



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



LORENA OLIVEIRA CABRAL

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE PROJETO NO
DESEMPENHO DE COLETORES SOLARES DE TUBOS EVACUADOS**

**OURO PRETO - MG
2020**

LORENA OLIVEIRA CABRAL
lorenaoliveiracabral@hotmail.com

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE PROJETO NO
DESEMPENHO DE COLETORES SOLARES DE TUBOS EVACUADOS**

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: DSc. Luís Antônio Bortolaia

OURO PRETO – MG
2020

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C117a Cabral, Lorena Oliveira .
Análise da influência de parâmetros de projeto no desempenho de coletores solares de tubos evacuados. [manuscrito] / Lorena Oliveira Cabral. - 2020.
82 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Luís Antônio Bortolaia.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Meios de transferência de calor. 2. Coletores solares . 3. Água - Aquecimento solar. 4. Tubos de calor. 5. Calor- Transmissão. I. Bortolaia, Luís Antônio. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.13

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB:1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Lorena Oliveira Cabral

Análise da influência de parâmetros de projeto no desempenho de coletores solares de tubos evacuados

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

Aprovada em 18 de Dezembro de 2020

Membros da banca

DsC. Luís Antônio Bortolaia - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
DsC. Elisângela Martins Leal - (Universidade Federal de Ouro Preto)
DsC. Claudio Marcio Santana - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Luís Antônio Bortolaia, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 29/01/2021



Documento assinado eletronicamente por **Luís Antonio Bortolaia, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/01/2021, às 21:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0130132** e o código CRC **53EE9313**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.000915/2021-45

SEI nº 0130132

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: (31)3559-1533 - www.ufop.br

A minha avó.

Minha primeira grande educadora.

AGRADECIMENTO

Agradeço em primeiro lugar a Deus por me guiar e iluminar em toda a minha trajetória acadêmica.

Agradeço aos meus pais, Lourival e Magna, pelo apoio e incentivo que tornaram este sonho possível. Obrigada pelo carinho, dedicação e exemplo. Aos meus anjos vó Dei e Tine por todo carinho e orações. Às minhas irmãs Gabriela, Ludmilla e Clara por toda alegria e cumplicidade. E agradeço também ao Fidel pela presença e apoio. Além de toda a minha família.

Agradeço a todos os amigos da Engenharia Mecânica e de Ouro Preto pelo companheirismo e força em especial à minha República Mistura Perfeita, pela irmandade e aprendizados.

Agradeço ao meu professor orientador Luis Antônio Bortolaia, pela paciência e incentivo. E finalmente, também sou grata a todos os professores e funcionários da UFOP que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste sonho. Meus sinceros agradecimentos!

*“Me levanto
Sobre o sacrifício
De um milhão de mulheres que vieram antes
E penso
O que é que eu faço
Para tornar essa montanha mais alta
Para que as mulheres que vierem depois de mim
Possam ver além”.*

Legado - Rupi Kaur

RESUMO

Frente à crescente discussão em torno da necessidade de adotar fontes renováveis de energia no âmbito mundial, o Brasil se vê cada vez mais inclinado a explorar o seu potencial de energia uma vez que dispõe de uma alta incidência solar. Dentro desse contexto, os coletores solares representam uma ferramenta para diminuir o gasto de energia elétrica através da redução de emprego de outras fontes de energia de alto custo econômico, bem como grandes riscos ambientais e sociais. Neste sentido, o presente trabalho pretende analisar o desempenho de coletores solares à vácuo com tubos em U para aquecimento de água residencial diante da variação de parâmetros de projeto. O estudo é fundamentado quanto ao objetivo em uma pesquisa descritiva, quantitativa e quanto aos aspectos técnicos, em uma pesquisa bibliográfica ou documental. A partir do equacionamento matemático obtido através do balanço de energia no coletor solar de tubos evacuados, implementado no *software Engineering Equation Solver* versão demonstrativa, são determinados a eficiência; o ganho útil de calor; o fator de remoção de calor e a temperatura da água na saída. Com estes valores, os parâmetros de comprimento, condutância sintética do revestimento, vazão mássica, radiação solar incidente, transmissividade, absortividade, coeficiente de transferência de calor por convecção do tubo em U, temperatura de entrada no tubo e velocidade do ar são variados e analisados quanto à influência do desempenho do coletor solar. Através dos cálculos e da representação gráfica apresenta-se que os parâmetros que mais influenciam no desempenho do coletor solar de tubos evacuados são o produto da absortividade pela a transmissividade; condutância sintética do absorsor e radiação solar incidente.

Palavras-chave: Transferência de calor, coletor solar de tubos evacuados, aquecimento de água, eficiência, coeficiente de perdas globais, calor útil.

ABSTRACT

Faced with the growing discussion around the need to embrace renewable energy sources worldwide, Brazil is increasingly inclined to explore its potential for energy since it has a high solar incidence. Within this context, solar collectors represent a mechanism to reduce electricity expenditure by reducing the use of other energy sources of high economic cost, as well as the major environmental and social risks. In this sense, the present work intends to analyze the performance of the glass evacuated tube solar collector with U-tube for residential water heating in view of the range of design parameters. The study is based, in terms of objective, on a descriptive, quantitative research and on the technical aspects in the bibliographic or documentary research. From the mathematical equation obtained through the energy balance the glass evacuated tube solar collector with U-tubes, implemented in the engineering equation solver (EES) software demonstrative version, the efficiency; the heat gain; the heat removal factor and the water temperature at the outlet are determined. With these values the parameters of length; synthetic coating conductance; mass flow; incident solar radiation; transmissivity; absorptivity; heat transfer coefficient by convection of the U-tube; tube inlet temperature and air velocity are range and analyzed for the influence of solar collector performance. Through the calculations and the graphic representation, it is presented that the parameters that most influence the performance of the glass evacuated tube solar collector with U-tube are the product of absorptivity by transmissivity; synthetic conductance of the absorber (47% increase in efficiency) and incident solar radiation.

Keywords: *Heat transfer, glass evacuated tube solar collector, water heating, efficiency, overall lost coefficient, heat gain.*

LISTA DE SIMBOLOS

q''_x	fluxo de calor (W/m ²);
k	condutividade térmica do material da parede (W/m K);
dT/dx	gradiente de temperatura (°C/m, K/m);
q''_{conv}	fluxo de calor convectivo (W/m ²)
h	coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m ² K)
T_s	temperatura da superfície (°C ou K)
T_∞	temperatura do fluido (°C ou K)
E	poder emissivo da superfície (W/m ²);
ε	emissividade (-)
σ	constante de Stefan – Boltzmann (5,67x10 ⁻⁸ W/m ² K).
G_{abs}	irradiação absorvida pela superfície (W/m ²)
α	propriedade radiante da superfície denominada absortividade (-)
G	radiação incidente total (W/m ²)
q''_{rad}	fluxo de calor por radiação (W/m ²)
q_{rad}	taxa líquida de transferência de calor por radiação (W)
h_r	coeficiente de transferência de calor por radiação (W/m ² .K)
R_t	resistência térmica (°C/W, K/W)
ΔT	variação da temperatura (°C ou K)
r_e	raio externo do tubo (m)
r_i	raio interno do cilindro tubo (m)
$R_{t,cond}$	resistência térmica condutiva (°C/W, K/W)
$R_{t,conv}$	resistência térmica convectiva (°C/W, K/W)
$R_{t,rad}$	resistência térmica radiante (°C/W, K/W)
A_a	área de abertura (m ²)

L	comprimento do tubo (m)
D_p	diâmetro do tubo interno (m)
N	número de tubos (-)
Q_L	perda térmica (W/m^2)
S	quantidade de energia solar absorvida pelo revestimento absorvedor (W/m^2)
Q_u	ganho de calor líquido absorvido pelo fluido de trabalho (W/m^2)
U_L	coeficiente de perda global de calor ($W/m^2.K$)
U_t	coeficiente de perda de calor pela superfície absorvedora para o ambiente ($W/m^2.K$)
U_e	coeficiente de perda de calor pelas laterais ($W/m^2.K$)
A_c	área da superfície externa do tubo absorvedor (m^2)
D	diâmetro do tubo absorvedor (m)
h_{g-a}	coeficiente de transferência de calor por convecção proveniente do tubo de vidro externo para os arredores ($W/m^2.K$)
$h_{p-g,r}$	coeficiente de transferência de calor por radiação entre o tubo absorvedor e o tubo de vidro externo ($W/m^2.K$)
$h_{p-g,c}$	coeficiente de transferência de calor por condução pelo suporte e o fechamento do coletor solar de tubos evacuados ($W/m^2.K$)
ε_p	emissividade do revestimento seletivo (-)
ε_g	emissividade da superfície de vidro externo (-)
D_g	diâmetro interno do tubo de vidro externo (m)
T_p	temperatura do tubo absorvedor (K)
T_g	temperatura do tubo de vidro externo (K)
k_a	condutividade térmica do ar ($W/m.K$)
Nu_a	número de Nusselt para o ar (-)
Re_a	número de Reynolds para o escoamento do ar (-)

V	velocidade de escoamento do ar (m/s)
ν	viscosidade cinemática do ar (m ² /s)
λ	condutividade da aleta (W/m.K)
T_i	temperatura do fluido de trabalho da entrada do tubo em U (K)
T_a	temperatura ambiente (K)
τ	transmitância da cobertura de vidro (-)
G	radiação solar (W/m ²)
F_R	fator de remoção de calor (-)
\dot{m}	vazão em massa de água (kg/s)
C_p	calor específico (J/kg.K)
F'	fator de eficiência do coletor (-)
C_b	condutância sintética (W/m.K)
C_B	condutância da ligação (W/m.K)
h_{fi}	coeficiente de transferência de calor entre o fluido e a parede do tubo (W/m ² K)
F	eficiência padrão para aletas com perfil retangular
W	distância entre os tubos (m)
d	diâmetro interno do tubo em U (m)
δ	espessura da aleta (m)
T_o	temperatura do fluido na saída do tubo em U (K)
η	eficiência do coletor solar (-)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Variação da Radiação solar no território Brasileiro.....	2
Figura 2: Matriz energética Brasileira.	3
Figura 3: Participação dos eletrodomésticos no consumo residencial no Brasil.....	4
Figura 4: Transferência de calor por condução em uma dimensão (difusão de energia).	7
Figura 5: Mecanismo de transferência de calor por convecção.....	9
Figura 6: Tipos de Convecção: (a) Convecção forçada; (b) Convecção natural; (c) Ebulição; (d) Condensação.....	9
Figura 7: Coletor solar plano.	14
Figura 8: Secção transversal de um coletor solar de placa plana.	14
Figura 9: Detalhe do coletor de tubos evacuados de vidro simples com tubos de calor.	16
Figura 10: Funcionamento de um coletor solar com tubos de calor.....	16
Figura 11: Coletor solar com tubos de vidro evacuados com tubo em U.....	18
Figura 12: Visão de montagem do coletor solar com tubos em U.	19
Figura 13: Coletor solar de tubos evacuados com tubos em U.	19
Figura 14: Perda óptica de calor através dos tubos de vidro evacuados.....	22
Figura 15: Configuração do coletor solar de tubo a vácuo.....	23
Figura 16: Circuito térmico para o coletor solar de tubo a vácuo.	23
Figura 17: Balanço de energia na aleta.....	27
Figura 18: Fluxograma de materiais e métodos.....	32
Figura 19: Gráfico de referência: Valores medidos em ensaio de eficiência do coletor de tubos a vácuo.....	35
Figura 20: Eficiência em função do fator de perda térmica para validação do modelo matemático.....	36
Figura 21: Variação da eficiência em função do fator $\tau\alpha$	39
Figura 22: Variação do ganho útil de calor em função do fator $\tau\alpha$	40

