



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONTROLE
E AUTOMAÇÃO E TÉCNICAS FUNDAMENTAIS**



BÁRBARA DE MORAIS MENDES

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE PROJETO NO
DESEMPENHO DE COLETORES SOLARES PLANOS**

**OURO PRETO - MG
2017**

BÁRBARA DE MORAIS MENDES

Barbaramendesbh1@hotmail.com

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE PROJETO NO
DESEMPENHO DE COLETORES SOLARES PLANOS**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: Dr. Luís Antônio Bortolaia

**OURO PRETO – MG
2017**

M538e Mendes, Bárbara de Morais.
Estudo da influência de parâmetros de projeto no desempenho de coletores solares planos [manuscrito] / Bárbara de Morais Mendes. - 2017.

47f.: il.: grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Luis Antônio Bortolaia.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. Energia solar - Calor - Transmissão. 2. Aquecimento solar - Coletores solares. 3. Água - Aquecimento solar. I. Bortolaia, Luis Antônio. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 681.5

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO E TÉCNICAS FUNDAMENTAIS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA

Aos trinta e um dias do mês de março do ano de dois mil e dezessete às 10 horas, na sala 27, localizada na Escola de Minas - Campus Ouro Preto - UFOP, foi realizada a defesa de monografia da aluna **Bárbara de Moraes Mendes** sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Prof^a. PhD. Elisângela Martins Leal, Prof. DSc. Milton Realino de Paula e Prof. DSc. Luís Antônio Bortolaia. A candidata apresentou o trabalho intitulado: “**Estudo da influência de parâmetros de projeto no desempenho de coletores solares planos**”, sob orientação do Prof. DSc. Luís Antônio Bortolaia. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram a aluna aprovada com a nota/conceito 8,6.

Ouro Preto, 31 de Março de 2017.

Prof. DSc. Luís Antônio Bortolaia
Professor Orientador

Prof^a. PhD. Elisângela Martins Leal
Professora Avaliadora

Prof. DSc. Milton Realino de Paula
Professor Avaliador

Bárbara Moraes Mendes
Aluna

AGRADECIMENTO

Agradeço em primeiro lugar a Deus que iluminou o meu caminho durante esta caminhada.

Agradeço aos meus pais, Mário e Kenia, meus maiores exemplos. Obrigada pelo carinho, dedicação e apoio incondicional. À minha irmã Isabela pela amizade e cumplicidade. Ao meu namorado, Flávio, pelo amor, paciência e por sua capacidade de me trazer paz. Agradeço à Lidiante, ao Maxsuell, à Nivia e todos os meus colegas da Engenharia Mecânica e de Ouro Preto pelo companheirismo e força para que eu concluísse o meu curso.

Agradeço ao meu professor orientador Luis Bortolaia, pela paciência e incentivo. Agradeço também todos os professores e funcionários da UFOP que de alguma forma me ajudaram a realizar esse sonho.

Agradeço os meus familiares, amigos de Belo Horizonte e todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão próximos de mim me apoiando em todas as decisões. Meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

Devido à alta incidência de radiação solar no Brasil o uso de coletores solares é uma alternativa para diminuir o gasto de energia elétrica, permitindo a redução da necessidade de outras fontes de energia que possuem um alto custo e maiores riscos ambientais e sociais. Com esse intuito, o presente trabalho pretende analisar o desempenho de coletores solares planos para aquecimento de água residencial frente à variação de parâmetros de projeto que influencia no mesmo. O estudo está fundamentado quanto ao objetivo em uma pesquisa descritiva, quanto a pesquisa será quantitativa, quanto aos aspectos técnicos em uma pesquisa bibliográfica ou documental. A partir do equacionamento matemático realizado através do balanço de energia no coletor solar plano, as equações foram implementadas no *software Excel* para determinação do rendimento ótico, do coeficiente de perdas globais, do rendimento instantâneo e do calor útil. Com esses valores, os parâmetros de espessura da placa absorvedora, de distância entre o absorvedor e a cobertura, do isolamento lateral, da emissividade do absorvedor, da condutividade do absorvedor, do coeficiente de transferência de calor no interior dos tubos, da distância entre tubos, da velocidade do vento, da radiação global e do isolamento posterior foram variados e analisados quanto à sua influência no coletor solar plano. Nos resultados é possível perceber que os parâmetros que mais influenciam no desempenho do coletor solar são a distância entre o absorvedor e a cobertura, a emissividade do absorvedor, a condutividade térmica do absorvedor, a distância entre tubos, a velocidade do vento e a radiação solar global.

Palavras-chave: Transferência de calor, coletor solar plano, aquecimento de água, rendimento ótico, coeficiente de perdas globais, rendimento instantâneo, calor útil.

ABSTRACT

Due to the high incidence of solar radiation in Brazil, the use of solar collectors is an alternative to reduce the cost of electric energy, allowing the reduction of the need for other energy sources that have a high cost and greater environmental and social risks. Therefore the present work intends to analyze the performance of flat plate solar collectors for residential water heating in front of the variation of design parameters that influence the same. The present study is based on the objective in a descriptive research, when the research will be quantitative, as for the technical aspects a bibliographical or documentary research. The equations were implemented in the Excel software to determine the optical efficiency, the coefficient of global losses, the instantaneous efficiency and the useful heat. With these values, the thickness parameters of the absorber plate, the distance between the absorber and the cover, the lateral insulation, the emissivity of the absorber, the conductivity of the absorber, the heat transfer coefficient inside the tubes, the distance between tubes, wind speed, global radiation and subsequent insulation were varied, and analyzed for their influence on the flat solar collector. In the results, it is possible to notice that the parameters that most influence the performance of the solar collector are the distance between the absorber and the cover, the emissivity of the absorber, the thermal conductivity of the absorber, the distance between tubes, wind speed and solar radiation global.

Keywords: Heat transfer, flat solar collector, water heating, optical efficiency, global loss coefficient, instantaneous efficiency, useful heat.

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c	Área do Coletor	m^2
A_t	Área total	m^2
C_{coletor}	Comprimento do Coletor	m
C_b	Condutância do material que liga a tubulação ao absorvedor (Bond conductance)	W/m^2K
D	Diâmetro externo dos tubos ascendentes	m
F	Fator de eficiência da aleta	-
F'	Fator de eficiência do coletor solar	-
g	Constante Gravitacional	m/s^2
G_T	Radiação solar global	W/m^2
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção	W/m^2K
h_{fi}	Coefficiente de transferência de calor no interior de tubos	W/m^2K
h_w	Coefficiente de transferência de calor por convecção devido ao vento	W/m^2K
k	Condutividades de Isolante	W/mK
k_{abs}	Condutividade do material absorvedor	W/mK
L	Distância entre absorvedor e cobertura	m
L_g	Espessura da cobertura de vidro	m
L_{coletor}	Largura do Coletor	m
N	Número de Coberturas	-
NT	Número de tubos	-
P_{coletor}	Perímetro do coletor	m
q_x	Fluxo de calor	W/m^2

Q_u	Ganho útil de energia de um coletor solar plano	W
T_a	Temperatura Ambiente	K
T_p	Temperatura média da placa absorvedora	K
T_i	Temperatura do fluido na entrada do coletor	K
T_s	Temperatura da superfície	K
T_∞	Temperatura do fluido	K
T_o	Temperatura do fluido na saída do coletor	K
T_m	Temperatura média do fluido no interior do coletor	K
U_b	Perdas de calor pela base do coletor	W/m ² K
U_L	Coefficiente global de perda de energia pelo coletor	W/m ² K
U_{lat}	Perdas de calor pela lateral do coletor	W/m ² K
U_t	Perdas de calor pelo topo	W/m ² K
V_w	Velocidade do vento	m/s
W	Distância entre tubos	m

Símbolos gregos

α	Absortividade	-
α	Difusividade Térmica	m ² /s
β	Inclinação Média do coletor	°
ϵ_g	Emissividade do vidro	-
ϵ_p	Emissividade da placa absorvedora	-
σ	Constante de Stefan Boltzman	W/m ² K ⁴
ν	Viscosidade Cinemática	m ² /s

δ	Espessura do absorsor	m
δ_1	Espessura do isolamento lateral	m
δ_2	Espessura do isolamento posterior	m
τ	Transmitância do vidro	-
η_i	Rendimento Instantâneo	-
$F'\eta_0$	Rendimento ótico	-

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Mecanismo de transferência de calor por condução.....	5
FIGURA 2	Mecanismo de transferência de calor por convecção.....	7
FIGURA 3	Sistema de Aquecimento Solar.....	10
FIGURA 4	Seção transversal de um coletor solar de placa plana básico.....	11
FIGURA 5	Seção tubo-absorção.....	13
FIGURA 6	Detalhe esquemático da placa e tubo de um coletor solar.....	13
FIGURA 7	Resistências térmicas de um coletor de cobertura dupla.....	14
FIGURA 8	Diagrama materiais e métodos.....	22
FIGURA 9	Vista superior de um coletor solar plano.....	26
FIGURA 10	Seção transversal de um coletor solar plano.....	27
FIGURA 11	Planilha do <i>Software Excel</i> com dados iniciais de propriedades dos materiais e outras variáveis do coletor.....	27
FIGURA 12	Planilha do <i>Software Excel</i> com dados iniciais das dimensões dos coletores, espessura dos materiais e tubo coletor.....	28
FIGURA 13	Planilha <i>Software Excel</i> com resultados obtidos.....	28
FIGURA 14	Planilha <i>Software Excel</i> para variação de parâmetros.....	29
FIGURA 15	Influência da variação da espessura da placa absorção no rendimento ótico e na perda global.....	30
FIGURA 16	Influência da variação da espessura da placa absorção no calor útil e no rendimento instantâneo.....	31
FIGURA 17	Influência da variação da distância entre o absorção e a cobertura no rendimento ótico e na perda global.....	32
FIGURA 18	Influência da variação da espessura da placa absorção no calor útil e no rendimento instantâneo.....	32
FIGURA 19	Influência da variação do isolamento lateral no rendimento ótico e na perda global.....	33
FIGURA 20	Influência da variação do isolamento lateral no calor útil e no rendimento instantâneo.....	34
FIGURA 21	Influência da variação da emissividade do absorção no rendimento ótico e na perda global.....	34

FIGURA 22	Influência da variação da emissividade do absorvedor no calor útil e no rendimento instantâneo.....	35
FIGURA 23	Influência da variação da condutividade do absorvedor no rendimento ótico e na perda global.....	36
FIGURA 24	Influência da variação da condutividade do absorvedor no calor útil e no rendimento instantâneo.....	36
FIGURA 25	Influência da variação do coeficiente de transferência de calor no interior dos tubos no rendimento ótico e na perda global.....	37
FIGURA 26	Influência da variação do coeficiente de transferência de calor no interior dos tubos no calor útil e no rendimento instantâneo.....	38
FIGURA 27	Influência da variação da distância entre tubos no rendimento ótico e na perda global	39
FIGURA 28	Influência da variação da distância entre tubos no calor útil e no rendimento instantâneo.....	39
FIGURA 29	Influência da variação da velocidade do vento no rendimento ótico e na perda global.....	40
FIGURA 30	Influência da variação da velocidade do vento no calor útil e no rendimento instantâneo.....	41
FIGURA 31	Influência da variação da radiação solar global no rendimento ótico e na perda global.....	41
FIGURA 32	Influência da variação da radiação solar global no calor útil e no rendimento instantâneo.....	42
FIGURA 33	Influência da variação do isolamento posterior no rendimento ótico e na perda global.....	43
FIGURA 34	Influência da variação do isolamento posterior no calor útil e no rendimento instantâneo.....	43

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Variáveis e Indicadores	23
TABELA 2	Propriedades dos materiais e outras variáveis do coletor.....	25
TABELA 3	Dimensões do coletor.....	26

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema	1
1.2	Justificativa	2
1.3	Objetivos	3
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos	3
1.4	Estrutura do Trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Mecanismos de Transferência de Calor.....	5
2.1.1	Condução	5
2.1.2	Convecção.....	6
2.1.3	Radiação	8
2.1.4	Resistência térmica	9
2.2	Coletor Solar	10
2.2.1	Introdução	10
2.2.2	Equacionamento do coletor solar.....	11
3	METODOLOGIA	20
3.1	Tipos de pesquisa.....	20
3.2	Materiais e Métodos	22
3.3	Variáveis e Indicadores.....	23
3.4	Instrumentos de Coleta de Dados	23
3.5	Tabulação de dados.....	24
3.6	Considerações Finais do Capítulo	24
4	RESULTADOS	25
4.1	Base de dados para o cálculo	25
4.2	Cálculo inicial das perdas de calor, dos rendimentos e do ganho útil de calor	27
4.3	Influência de alguns parâmetros no desempenho do coletor solar	29
4.3.1	Variação da espessura da placa absorvedora	30
4.3.2	Variação da distância (L) entre o absorvedor e a cobertura.....	31
4.3.3	Variação do isolamento lateral	33
4.3.4	Variação da emissividade do absorvedor.....	34

4.3.5	Condutividade do absorsor	35
4.3.6	Varição do coeficiente de transferência de calor no interior dos tubos (h_{fi}).....	37
4.3.7	Varição da distância entre tubos	38
4.3.8	Varição da velocidade do vento	40
4.3.9	Varição da radiação solar global.....	41
4.3.10	Varição do isolamento posterior	42
5	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	46

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

O grande avanço tecnológico ocorrido no mundo deve-se à utilização da energia elétrica, que tornou mais simples coisas que antigamente eram consideradas complexas. Por estar presente em tarefas básicas do cotidiano das pessoas, a eletricidade se tornou de grande importância para a vida da sociedade.

De acordo com Dessbesell (2014):

A energia solar é a principal fonte de energia da Terra. No seu movimento de translação ao redor do Sol, a Terra recebe 1410 W/m^2 de energia, medição feita numa superfície normal (em ângulo reto) com o Sol. Dessa energia, aproximadamente 19% é absorvida pela atmosfera e 35% é refletida pelas nuvens. Ao passar pela atmosfera terrestre, a maior parte da energia solar está na forma de luz visível e luz ultravioleta.

Para Coelho (2011), o aproveitamento da energia solar pode ser feito de forma indireta e direta. A forma indireta abrange a energia hidráulica, biomassa, energia dos oceanos e eólica. E até mesmo energias como a do carvão e do petróleo fazem parte desse processo, pois são formadas por restos de plantas e animais que necessitam da luz solar para sobreviver. A forma direta envolve o aproveitamento da radiação solar como fonte de energia e tem várias aplicações, tais como o aquecimento de fluidos e ambientes e a geração de potência mecânica ou elétrica. Pode ainda ser convertida diretamente em energia elétrica, por meio de efeitos sobre determinados materiais, entre os quais se destacam o termoeletrico e o fotovoltaico.

O Brasil se localiza próximo à linha do Equador, logo possui alta incidência de luz solar. Para Rodrigues (2005) *apud* Faria (2007), o Brasil possui uma média anual de 280 dias de sol.

De acordo com o Balanço Energético Nacional, relatório síntese do ano base de 2015, (EPE, 2016) a distribuição de energia elétrica no Brasil é: 64,0% hidráulica, 12,9% gás natural, 8,0% biomassa, 4,8 % derivados de petróleo, 4,5% carvão e derivados, 2,4% nuclear, 3,5% eólica e 0,01% solar. Portanto, a energia hidráulica é a principal fonte de energia, que apesar de ser considerada renovável, possui impactos ambientais como alagamento de grandes áreas cultiváveis gerando impactos naturais e sociais.

