))
Tau_perp = TAU_abs*(1-R_perp)^2/(1-(R_perp*TAU_abs)^2)
Tau_para = TAU_abs*(1-R_para)^2/(1-(R_para*TAU_abs)^2)
RHO_perp = R_perp*(1+TAU_abs*Tau_perp)
RHO_para = R_para*(1+TAU_abs*Tau_para)
ALPHA_perp = (1-TAU_abs)*(1-R_perp)/(1-R_perp*TAU_abs)
ALPHA_para = (1-TAU_abs)*(1-R_para)/(1-R_para*TAU_abs)
END
```

“Coeficiente de perda de calor pelo topo”

“Nenhuma cobertura”

```
Procedure U_T_0_(T_placa;T_amb;T_ceu_K;BETA;h_vento;epsilon_IR_p: U_topo; T_c1)
T_placa`=T_placa+273
q_r_pa = epsilon_IR_p*5,67e-8*(T_placa`^4-T_ceu_K^4)
q_c_pa = h_vento*(T_placa-T_amb)
```

```

q_perdido_t = q_r_pa + q_c_pa
U_topo= q_perdido_t/(T_placa-T_amb)
T_c1 = 0                                     “temperatura de cobertura nula”
END

```

“1 cobertura”

```

Procedure U_T_1_(T_placa;T_amb;T_ceu_K;BETA;h_vento;Emitt_IR_p;Emitt_IR_c1;d_cp;
TRANS_IR_c1: U_topo; T_c1)
Reflet_IR_p =1-Emitt_IR_p
Reflet_IR_c1 = 1-(Emitt_IR_c1+TRANS_IR_c1)
T_amb` = T_amb+273,15
T_placa`=T_placa+273,15
T_c`_x= (T_placa` + T_ceu_K)/2
q_1_o = 400
REPEAT
T_c` = T_c`_x
T_c = T_c`-273,15
Nu = Nu_placa_plana(BETA;T_c;T_placa;d_cp)
T_media = Max(-10; (T_placa+T_c)/2)
T_media = Min(500; T_media)
h_c_pc = Nu*Conductivity(Air;T=T_media)/d_cp  “Duffie 6.4.1”
q_c_pc = h_c_pc*(T_placa-T_c)
q_2_i = 5,67e-8*T_ceu_K^4
q_1_i = Reflet_IR_p*q_1_o+Emitt_IR_p*5,67e-8*T_placa`^4
q_1_o = TRANS_IR_c1*q_2_i+Reflet_IR_c1*q_1_i+Emitt_IR_c1*5,67e-8*T_c`^4
q_2_o = TRANS_IR_c1*q_1_i+Reflet_IR_c1*q_2_i+Emitt_IR_c1*5,67e-8*T_c`^4
T_c`_x=                                     T_c`+((q_1_i                                     -q_1_o-
q_2_o+q_2_i+h_c_pc*T_placa`+h_vento*T_amb`)/(h_vento+h_c_pc)-T_c`)*0,3
Error = abs(T_c`_x-T_c`)
UNTIL (Error < 1,0e-4)
q``_t = q_1_i-q_1_o+q_c_pc
U_topo= q``_t/(T_placa-T_amb)
T_c1 = T_c`-273,15

```

End

“Coeficiente de perda total de calor”

```

Procedure  U_L_(T_placa;T_amb;  T_ceu_K;  BETA;h_vento;Emitt_IR_p;Emitt_IR_c1;
Ncoberturas;U_base;U_lateral;d_cp; TRANS_IR_c1; emit_infra : U_L;T_c1 )
If (Ncoberturas = 0) then call U_T_0_(T_placa;T_amb;T_ceu_K;BETA;h_vento;Emitt_I
R_p;U_topo; T_c1)
if (Ncoberturas = 1) then call U_T_1_(T_placa;T_amb;T_ceu_K;BETA;h_vento;Emitt_I
R_p;Emitt_IR_c1;d_cp; TRANS_IR_c1: U_topo; T_c1)
U_L = U_topo+ U_base + U_lateral
End

```

“Número de Nusselt para convecção natural entre placas paralelas”