Figura 23:Variação da Temperatura do fluido na saída em função do fator $\tau\alpha$	40
Figura 24:Variação da eficiência em função da condutância sintética, C_b	41
Figura 25:Variação do ganho de calor útil em função da condutância sintética, C_b	42
Figura 26:Variação do fator de remoção de calor (F_R) em função da condutância sintética, C_b	42
Figura 27:Variação da temperatura do fluido na saída em função da condutância sintética, C_b	43
Figura 28:Variação da eficiência em função da radiação solar incidente.	44
Figura 29:Variação do ganho útil de calor em função da radiação solar incidente.....	44
Figura 30: Variação da temperatura do fluido na saída em função da radiação solar incidente.	45
Figura 31: Variação da eficiência em função da vazão mássica do fluido de trabalho.....	46
Figura 32:Variação do ganho de calor útil em função da vazão mássica do fluido de trabalho.	46
Figura 33: Variação do fator de remoção de calor (F_R) em função da vazão mássica do fluido de trabalho.	47
Figura 34:Variação da temperatura do fluido na saída em função da vazão mássica do fluido de trabalho.	47
Figura 35: Variação da eficiência em função da temperatura do fluido na entrada em diferentes temperaturas ambiente.....	48
Figura 36:Variação do ganho útil de calor em função da temperatura do fluido na entrada em diferentes temperaturas ambiente.	49
Figura 37:Variação do fator de remoção de calor (F_R) em função da temperatura do fluido na entrada em diferentes temperaturas ambiente.	49
Figura 38:Variação da temperatura do fluido na saída em função da temperatura do fluido na entrada em diferentes temperaturas ambiente.	50
Figura 39: Variação da eficiência em função do comprimento dos tubos.	51
Figura 40: Variação do ganho útil de calor em função do comprimento.	51

Figura 41:Variação do fator de remoção de calor em função do comprimento.	52
Figura 42:Variação da temperatura do fluido na saída em função do comprimento dos tubos.	52
Figura 43:Variação da eficiência em função do coeficiente de transferência de calor por convecção no tubo em U.	53
Figura 44: Variação do ganho útil de calor em função do coeficiente de transferência de calor por convecção no tubo em U.	54
Figura 45: Variação do fator de remoção de calor em função do coeficiente de transferência de calor por convecção no tubo em U.	54
Figura 46: Variação da temperatura do fluido na saída em função do coeficiente de transferência de calor por convecção no tubo em U.	55
Figura 47:Variação da eficiência em função da velocidade do ar.	56
Figura 48:Variação do ganho útil de calor em função da velocidade do ar.	56
Figura 49:Variação do Fator de remoção de calor em função da velocidade do ar.	57
Figura 50:Variação da temperatura do fluido na saída em função da velocidade do ar.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Diferença entre áreas de coletores	21
Tabela 2: Variáveis e indicadores.....	33
Tabela 3: Validação do modelo	37
Tabela 4: Parâmetros de projeto	38
Tabela 5: Resultados.....	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	5
1.3	Objetivos.....	6
1.3.1	Geral	6
1.3.2	Específicos.....	6
1.4	Estrutura do Trabalho	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Mecanismos de Transferência de Calor.....	7
2.1.1	Condução	7
2.1.2	Convecção	8
2.1.3	Radiação	10
2.1.4	Resistência térmica.....	11
2.2	Transferência de calor através de aletas	12
2.3	Sistema de Aquecimento Solar.....	13
2.4	Coletores Solares	13
2.4.1	Coletor Solar Plano.....	14
2.4.2	Coletor solar de Tubos a vácuo	15
2.4.3	Outros coletores solares.....	20
2.5	Áreas do coletor.....	20
2.6	Equacionamento do coletor solar	21
2.7	Considerações finais	29
3	METODOLOGIA.....	30
3.1	Tipos de pesquisa.....	30
3.2	Materiais e Métodos	32
3.3	Variáveis e Indicadores	33
3.4	Instrumentos de coleta de dados	33
3.5	Tabulação de dados	34
3.6	Considerações Finais do Capítulo	34
4	RESULTADOS.....	35
4.1	Validação do modelo matemático	35

4.2	Base de dados para o cálculo	37
4.3	Influência de alguns parâmetros no desempenho do coletor solar	38
4.3.1	Variação do fator produto da transmitância e a absorvidade - $\tau\alpha$	39
4.3.2	Variação da Condutância sintética do coletor	41
4.3.3	Variação da radiação solar incidente	43
4.3.4	Variação da vazão mássica	45
4.3.5	Variação da temperatura de entrada do fluido em diferentes temperaturas ambiente	48
4.3.6	Variação do comprimento do coletor	50
4.3.7	Variação do coeficiente de transferência de calor por convecção do Tubo em U..	53
4.3.8	Variação da velocidade do ar.....	55
4.3.9	Considerações finais do capítulo	58
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	59
5.1	Conclusões.....	59
5.2	Recomendações	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Com o avanço das tecnologias, a demanda energética da sociedade moderna tem aumentado cada vez mais e ao passo em que se busca expandir a oferta de energia com sustentabilidade, também é importante buscar mecanismos de redução desta demanda. Nesse cenário, torna-se crescente a busca por fontes renováveis de energia, que podem ser definidas como àquelas que “são repostas imediatamente pela natureza” segundo Goldemberg e Lucon (2007, p.9).

De acordo com Uczai, Tavares e Queiroz Filho, (2012, p. 24):

“As fontes renováveis podem contribuir para o desenvolvimento social e econômico, acesso à energia, segurança energética, mitigação das mudanças climáticas e redução de problemas ambientais e de saúde causados pela poluição do ar, alcançando, assim, todas as dimensões do desenvolvimento sustentável.”

Dentre as fontes renováveis mais discutidas na atualidade está a energia solar. De acordo com Dessbesell e Gomes (2014, p. 7), “energia solar é um termo que se refere à energia proveniente da luz e do calor do sol”. Além disso, é importante ressaltar que ainda segundo Dessbesell e Gomes (2014, p.8), a “terra recebe 174 Peta Watts de radiação solar (insolação) na zona superior da atmosfera”, que pode, portanto, ser aproveitada tanto para geração de eletricidade quanto de calor.

Contudo, essa energia não é distribuída uniformemente pelo território terrestre, variando conforme latitude, estação do ano e condições atmosféricas como nebulosidade e umidade relativa do ar. Devido à localização geográfica, o Brasil é privilegiado em termos de radiação solar. Segundo Tiba *et al.*, p.19) a radiação solar varia entre 14 e 22 MJ/m².dia, como pode ser observado na Figura 1.

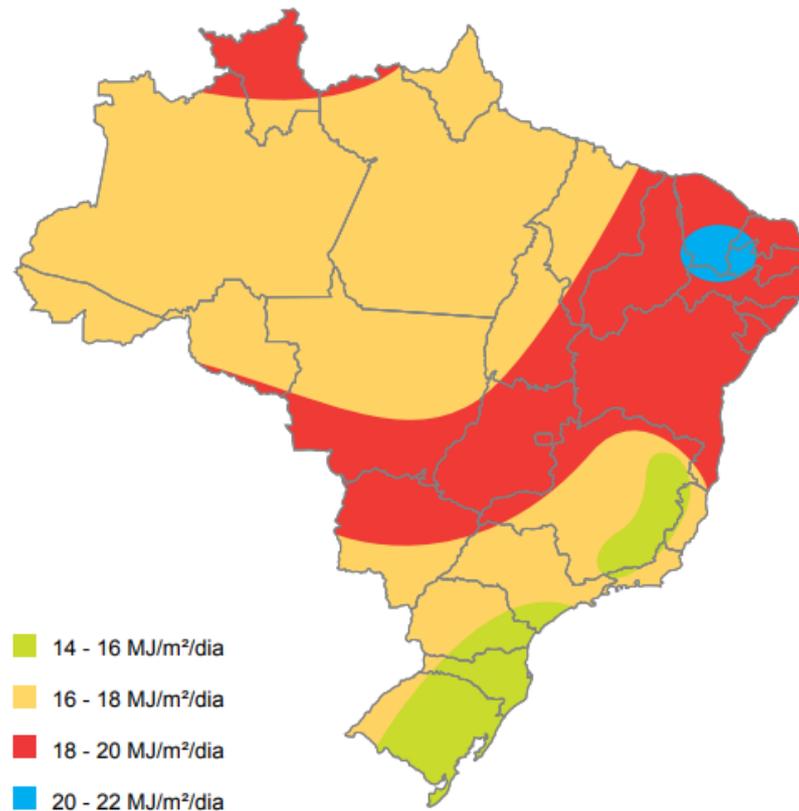


Figura 1: Variação da Radiação solar no território Brasileiro.
Fonte: Atlas da Energia Elétrica do Brasil (2008).

Ainda na Figura 1 é possível inferir que a radiação solar em todo o território brasileiro possui baixa variação, sendo considerada alta em toda a sua extensão. Contudo, quando se trata da utilização da energia solar no Brasil, pode-se observar através da matriz energética apresentada no Balanço Energético Nacional de 2018 (EPE, 2019) que a participação da energia solar é ínfima, conforme a Figura 2.

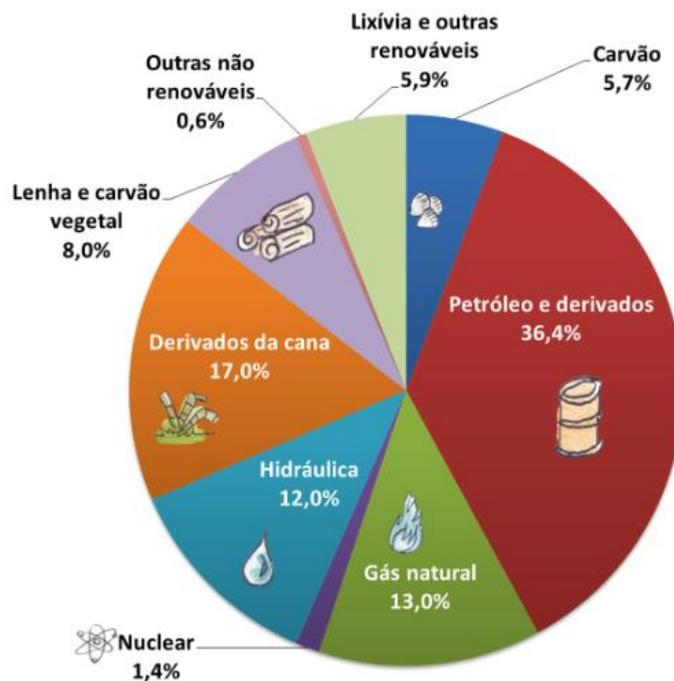


Figura 2: Matriz energética Brasileira.
Fonte: EPE, 2019.