De acordo com EPE (2014), em 2012, o consumo de energia elétrica nas residências brasileiras ficou distribuído da seguinte forma: 1.382 kWh/domicílio (73,9%) para o consumo de equipamentos elétricos, 337 kWh/domicílio (18%) relativo ao consumo de

chuveiro elétrico, 302 kWh/domicílio (16,2%) para a iluminação e 150 kWh/domicílio (8%) para condicionamento ambiental.

Portanto, verifica-se que há um grande consumo de energia para aquecimento de água de chuveiros elétricos que poderá ser suprido com o uso da energia solar, o que permitirá a diminuição da necessidade de outras fontes de energia que são mais caras e possuem maior índice de riscos ambientais e sociais.

Diante deste contexto, tem-se a seguinte problemática:

Como analisar o desempenho de coletores solares planos para aquecimento de água residencial frente à variação de parâmetros de projeto que exercem influência no mesmo?

1.2 Justificativa

De acordo com Faria (2007), as fontes de energia renováveis são responsáveis por oferecer inúmeras vantagens em relação as fontes de energias não renováveis, como por exemplo, assegurar a sustentabilidade da geração de energia a longo prazo, reduzir emissões atmosféricas de poluentes, criar novas oportunidades de empregos e diminuir os danos irreversíveis na natureza. Portanto, as fontes de energia solar, eólica e de biomassa abundante, surgem como substituição das energias não renováveis.

O Brasil está localizado em uma faixa onde há alta incidência de luz solar, de acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006), incide uma média de 1500 kWh/m² a 2500 kWh/m² de irradiação solar em qualquer região do Brasil. Portanto o uso de energia solar seria um dos melhores meios para utilizar a energia renovável.

Para Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental (2013), em regiões menos ensolaradas no Brasil, os valores de irradiação solar incidente são 40% maiores do que na região mais ensolarada da Alemanha. Porém ela possui um maior número de projetos de incentivo para aproveitamento de recursos solares, sendo atualmente um país bem sucedido no desenvolvimento da energia solar.

De acordo com EPE (2014), em 2012, 18% da energia elétrica consumida nas residências brasileiras foi referente ao consumo de chuveiro elétrico e 4,7% das casas contavam com aquecedores solares. Portanto, a quantidade de aquecedores solares de água

instalados no Brasil foi de 41,0 m²/1.000 habitantes em 2012. Com isso foi possível evitar o consumo de 1.081 GWh, o que representou 0,9% da demanda elétrica do setor residencial.

Para o EPE (2014), essa energia economizada em 2012 pode parecer pequena, mas como está associada ao aquecimento de água, ela se torna relevante. A energia não consumida corresponde a não se precisar utilizar uma usina hidrelétrica de 225 MW.

Assim, o uso de aquecedores solares seria excelente para diminuir o gasto de energia elétrica e beneficiar o sistema de geração e distribuição de energia deslocando as urgências de grandes investimentos de recursos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Analisar o desempenho de coletores solares planos frente à variação dos parâmetros de influência no mesmo.

1.3.2 Específicos

- Realizar revisão bibliográfica sobre os mecanismos de Transferência de Calor e coletores solares planos para aquecimento de água;
- Realizar modelagem matemática para o projeto do coletor através da aplicação do balanço de energia no coletor solar;
- Aplicar a modelagem matemática em um estudo de caso típico, variando os principais parâmetros que influenciam no desempenho do coletor solar;
- Analisar os resultados.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos, onde no primeiro capítulo é apresentada a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e seus objetivos geral e específicos. O segundo capítulo apresentará a revisão bibliográfica sobre os mecanismos de Transferência de Calor e um estudo sobre os coletores solares planos que contará com conceitos e teorias a respeito dos assuntos, bem como trata sobre a construção e aplicação da modelagem matemática a ser utilizada na análise do coletor. No capítulo três será apresentada

a metodologia da pesquisa. No capítulo quatro serão analisados os resultados obtidos e no último capítulo será apresentada a conclusão do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo serão abordados os três mecanismos de transferência de calor (condução, convecção e radiação térmica) e uma exposição do coletor solar.

2.1 Mecanismos de Transferência de Calor

De acordo com Incropera (2008), “Transferência de calor (ou calor) é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço”. Existem três tipos de mecanismos/processos de transferência de calor: condução, convecção e radiação térmica.

2.1.1 Condução

Para Incropera (2008), a condução é a transferência de calor através de um meio estacionário (sólido ou fluido) devido a um gradiente de temperatura no mesmo (Figura 1). Pode ser vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância devido às interações entre partículas.

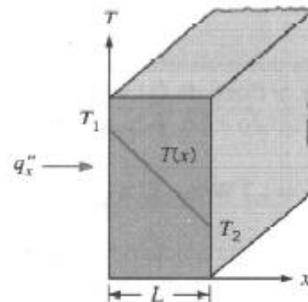


Figura 1. Mecanismo de transferência de calor por condução
Fonte: INCROPERA, 2008.

De acordo com Incropera (2008), a transferência de calor por condução pode ser determinada através da lei de Fourier. Para uma parede plana unidimensional o fluxo de calor é apresentado pela seguinte equação:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Sendo:

q_x'' - fluxo de calor (W/m^2);

k - condutividade térmica do material da parede (W/m.K);

$\frac{dT}{dx}$ - gradiente de temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$; K/m).

Çengel (2012) diz que “a condutividade térmica (k) é a medida da capacidade do material em conduzir calor”, propriedade importante relacionada à transferência de calor por condução. O sinal negativo é uma consequência do fato do calor ser transferido na direção da temperatura decrescente.

Para Incropera (2008), em condições de estado estacionário, onde as propriedades não variam com o tempo, e distribuição de temperaturas linear, o gradiente de temperatura é representado por:

$$q_x'' = -k \frac{T_2 - T_1}{L} = k \frac{T_1 - T_2}{L} = K \frac{\Delta T}{L} \quad (2)$$

2.1.2 Convecção

Para Incropera (2008), a transferência de calor por convecção abrange dois mecanismos. A transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório (difusão) e a transferência de energia devido ao movimento global, ou macroscópico (advecção).

Çengel (2012) afirma que quanto mais rápido for o movimento do fluido, maior a transferência de calor por convecção.

De acordo com Incropera (2008), a convecção pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento do fluido. Podendo ser forçada, onde o escoamento do fluido é causado por meios externos, como ventilador, bomba ou ventos atmosféricos (Figura 2) e convecção natural ou livre, onde o escoamento do fluido é causado por forças de empuxo, que são originadas por diferenças de densidade devido às variações de temperatura no fluido. Há processos de convecção nos quais existe a troca de calor latente, que está associada a uma mudança de fase entre os estados líquido e vapor do fluido. Por exemplo, a ebulição e a condensação.

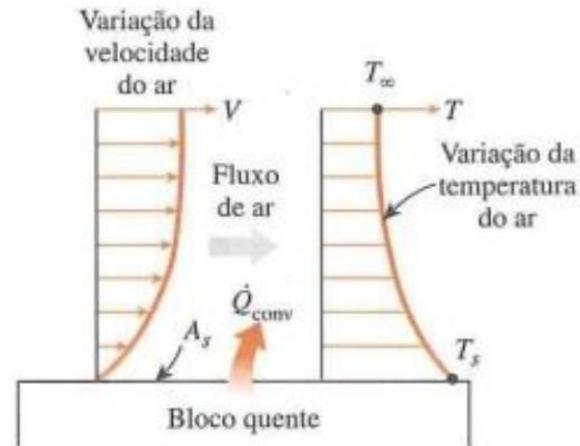


Figura 2. Mecanismo de transferência de calor por convecção
 Fonte: Çengel, 2012

Incropera (2008) diz que para todos os processos, determina-se o fluxo de calor por convecção através da lei de Newton do resfriamento. Esta lei é expressa por

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (3)$$

Sendo:

q'' - fluxo de calor convectivo (W/m^2);

T_s - temperatura da superfície ($^\circ\text{C}$, K);

T_∞ - temperatura do fluido ($^\circ\text{C}$, K);

h - coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$). De acordo com Çengel (2012), ele depende de:

- Propriedades do fluido;
- Velocidade da massa do fluido;
- Geometria da superfície;
- Natureza do escoamento do fluido.

Para Incropera (2008), quando o fluxo de calor é maior que zero, o calor é transferido a partir da superfície e quando o fluxo de calor for menor que zero, o calor é transferido para a superfície.

2.1.3 Radiação

De acordo com Incropera (2008) a radiação térmica é a energia emitida por toda matéria que se encontra em uma temperatura não nula. A emissão pode ocorrer a partir de superfícies sólidas, gases e líquidos. A energia do campo radioativo é transportada por ondas eletromagnéticas, sem necessidade de um meio material. Seu transporte é mais efetivo no vácuo.

Para Incropera (2008), o fluxo de calor emitido por uma superfície real é dado por:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (4)$$

Sendo:

E - poder emissivo da superfície (W/m^2);

ε - emissividade ($0 \leq \varepsilon \leq 1$). A emissividade depende do material da superfície e do seu acabamento;

T_s - temperatura absoluta da superfície (K);

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

Segundo Incropera (2008), a radiação incidente (G) pode incidir sobre uma superfície a partir de sua vizinhança. A taxa em que todas as radiações incidem sobre uma área unitária da superfície é designada por irradiação. Ela é classificada como absorvida, refletida ou transmitida e depende da superfície. A irradiação absorvida pode ser calculada por:

$$G_{abs} = \alpha G \quad (5)$$

Sendo:

G_{abs} - irradiação absorvida pela superfície (W/m^2);

α - propriedade radiante da superfície denominada absorvidade. $0 \leq \alpha \leq 1$;

G - radiação incidente total (W/m^2).

Em muitas aplicações é conveniente expressar a transferência de radiação líquida entre uma superfície e a vizinhança através da equação (Incropera, 2008):

$$q''_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (6) \quad 9$$

Sendo:

q''_{rad} - fluxo de radiação (W/m²).

Ou,

$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{viz}) \quad (7)$$

E q_{rad} é taxa líquida de transferência de calor por radiação (W).

Sendo h_r o coeficiente de transferência de calor por radiação dado por:

$$h_r = \varepsilon\sigma(T_s + T_{viz})(T_s^2 + T_{viz}^2) \quad (8)$$

2.1.4 Resistência térmica

De acordo com Incropera (2008), a resistência térmica (R_t) está associada à transferência de calor pela seguinte equação:

$$R_t = \frac{\Delta T}{q} \quad (9)$$

A resistência térmica condutiva é expressa por:

$$R_{t,cond} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad (10)$$

A resistência térmica convectiva será:

$$R_{t,conv} = \frac{T_s - T_\infty}{q} = \frac{1}{hA} \quad (11)$$

A resistência térmica radiante é expressa por:

$$R_{t,rad} = \frac{T_s - T_{viz}}{q_{rad}} = \frac{1}{h_r A} \quad (12)$$

2.2 Coletor Solar

2.2.1 Introdução

Para Lourenço (2012), o coletor solar é um dispositivo que absorve a energia solar e a transforma em energia térmica, aquecendo o fluido que está no equipamento. Esse fluido pode ser o ar, a água, ou outro fluido térmico.

De acordo com Duffie e Beckman (1991) coletores solares devem ter alta transmissividade e absorvidade de radiação solar. Eles perdem energia por convecção e radiação, sendo desejável que a emitância da superfície seja a mais baixa possível para reduzir as perdas por radiação.

Conforme Coelho (2012), para o aquecimento de água são necessários três sistemas: o sistema de captação, composto pelo coletor e as tubulações que acoplam o coletor ao reservatório; o sistema de armazenamento, que possui o reservatório térmico e os sistemas auxiliares; e, por último, o sistema de consumo que é constituído pela distribuição da água aquecida para o consumo final. A Figura 3 ilustra um sistema de aquecimento através de coletor solar.

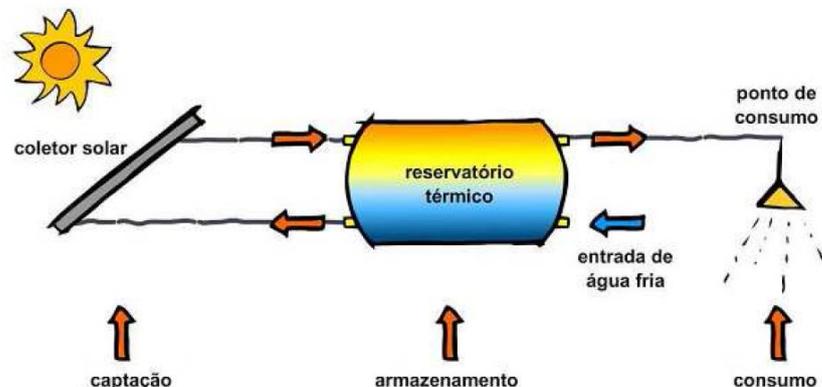


Figura 3. Sistema de Aquecimento Solar
Fonte: DASOL, 2008

Segundo Duffie e Beckman (1991), o coletor solar plano é composto dos seguintes equipamentos (Figura 4): superfície absorvedora de energia solar, normalmente de cobre ou alumínio, que transfere a energia absorvida para o fluido; cobertura de vidro na faixa de comprimentos de onda da radiação solar incidente sobre a superfície absorvedora, e opaca na região de emissão da placa absorvedora, reduzindo, assim, as perdas por convecção para a atmosfera e isolamento térmico para diminuir as perdas por condução.

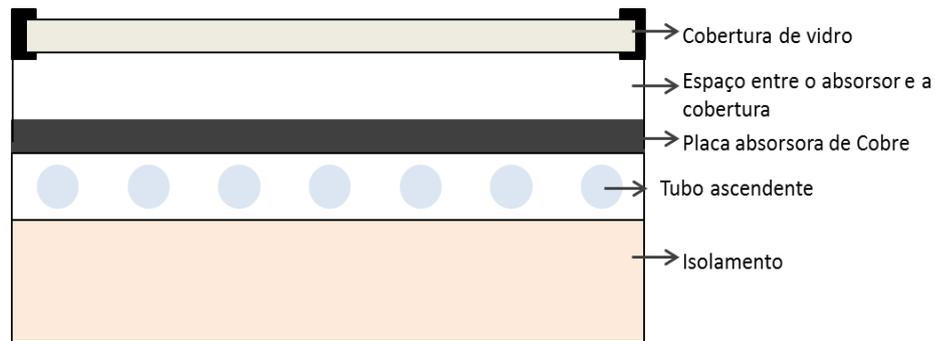


Figura 4. Seção transversal de um coletor solar de placa plana básico
Fonte: Pesquisa direta, 2017.

2.2.2 Equacionamento do coletor solar

Para Lourenço (2012), a equação básica do ganho útil de energia (Q_u) de um coletor plano é dada por:

$$Q_u = A_c F' [G_T (\tau \alpha) - U_L (T_m - T_a)] \quad (13)$$

Sendo:

A_c a área do coletor (m^2);

F' o fator de eficiência do coletor;

G_T a irradiação solar ou radiação incidente;

τ a transmissividade do vidro;

α a absorvidade;

U_L o coeficiente global de perda de energia pelo coletor (W/m^2K);

T_m a temperatura média do fluido no interior do coletor (K), representada pela média entre a temperatura do fluido na entrada no coletor (T_i) e a Temperatura do fluido na saída do coletor (T_o);

T_a a temperatura ambiente (K).