```

Function Nu_placa_plana(BETA;T1;T2;L_placa)
Tmedia=(T1+T2)/2
TmediaK=Tmedia+273
Rho=1/Volume(Air;T=Tmedia;P=101,3)
k=Conductivity(Air;T=Tmedia)
Nu=Viscosity(Air;T=Tmedia)/Rho
Cp=SpecHeat(Air;T=Tmedia)*1000
Alpha=k/(Rho*Cp)
Ra=max(10;9,81*abs(T2-T1)*L_placa^3/(TmediaK*Nu*Alpha))
a=1,44*(1-1708*(sin(1,8*BETA)^1,6)/(Ra*cos(BETA)))*max(0;1-(1708/(Ra*cos(BETA))))
b=max(0;(Ra*cos(BETA)/5830)^(1/3)-1)
Nu_placa_plana=1+a+b
END

```

“Diferentes geometrias-----”

“Fator de eficiência do coletor para geometria com tubos quadrados”

Function

$F^{\circ}(U_L; \text{cond_placa}; \text{espessura_placa}; \text{Esp_tubos}; \text{Tubo_diam_i}; \text{Tubo_diam_ext}; \text{Cond_solda}; h_{fi})$

$m = (U_L / (\text{cond_placa} * \text{espessura_placa}))^{,5}$

$F = \tanh(m * (\text{Esp_tubos} - \text{Tubo_diam_ext}) / 2) / (m * (\text{Esp_tubos} - \text{Tubo_diam_ext}) / 2)$

$F^{\circ} = (1/U_L) / (\text{Esp_tubos} * (1/(U_L * (\text{Tubo_diam_ext} + (\text{Esp_tubos} - \text{Tubo_diam_ext}) * F)) + 1/(\text{Tubo_diam_i} * h_{fi})))$

END

“Fator de remoção de calor do coletor para geometria com tubos quadrados”

Function $F_{R_}(m_dot; C_P; A; U_L; F^{\circ})$

$\text{fator_fluxo} = m_dot * C_P / (A * U_L * F^{\circ})$

$F^{\circ} = \text{fator_fluxo} * (1 - \exp(-1/\text{fator_fluxo}))$

$F_{R_} = F^{\circ} * F^{\circ}$

END

“-----”

“Fator de eficiência do coletor para geometria com tubos redondos”

Function $F^{\circ}(U_L; \text{cond_placa}; \text{espessura_placa}; \text{Esp_tubos}; \text{Tubo_diam_i};$

$\text{Tubo_diam_ext}; \text{Cond_solda}; h_{fi})$

$m = (U_L / (\text{cond_placa} * \text{espessura_placa}))^{,5}$

$F = \tanh(m * (\text{Esp_tubos} - \text{Tubo_diam_ext}) / 2) / (m * (\text{Esp_tubos} - \text{Tubo_diam_ext}) / 2)$

$F^{\circ} = (1/U_L) / (\text{Esp_tubos} * (1/(U_L * (\text{Tubo_diam_ext} + (\text{Esp_tubos} - \text{Tubo_diam_ext}) * F)) + 1/(\text{Cond_solda} + 1/(\pi * \text{Tubo_diam_i} * h_{fi}))))$

END

“Fator de remoção de calor do coletor para geometria com tubos redondos”

Function $F_{R_}(m_dot; C_P; A; U_L; F^{\circ})$

$\text{fator_fluxo} = m_dot * C_P / (A * U_L * F^{\circ})$

$F^{\circ} = \text{fator_fluxo} * (1 - \exp(-1/\text{fator_fluxo}))$

$F_{R_} = F^{\circ} * F^{\circ}$

END

“-----”

“PROGRAMA PRINCIPAL *****”

“Analisando as dimensões do coletor”

```
xx      =      analise_dim_coletor(Largura_coletor;Comprimento_coletor;espessura_coletor;
Largura_placa; Comprimento_placa; d_cp; espessura_placa; Tubo_diam_i; Tubo_diam_ext;
espessura_isol_base)
```

“analisa a coerência dos dados de entrada”

“Analisando as propriedades óticas”