Conforme pode ser visto na Figura 2, a energia solar está englobada na classificação “Lixívia e outras renováveis” que ocupa apenas 5,9% da matriz energética brasileira e dentro dessa porcentagem ela ocupa apenas 0,4% (EPE 2019). Logo, pode-se inferir que a energia solar ocupa 0,025% da matriz energética brasileira como um todo.

Dessa oferta de energia exposta na matriz, boa parte das fontes de energia são utilizadas para geração de eletricidade. Além disso, segundo levantamento feito pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), de 1995 a 2018, a classe residencial é a segunda maior consumidora de eletricidade. Ainda dentro desta classe, segundo o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL (Eletrobrás, 2007) o chuveiro elétrico é o eletrodoméstico que mais consome eletricidade em uma residência, conforme exposto na figura 3.

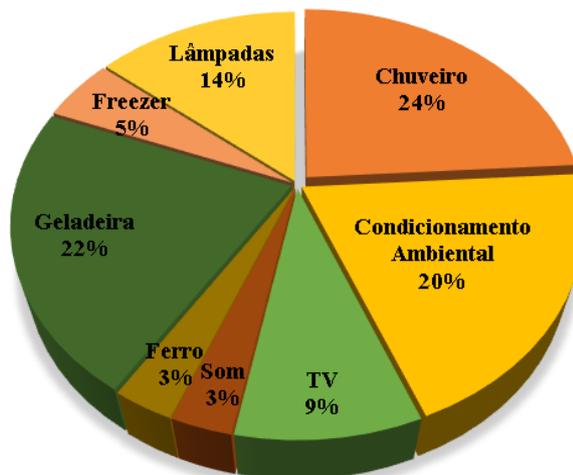


Figura 3: Participação dos eletrodomésticos no consumo residencial no Brasil.
Fonte: PROCEL, 2007 (Adaptado).

Através do gráfico apresentado na Figura 3 pode-se analisar, portanto, que o aquecimento de água é de fato um grande consumidor de eletricidade e que pode ser suprido pela utilização de energia solar através de um coletor solar. Com isso, o consumo nas residências seria reduzido consideravelmente, impactando na mitigação do consumo de outras fontes de energia.

Segundo Toro (2015), a maior parte do aquecimento solar de água no Brasil é realizado com coletores solares planos, uma vez que já é uma tecnologia bem conhecida e fabricada no país, com um custo relativamente baixo. Mas também existem outras tecnologias para realizar este aquecimento, como os coletores solares de tubos a vácuo, que no passado tinha seu uso restringido devido à um elevado custo de fabricação. As principais características dos coletores solares de tubos evacuados são sua superfície seletiva e seu isolamento a vácuo, que proporcionam um melhor isolamento térmico. Estes coletores apresentam, portanto, a vantagem de possuir um melhor desempenho em regiões frias quando comparado aos de placas planas.

De acordo com Toro (2015), a recente proliferação do uso de coletores solares de tubos a vácuo implicou em uma produção massiva desta tecnologia em países como a China. Contudo, é importante pontuar que isto se tornou possível somente devido à descoberta de métodos de fabricação com custos menores, trazendo aos coletores de tubos evacuados um custo mais competitivo para o aquecimento de água para uso doméstico.

Devido à esta redução dos preços, os coletores solares de tubo a vácuo estão sendo difundidos cada vez mais no mercado brasileiro, chegando a ter mais de um modelo disponível no mercado. Faz-se necessário, portanto, entender as especificidades desta tecnologia bem como avaliar os seus parâmetros.

Nesse sentido, apresenta-se a seguinte problemática:

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

1.2 Justificativa

“A conscientização de que a maioria dos recursos, sejam eles energéticos ou não, são finitos, tem aberto espaço para tentar equacionar a relação do homem com a natureza em termos de uma melhor e mais harmônica convivência” (TIBA *et al.*, 2000, p.1). Nesse sentido, a energia solar apresenta-se como uma tecnologia que se bem aplicada e utilizada pode provocar mudanças culturais e trazer importantes contribuições para o desenvolvimento sustentável.

Através do coletor solar, um dispositivo que permite o aquecimento de água a partir da energia solar térmica, pode-se gerar um impacto significativo na utilização de energia elétrica nos domicílios brasileiros uma vez que os chuveiros elétricos para aquecimento de água representam 24% do consumo (PROCEL, 2007).

Primeiramente, os coletores desenvolvidos para estes fins eram de placas planas, contudo, segundo Ávila (2017, p.12) tal tecnologia mostrara certa dificuldade ao ser aplicada nas regiões mais frias do país. Em contrapartida, segundo Arora *et al.* (2011, p.1) coletores solares de tubo a vácuo possuem melhor performance em climas frios e nublados, constituindo-se, portanto, em uma ótima alternativa de aquecimento solar a ser difundida rumo ao desenvolvimento sustentável.

Tendo em vista a esta conhecida necessidade de difundir conhecimentos a respeito dos coletores solares, com a visão de que esta tecnologia pode reduzir o consumo de fontes mais nocivas de energia, o presente estudo se ocupa em discutir quais parâmetros são relevantes em termos de projetos de coletores solares de tubos evacuados com tubos em U.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Analisar o desempenho de coletores solares de tubos evacuados frente à variação dos parâmetros de operação que o influenciam.

1.3.2 Específicos

- Realizar revisão bibliográfica sobre os mecanismos de Transferência de Calor, aquecimento solar e coletores solares de tubo à vácuo para o aquecimento de água;
- Realizar equacionamento matemático para o projeto do coletor através da aplicação do balanço de energia;
- Analisar a influência dos parâmetros de projeto relevantes no desempenho do coletor solar;
- Analisar os resultados.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está subdividido em cinco capítulos, no qual o primeiro apresenta a formulação do problema, a justificativa para o desenvolvimento do estudo e seus objetivos geral e específicos. Já no segundo capítulo, apresenta-se uma revisão bibliográfica na qual são expostos os mecanismos de transferência de calor, além de estudos sobre coletores solares de tubo à vácuo bem como conceitos e teorias a respeito dos assuntos. Ainda neste capítulo é exposta a aplicação da modelagem matemática a ser utilizada para estudo do coletor. No capítulo três tem-se a metodologia adotada na pesquisa. No capítulo quatro analisa-se os resultados obtidos e por fim, no capítulo cinco é exposta a conclusão do trabalho e possíveis sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No decorrer deste capítulo serão abordados os mecanismos de transferência de calor, sendo eles radiação, convecção e condução, o funcionamento de um sistema de aquecimento solar além de uma explicação a respeito dos coletores solares de tubo à vácuo e o seu equacionamento matemático.

2.1 Mecanismos de Transferência de Calor

Incropera *et al.* (2008, p.2) define: “Transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido à uma diferença de temperaturas no espaço”. É importante ressaltar, conforme Çengel e Ghajar (2012, p.17), que a transferência de calor “ocorre do meio de maior temperatura para o de menor temperatura e cessa quando os dois meios atingem a mesma temperatura” chegando, portanto, ao equilíbrio térmico.

Para que a transferência de calor ocorra existem três mecanismos (ou modos): condução, convecção e radiação, os quais são explicados a seguir.

2.1.1 Condução

Para Çengel e Ghajar (2012, p. 17) a condução é “A transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para partículas vizinhas adjacentes menos energéticas, como resultado da interação entre elas”. Diante disso, Incropera *et al.* (2008) alerta ainda que processos de transferência de calor deste tipo ocorre devido a conceitos relacionados à atividade atômica e molecular quando existe um gradiente de temperatura em um meio estacionário (sólido ou fluido – líquido ou gases), conforme exemplificado na Figura 4.

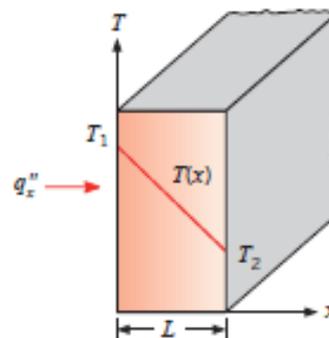


Figura 4: Transferência de calor por condução em uma dimensão (difusão de energia).
Fonte: Incropera *et al.* (2008, p. 4).

Segundo Çengel e Ghajar (2012), a transferência de calor por condução pode ser determinada através da Lei de Fourier. Sendo assim, para uma parede plana unidimensional como a exposta na figura 4, o fluxo de calor pode ser apresentado pela equação:

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

Sendo:

q_x'' - fluxo de calor (W/m²);

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

dT/dx - gradiente de temperatura (°C/m; K/m).

A respeito da condutividade térmica (k), Çengel e Ghajar (2012, p. 19) explicam que é “a medida da capacidade do material em conduzir calor”, sendo uma propriedade de grande relevância para a condução. Ressalta-se ainda que o sinal negativo na equação (1) se deve ao fato de o calor ser transferido em uma direção de temperatura decrescente.

Segundo Incropera *et al.* (2008), dado um regime estacionário, no qual as propriedades não variam com o tempo, a distribuição de temperaturas é linear, o fluxo de calor se dá conforme a equação (2):

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

2.1.2 Convecção

A convecção, conforme Incropera *et al.* (2008, p. 6), “abrange dois outros mecanismos de transferência de calor, são eles: difusão, devido ao movimento molecular aleatório, e a advecção, devido ao movimento global macroscópico”. Já Çengel e Ghajar (2012, p. 25) definem que a convecção “é o modo de transferência de energia entre a superfície sólida e a líquida ou gás adjacente, que está em movimento e que envolve os efeitos combinados de condução e de movimento de um fluido”.

Sabe-se ainda que a convecção pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento do fluido, segundo Incropera *et al.* (2008), podendo ser forçada, quando o escoamento do fluido tem origem em meios externos como ventiladores, bombas ou ventos

atmosféricos, ou natural (ou livre), quando tem origem nas diferenças de densidade causadas pela variação de temperatura do fluido. Há processos de convecção, nos quais ocorre a troca de calor latente devido à mudança de fase entre os estados líquido e vapor do fluido. O mecanismo de transferência de calor por convecção pode ser entendido observando a Figura 5, e a classificação conforme a origem do escoamento do fluido é exemplificada através da Figura 6.

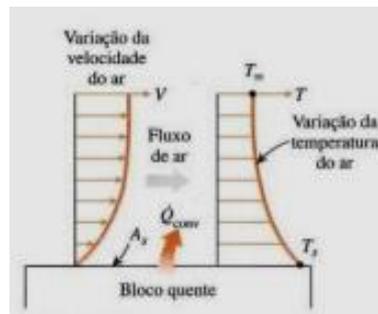


Figura 5: Mecanismo de transferência de calor por convecção.
Fonte: Çengel e Ghajar (2012, p. 26).