Segundo Lourenço (2012) e Duffie e Beckman (1991), o cálculo do fator de eficiência F' do coletor solar para tubos paralelos é por:

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[\frac{1}{U_L |F(W-D) + D|} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D h_i} + \frac{U_b D}{\pi D h_i C_b} - \frac{U_b D (\pi D h_i + U_b D)}{U_L |F(W-D) + D| \pi D h_i C_b} \right]} \quad (14)$$

Sendo:

F o fator de eficiência da aleta, que pode ser determinado através de:

$$F = \frac{\tanh\left(\frac{m(W-D)}{2}\right)}{\frac{m(W-D)}{2}} \quad (15)$$

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k\delta}} \quad (16)$$

k a condutividade térmica do material do absorsor (W/mK);

δ a espessura do absorsor (m).

W a distância entre tubos (m), calculado a partir de:

$$W = \frac{D + L_{coletor}}{NT + 1} \quad (17)$$

D o diâmetro externo dos tubos coletores (m);

$L_{coletor}$ a largura do coletor (m);

NT o número de tubos do coletor;

C_b a condutância do material que liga a tubagem ao absorsor (Bond conductance);

h_i o coeficiente de transferência de calor por convecção no interior dos tubos (W/m²K).

A configuração da seção tubo – absorsor é mostrada na figura 5.

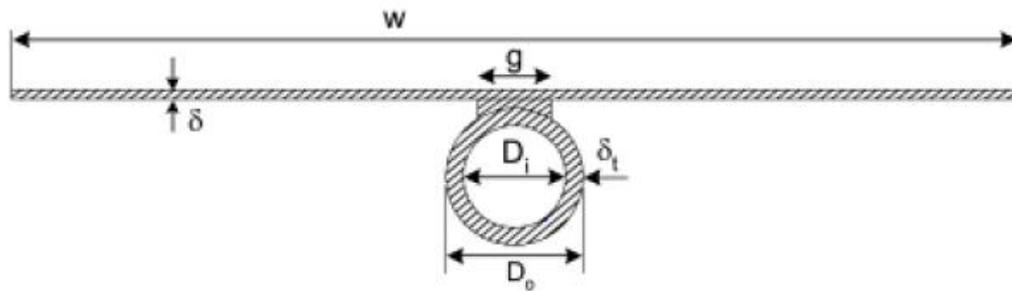


Figura 5: Seção tubo-absorvedora
 Fonte: Eisenmann (2004) *apud* Lourenço (2012).

Para o cálculo de U_L é necessário entender a figura 6, representando um coletor solar de placa dupla. Assim, se considerarmos um coletor solar com uma cobertura única, ou seja, uma única placa de vidro, parte da radiação solar incidente é absorvida e refletida pela 1ª cobertura do coletor e pela placa absorvedora, respectivamente.

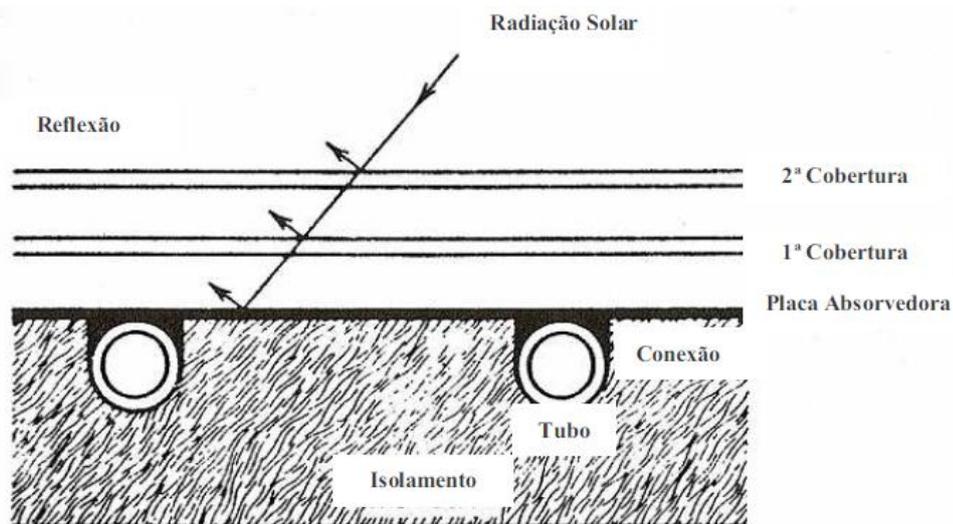


Figura 6: Detalhe esquemático da placa e tubo de um coletor solar
 Fonte: DUFFIE E BECKMAN,1991.

A figura 7(a) e 7(b) ilustra o circuito térmico equivalente, representando as resistências térmicas de um coletor solar de cobertura dupla, onde se tem na placa absorvedora de temperatura T_p a incidência solar G_T (ou S) e a transferência de calor útil Q_u à água. As resistências térmicas R_1 , R_2 e R_3 representam as resistências por convecção e radiação entre a cobertura 2 e o ambiente, entre a cobertura 1 e a cobertura 2 e entre a placa absorvedora e a cobertura 1, respectivamente. A resistência R_4 representa a condução no isolamento e a

resistência R_5 representa a convecção e a radiação entre a base do coletor e o ambiente/vizinhança.

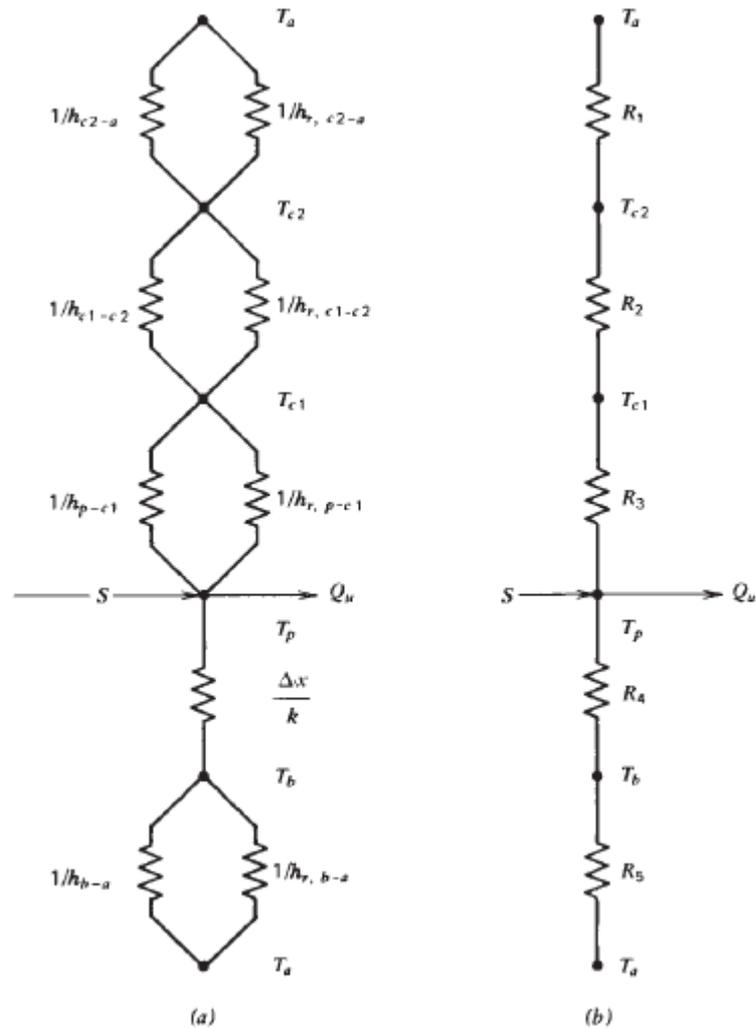


Figura 7. Resistências térmicas de um coletor de cobertura dupla
Fonte: DUFFIE; BECKMAN 1991

Através da figura (7a), pode-se escrever o circuito térmico equivalente representando as resistências térmicas de um coletor de cobertura simples, excetuando-se a resistência R_2 .

Segundo Duffie e Beckman (1991), o coeficiente global de perda de energia pelo coletor (U_L) é dado por:

$$U_L = U_t + U_b + U_{lat} \quad (18)$$

Sendo:

U_t o coeficiente de perda de calor pelo topo do coletor, na cobertura de vidro ($W/m^2 K$);

U_b o coeficiente de perda de calor pela base do coletor (W/m^2K);

U_{lat} o coeficiente de perda de calor pelas laterais do coletor (W/m^2K).

Duffie e Beckman (1991) afirmam que a perda de energia através do topo contempla a radiação e a convecção entre placas paralelas. A transferência de energia entre a placa p, e a primeira cobertura C_1 é a mesma em qualquer das outras duas tampas adjacentes e também é igual à energia perdida na tampa superior. Logo a perda através da área de topo é igual à transferência de calor da placa absorvente para a primeira tampa.

Para Duffie e Beckman (1991), a perda térmica pelo topo é calculada por:

$$q_{perda\ topo} = (h_{c,p-c1} + h_{r,p-c1})(T_p - T_{c1}) \quad (19)$$

Sendo:

$h_{c,p-c1}$ o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a placa absorvedora e a cobertura;

$h_{r,p-c1}$ o coeficiente de transferência de calor por radiação entre a placa absorvedora e a cobertura;

T_p a temperatura da placa;

T_{c1} a temperatura da cobertura.

De acordo com Duffie e Beckman (1991), o coeficiente de transferência de calor por radiação entre a placa absorvedora e a cobertura do coletor solar é expresso por:

$$h_{r,p-c} = \frac{\sigma(T_p + T_c)(T_p^2 + T_c^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \quad (20)$$

Sendo:

ε_p a emissividade da placa absorvedora;

ε_c a emissividade da cobertura.

Duffie e Beckman (1991) afirma que a Resistência R_3 (da placa absorvedora com relação à cobertura) pode ser calculada por:

$$R_3 = \frac{1}{h_{p-c}} + \frac{1}{h_{r,p-c}} \quad (21)$$

A resistência R_1 (entre a cobertura e o ambiente) é determinada através de:

$$R_1 = \frac{1}{h_{c-a}} + \frac{1}{h_{r,c-a}} \quad (22)$$

Segundo McAdams (1954) *apud* Lourenço (2012), a perda de calor por convecção entre a cobertura e o ambiente é devida à ação do vento. Para os cálculos, foi utilizada a velocidade do vento de $V_w = 3\text{m/s}$. A determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção entre a cobertura e o ar exterior em movimento é realizada através da equação:

$$h_{c-a} = h_w = 5,7 + 3,8V_w, \quad V_w \leq 5\text{m/s} \quad (23)$$

Sendo:

V_w a velocidade do vento (m/s).

Para Duffie e Beckman (1991), a perda de calor por radiação entre a cobertura e o ambiente é dada por:

$$U_{r,c-a} = \frac{\sigma \varepsilon_c (T_c + T_s)(T_c^2 + T_s^2)(T_c - T_s)}{T_c - T_a} \quad (24)$$

T_s a temperatura do céu (K);

T_c a temperatura de Cobertura (K).

Segundo com Duffie e Beckman (1991), a transmitância térmica do topo do coletor/coeficiente global de transferência de calor do topo do coletor (U_t) será o inverso da soma das resistências:

$$U_t = \frac{1}{R_1 + R_3} \quad (25)$$

Novamente, de acordo com Duffie e Beckam (1991), o cálculo da transmitância térmica do topo do coletor (U_t) é um processo iterativo que consiste em escolher um valor aleatório para a temperatura da placa, e com esse valor é possível calcular os coeficientes convectivos e de radiação. Portanto poderá ser calculado U_t na equação (26), que deve ser verificado e recalculado até a convergência. Para qualquer das duas placas adjacentes, a nova temperatura da placa j pode ser expressa em termos da temperatura da placa i como:

$$T_j = T_i - \frac{U_t(T_p - T_a)}{h_{c,i-j} + h_{r,i-j}} \quad (26)$$

Malhotra *et al.* (1981) *apud* Lourenço (2012), propõe uma equação empírica para U_t , de forma a evitar o processo iterativo de cálculo:

$$U_t = \left\{ \frac{N}{\frac{204,48}{T_p} \left[L^3 \cos\beta \frac{(T_p - T_a)}{(N + f)} \right]^{0,252} + \frac{1}{h_w}} \right\}^{-1} \quad (27)$$

$$+ \left\{ \frac{\sigma(T_p + T_a)(T_p^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_p + 0,0425(1 - \varepsilon_p))^{-1} + \left[\frac{(2N + f - 1)}{\varepsilon_g} \right] - N} \right\}$$

Sendo:

$$f = \left(\frac{9}{h_w} - \frac{30}{h_w^2} \right) \left(\frac{T_a}{316,9} \right) (1 + 0,091N);$$

N o número de coberturas de vidro;

L a distância entre absorvedor e cobertura (m);

β a inclinação do coletor solar ($^\circ$);

h_w o coeficiente de transferência de calor por convecção devido ao vento (W/m^2K).

Segundo Lourenço (2012), o coeficiente de perda de calor pela base do coletor (U_b), inclui as resistências R_4 (condução) e R_5 (convecção + radiação), mas R_5 pode ser desprezada devido ao seu valor ser muito pequeno. A perda pela base do coletor pode ser expressa por:

$$U_b = \frac{k}{\delta_2} \quad (28)$$

Sendo:

k a condutibilidade térmica do isolante (W/mK);

δ_2 a espessura do isolamento posterior (m).

Para Lourenço (2012), o coeficiente de perda de calor pelas laterais do coletor (U_{lat}) é determinada de:

$$U_{lat} = \frac{\frac{k}{\delta_1} P_{coletor} \delta_{coletor}}{A_{total}} \quad (29)$$

Sendo:

k a condutividade térmica do isolante (W/mK);

δ_1 a espessura do isolamento lateral (m);

$P_{coletor}$ o perímetro do coletor (m);

$\delta_{coletor}$ a espessura do coletor (m);

A_t a área total do coletor (m²).

Para Lourenço (2012), o rendimento ótico é determinado a partir da transmissividade da cobertura (τ) e do coeficiente da absorvidade da placa absorvora (α). É definido por:

$$\eta_0 = \tau\alpha$$

De acordo com Lourenço (2012), o rendimento instantâneo do coletor solar pode ser determinado através da razão entre o calor útil fornecido pelo coletor e a energia absorvida pelo mesmo. A equação representativa do rendimento é expressa por:

$$\eta_i = \frac{Q_u}{A_c G_T} \quad (30)$$

Substituindo o ganho útil de calor nesta equação, tem-se:

$$\eta_i = \frac{Q_u}{A_c G_T} = \frac{A_c F [G_T (\tau \alpha) - U_L (T_m - T_a)]}{A_c G_T} = F' (\tau \alpha) - F' U_L \frac{(T_m - T_a)}{G_T} \quad (31)$$

Que representa a equação aplicável, em função dos parâmetros de rendimento ótico e de perda global utilizados.

3 METODOLOGIA

Será apresentada nesse capítulo a metodologia da pesquisa. Para isso será explicitado o tipo de pesquisa utilizada, os materiais e métodos, as variáveis com seus respectivos indicadores e os instrumentos de coleta e tabulação de dados.

3.1 Tipos de pesquisa

A pesquisa pode ser classificada de acordo com os seus objetivos, a sua forma de abordagem, e quanto aos procedimentos técnicos utilizados.

De acordo com a sua forma de abordagem, ela pode ser considerada qualitativa, onde Minayo (2009) diz que: “ela trabalha com o universo dos significados, dos motivos, das aspirações, das crenças, dos valores e das atitudes”. Portanto, ela se preocupa com os aspectos da realidade que não possui representatividade numérica. Procura compreender e explicar as relações sociais.

Para Fonseca (2002), a pesquisa quantitativa é centrada na objetividade. Ela busca traduzir toda informação em números utilizando a linguagem matemática. O melhor seria utilizar a pesquisa quantitativa e qualitativa de forma conjunta, pois apresenta melhores resultados e maiores informações.