```
yy = analise_prop_oticas(epsilon_IR_c1; tau_IR_c1)
```

“apenas ajuste das componentes óticas para variáveis das funções”

```
TRANS_IR_c1=tau_IR_c1
```

```
Emitt_IR_c1 = epsilon_IR_c1
```

```
emit_infra = epsilon_IR_c1
```

```
Emitt_IR_p = epsilon_IR_p
```

“Calculando o coeficiente de extinção de luz”

```
Reflet_c1=((n_c1-1)/(n_c1+1))^2
```

```
n_c1*sin(theta_1)=sin(theta_2)
```

```
TAU_abs_c1 = exp(-KL_c1/cos(theta_2))
```

```
tau_s_c1 = TAU_abs_c1*(1-Reflet_c1)^2/(1-(Reflet_c1*TAU_abs_c1)^2)
```

“índice de refração da luz (n_c1) e transmitância (tau_s_c1) para obter o coeficiente de extinção da luz (KL_c1)”

“convertendo a taxa de massa”

```
Q_dot = Q_dot_L*convert(L/min; m^3/s)
```

“convertendo unidades”

“Áreas”

```
A_c = Largura_coletor*Comprimento_coletor
```

```
A_p = Largura_placa*Comprimento_placa
```

```
A_contorno = espessura_coletor*2*(Comprimento_coletor+Largura_coletor)
```

“Espaçamento entre tubos”