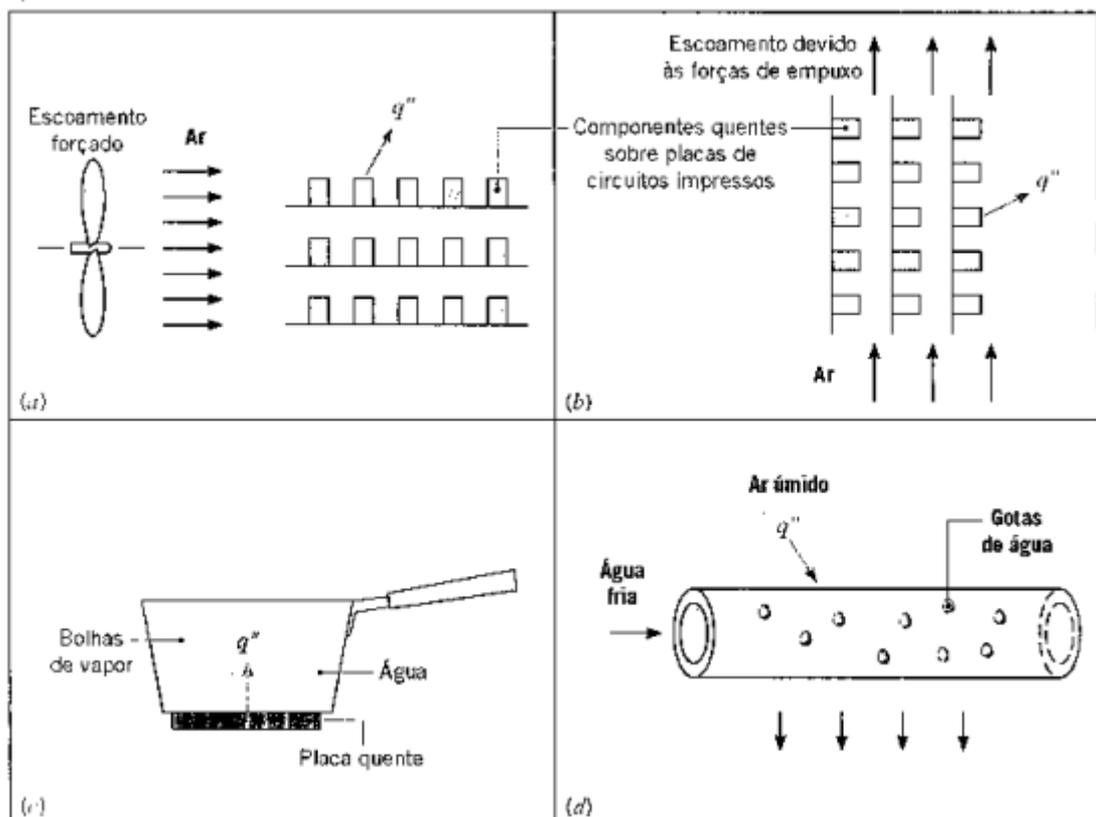


Figura 6: Tipos de Convecção: (a) Convecção forçada; (b) Convecção natural; (c) Ebulição; (d) Condensação.
Fonte: Incropera *et al.* (2008, p. 5).

Çengel e Ghajar (2012) afirmam que a taxa de transferência de calor por convecção é proporcional à diferença de temperatura, sendo expressa pela Lei de Newton como:

$$q_{conv} = h(T_s - T_{\infty}) \quad (3)$$

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 ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$).

Ainda para Çengel e Ghajar (2012), o coeficiente de transferência de calor por convecção depende de: propriedades do fluido; velocidade da massa de fluido; geometria da superfície e natureza do escoamento do fluido.

Já para Incropera *et al.* (2008), uma vez que o fluxo é superior a zero, o calor é transferido a partir da superfície para o fluxo, no contrário quando é menor que zero o calor é transmitido do fluxo para a superfície.

2.1.3 Radiação

Finalmente, a radiação térmica é definida por Incropera *et al.* (2008, p. 8) como “a energia emitida por toda matéria que se encontra em uma temperatura não nula”. Çengel e Ghajar (2012, p.27) explicam que essa energia é emitida “sob a forma de ondas eletromagnéticas (ou fótons) como resultado das mudanças nas configurações eletrônicas de átomos e moléculas”. É importante destacar ainda que uma vez que a energia do campo radioativo é transportada através de ondas eletromagnéticas, não há necessidade de um meio material para que ocorra a transferência por radiação, sendo ainda mais eficiente no vácuo.

Para Incropera *et al.* (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 ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}^4$).

De acordo com Incropera *et al.* (2008), a partir de sua vizinhança, a radiação incidente (G) pode incidir sobre uma superfície. Dessa forma, a taxa com que todas as radiações incidem sobre uma área unitária de superfície é designada através de irradiação, sendo ainda classificada como absorvida, refletida ou transmitida, e é dependente da superfície. A Irradiação absorvida pode ser calculada através da equação:

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

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).

É possível ainda expressar a transferência de radiação líquida entre uma superfície e a vizinhança através da equação dada por Incropera *et al.* (2008):

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

Sendo:

q''_{rad} – Fluxo de radiação (W/m^2).

Ou,

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

Sendo:

q_{rad} – Taxa líquida de transferência de calor por radiação (W).

h_r – Coeficiente de transferência de calor por radiação (W/m^2K) dado por:

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

2.1.4 Resistência térmica

A resistência térmica (R_t), segundo Incropera *et al.* (2008) está relacionada à transferência de calor pela equação:

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

Já a resistência térmica condutiva para uma superfície plana é expressa por:

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

Para um Tubo cilíndrico:

$$R_t = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi kL} \quad (11)$$

Em que:

r_e é o raio externo do cilindro (m);

r_i é o raio interno do cilindro (m).

Enquanto que a resistência térmica convectiva será:

$$R_{t,conv} = \frac{T_s - T_\infty}{q} = \frac{1}{hA} \quad (12)$$

E a resistência térmica radiante é expressa por:

$$R_{t,rad} = \frac{T_s - T_{viz}}{q_{rad}} = \frac{1}{h_r A} \quad (13)$$

2.2 Transferência de calor através de aletas

Conforme apresentado por Incropera *et al.* (2008), existem estratégias para elevar a taxa de transferência de calor conhecidas, uma delas consiste em aumentar o coeficiente de transferência de calor por convecção através do aumento da velocidade do fluido e/ou quando se reduz a temperatura do fluido que passa no casco, entretanto, esta estratégia muitas vezes exige instalação de novos equipamentos, o que nem sempre é viável e ainda que seja pode ser insuficiente para gerar bons resultados, a depender do contexto. Outra estratégia, bastante visada, consiste em aumentar a área de troca térmica ao inserir superfícies estendidas, as chamadas aletas.

Segundo Çengel e Ghajar (2012), as aletas elevam a transferência de calor a partir de sua superfície estendida, uma vez que ocorre o aumento da área de troca térmica, expondo a superfície maior à convecção e à radiação. Vias de regra, as aletas são constituídas de materiais condutores, como alumínio e cobre. De acordo com Santos e Gabrich (2018) as aletas podem ser fabricadas por extrusão, fixação de uma folha fina de metal sobre uma superfície ou por solda.

2.3 Sistema de Aquecimento Solar

O sistema de aquecimento solar tratado neste estudo é referente ao aquecimento de água para consumo doméstico por meio da radiação solar. Segundo a NBR 15569 (ABNT, 2008), o sistema deve ser composto por coletor(es) solar(es), reservatório(s) térmico(s), aquecimento auxiliar e suas interligações hidráulicas. Tais componentes quando combinados corretamente formam um conjunto que permite a conversão da radiação solar, incidente no coletor, em energia térmica.

De acordo com Toro (2015), os sistemas de aquecimento de água por radiação solar podem ser classificados como diretos ou indiretos. Sendo o direto aquele que usa como fluido de trabalho o mesmo fluido que será consumido, no caso a água. Já no indireto o fluido de trabalho é diferente do fluido de consumo, geralmente um óleo ou misturas, com isso, a transferência de calor entre os fluidos ocorre através de um trocador de calor. No presente estudo será adotado um sistema direto.

2.4 Coletores Solares

Segundo Rosa (2012, p.8) “O coletor solar é um dispositivo que converte a radiação solar em energia térmica aquecendo um fluido de trabalho, que pode ser a água, ar ou outro fluido térmico”.

De acordo com Duffie e Beckman (1991) os coletores solares precisam possuir alta transmissividade e absorvidade de radiação solar. Além disso, é importante atentar-se que nos coletores perde-se energia por convecção e radiação, sendo ainda desejável que a emissividade da superfície seja baixa para reduzir as perdas por radiação.

Atualmente existe mais de um modelo de coletor solar disponível para o uso na composição de um sistema de aquecimento solar. É importante portanto estudar cada caso e equilibrar os parâmetros a fim de escolher o melhor modelo para o empreendimento desejado.

2.4.1 Coletor Solar Plano

É importante retomar a ideia de que o coletor solar é um dispositivo que busca absorver a radiação solar incidente e transferi-la para um fluido de trabalho sob forma de energia térmica. Quando a superfície absorvedora do coletor é classificada como plana, tem-se um coletor solar de placas planas.

Segundo Duffie e Beckman (1991), um coletor solar plano com cobertura, tipo mais comum no mercado atualmente (Figuras 7 e 8), é composto basicamente por uma superfície absorvedora de energia solar, normalmente feita de cobre ou alumínio, ela é responsável por transferir a energia absorvida para o fluido; por uma 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 a fim de reduzir as perdas por convecção para a atmosfera; por tubos ascendentes nos quais passará o fluido de trabalho e por fim o isolamento térmico para diminuir as perdas por condução.



Figura 7: Coletor solar plano.
Fonte: Rosa (2012).

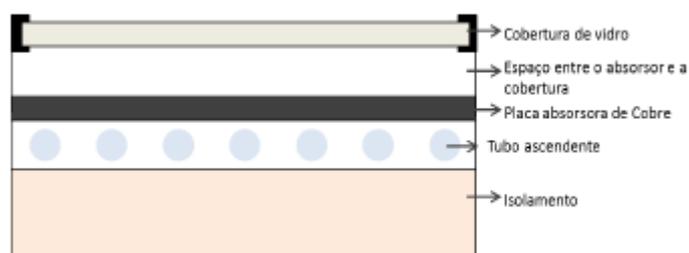


Figura 8: Secção transversal de um coletor solar de placa plana.
Fonte: Mendes (2017).

Nas figuras torna-se visual o esquema descrito acima podendo-se notar a organização do sistema a fim de compreender o seu funcionamento. Contudo, via de regra os coletores solares de placas planas são mais adequados para climas mais quentes, perdendo seu desempenho quando aplicado em regiões mais frias Arora *et al.* (2011).

2.4.2 Coletor solar de Tubos a vácuo

Uma vez que os coletores solares convencionais se tornam menos efetivos em temperaturas menores, o coletor solar de tubos a vácuo, que antes era utilizado somente em aplicações industriais, ganhou espaço também no aquecimento de água domiciliar.