Para Gil (2002), com relação ao objetivo da pesquisa, ela pode ser reclassificada em pesquisa exploratória, na qual sua finalidade é explicitar e proporcionar maior familiaridade com o problema. A pesquisa explicativa é a que mais aprofunda o conhecimento da realidade, devido a explicar a razão das coisas em seus mínimos detalhes. Portanto é considerado o tipo mais complexo e delicado.

A pesquisa descritiva será utilizada no presente trabalho e constitui em descrever as características de fenômenos ou populações. Podem também estabelecer relações entre variáveis. Para Triviños (1987), os estudos descritivos podem ser criticados porque podem existir resultados equivocados, gerando imprecisão. Para Gil (2002), o estudo descritivo necessita que a pesquisa tenha uma precisa delimitação de técnicas, métodos, modelos e teorias para uma eficaz coleta e análise dos dados obtidos.

Quanto aos procedimentos técnicos, Gil (2002) diz que a pesquisa bibliográfica é baseada em material já elaborado, como livros, obras acadêmicas, publicações periódicas, entre outros. Deve-se tomar cuidado com a qualidade da pesquisa, para não colocar dados

equivocados. Para que isso não ocorra, devem-se analisar todas as informações para descobrir possíveis incoerências ou contradições. A pesquisa documental é bastante similar com a bibliográfica. A diferença entre elas está na fonte de pesquisa, pois a pesquisa documental pode utilizar de fontes sem tratamento analítico como revistas, relatórios, cartas, filmes, documentos oficiais, relatórios de empresa, entre outros. Logo, a pesquisa bibliográfica pode ser considerada um tipo de pesquisa documental.

Para Gil (2002), “a pesquisa experimental determina um objeto de estudo, seleciona as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto”. São responsáveis por grandes avanços tecnológicos e científicos. A pesquisa pode ser desenvolvida em meio artificial, (em laboratórios), ou onde são criadas em suas próprias comunidades (campo).

Para Gil (2002), o estudo de caso é um estudo detalhado de um ou poucos objetos. Para Fonseca (2002), apresenta uma forte tendência descritiva, pois o pesquisador não pretende intervir sobre o objeto, mas sim descrevê-lo.

Define Thiollent (1988):

A pesquisa ação é um tipo de investigação social com base empírica que é concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo no qual os pesquisadores e os participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo.

Para Fonseca (2002), é um ciclo permanente envolvendo o planejamento, o diagnóstico, a ação, a observação e a reflexão. Assim como a pesquisa ação, a pesquisa participante é caracterizada pela interação entre pesquisadores e membros das situações investigadas. É usada em estabelecimentos de programas públicos ou plataformas políticas.

De acordo com as informações apresentadas, o presente trabalho consiste, quanto ao objetivo, em uma pesquisa descritiva, pois serão observados, registrados e analisados os fenômenos da pesquisa. Quanto a sua forma de abordagem, a pesquisa será quantitativa, pois analisará os dados numéricos através de procedimentos estatísticos e cálculos. O trabalho ainda apresentará quanto aos aspectos técnicos, uma pesquisa bibliográfica ou documental, pois será baseada em material já elaborado e um estudo de caso para a análise do efeito da influência dos parâmetros de projeto em um coletor solar.

3.2 Materiais e Métodos

Conforme a figura 8, a partir da revisão bibliográfica e do equacionamento matemático realizado através da aplicação do balanço de energia no coletor, os dados e as equações serão implementadas no *Software Excel* para a determinação do rendimento ótico, das perdas globais de calor, do rendimento e do ganho de calor útil do coletor.

Os cálculos serão realizados a partir de dados típicos do ambiente local e dos elementos componentes do coletor solar, ou seja, vidros, placa absorvedora, tubulação, isolamento e transmitância térmica.

A partir do cálculo das perdas globais de calor e do coeficiente de eficiência do coletor é possível calcular o rendimento ótico pela equação $F'\eta_0$, o coeficiente de perdas globais de calor com a equação $F'U_L((T_m-T_a)/G_T)$, o rendimento instantâneo pela equação (31) e o calor útil através da equação (13).

A partir dos valores iniciais, foram feitas variações nos parâmetros: espessura da placa absorvedora, distância (L) entre o absorvedor e a cobertura, isolamento lateral, emissividade do absorvedor, condutividade do absorvedor, coeficiente de transferência de calor por convecção no interior dos tubos, distância entre tubos, velocidade do vento, radiação global incidente e isolamento posterior. Para a análise, foram construídos gráficos no *software Excel* da influência da variação dos parâmetros no rendimento ótico, na perda global, no calor útil e no rendimento instantâneo.

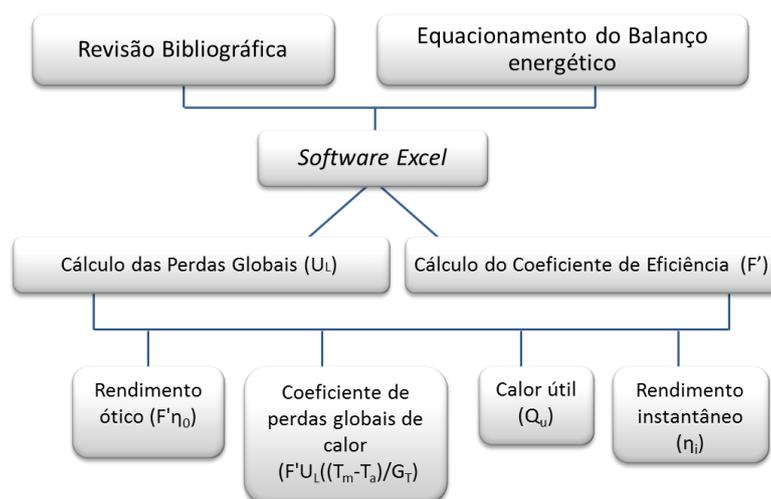


Figura 8. Diagrama materiais e métodos
Fonte: Pesquisa direta, 2017

3.3 Variáveis e Indicadores

Segundo Gil (2002), “o conceito de variável refere-se a tudo aquilo que pode assumir diferentes valores ou diferentes aspectos, segundo os casos particulares ou as circunstâncias”.

A Tabela 1 ilustra as variáveis com seus respectivos indicadores, que serão utilizados nesse trabalho.

Tabela (1) Variáveis e Indicadores

Variáveis	Indicadores
Ganho útil de energia	Área do Coletor
	Energia Absorvida por unidade de tempo e área
	Coefficiente Global de Perda de energia pelo coletor
	Temperatura média da placa absorvedora
	Temperatura ambiente
Energia absorvida por unidade de tempo e área	Média horária da radiação solar incidente no plano horizontal
	Fator geométrico F
	Transmitância do vidro
	Absortância da tinta ou do tratamento seletivo
	Densidade do vidro
	Fatores geométricos entre o plano inclinado de um ângulo β , em relação ao plano horizontal, e abóboda celeste e entre a superfície do coletor e o solo.
Coefficiente Global de perda de energia pelo coletor	Coefficiente de perda de calor pelo topo do coletor
	Coefficiente de perda de calor pela base do coletor
	Coefficiente de perda de calor pelas laterais do coletor
Elementos componentes do coletor: vidros, placa absorvedora, tubulação e isolamento.	Dimensões
	Propriedades térmicas

Fonte: Pesquisa direta, 2017.

3.4 Instrumentos de Coleta de Dados

Esta etapa consiste em determinar as ferramentas utilizadas para a coleta de dados em cima do tema proposto para a pesquisa.

Como mencionado no começo deste capítulo, o trabalho terá natureza bibliográfica, estudo de caso, quantitativa e descritiva. Portanto, os principais dados serão adquiridos em livros, obras acadêmicas, dissertações, catálogos, entre outros. É considerada uma técnica de custo baixo e com baixo tempo de captação.

3.5 Tabulação de dados

Os dados obtidos na coleta de dados serão tabulados no *Software Microsoft Excel*, onde será utilizado para os cálculos e a construção de gráficos e tabelas. O *Software Microsoft Word* será utilizado para processar os resultados obtidos através de textos.

Logo, os *Softwares* apresentados permitem a visualização, automatização e arranjo dos dados obtidos.

3.6 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foi apresentada a metodologia que será utilizada nesta pesquisa, mostrando o tipo de pesquisa quanto ao seu objetivo, a sua forma de abordagem e aos procedimentos técnicos. Foram apresentados os materiais e os métodos a serem empregados, as variáveis com seus respectivos indicadores. Abordou-se também quais são os instrumentos e como será a tabulação dos dados obtidos.

No próximo capítulo serão abordadas as análises dos resultados obtidos a partir dos dados coletados segundo a modelagem matemática nos *Softwares* escolhidos.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão abordados os resultados obtidos a partir do equacionamento matemático do coletor solar com o objetivo de analisar o efeito da variação dos parâmetros de entrada no comportamento do coletor.

4.1 Base de dados para o cálculo

Para a realização dos cálculos utilizou-se uma base de dados cujos valores foram obtidos de catálogos de coletores solares e da literatura disponível.

Os seguintes dados iniciais foram utilizados: temperatura ambiente ($T_a = 20^\circ\text{C}$), temperatura média da placa absorvedora ($T_p = 80^\circ\text{C}$), velocidade do vento ($v_w = 3 \text{ m/s}$) e de radiação solar incidente ($G_T = 1000 \text{ W/m}^2$).

Na tabela 2, são apresentados os dados das propriedades dos materiais, da inclinação do coletor e do coeficiente de transferência de calor no interior dos tubos, usados no cálculo.

Tabela (2). Propriedades dos materiais e outras variáveis do coletor

Variável	Coletor
Emissividade do vidro (ϵ_g)	0,88
Emissividade da placa absorvedora (ϵ_p)	0,96
Transmissividade do vidro (τ)	0,885
Absortividade (α)	0,95
Inclinação Média do coletor (β)	45°
Coeficiente de transferência de calor no interior de tubos (h_{fi})	$300 \text{ W/m}^2\text{K}$
Condutância do material que liga a tubulação ao absorvedor (Bond condutance) (C_b)	95
Condutividade do isolante - Lã de rocha	$0,045 \text{ W/mK}$
Condutividade do material absorvedor - Cobre	380 W/mK

Fonte: Lourenço (2012), Incropera (2008).

As dimensões (comprimento, largura, espessura, diâmetro dos tubos) do coletor utilizado como referência para o cálculo são apresentadas na tabela 3.

Tabela (3). Dimensões do coletor

Variável	Coletor
Espessura do coletor (δ_{coletor})	0,085m
Largura do Coletor (L_{coletor})	1,148m
Comprimento do Coletor (C_{coletor})	2,003m
Espessura do isolamento posterior (δ_2)	0,04m
Espessura do isolamento lateral (δ_1)	0,02m
Espessura da cobertura de vidro (L_g)	0,0032m
Espessura do absorsor (δ)	0,0005m
Distância entre absorsor e cobertura (L)	0,022m
Diâmetro externo dos tubos ascendentes (D)	0,02m
Distância entre tubos (W)	0,090m
Número de Tubos (NT)	12

Fonte: Lourenço (2012), Catálogo Sylber.

Na Figura 9 e na Figura 10 estão representadas respectivamente, a vista superior e a seção transversal de um coletor solar plano com as medidas usadas para o cálculo.

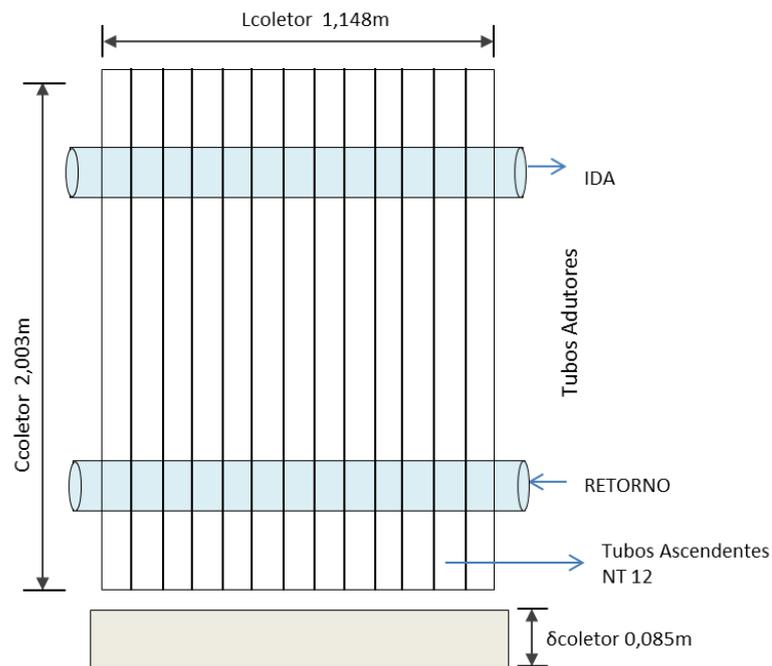


Figura 9 : Vista superior de um coletor solar plano

Fonte: Lourenço (2012), Catálogo Sylber.

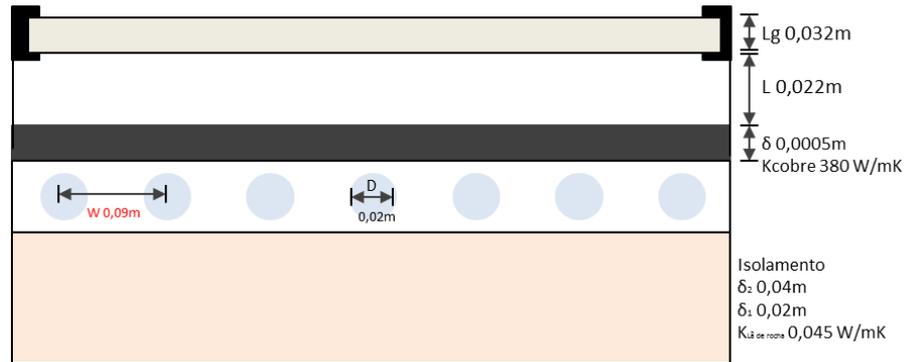


Figura 10: Seção transversal de um coletor solar plano
Fonte: Lourenço (2012), Catálogo Sylber.

4.2 Cálculo inicial das perdas de calor, dos rendimentos e do ganho útil de calor

Os dados fornecidos nas Tabelas 2 e 3 foram implementados no *Software Excel* conforme figuras 11 e 12. A planilha permite a entrada de dados e a realização dos cálculos de forma rápida e com fácil visualização.

DADOS DO COLETOR			
Parâmetro	Sigla	Unida	Valor
Temperatura Ambiente	Ta	K	293,15
Temperatura média da placa absorvedora	Tp	K	353,15
Temp. do fluido de entrada no coletor	Ti	k	298,15
Temp do fluido saída do coletor	To	K	323,15
Emissividade do vidro	ϵ_g	-	0,88
Emissividade da placa absorvedora	ϵ_p	-	0,96
Transmissividade do vidro	τ	-	0,885
Absortividade	α	-	0,95
Inclinação Média do coletor	β	°	0,785398163
Coefficiente de transferência de calor no interior de tubos	hfi	W/m ² K	300
Velocidade do vento	Vw	m/s	3
Condutividades de Isolante - ESCOLHER O VALOR DE ACORDO COM O COLETOR			
Condutividade Lã de Rocha	k	W/mK	0,045
Condutividade do material absorvedor			
Kcobre	kabs	W/mK	380
Constantes			
Stefan Boltzman	σ	W/m ² K ⁴	5,67E-08
Número de Coberturas	N	-	1
Constante Gravitacional	g	m/s ²	9,81
Viscosidade Cinemática	v	m ² /s	0,0000188
Difusidade Termica	α	m ² /s	0,0000269

Figura 11: Planilha do *Software Excel* com dados iniciais de propriedades dos materiais e outras variáveis do coletor
Fonte: Pesquisa direta, 2017.