```
N_tubos = Largura_placa/Esp_tubos
```

“Temperatura do céu”

$T_{dp} = \text{DEWPOINT}(\text{AirH}_2\text{O}; T=T_{amb}; P=101,3; R = \text{Umidade_relativa}/100)$
 $T_{amb_K} = T_{amb} + 273,15$
 $T_{ceu_K} = (T_{amb_K} * (,711 + ,0056 * T_{dp} + ,000073 * T_{dp}^2 + ,013 * \cos(15 * 180)))^{,25}$

“Radiação absorvida”

$I_{dT} = G_T * I_{dI_T} / 100$
 $I_d = I_{dT} / (1 + \cos(\text{BETA})) / 2$
 $\rho_g = 0,4$
 $I_{gT} = (I_{bT} + I_d) * \rho_g * (1 - \cos(\text{BETA})) / 2$
 $I_{bT} = \max(0; I_{bT})$
 $G_T = I_{bT} + I_{dT} + I_{gT}$

“Componentes ópticas”

$\tau_{alpha_b} = \text{TauAlpha_}(N_{coberturas}; \theta_1; KL_{c1}; n_{c1}; \text{Alpha}_n)$
 $\theta_{1_d} = 59,7 - 0,1388 * \text{BETA} + 0,001497 * \text{BETA}^2$
 $\tau_{alpha_d} = \text{TauAlpha_}(N_{coberturas}; \theta_{1_d}; KL_{c1}; n_{c1}; \text{Alpha}_n)$
 $\theta_{1_g} = 90 - 0,5788 * \text{BETA} + 0,002693 * \text{BETA}^2$
 $\tau_{alpha_g} = \text{TauAlpha_}(N_{coberturas}; \theta_{1_g}; KL_{c1}; n_{c1}; \text{Alpha}_n)$
 $S = I_{bT} * \tau_{alpha_b} + I_{dT} * \tau_{alpha_d} + I_{gT} * \tau_{alpha_g}$

“Calculando as perdas pela ação do vento”

$Pr[1] = \text{Prandtl}(\text{Air}; T=T_{amb})$
 $Pr_w = Pr[1]$
 $D_{h_vento} = 4 * \text{Comprimento_coletor} * \text{Largura_coletor} / (2 * (\text{Comprimento_coletor} + \text{Largura_coletor}))$
 $\text{Density} = 1 / \text{Volume}(\text{Air}; T=T_{amb}; P=101,3)$
 $\text{Visc} = \text{Viscosity}(\text{Air}; T=T_{amb})$
 $Re_w = \text{Density} * \text{Velocidade_vento} * D_{h_vento} / \text{Visc}$
 $Nu = ,86 * Re_w^{,5} * Pr_w^{,333}$ “Pr=0,7”
 $K_{ar_Tamb} = \text{Conductivity}(\text{Air}; T=T_{amb})$
 $h_{vento} = \max(Nu * \text{Conductivity}(\text{Air}; T=T_{amb}) / D_{h_vento})$

“Coeficientes de perda de calor pelo isolamento de base e lateral”

$U_{base} = \text{cond_isol_base} / \text{espessura_isol_base} * (A_c / A_p)$

$$U_{\text{lateral}} = (\text{cond_isol_lateral}/\text{espessura_isol_lateral}) * (A_{\text{contorno}}/A_{\text{p}})$$

“Fator de eficiência e remoção de calor do coletor”

$$F^{\circ} = F^{\circ}(U_L; \text{cond_placa}; \text{espessura_placa}; \text{Esp_tubos}; \text{Tubo_diam_i}; \text{Tubo_diam_ext}; \text{Cond_solda}; h_{\text{fi}})$$

$$F_R = F_R(m_{\text{dot}}; C_p; A_p; U_L; F^{\circ})$$

$$F^{\circ\circ} = F_R/F^{\circ}$$

“Calculando a temperatura da placa”

$$T_{\text{placa}} = T_{\text{in}} + Q_u / (A_p * F_R * U_L) * (1 - F_R)$$

“Calculando a temperatura do fluido”

$$T_{\text{fl}} = T_{\text{in}} + Q_u / (A_p * F_R * U_L) * (1 - F^{\circ\circ})$$

“Calculando h_{fi} ”

$$\text{Call } h_{\text{tubo_DELTAP}}(Q_{\text{dot}}; \text{Tubo_diam_i}; \text{Comprimento_placa}; T_{\text{fl}}; P_{\text{in}}; N_{\text{tubos}} : m_{\text{dot}}; C_p; h_{\text{fi}}; \text{DELTAP}; Re; \text{DELTAP_1}; \text{DELTAP_2}; \text{DELTAP_total}) \quad \text{“avalia regime de escoamento”}$$

“Calculando as perdas globais”

$$\text{Call } U_L(T_{\text{placa}}; T_{\text{amb}}; T_{\text{ceu_K}}; \text{BETA}; h_{\text{vento}}; \text{Emitt_IR_p}; \text{Emitt_IR_c1}; N_{\text{coberturas}}; U_{\text{base}}; U_{\text{lateral}}; d_{\text{cp}}; \text{TRANS_IR_c1}; \text{emit_infra} : U_L; T_{\text{c1}})$$

“Ganho de calor útil no coletor”

$$\text{ganho_energia} = Q_u / A_p * 10E-3 [\text{MJ/h}]$$

$$Q_u = \max((S * A_p - U_L * A_p * (T_{\text{placa}} - T_{\text{amb}})); 0)$$

“Temperatura de saída do fluido”

$$Q_u = m_{\text{dot}} * C_p * (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad \text{“balanço de energia”}$$

“Temperatura média do fluido”

$$T_{\text{med}} = (T_{\text{in}} + T_{\text{out}}) / 2$$

“Eficiência instantânea do coletor”

$$\eta_i = Q_u / (A_p * G_T) * 100$$

$$\Delta T_{G_T} = (T_{in} - T_{amb}) / G_T$$

“Produto da transmitância-absorptância para ângulo de incidência normal”

$$\tau_{\alpha_n} = \tau_{\alpha}(N_{coberturas}; 0; KL_{c1}; n_{c1}; \alpha_n)$$

“Calculando as temperaturas médias para plotagem”

$$\Delta T = T_{out} - T_{in}$$

$$\Delta T_{G_T_{av}} = (T_{med} - T_{amb}) / G_T$$

“Temperatura de estagnação do sistema”

$$S = U_L * (T_{stag_p} - T_{amb})$$

$$N_{coberturas} = 1$$

“Número de coberturas”