Segundo Manea, Rosa e Krezinger (2013, p. 40), “coletores solares que utilizam tubos a vácuo minimizam a troca de calor por convecção e condução colocando a superfície absorvedora em um ambiente quase totalmente evacuado de matéria”. Como dito no tópico 2.1.3 a radiação solar é ainda mais eficiente no vácuo, chegando à superfície absorvedora, mas tal estratégia irá impedir a perda de calor por condução e convecção por parte da superfície absorvedora, uma vez que estas não ocorrem na ausência de um meio material. Logo, o vácuo atua como um isolante, maximizando a eficiência do coletor.

Além disso, segundo Manea, Rosa e Krezinger. (2013) a troca de calor por radiação também é minimizada uma vez que a superfície absorvedora possui uma baixa emissividade. Com isso, este tipo de coletor possui uma vantagem gigantesca em relação aos coletores planos no que se diz respeito a perdas térmicas. Seguindo esta premissa, existem alguns modelos de coletores solares de tubos a vácuo, dos quais trata-se a seguir.

Nos coletores de tubos a vácuo, de acordo com Arora *et al.* (2011), cada tubo evacuado consiste em dois tubos feitos de vidro, um material extremamente resistente. O tubo da parte externa tem uma refletividade muito baixa e transmissividade muito alta, favorecendo a passagem da radiação. O tubo interno tem uma camada de revestimento seletivo que maximiza a absorção de energia solar e em contrapartida minimiza a reflexão, com isso, o calor que entra no sistema fica contido nele.

2.4.2.1 Tubos de calor (*heat-pipe*)

Os tubos a vácuo *heat-pipe*, como o representado na figura 9, são caracterizados pela presença de um tubo de cobre selado (tubo de calor ou *heat-pipe*) no interior do tubo de vidro interno, que é o responsável pela condução de calor. De acordo com Lovatel (2013, p.23), “dentro deste tubo selado há um fluido (água e/ou glicol) que evapora e condensa alternadamente a baixa pressão e temperatura (pouco acima da temperatura ambiente)”.

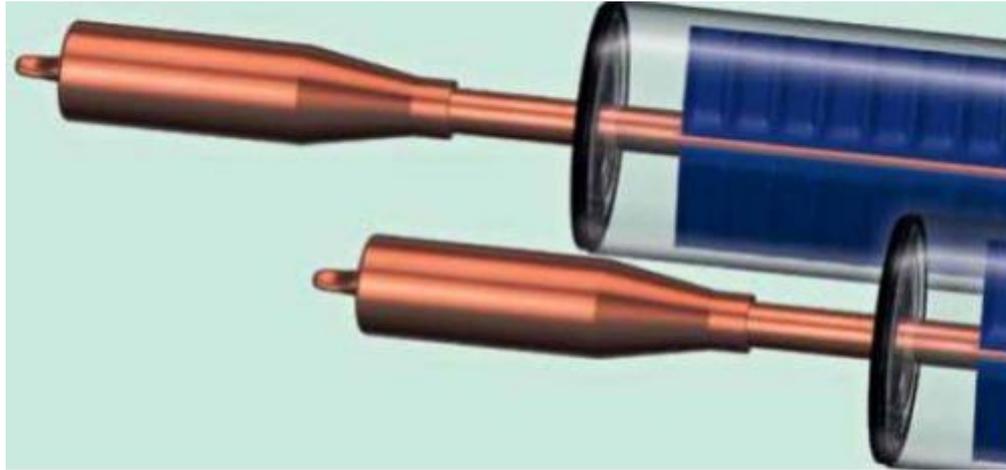


Figura 9: Detalhe do coletor de tubos evacuados de vidro simples com tubos de calor.
Fonte: Universidade do sol (2013, p.7).

Já segundo Mahjouri (2004), os tubos de calor performam como um condutor térmico de alta condutância. Devido às suas propriedades termo físicas, possui uma taxa de transferência de calor que poderia ser milhares de vezes maior que os melhores condutores térmicos sólidos com as mesmas dimensões. Com isso, os coletores solares com tubos de calor possuem um funcionamento que atrelam as vantagens já mencionadas dos tubos de calor e do vácuo, como representado na figura 10.

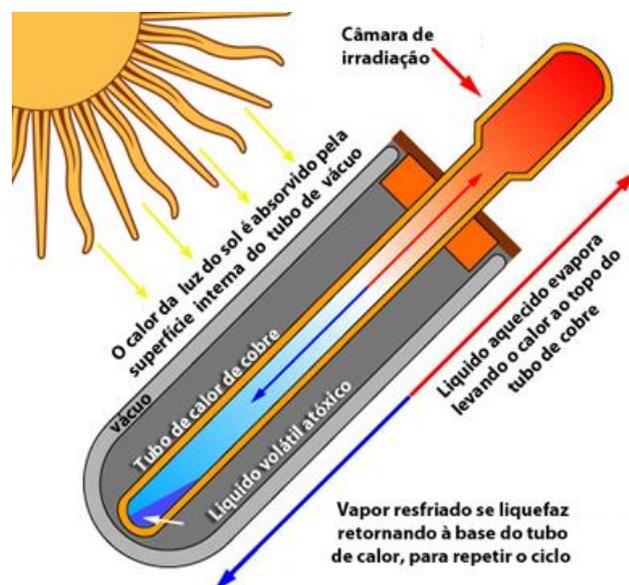


Figura 10: Funcionamento de um coletor solar com tubos de calor.
Fonte: Marla Energias (2014).

Como pode ser observado na figura 10, em termos de funcionamento, os chamados tubos de calor realizam ciclos de evaporação-condensação, geralmente são formados por uma região evaporadora, uma adiabática e outra condensadora, e o retorno do condensado à parte de evaporação é realizada através de um material poroso no qual a pressão capilar é a força motriz

do escoamento. Seguindo este mecanismo, nos coletores solares a tubos de vácuo com *heat pipes*, de acordo com Lovatel (2013), a região responsável pela evaporação é a que recebe a radiação solar direta, já a parte condensadora fica na extremidade superior dissipando calor latente de condensação do fluido de trabalho para a água que está dentro do reservatório térmico.

Os coletores com tubos de calor, segundo MA *et al.* (2010), possuem algumas vantagens como anticongelamento, rápida inicialização, resistência à alta pressão, facilidade de instalação e manutenção, entre outras. Por estes motivos, muitos países têm prestado cada vez mais atenção a esta tecnologia.

2.4.2.2 Tubos em U

De acordo com Avallone (2013), os coletores solares de tubos evacuados com tubos em U, como os apresentados na figura 11, são caracterizados por possuírem um tubo de cobre em forma de “U” encaixado no interior de uma aleta de alumínio ou cobre e este conjunto é posicionado no interior do tubo absorvedor. Através do tubo metálico em forma de U cria-se uma circulação de água, fluido de trabalho, que durante o processo recebe o calor proveniente da incidência solar e ao sair aquecida é armazenada em um reservatório térmico para uso. Na região interna entre a aleta e o tubo absorvedor, há uma camada de circulação de ar que recebe o calor da superfície absorvedora de vidro e o transfere para a aleta de cobre.

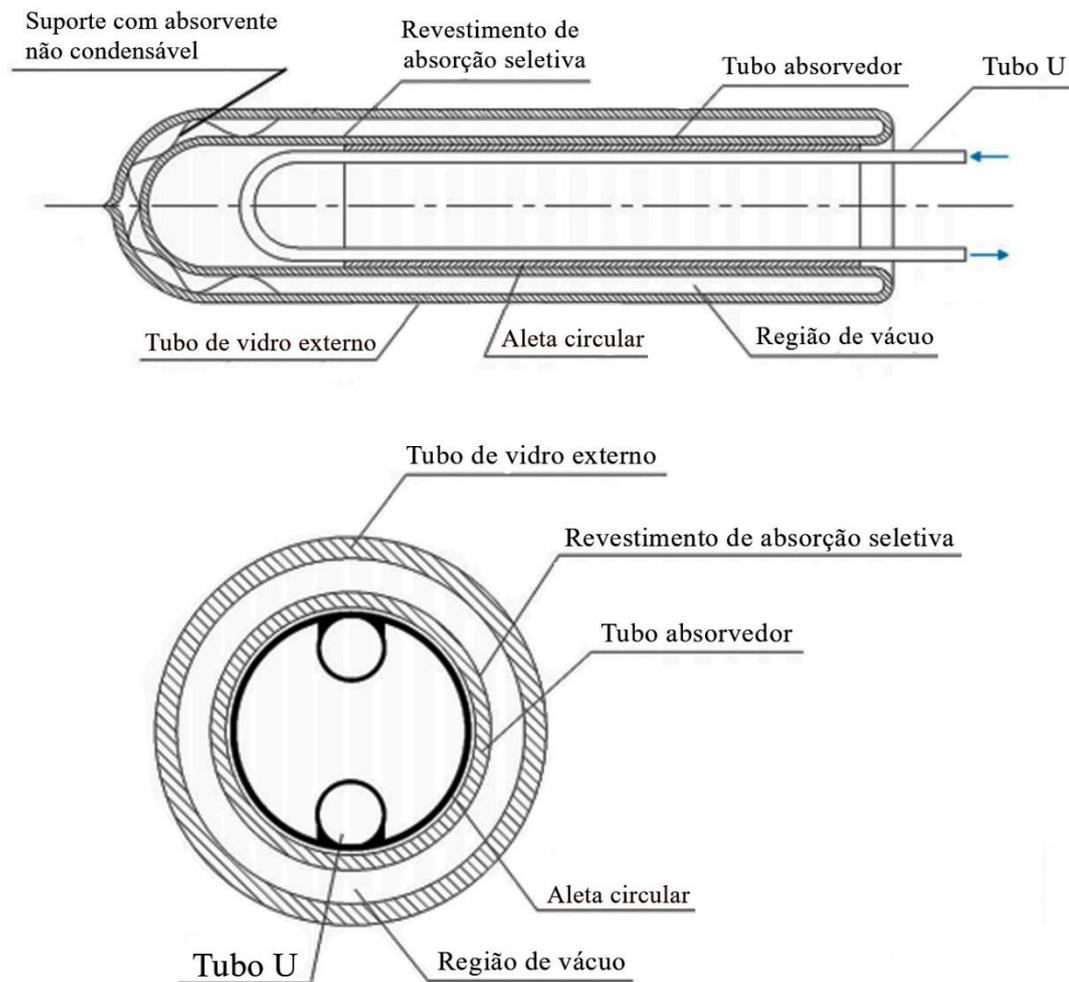


Figura 11: Coletor solar com tubos de vidro evacuados com tubo em U.

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

Através da figura 11 é possível observar a estrutura dos coletores solares de tubos evacuados com tubos em U. Conforme descreve Naik *et al.* (2016), consiste em tubo externo de vidro, tubo interno de vidro, aleta de cobre ou alumínio e tubo de cobre em formato de U. Inicialmente, radiação solar incidente no tubo de vidro externo é transferida para a superfície do tubo interno, que possui absorvidade seletiva, e então é absorvida pelo material da aleta. Finalmente a energia coletada pela aleta é transferida para o fluido de trabalho em circulação dentro do tubo com formato em U por convecção. Através da figura 12, torna-se possível visualizar esta estrutura.