Dimensões dos coletores			
Espessura do coletor	δ_{coletor}	m	0,085
Largura do Coletor	L_{coletor}	m	1,148
Comprimento do Coletor	C_{coletor}	m	2,003
Área total	A_{total}	m ²	2,299
Perímetro do coletor	P_{coletor}	m	6,302
Espessuras dos materiais			
Espessura do isolamento posterior	δ_2	m	0,04
Espessura do isolamento lateral	δ_1	m	0,0200
Espessura da cobertura de vidro	L_g	m	0,0032
Espessura do absorsor	δ	m	0,0005
Distância entre absorsor e cobertura	L	m	0,0220
Tubo coletor			
Diâmetro externo dos tubos ascendentes	D	m	0,02
Distância entre tubos	W	m	1,00
Condutância do material que liga a tubagem ao absorsor (Bond conductance).	C_b	-	95
Número de tubos	NT	-	12

Figura 12 : Planilha do *Software Excel* com dados iniciais das dimensões dos coletores, espessura dos materiais e tubo coletor.

Fonte: Pesquisa direta, 2017.

Através desses dados iniciais foram realizados os cálculos a partir das equações da modelagem matemática. Os resultados obtidos em função das grandezas fornecidas na base de dados, sem variação das mesmas, são mostrados na Figura 13.

Parâmetro	Sigla	.un	Valor
Ganho útil de energia de um coletor plano	Q_u	W	1474,14
Área do Coletor	A_c	m ²	2,30
Fator de eficiência da aleta	F'	-	0,9381
Radiação solar global	GT	W/m ²	1000
η_0	$\tau\alpha$		0,84
Coefficiente global de perda de energia pelo coletor	U_L	W/m ² K	8,99
Perdas de calor pelo topo	U_t	W/m ² K	7,34
coeficiente de transferência de calor do vento	h_w	W/m ² K	17,10
Perdas de calor pela base do coletor	U_b	W/m ² K	1,13
Perdas de calor pela lateral do coletor	U_{lat}	W/m ² K	0,52
Temperatura média do fluido no interior do coletor	T_m	K	310,65
Rendimento ótico	$F'\eta_0$	-	0,789
Coefficiente de perdas globais para o meio ambiente	$F'U_L((T_m-T_a)/GT)$	-	0,148
Rendimento Instantâneo	η_i	-	0,641087

Figura 13 : Planilha *Software Excel* com resultados obtidos

Fonte: Pesquisa direta, 2017

A Figura 13 apresenta os valores das perdas de calor, parciais e global, do fator de eficiência da aleta, do rendimento ótico ($F'\eta_o$), do coeficiente de perdas de calor globais do coletor ($F'U_L((T_m-T_a)/G_T)$), do rendimento instantâneo (η_i) e do calor útil (Q_u) utilizado para aquecer a água. Conforme afirma Lourenço (2012), o fator F' não deve ser inferior a 0,9, para se ter uma boa eficiência do coletor solar. Nesta figura observa-se que o rendimento do coletor é igual a 0,64 e o calor disponível para aquecer a água é de 1.474,1 (W).

4.3 Influência de alguns parâmetros no desempenho do coletor solar

Apresenta-se neste item o estudo da influência de alguns parâmetros no desempenho do coletor solar plano. O desempenho será obtido em função dos parâmetros: coeficiente de rendimento ótico ($F'\eta_o$), coeficiente de perda de calor global para o ambiente, rendimento instantâneo e calor útil fornecido pelo coletor. Serão analisadas a espessura da placa absorvora, à distância (L) entre o absorvora e a cobertura, o isolamento lateral, a emissividade do absorvora, a condutividade do absorvora, o coeficiente de transferência de calor no interior dos tubos, a distância entre tubos, a velocidade do vento, a radiação global e o isolamento posterior.

Essa variação de parâmetros foi realizada a partir do *Software Excel*, conforme Figura 14. Nele é possível variar vários valores de parâmetros de uma única vez. Para isso, colocam-se os valores conforme indicado e clica-se no botão “CALCULAR”. Os valores obtidos ficam armazenados em outra aba, onde é possível vê-los apertando em “VER TABELA DE DADOS”. Para criar outros dados, basta apertar em “APAGAR”. Posteriormente, com os dados das tabelas criadas, foram realizados os gráficos que serão apresentados.

DADOS PARA CÁLCULO									
Variação da espessura da placa absorvora (δ)	Espessura entre o absorvora e a cobertura (L)	Isolamento lateral (δ_1)	Emissividade do absorvora (ep)	Condutividade do absorvora ($kabs$)	Transferência de calor no interior dos tubos (hfi)	Distância entre tubos (W)	Velocidade do vento (Vw)	radiação solar global (GT)	Isolamento posterior (δ_2)
	0,0220		0,96	380	300		3	1000	0,04
	CALCULAR L		CALCULAR ep	CALCULAR kabs	CALCULAR hfi		CALCULAR Vw	CALCULAR GT	CALCULAR δ_2
	LIMPAR L		LIMPAR ep	LIMPAR kabs	LIMPAR hfi		LIMPAR Vw	LIMPAR GT	LIMPAR δ_2
	VER TABELA DE CÁLCULOS	0,0200	VER TABELA DE CÁLCULOS	VER TABELA DE CÁLCULOS	VER TABELA DE CÁLCULOS	CALCULAR W	VER TABELA DE CÁLCULOS	VER TABELA DE CÁLCULOS	VER TABELA DE CÁLCULOS
0,0005		CALCULAR δ_1							
CALCULAR δ		LIMPAR δ_1							
LIMPAR δ		VER TABELA DE CÁLCULOS							
VER TABELA DE CÁLCULOS						VER TABELA DE CÁLCULOS			

Figura 14 : Planilha *Software Excel* para variação de parâmetros
 Fonte: Pesquisa direta, 2017

4.3.1 Variação da espessura da placa absorvedora

A espessura da placa absorvedora foi variada de 0,4 a 1,5 mm. Considerando os demais parâmetros envolvidos constantes, o resultado é apresentado na Figura 15. Pode-se observar que quanto maior a espessura, maior será o rendimento ótico ($F'\eta_o$), portanto mais calor é transferido para o fluido circulante e a eficiência da aleta F' é maior. Para o coeficiente de perdas de calor ($F'U_L((T_m-T_a)/G_T)$) acontece o mesmo. Mas a influência da espessura da placa absorvedora é maior sobre o rendimento ótico, pois o valor do coeficiente global de perda de energia pelo coletor (U_L) não é alterado com a espessura, somente o valor de F' . O aumento dos coeficientes ocorre até uma espessura de 0,13 mm, aproximadamente, e a partir deste valor os coeficientes permanecem constantes. Observa-se um aumento de 1,27% para o rendimento ótico e um aumento de 1,36% do coeficiente global de perda de calor.

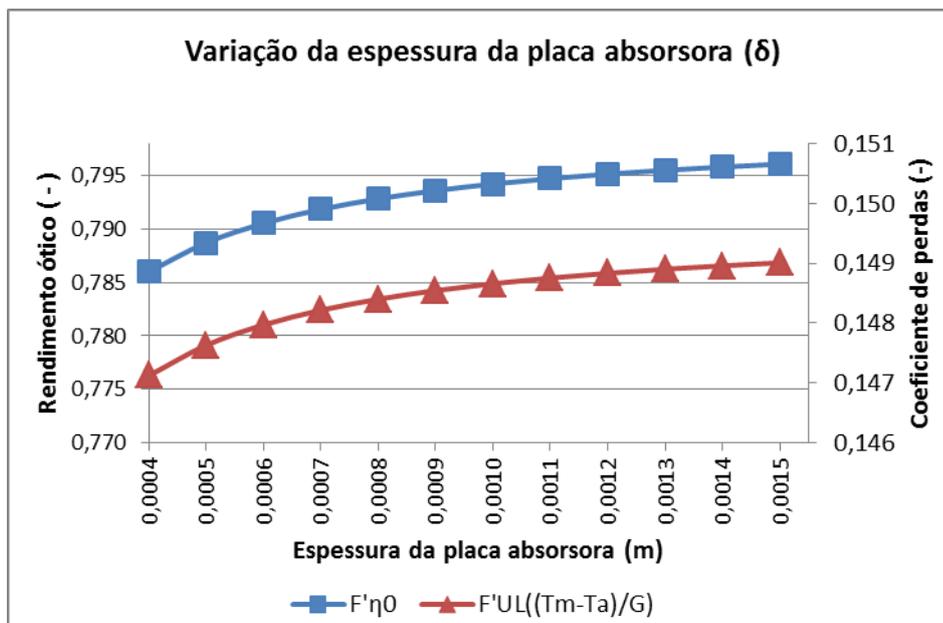


Figura 15: Influência da variação da espessura da placa absorvedora no rendimento ótico e na perda global
Fonte: Pesquisa direta, 2017.

A Figura 16 mostra a influência da espessura da placa no rendimento instantâneo (η_i) e no calor útil (Q_u) fornecido pelo coletor.

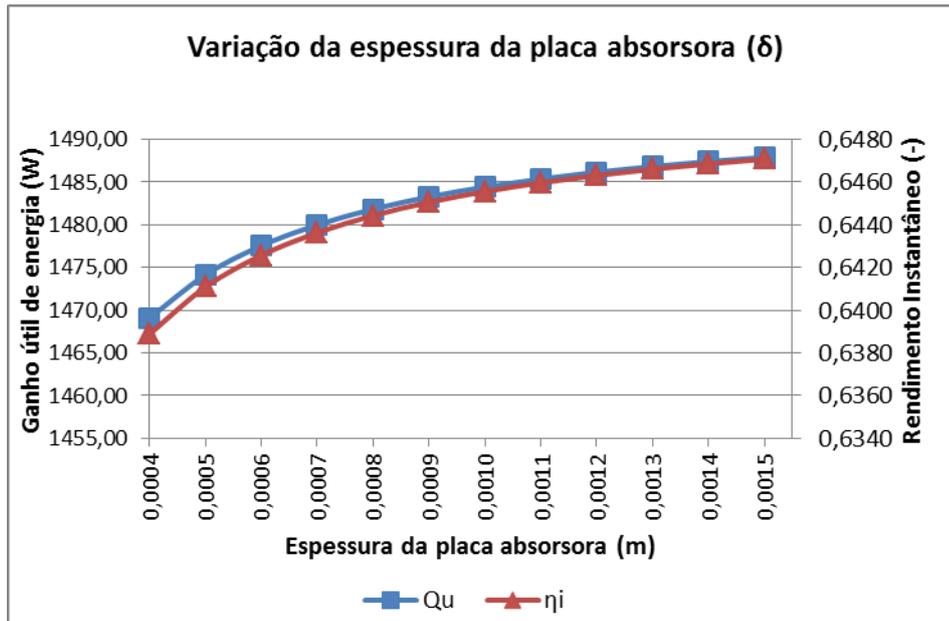


Figura 16: Influência da variação da espessura da placa absorvedora no calor útil e no rendimento instantâneo
Fonte: Pesquisa direta, 2017.

Observa-se que com o aumento da espessura da placa absorvedora, aumenta o rendimento instantâneo (η_i) em 1,25% e o ganho útil de energia (Q_u) em 1,28%.

4.3.2 Variação da distância (L) entre o absorvedor e a cobertura

Houve uma variação da distância entre o absorvedor e a cobertura de 5 mm a 39 mm. Considerando os outros parâmetros envolvidos constantes, o resultado é apresentado na Figura 17. Observa-se que quando se aumenta a distância, o coeficiente de perdas ($F'U_L((T_m T_a)/G_T)$) diminui e o rendimento ótico ($F'\eta_0$) aumenta. Isso acontece porque o valor do coeficiente de perda de energia pelo topo do coletor (U_t) é reduzido. O coeficiente de perda de calor diminui de 11,73% e o rendimento ótico aumenta de 0,77%.

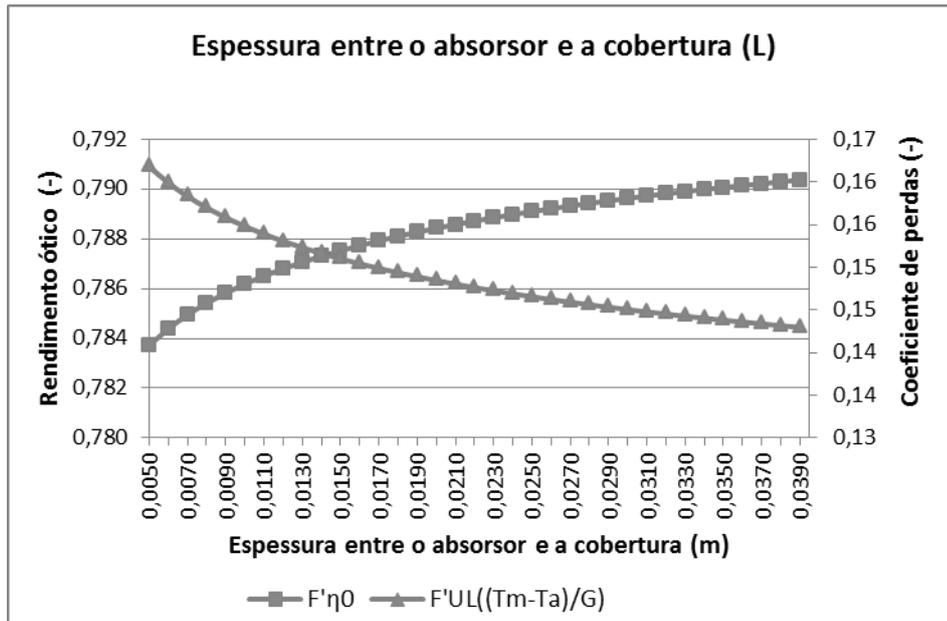


Figura 17: Influência da variação da distância entre o absorvedor e a cobertura no rendimento ótico e na perda global
 Fonte: Pesquisa direta, 2017.

A Figura 18 representa a influência da distância entre o absorvedor e a cobertura no rendimento instantâneo (η_i) e no calor útil (Q_u).

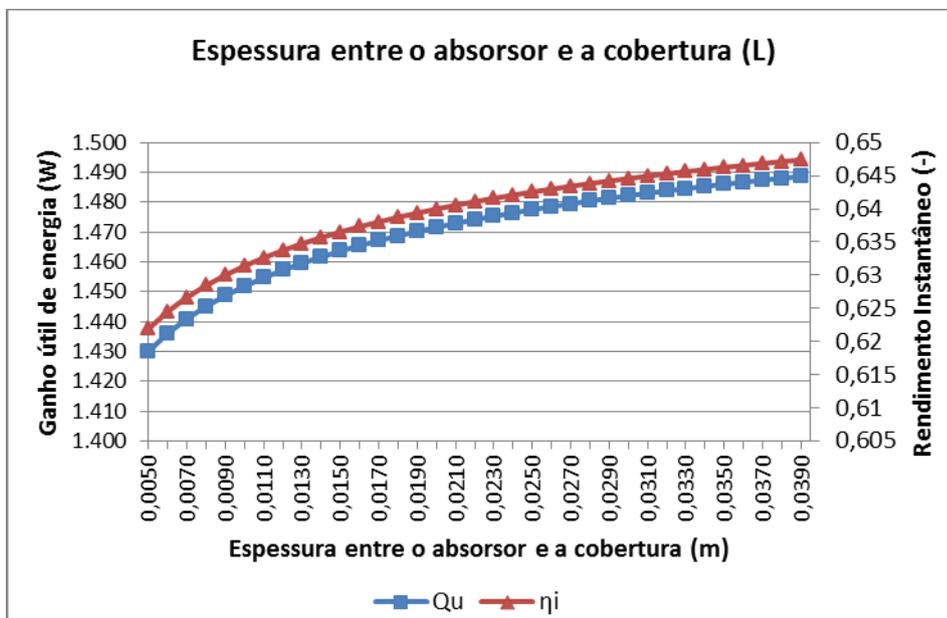


Figura 18: Influência da variação da espessura da placa absorvedora no calor útil e no rendimento instantâneo
 Fonte: Pesquisa direta, 2017.