Figura 12: Visão de montagem do coletor solar com tubos em U.

Fonte: Zhejiang Sidite New Energy Co., Ltd ([s.d], p.5).

Liang *et al.* (2011) destaca que o coletor solar de tubos evacuados com tubo em U, figura 13, possui a vantagem de possuir uma alta capacidade de suportar pressões elevadas, além de sua simplicidade estrutural quando comparado aos demais.



Figura 13: Coletor solar de tubos evacuados com tubos em U.

Fonte: Komeco, 2017.

2.4.3 Outros coletores solares

É importante mencionar que existem ainda outros tipos de coletores solares que são empregados no aquecimento de fluidos, podendo trabalhar em baixa ou média temperaturas. Segundo Ávila (2017), seja para a utilização direta dos fluidos aquecidos ou para geração de energia elétrica, são eles: coletores solares de placas planas sem cobertura; coletor cilindro-parabólico composto – CPC, estacionário; coletor de máxima reflexão e coletor linear Fresnel.

2.5 Áreas do coletor

Segundo exposto por Rosa, Manea e Krezinger (2013), a definição da área de um coletor é um fator importantíssimo para medir a eficiência de um coletor solar. Para tanto, existem diferentes normas que podem ser consideradas para guiar o cálculo e com isso é importante especificar os tipos de áreas que vão ser utilizadas no trabalho, podendo-se classificar em três tipos.

De acordo com a norma brasileira NBR 15747-2 (ABNT, 2009) apud Rosa, Manea e Krezinger (2013), um absorvedor é o componente do coletor que retém a energia radiante e a transfere para o fluido de trabalho em forma de calor. Já a abertura de um coletor, pode ser definida como a região através da qual a radiação não concentrada será admitida. Por fim, a área bruta ou área total do coletor é a área máxima projetada de um coletor completo, sem que se considere as tubulações externas.

Ainda de acordo com a norma, dada a definição de absorvedor, no cálculo da área absorvedora de um coletor solar de tubos evacuados será considerada a soma das áreas projetadas dos tubos internos. Já quanto a área de abertura, considera-se a soma das áreas projetadas dos tubos externos. Segundo a NBR 15747-2 (ABNT, 2009) apud Manea, Rosa e Krezinger. (2013), recomenda-se a utilização da área de abertura para realização do cálculo de eficiência do coletor, embora não a especifique com clareza. Já a norma ASHRAE 93-2003 (ASHRAE, 2003) apud Manea, Rosa e Krezinger. (2013) define a área de abertura como:

$$Aa = LD_p N \quad (14)$$

Sendo que,

L é o comprimento do tubo (m);

D_p é o seu diâmetro externo do tubo interno (m);

N é o número de tubos.

Por fim, com relação à área total, toma-se como a área total externa incluindo cabeçote e suportes inferiores.

Através da tabela 1, pode-se observar uma comparação das áreas de um coletor solar de tubos evacuados com as áreas de dois tipos de coletores planos, possibilitando uma percepção maior do objeto deste estudo.

Tabela 1: Diferença entre áreas de coletores

Tipo de Coletor	Área absorvedora	Área abertura	Área total
Plano sem cobertura	1,60 m ²	1,60 m ²	1,60 m ²
Plano com cobertura	1,60 m ²	1,68 m ²	1,80 m ²
Tubos	1,60 m ²	1,92 m ²	3,05 m ²

Fonte: Rosa, Manea e Krezinger (2013).

2.6 Equacionamento do coletor solar

O coletor considerado neste estudo é um coletor de tubos evacuados com duas camadas de tubos de vidro evacuado que são fundidas juntas ao final e no tubo absorvedor é depositado um revestimento com absorção seletiva em sua superfície externa. O ar entre os tubos de vidro é bombeado com a finalidade de formar o vácuo. Desta forma, a energia solar pode ser bem aproveitada e as perdas devido a condução e convecção de calor são minimizadas. O tubo em U é soldado ou cunhado dentro de uma aleta circular.

A quantidade de energia solar absorvida pelo revestimento seletivo é igual à radiação solar incidente subtraídas as perdas óticas como representado na figura 14, a seguir.

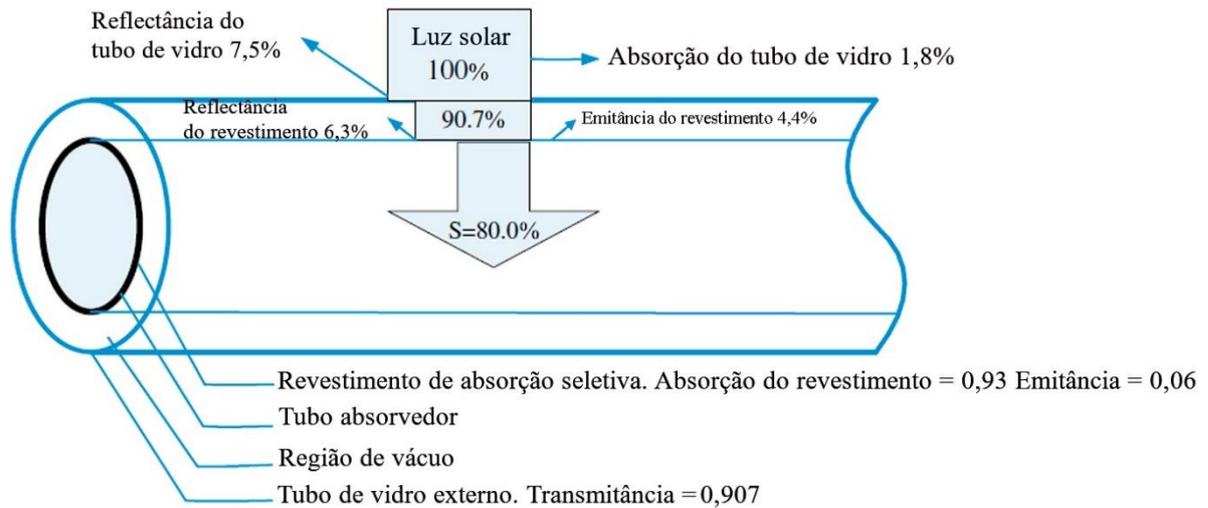


Figura 14: Perda óptica de calor através dos tubos de vidro evacuados.

Fonte: Adaptada de MA *et al.* (2010).

Para realizar o equacionamento do coletor solar, adota-se em uma maior parte a teoria descrita no trabalho de MA *et al.* (2010), na qual é feita a análise unidimensional de um coletor solar de tubo evacuado com tubos em U. Com a finalidade de simplificar os cálculos, sem perda da precisão, algumas suposições são feitas:

- (1) A resistência térmica através da parede do tubo de vidro externo é desprezível;
- (2) A absorção de energia solar do tubo de vidro externo é desprezível;
- (3) O fluxo de calor médio ao longo da direção circunferencial é usado como uma condição de contorno para o fluxo de calor, embora o fluxo de calor não seja igualmente distribuído em condições reais.
- (4) O processo de transferência de calor é tomado como um fenômeno estável; fenômenos transientes não são incluídos neste estudo.

A configuração de coletor solar adotada é retratada através das figuras 15 e 16.

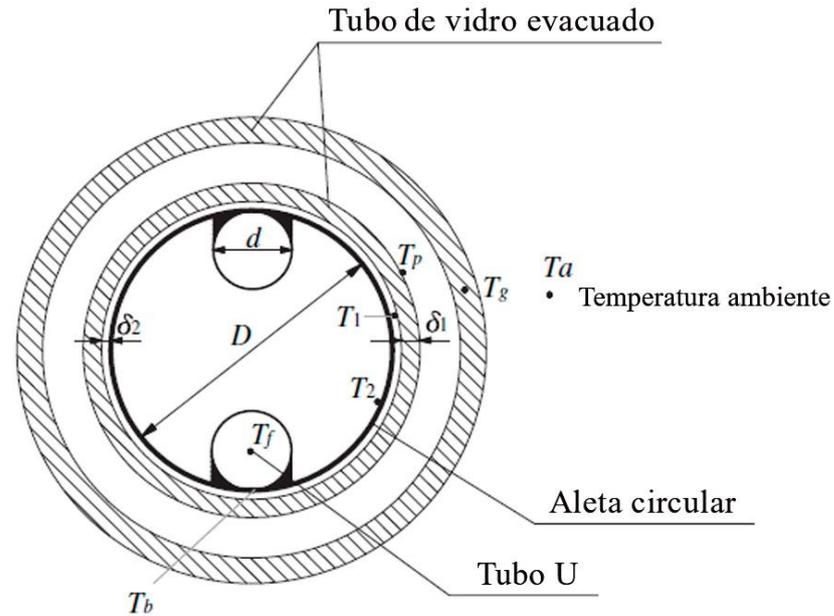


Figura 15: Configuração do coletor solar de tubo a vácuo.

Fonte: Adaptado de MA *et al.* (2010).

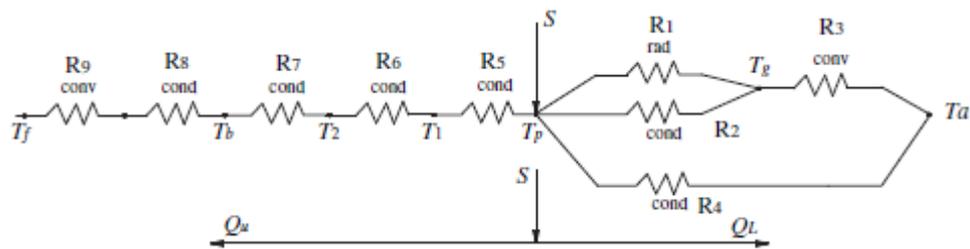


Figura 16: Circuito térmico para o coletor solar de tubo a vácuo.

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

Com base nas suposições adotadas anteriormente um circuito de resistências térmicas é adotado para descrever o fenômeno físico. Através da figura 16, é possível compreender os processos envolvidos na operação do coletor solar, uma vez que se analisa o circuito térmico equivalente apresentado e com isso, conforme descrito por MA *et al.* (2010), infere-se que a perda térmica, Q_L , pode ser expressa como:

$$Q_L = S - Q_u \quad (15)$$

Sendo:

S a quantidade de energia solar absorvida pelo revestimento absorvedor (W/m^2); e

Q_u o ganho de calor líquido absorvido pelo fluido de trabalho (W/m^2).

Desta forma, o coeficiente de perda global de calor, U_L ($W/m^2 \cdot K$), pode ser definida como:

$$U_L = U_t + U_e \quad (16)$$

Sendo que:

U_t é o fator de perda de calor pela superfície absorvedora para o ambiente externo ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$) e

U_e é o fator de perda de calor pelas laterais, que pode ser obtido através da equação a seguir, referente à área da superfície externa do tubo absorvedor ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$).

Se o produto do fator de perda lateral pela área é definido como $(UA)_{\text{lateral}}$ então o fator de perda lateral, baseado na superfície externa do tubo absorvedor, A_c , é:

$$U_e = \frac{(UA)_{\text{lateral}}}{A_c} \quad (17)$$

$$A_c = \pi DL \quad (18)$$

Sendo que:

D é o diâmetro externo do tubo absorvedor (m);

L é o comprimento do tubo absorvedor (m).

Além disso, o fator de perda proveniente do tubo absorvedor para o ambiente, U_t ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$), pode ser expresso por:

$$U_t = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{g-a}}\right) + \left(\frac{1}{h_{p-g,r} + h_{p-g,c}}\right)} \quad (19)$$

Em que:

h_{g-a} é o coeficiente de transferência de calor por convecção proveniente do tubo de vidro externo para os arredores ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$);

$h_{p-g,r}$ representa o coeficiente de transferência de calor por radiação entre o tubo absorvedor e o tubo de vidro externo ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$);

$h_{p-g,c}$ é o coeficiente de transferência de calor por condução pelo suporte e o fechamento do coletor solar de tubos evacuados ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$).

Estes coeficientes de transferência de calor são referentes à área externa do tubo absorvedor, A_c (m^2).

O coeficiente $h_{p-g,r}$ muda com a temperatura do tubo absorvedor, T_p (K) e o tubo de vidro externo, T_g , e pode ser expressa como:

$$h_{p-g,r} = \left(\frac{\sigma \varepsilon_p}{1 + (1 - \varepsilon_p) \left(\frac{\varepsilon_p D}{\varepsilon_g D_g} \right)} \right) (T_p^2 + T_g^2)(T_p + T_g) \quad (20)$$

Sendo que:

ε_p é a emissividade do revestimento seletivo;

ε_g é a emissividade da superfície interna do vidro externo;

σ é a constante de Stefan-Boltzmann;

D_g é o diâmetro interno do tubo de vidro externo (m).

O coeficiente de convecção entre o vidro e o ambiente, segundo Kizilkan e Yamaguchi (2019) pode ser calculado através da equação:

$$h_{g-a} = \frac{Nu_a k_a}{D_g} \quad (21)$$

Em que:

k_a é a condutividade térmica do ar (W/m.K);

e D_g é o diâmetro externo do tubo de vidro externo (m).

E o número de Nusselt para o ar, Nu_a , pode ser determinado por:

$$Nu_a = 0,4 + 0,54 Re^{0,52} \quad \text{Para } 0,1 < Re < 1000 \quad (22)$$

$$Nu_a = 0,3 Re^{0,6} \quad \text{Para } 1000 < Re < 50000 \quad (23)$$

Sendo Re o número de Reynolds, a ser calculado por:

$$Re_a = \frac{VD_g}{\nu} \quad (22)$$

Sendo que:

V é a velocidade de escoamento do ar (m/s) e

ν é a viscosidade cinemática do ar (m²/s).

É importante executar o cálculo do fator de perda térmica global, uma vez que ele se constitui em um importante parâmetro para medir a performance do coletor. Contudo, para calcular o coeficiente de transferência de calor por condução, $h_{p-g,c}$ e o fator de perdas pela lateral do tubo, U_e , não podem ser previstos com precisão porque estão relacionados com o ambiente e a qualidade de fabricação. Desta forma se faz necessário utilizar valores obtidos em resultados experimentais, conforme MA et.al (2010). Logo, o coeficiente de transferência de calor por condução, $h_{p-g,c}$ e o fator de perdas pela lateral do tubo, U_e serão considerados $0,2796 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ e $0,1687 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, respectivamente.

Fazendo-se um balanço de energia entre o tubo absorvedor e o ambiente, é possível encontrar a expressão:

$$U_t(T_p - T_a) = h_{p-g,r}(T_p - T_g) + h_{p-g,c}(T_p - T_g) \quad (23)$$

Utilizando as equações (18), (19), (20) e (23), e se T_p e T_a são conhecidos, os parâmetros desconhecidos U_t , $h_{p-g,r}$ e T_g podem ser determinados.

Para realizar os cálculos do fator de eficiência do coletor é importante adotar algumas suposições:

- (1) O gradiente de temperatura na direção do fluxo ao longo do tubo em U é insignificante;
- (2) A transferência de calor da aleta pode ser estudada como placa plana, uma vez que a superfície do tubo absorvedor é paralela à aleta;
- (3) O gradiente de temperatura da aleta ao longo da direção radial é desprezível.

Além disso, é importante compreender que a energia absorvida através do tubo absorvedor é transferida para o fluido de trabalho, dentro do tubo em U , através da aleta e do próprio tubo em U . Desta forma, a temperatura ao longo da aleta é variável ao longo da direção circunferencial e a temperatura do tubo absorvedor é suposta como constante (T_p), de forma similar ao que ocorre em coletores solares de placas planas, desta forma pode-se considerar a configuração exposta na figura 17.

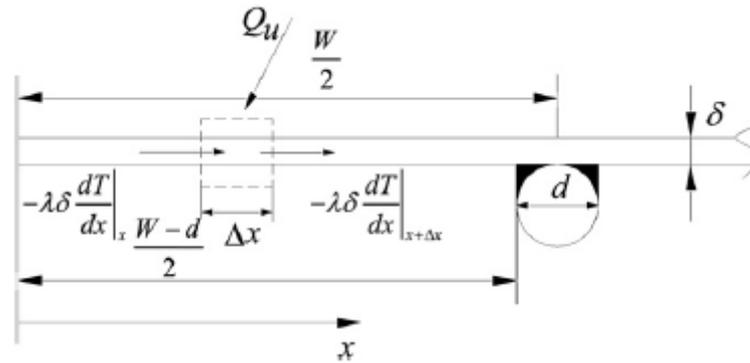


Figura 17: Balanço de energia na aleta.

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

Conforme exposto na figura 16, a espessura da aleta de cobre é δ , o diâmetro do tubo em U é d e a distância entre os tubos U na direção circunferencial é $W = P/2$, sendo P o perímetro da aleta de cobre. Fazendo-se um balanço de energia em uma região amostral de largura Δx e unidade de comprimento na direção do escoamento do fluxo:

$$-\lambda\delta \frac{dT}{dx} \Big|_x - \left(-\lambda\delta \frac{dT}{dx} \Big|_{x+\Delta x}\right) + Q_u \Delta x = 0 \quad (24)$$

Sendo que

λ é a condutividade da aleta em $W/(m.K)$;

Q_u é o ganho útil de calor do coletor, baseado no tubo absorvedor e na camada de ar entre a aleta e o tubo absorvedor. Segundo Moslemi e Keshtkar (2018):

$$Q_u = A_a F_R [G (\alpha \tau) - U_L (T_i - T_a)] \quad (25)$$

Sendo que

T_i é a temperatura do fluido de trabalho na entrada do tubo em U em K;

τ é a transmitância da cobertura de vidro;

α é a absorvidade do absorvedor;

G é a radiação solar em W/m^2 ; e

F_R é o fator de remoção de calor, que pode ser definido como:

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{A_a U_L} \left[1 - \exp \left(-\frac{U_L A_a F'}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad (26)$$

Em que:

\dot{m} é a vazão em massa de água (kg/s);

C_p é o calor específico da água (J/kg.K); e

F' é o fator de eficiência do coletor solar.

De acordo com MA *et al.* (2010) o fator de eficiência, F' , pode ser calculado através da equação:

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[\frac{1 + \frac{U_L}{C_b}}{U_L[d + (W - d)F]} + \frac{1}{C_B} + \frac{1}{h_{f,i}\pi d} \right]} \quad (27)$$

Sendo que

C_b é a condutância sintética W/(m.K);

C_B é a condutância da ligação, que é menor que 30 W/(m.K);

$h_{f,i}$ é o coeficiente de transferência de calor entre o fluido e a parede do tubo (W/m².K).

Além disso, a eficiência padrão da aleta, F , para aletas retas com perfil retangular é:

$$F = \frac{\tanh \left[\frac{m(W - d)}{2} \right]}{\frac{m(W - d)}{2}} \quad (28)$$

Sendo:

W a distância entre os tubos (m) e

d é o diâmetro do tubo em U (m).

O fator m é definido por:

$$m = \left[\frac{U_L}{\lambda \delta \left(1 + \frac{U_L}{C_b} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

Sendo que δ é espessura da aleta (m).

Além disso, pode-se calcular a temperatura de saída do fluido, T_o , através da equação a seguir.

$$T_o = T_i + \frac{Q_u}{(\dot{m}C_p)} \quad (30)$$

Finalmente, torna-se possível definir a eficiência do coletor solar que pode ser obtida através da seguinte equação.

$$\eta = \frac{Q_u}{A_a G} \quad (31)$$

2.7 Considerações finais

O presente capítulo abordou os mecanismos de transferência de calor, o funcionamento das aletas e os estudos envolvendo coletores solares de tubos à vácuo. Através disso, foi possível, portanto, apresentar o equacionamento que será adotado para efetuar o estudo da influência dos parâmetros de projeto no desempenho dos coletores solares de tubos à vácuo.

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem como função primordial a discussão da metodologia de pesquisa adotada. Para tanto, será exposto o tipo de pesquisa adotado, os materiais e métodos, as variáveis com seus respectivos indicadores e os instrumentos de coleta e tabulação de dados.

3.1 Tipos de pesquisa

Conforme Gil (2002), pesquisa é o procedimento racional e sistemático que busca proporcionar respostas aos problemas propostos. É necessária quando não há informação suficiente ou quando as informações disponíveis estão desordenadas e não podem ser relacionadas ao problema adequadamente. A pesquisa desenvolve-se por um processo com inúmeras fases, iniciada pela formulação do problema até uma satisfatória apresentação dos resultados.

Para definir o tipo de pesquisa empregado no estudo, deve-se compreender que ela pode ser classificada de acordo com os objetivos, com a forma de abordagem, e quanto aos procedimentos técnicos utilizados.

Uma vez definida a forma de abordagem, ela pode ser considerada qualitativa, na qual segundo Minayo (2009) trabalha-se com o universo dos significados, dos motivos, das aspirações e das crenças, dos valores e das atitudes. Sendo pautada, portanto, em aspectos da realidade que vai além da representatividade numérica, buscando entender as relações sociais. Já se a pesquisa for quantitativa, de acordo com Fonseca (2002) é focada na objetividade. Busca-se traduzir toda informação em números através da linguagem matemática. Para fins de apresentar melhores resultados e mais informações o ideal é que se utilize ambas as abordagens de forma conjunta.

Com relação aos objetivos da pesquisa, pode-se reclassificar ainda, segundo Gil (2002), em pesquisa exploratória, com a finalidade de explicitar e proporcionar maior familiaridade com o problema ou em pesquisa explicativa, na qual se tem um aprofundamento das questões objetivando explicar a razão das coisas em seus mínimos detalhes. Sendo a segunda classificação, portanto, mais complexa e delicada.