O calor útil apresenta uma variação de 4,10% (1430 a 1488,7W) e o rendimento uma variação de 4,02% (0,622 a 0,647), mostrando que a variação da distância entre a placa absorvedora e a cobertura exerce influência significativa no desempenho do coletor solar.

4.3.3 Variação do isolamento lateral

Para o isolamento lateral foram utilizados dados entre 15 e 35 mm. Pode se observar através da Figura 19 que o valor do rendimento ótico ($F'\eta_0$) aumenta de 0,25% com o aumento da espessura do isolamento lateral, mas que o coeficiente de perdas ($F'U_L((T_m-T_a)/G_T)$) diminui de 4,00% com o aumento do isolamento. Isso acontece pois o valor do coeficiente global de perda de energia pelo coletor (U_L) diminui e F' sofre um pequeno aumento.

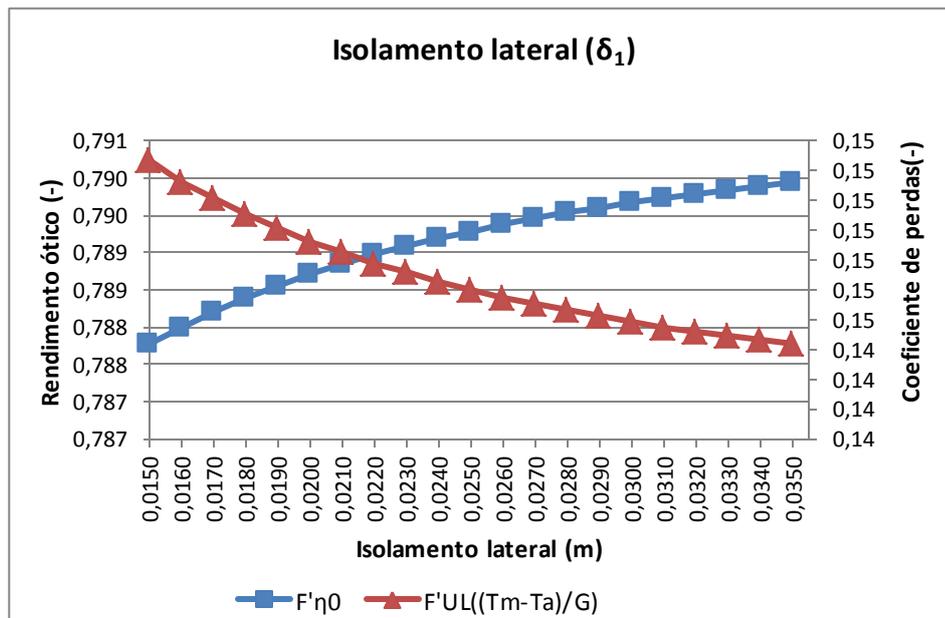


Figura 19: Influência da variação do isolamento lateral no rendimento ótico e na perda global
Fonte: Pesquisa direta, 2017.

O gráfico 20 mostra que com o aumento da variação do isolamento lateral, aumenta o ganho de energia útil (Q_u) e a eficiência instantânea (η_i). Estes aumentos são da ordem de 1,31% e 1,41% respectivamente.

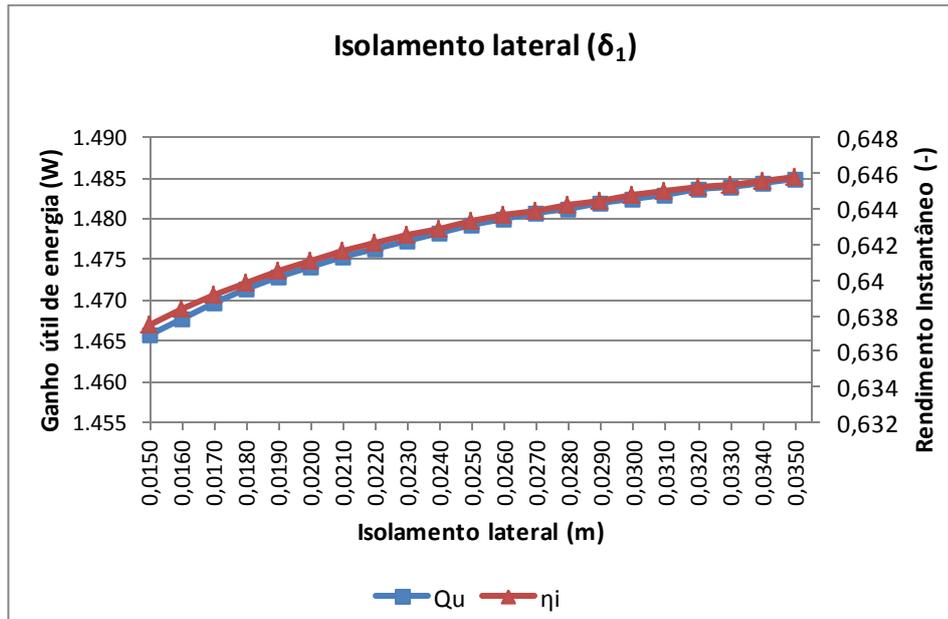


Figura 20: Influência da variação do isolamento lateral no calor útil e no rendimento instantâneo
Fonte: Pesquisa direta, 2017.

4.3.4 Variação da emissividade do absorvedor

Foi realizada uma variação da emissividade do absorvedor de 0,05 a 0,96. Como se pode observar na Figura 21, emissividades mais baixas possuem maiores rendimentos óticos ($F'\eta_0$) e menores coeficientes de perda de calor ($F'UL((T_m-T_a)/G_T)$). Por ser um parâmetro que influencia bastante o coletor, ele é muito estudado e responsável pelos melhoramentos dos coletores solares. O rendimento ótico diminui de 2,71% e o coeficiente de perda de calor aumenta em 74,12%.

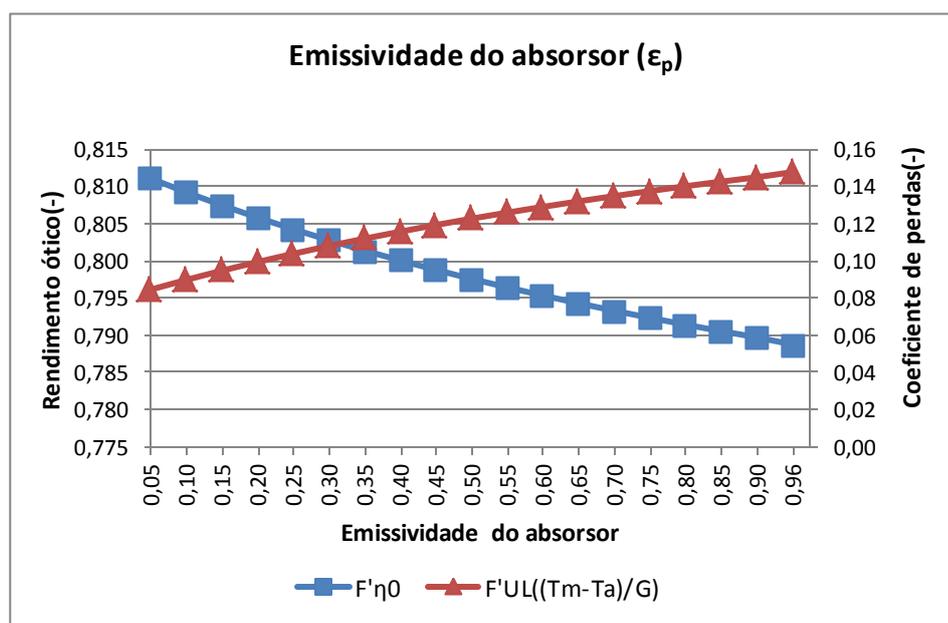


Figura 21: Influência da variação da emissividade do absorvedor no rendimento ótico e na perda global
Fonte: Pesquisa direta, 2017.

Na figura 22 pode-se observar que o ganho de energia e a eficiência instantânea aumentam com a diminuição da emissividade da placa absorvedora. Pode-se observar também a diminuição do rendimento e do ganho útil de calor, conforme ocorre a diminuição do rendimento ótico e o aumento do coeficiente de perdas.

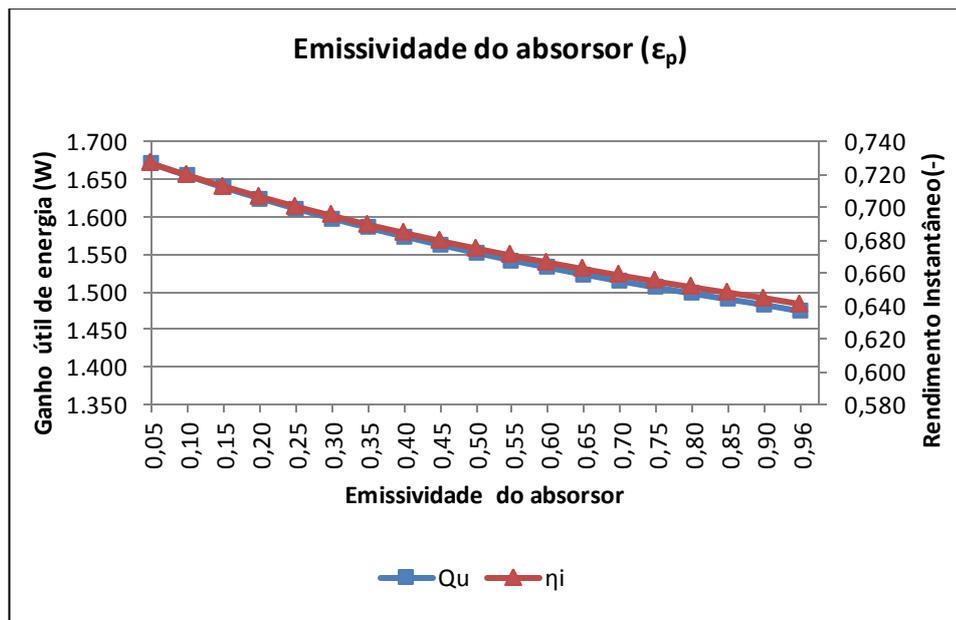


Figura 22: Influência da variação da emissividade do absorvedor no do calor útil e no rendimento instantâneo
Fonte: Pesquisa direta, 2017.

O rendimento instantâneo e o ganho útil de calor diminuem de aproximadamente 11,7%, variando de 0,726 a 0,641 e de 1670,4 a 1474,1 W, respectivamente, com o aumento da emissividade.

4.3.5 Condutividade do absorvedor

A condutividade do absorvedor é a sua capacidade de transferir calor para o fluido circulante, logo materiais com maiores condutividades admitem maior transferência de calor. Para a construção da Figura 23 foi utilizada uma variação de 50 a 400 W/(mK) onde se pode perceber que com o aumento da condutividade, o rendimento ótico ($F'\eta_0$) e as perdas de calor ($F'U_L((T_m-T_a)/G_T)$) aumentam. A partir de 300 W/(mK), há pequenas variações de perda de calor (Q_u) e de rendimento ótico (η_i). O mesmo acontece na Figura 24, com o ganho útil de energia e a eficiência instantânea.

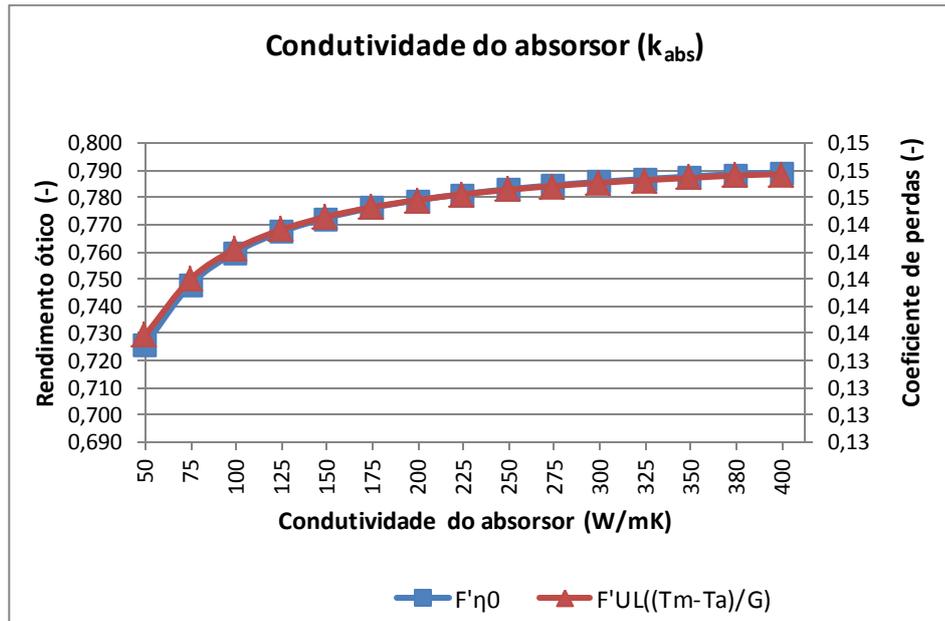


Figura 23: Influência da variação da condutividade do absorvedor no rendimento óptico e na perda global
Fonte: Pesquisa direta, 2017.

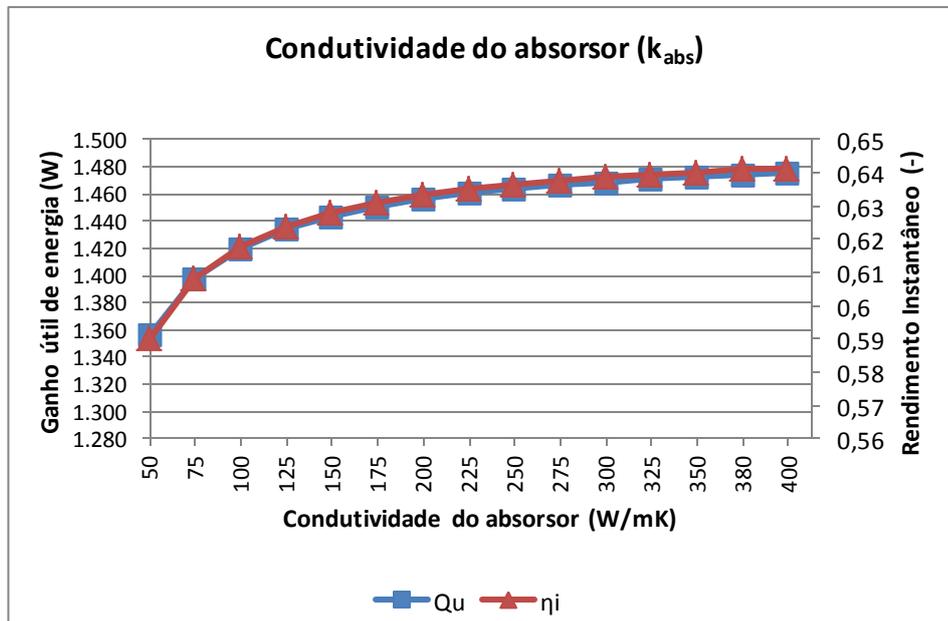


Figura 24: Influência da variação da condutividade do absorvedor no calor útil e no rendimento instantâneo
Fonte: Pesquisa direta, 2017.

Nas figuras 23 e 24 observa-se o comportamento das curvas com o aumento da condutividade térmica do material da placa absorvedora, e as variações obtidas foram: no rendimento óptico, aumento de 8,68%; nas perdas globais de calor, aumento de 8,82%; no rendimento instantâneo, aumento de 8,81%, e no calor útil, aumento de 8,73%.

4.3.6 Variação do coeficiente de transferência de calor no interior dos tubos (h_{fi})

O coeficiente de transferência de calor por convecção no interior dos tubos foi variado de 300 a 1000 W/(m²K). Com o aumento deste coeficiente, a eficiência da aleta aumenta (F'), pois será transferido mais calor para o fluido circulante. Dessa forma teremos o aumento do rendimento ótico ($F'\eta_0$) e das perdas de calor, conforme se mostra na Figura 25. Estes aumentos são de 2,92% e 2,70%, respectivamente.

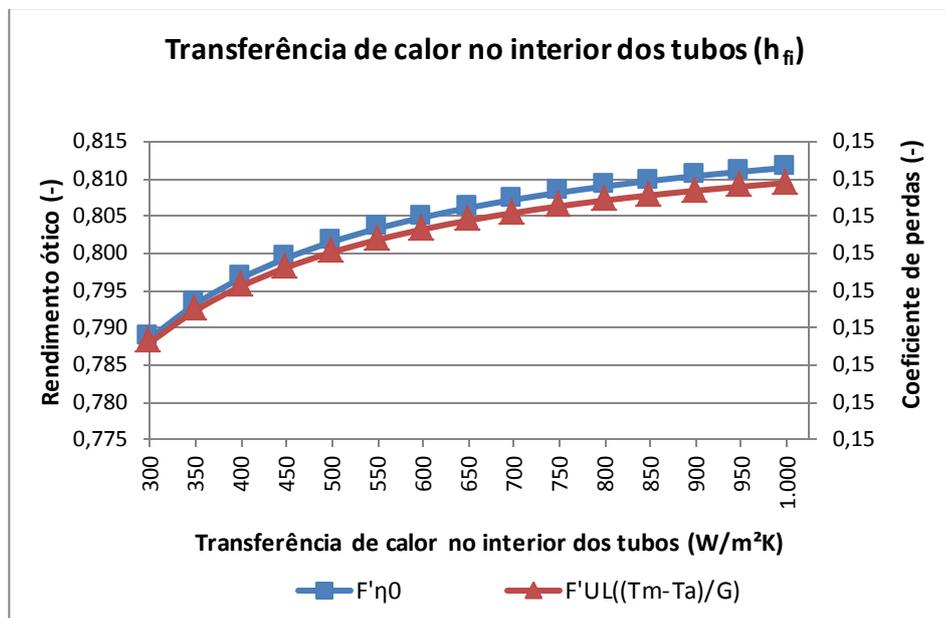


Figura 25: Influência da variação do coeficiente de transferência de calor no interior dos tubos no rendimento ótico e na perda global

Fonte: Pesquisa direta, 2017.

O mesmo é mostrado na Figura 26, com o calor útil (Q_u) e o rendimento instantâneo (η_i). Estes sofrem um aumento de aproximadamente 2,90%.

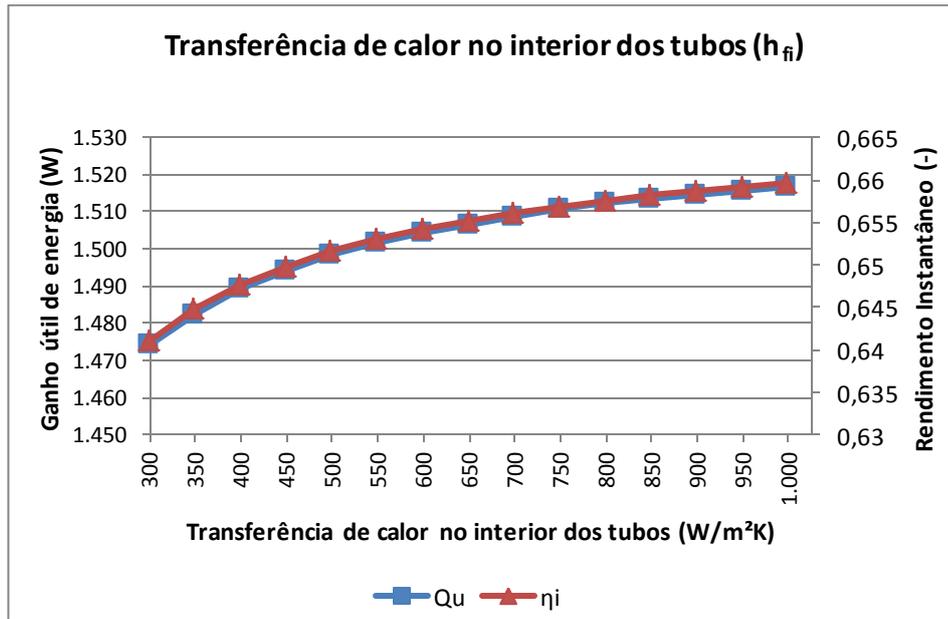


Figura 26: Influência da variação do coeficiente de transferência de calor no interior dos tubos no calor útil e no rendimento instantâneo
 Fonte: Pesquisa direta, 2017.

4.3.7 Variação da distância entre tubos

A distância entre tubos foi variada de 40 a 200 mm e os outros parâmetros ficaram constantes. O aumento da distância entre tubos diminui a quantidade de tubos, e como consequência ocorre à diminuição das perdas de calor, do rendimento ótico, do rendimento instantâneo e do calor útil, conforme figuras 27 e 28. Na Figura 27 verifica-se o comportamento da variação do rendimento ótico e do coeficiente de perdas, com diminuição de 16,55% e 16,88%, respectivamente.

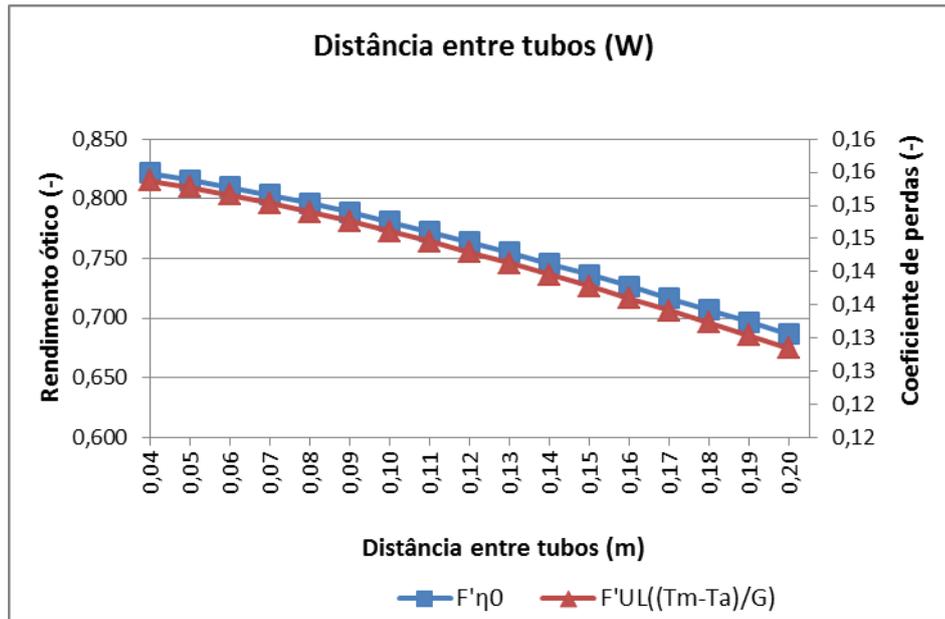


Figura 27: Influência da variação da distância entre tubos no rendimento óptico e na perda global

Fonte: Pesquisa direta, 2017.

Na Figura 28, representa-se a variação do calor útil (Q_u) e do rendimento instantâneo (η_i). Pode-se observar que eles diminuem com o aumento da distância entre tubos, de cerca de 16,45% (1535,4 - 1282,9 W) para o calor útil fornecido à água e de 16,5% (0,668- 0,558) para o rendimento.

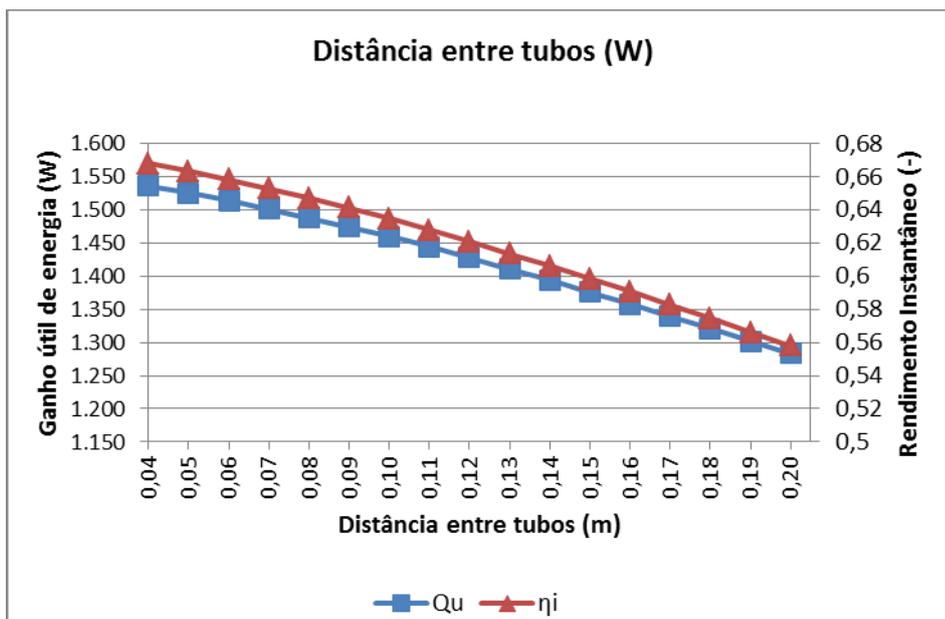


Figura 28: Influência da variação da distância entre tubos no calor útil e no rendimento instantâneo

Fonte: Pesquisa direta, 2017.

4.3.8 Variação da velocidade do vento

Variou-se a velocidade do vento de 0 a 8,5m/s. A velocidade do vento influi diretamente no coeficiente externo de transferência de calor por convecção e, portanto na perda de calor do coletor, e nos parâmetros de desempenho analisados. De acordo com a Figura 29, o rendimento ótico ($F'\eta_0$) apresenta uma diminuição de 1,63%. Já o coeficiente de perdas de calor diminui fortemente com o aumento da velocidade do vento, em torno de 29,9%. Isso acontece devido ao coeficiente de perdas de calor pelo topo do coletor (U_t) possuir maior influência, pois não se verifica um aquecimento da cobertura do coletor, reduzindo a absorção solar.

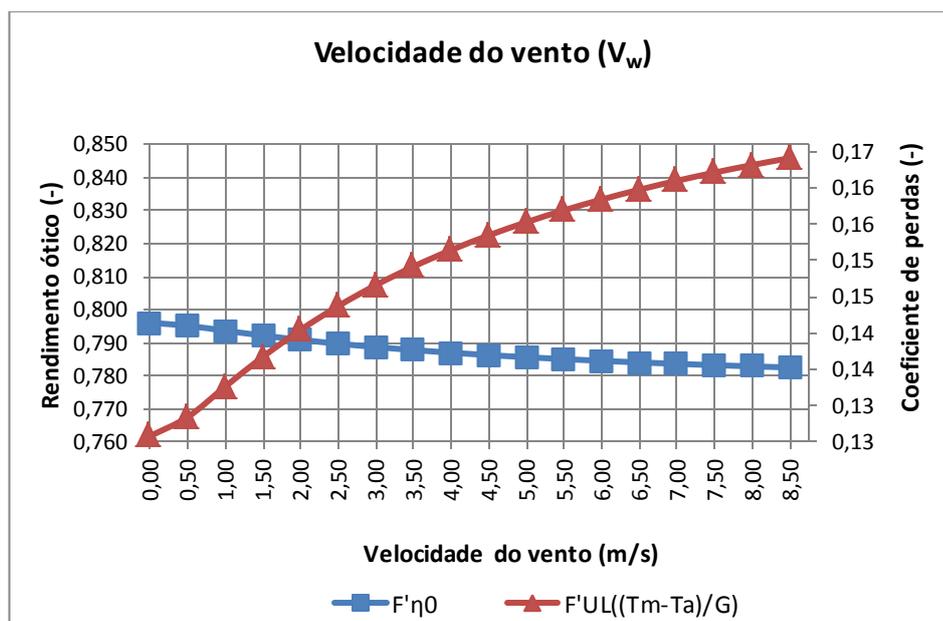


Figura 29: Influência da variação da velocidade do vento no rendimento ótico e na perda global

Fonte: Pesquisa direta, 2017

O gráfico 30 mostra que com o aumento da velocidade do vento, o ganho útil de calor (Q_u) e o rendimento instantâneo (η_i) diminuem consideravelmente, na ordem de 7,7%.

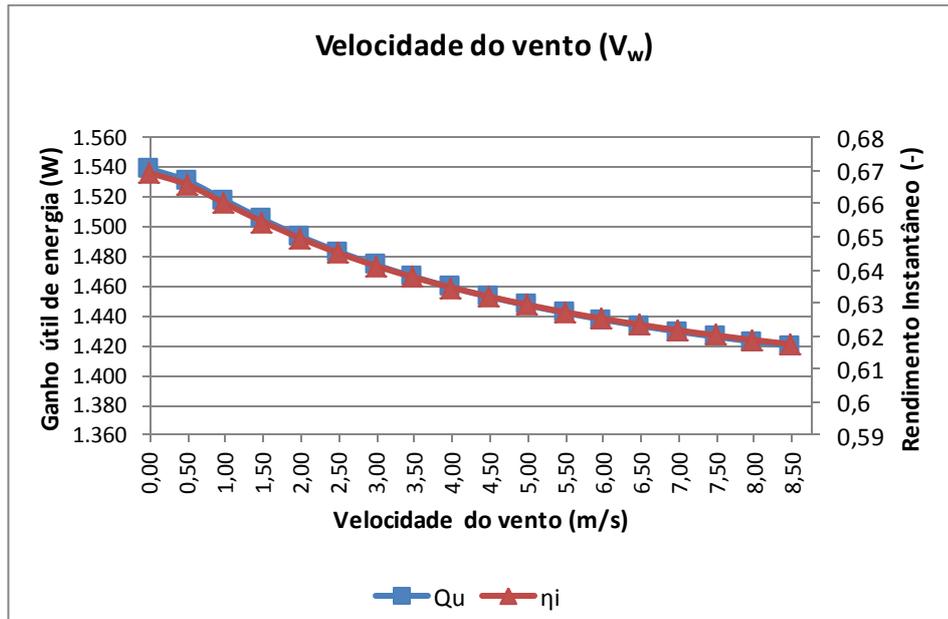


Figura 30: Influência da variação da velocidade do vento no calor útil e no rendimento instantâneo
Fonte: Pesquisa direta, 2017.

4.3.9 Variação da radiação solar global

A radiação solar global foi variada de 500 a 1100 W/m² e os demais parâmetros ficaram constantes. Observa-se na Figura 31 que a radiação solar não influencia no rendimento ótico (η_i) e para as grandezas consideradas diminui em 54,6% para as perdas globais ($F'U_L((T_m - T_a)/G_T)$) conforme a intensidade da radiação solar aumenta.

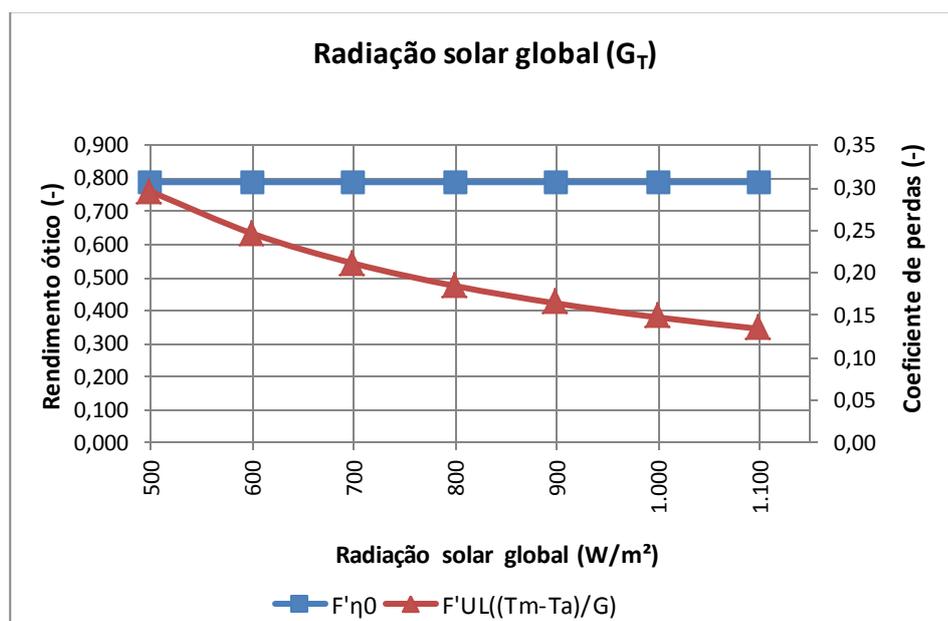


Figura 31: Influência variação da radiação solar global no rendimento ótico e na perda global
Fonte: Pesquisa direta, 2017.

Na Figura 32 é possível observar que com o aumento da radiação solar global, o calor útil (Q_u) possui um ganho de 191,8% e o rendimento ótico (η_i) tem um ganho de 32,8%, confirmando que quanto maior a disponibilidade da radiação solar melhor o desempenho do coletor.

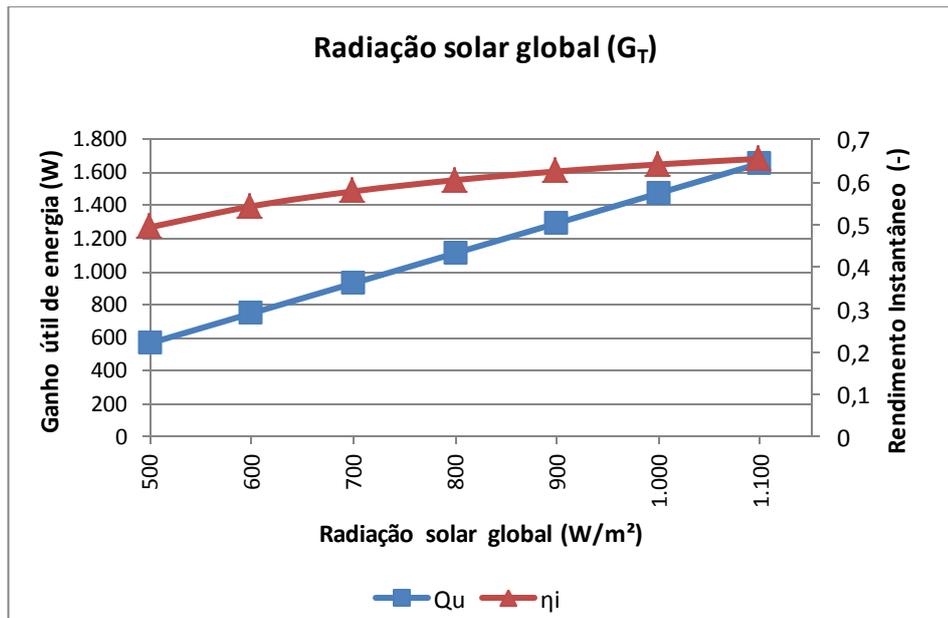


Figura 32: Influência da variação da radiação solar global no calor útil e no rendimento instantâneo
Fonte: Pesquisa direta, 2017.

4.3.10 Variação do isolamento posterior

O isolamento posterior foi variado de 20 a 50 mm e os outros parâmetros continuaram constantes. De acordo com a Figura 33, o aumento do isolamento posterior diminui as perdas de calor pela base do coletor (U_b), portanto, há uma diminuição das perdas globais de calor ($F'U_L((T_m-T_a)/G_T)$) em 12,73% e um pequeno aumento de 0,89% no rendimento ótico ($F'\eta_0$).

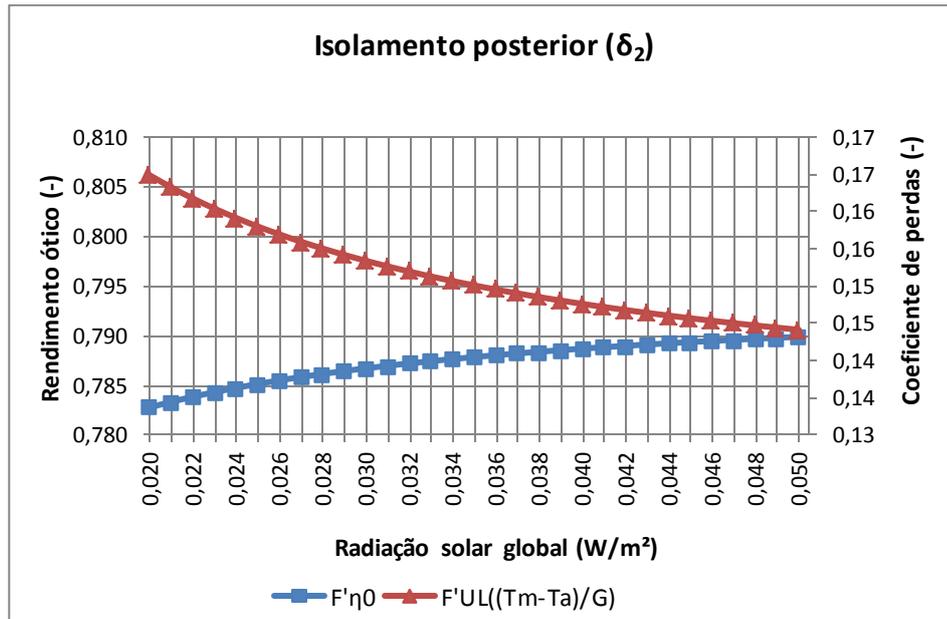


Figura 33: Influência da variação do isolamento posterior no rendimento óptico e na perda global
Fonte: Pesquisa direta, 2017.

Na Figura 34 é possível observar que com o aumento do isolamento posterior, o calor útil (Q_u) e o rendimento instantâneo (η_i) tem um ganho de aproximadamente 4,5%, sendo portanto significativo.

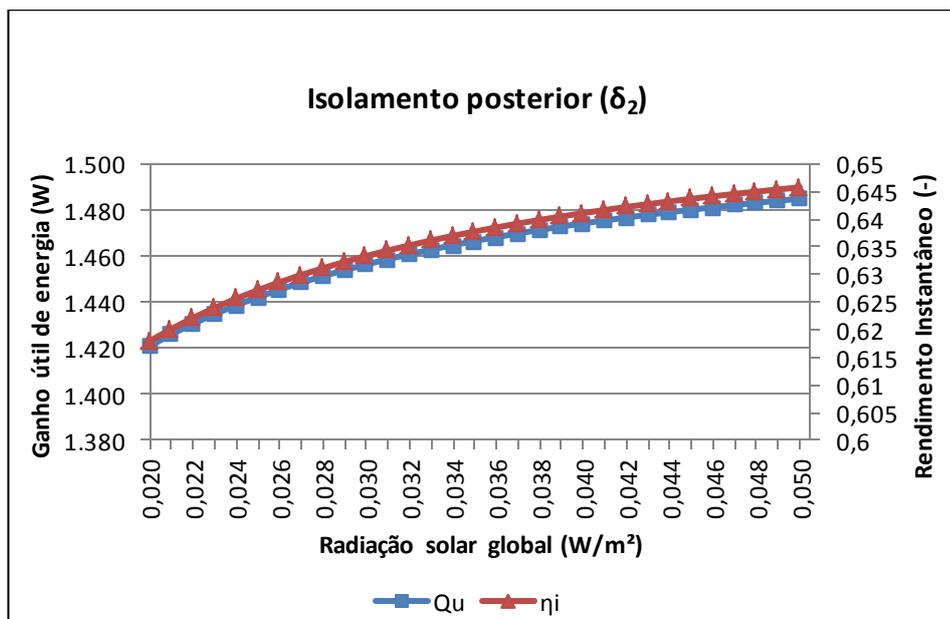


Figura 34: Influência da variação do isolamento posterior no calor útil e no rendimento instantâneo
Fonte: Pesquisa direta, 2017.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou como objetivo principal a análise da influência de parâmetros de projeto no desempenho de coletores solares planos para aquecimento de água residencial. Para realizar um estudo paramétrico desta influência dos parâmetros foi desenvolvida uma planilha no *Software Excel* com as equações matemáticas do balanço de energia de um coletor.

Os parâmetros de influência considerados foram: espessura da placa absorvedora (δ), distância entre o absorvedor e a cobertura (L), isolamento lateral (δ_1), emissividade do absorvedor (ϵ_p), condutividade térmica do absorvedor (k_{abs}), transferência de calor por convecção no interior dos tubos (h_{fi}), distância entre tubos (W), velocidade do vento (V_w), radiação solar global (G_T) e isolamento posterior (δ_2). Estes foram variados e a sua influência sobre o desempenho do coletor, em termos de rendimento ótico ($F'\eta_0$), coeficiente global de perdas de calor ($F'U_L((T_m-T_a)/G_T)$), calor útil (Q_u) e rendimento instantâneo (η_i) foi analisada.

Conforme mostraram os resultados obtidos os parâmetros que mais influenciam no desempenho do coletor solar são a distância entre o absorvedor e a cobertura, a emissividade do absorvedor, a condutividade térmica do absorvedor, a distância entre tubos, a velocidade do vento e a radiação solar global.

A distância entre a placa absorvedora e a cobertura exerce influência significativa no desempenho do coletor solar, e deve ser bem dimensionada, pois possibilita uma variação de 4,1% no calor útil e de 4,0% no rendimento.

A emissividade da placa absorvedora é outro parâmetro de grande influência. Com o aumento da emissividade, no campo de variação proposto, o rendimento instantâneo e o ganho útil de calor diminuem de aproximadamente 11,7%. Para baixas emissividades o rendimento ótico (que também depende da transmissividade da cobertura), o calor útil e o rendimento instantâneo possuem valores mais elevados e para maiores valores de emissividade o coeficiente de perda é mais elevado, diminuindo os valores dos parâmetros de desempenho.

Como a condutividade do absorvedor é o parâmetro que mede a capacidade de transferir calor para o fluido, coletores com materiais com grandes condutividades possuem maiores rendimentos. O cobre e o alumínio são materiais com condutividades térmicas elevadas, e muito utilizados em coletores solares. Observou-se um aumento da ordem de 8,81% no rendimento instantâneo e 8,73% no calor útil, para as condutividades térmicas mais elevadas.

Com relação à distância entre tubos, verifica-se que para maiores distâncias o calor útil fornecido à água e o rendimento diminuem de 16,45% e 16,5%, respectivamente. Para um diâmetro de tubulação fixado, o aumento da distância entre tubos diminui o número de tubos do coletor e conseqüentemente a quantidade de calor transferido e o rendimento do mesmo. Portanto, é um parâmetro que deve ser otimizado.

Quanto à velocidade do vento, observa-se que para valores maiores desta, ocorrerá um aumento da perda global de calor, ou seja, um aumento na transferência de calor, principalmente por convecção na parte superior do coletor solar. Em decorrência tem-se uma diminuição considerável no ganho útil de calor e no rendimento instantâneo, na ordem de 7,7%.

O aumento da radiação solar global, função do local de instalação do coletor, promove um aumento no calor útil de 191,8% e no rendimento de 32,6%, para condições fixas de dimensões e demais parâmetros do coletor.

Para estudos futuros, segue algumas sugestões:

- realizar estudo para coletores de cobertura dupla;
- criar um modelo que realize a conexão do coletor com o reservatório térmico;
- realizar análise e desenvolvimento de equacionamento para estudo em regime de operação transiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática**. 4.ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

COELHO, Daniel Moreira. **Identificação de variáveis críticas e simulação do uso de coletores solares em prédios residenciais**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. IV. **Energia solar - análise comparativa entre o Brasil e a Alemanha**. Salvador: [s.e.], 2013.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. New York: John Wiley & Sons, 1991.

DESSBESELL, Elton Herberto; GOMES, Natanael Rodrigues. **Máquina de alimentação de pequenos animais**. Panambi: Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional: Ano base 2013**. Rio de Janeiro: EPE, 2014. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf> Acesso em: 26 de junho de 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Consumo de Energia no Brasil: Análises Setoriais**. Rio de Janeiro: EPE, 2014. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/DEA%2010-14%20Consumo%20de%20Energia%20no%20Brasil.pdf>>. Acesso em: 15 de dezembro de 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional: relatório síntese do ano base de 2015**. Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2016_Web.pdf>. Acesso em: 26 de junho de 2016.

FARIA, Lucas Paglioni Pataro. **Modelagem matemática e avaliação experimental da não uniformidade do escoamento da água em coletores solares planos**. Belo Horizonte: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2007.

FONSECA, João José Saraiva da. **Curso de especialização em comunidades virtuais de aprendizagem – informática educativa**. Ceará: Universidade Federal do Ceará, 2002.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

INCROPERA, Frank P. ; DEWITT, David P.; BERGMAN, Theodore L.; LAVINE; Adrienne S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2008.

LOURENÇO, Pedro Miguel da Silva. **Modelação de Coletores Solares Planos**. [s.l.]: Universidade de Lisboa, 2012.

MINAYO, Maria Cecília de Souza (org); DESLANDES, Suely Ferreira; GOMES, Romeu. **Pesquisa Social: teoria, método e criatividade**. 28. ed. Petrópolis :Vozes, 2009.

PEREIRA, Enio Bueno; MARTINS, Fernando Ramos; ABREU, Samuel Luna de; RUTHER, Ricardo. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campo: INPE, 2006. Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/pub/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf>. Acesso em: 13 de dezembro de 2015.

SYLBER. Livro de Instruções para instalação: coletor solar CFO25S. [s.l.]; [s.e.]; [s.d.]

THIOLLENT, M. **Metodologia da pesquisa-ação**. 4.ed. São Paulo: Cortez, 1988.

TRIVIÑOS, Augusto Nivaldo Silva. **Introdução à pesquisa em Ciências Sociais: a pesquisa qualitativa em educação: o positivismo, a fenomenologia, o marxismo**. São Paulo: Atlas, 1987.