Ainda na classificação quanto aos objetivos é possível afirmar que a pesquisa descritiva será a utilizada no presente trabalho uma vez que se busca descrever as características de fenômenos ou populações, além de estabelecer relações entre as variáveis envolvidos. Segundo Gil (2002), a fim de se obter sucesso através da pesquisa descritiva é importante que as técnicas,

métodos, modelos e teorias sejam delimitados de forma precisa a fim de se obter uma coleta e análise eficaz dos dados obtidos.

Quanto aos procedimentos técnicos adotados, a tipologia pode ser definida como pesquisa bibliográfica quando é baseada em materiais já elaborados, como livros; obras acadêmicas; publicações periódicas, entre outros. É importante, então, que haja cautela para não prejudicar a qualidade da pesquisa ao se utilizar dados equivocados. Neste sentido, deve-se ter um nível elevado de criticidade para descobrir possíveis incoerências e contradições. Já a tipologia que adota os procedimentos de pesquisa documental é bastante similar à bibliográfica, entretanto a distinção está em suas fontes uma vez que a pesquisa documental pode utilizar fontes sem tratamento analítico como revistas, relatórios, cartas, filmes, documentos oficiais, relatórios de empresa, entre outros. Com isso, a pesquisa bibliográfica é considerada um tipo de pesquisa documental.

Ainda com relação aos procedimentos, segundo 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”. Tais pesquisas 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).

Já o estudo de caso para Gil (2002), caracteriza-se pelo profundo e incansável estudo de um ou poucos objetos, permitindo um amplo conhecimento e contendo detalhes dos fenômenos envolvidos. Para Fonseca (2002), apresenta uma forte tendência descritiva, pois o pesquisador não pretende intervir sobre o objeto, mas sim descrevê-lo.

Quanto a pesquisa ação, 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.”

De acordo com Fonseca (2002), têm-se então um ciclo permanente envolvendo o planejamento, o diagnóstico, a ação, a observação e a reflexão. Bem como a pesquisa ação, a pesquisa participante está relacionada com a interação entre pesquisadores e elementos das situações investigadas.

Diante das informações apresentadas, compreende-se, portanto, que o presente trabalho consiste em uma pesquisa descritiva, quanto aos objetivos, pois os fenômenos envolvidos na pesquisa serão observados, registrados e analisados. Quanto à abordagem, utiliza-se a pesquisa

quantitativa uma vez que analisará dados numéricos com procedimentos estatísticos e cálculos. Já quanto aos aspectos técnicos, a tipologia de pesquisa adotada é a bibliográfica ou documental, dado que será baseado em materiais elaborados e um estudo de caso para análise da influência dos parâmetros de projeto em um coletor solar de tubo à vácuo.

3.2 Materiais e Métodos

Em conformidade com o exposto na Figura 18, baseando-se na revisão bibliográfica e no equacionamento realizado através do balanço de energia do coletor solar de tubos a vácuo, os dados e as equações são implementados no *Software Engineering Equation Solver (EES)*, versão demonstrativa, a fim de determinar a eficiência, as perdas globais de calor, temperatura do fluido na saída e ganho útil do coletor.

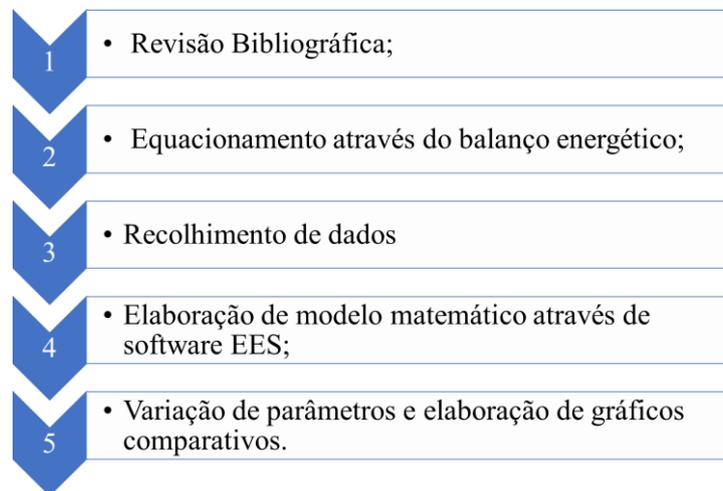


Figura 18: Fluxograma de materiais e métodos.
Fonte: Pesquisa Direta, 2020.

Os cálculos são realizados através de dados típicos do ambiente local e dos componentes do coletor solar conforme bibliografia estudada. Primeiramente, será calculado o coeficiente de perdas globais (U_L), com isso será possível realizar o cálculo do coeficiente da aleta (m) e a eficiência padrão da aleta (F), o que permitirá calcular o fator de eficiência do coletor (F') e o fator de remoção de calor (F_R) para que então seja calculado o ganho útil de calor (Q_u), a temperatura de saída do fluido (T_o) e finalmente a eficiência do coletor (η). Somente após validado o modelo matemático desenvolvido através da comparação com a bibliografia apresentada, o modelo passa a ser utilizado para desenvolver os demais gráficos comparativos com a finalidade de observar os efeitos dos parâmetros de projeto.

3.3 Variáveis e Indicadores

Para Lakatos e Marconi (2003), uma variável é considerada uma classificação ou medida: uma quantidade instável, podendo-se, portanto, assumir diversos valores; um conceito operacional, que apresenta ou possui valores; um aspecto; um fator ou propriedade, discernível em algum objeto de estudo.

Já Tadachi e Flores (1997, p.19) classificam indicadores como “formas que representam de maneira quantificável as características de produtos e processos”. Além disso, para eles a finalidade dos indicadores é proporcionar o controle e a melhora da qualidade e do desempenho de produtos no decorrer do tempo.

Através da Tabela 2 retrata-se as variáveis, com os respectivos indicadores que serão usadas no presente trabalho.

Tabela 2: Variáveis e indicadores.

VARIÁVEIS	INDICADORES
Desempenho do Coletor solar	<ul style="list-style-type: none"> - Ganho útil de calor; - Eficiência; - Fator de remoção de calor; - Temperatura do fluido na saída.
Parâmetros de projeto	<ul style="list-style-type: none"> - Comprimento dos tubos; - Condutância sintética; - Vazão do fluido; - Velocidade do ar; - Temperatura do fluido na entrada; - $\tau\alpha$; - Radiação solar incidente; - Coeficiente de transferência de calor dos tubos U.

Fonte: Pesquisa direta, 2020.

3.4 Instrumentos de coleta de dados

Como mencionado anteriormente, o presente trabalho possui natureza bibliográfica, estudo de caso, quantitativa e descritiva. Portanto, os dados serão adquiridos por meio de livros, obras acadêmicas, dissertações, catálogos, entre outros.

3.5 Tabulação de dados

Os dados adquiridos através da etapa de coletas de dados serão tabulados através do *software Microsoft Excel* e do *software Engineering Equation Solver (EES)*, versão demonstrativa, ferramentas utilizadas tanto para realização de cálculos como para construção de gráficos e tabelas. O *software Microsoft Word* será utilizado para transformar os resultados obtidos em textos.

Todos os *softwares* apresentados, ao serem utilizados em conjunto, permitirão a visualização, a automatização e o arranjo dos dados obtidos.

3.6 Considerações Finais do Capítulo

O presente capítulo apresentou a metodologia que será utilizada para a pesquisa, mostrando o tipo de pesquisa quanto ao objetivo, forma de abordagem e procedimentos técnicos. Apresentou-se ainda os materiais e métodos empregados, bem como as variáveis com seus respectivos indicadores. Foram abordados ainda 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 de acordo com a modelagem matemática nos *softwares* escolhidos.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir do equacionamento matemático do coletor solar com a finalidade de observar os efeitos da variação dos parâmetros de projeto no comportamento do coletor.

4.1 Validação do modelo matemático

Por meio do *software Engineering Equation Solver (EES)*, versão demonstrativa, é possível inserir os parâmetros adotados, bem como o equacionamento já descrito no capítulo 2 com a finalidade de gerar a análise pretendida. Primeiramente foram realizados alguns testes para determinar o melhor equacionamento, no qual pode-se obter resultados semelhantes aos adotados por Manea *et al.* (2013), que apresenta resultados experimentais mostrados na Figura 19, sendo o gráfico de referência representado para fins de comparação. Com isso, obtém-se o gráfico da figura 20 que apresenta o resultado obtido através do equacionamento proposto, mostrando concordância com o que se tem na bibliografia estudada.

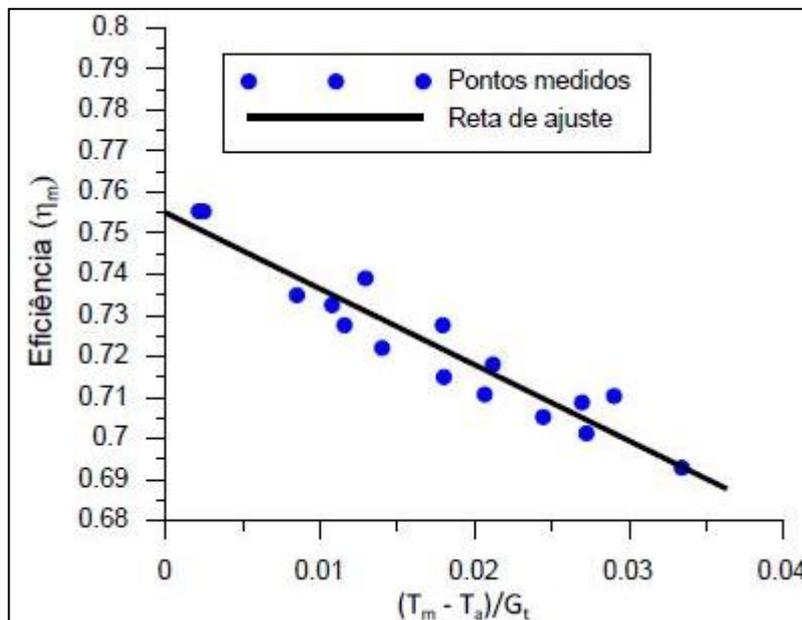


Figura 19: Gráfico de referência: Valores medidos em ensaio de eficiência do coletor de tubos a vácuo. Fonte: Manea *et al.* (2013).

Na figura 19, observa-se valores obtidos através de um ensaio no qual se estuda um coletor a vácuo típico. O ensaio é elaborado realizando-se a medição de dezesseis pontos de eficiência térmica do coletor. O ensaio foi realizado entre os meses de novembro de 2011 a janeiro de 2012, na região Sul do Brasil e o coletor foi posicionado em uma inclinação de 45°.

Na figura 20, têm-se os valores obtidos conforme o equacionamento descrito na metodologia. Para tanto, foram adotados como parâmetros de entrada o comprimento dos tubos de 1,2 m; a condutância sintética de 11 W/m.K; e a vazão mássica de 0,02 kg/s. A temperatura média do fluido (T_m) é adotada como sendo a média aritmética das temperaturas do fluido na entrada e na saída, sendo que para a temperatura de entrada adotou-se o valor de 313 K.

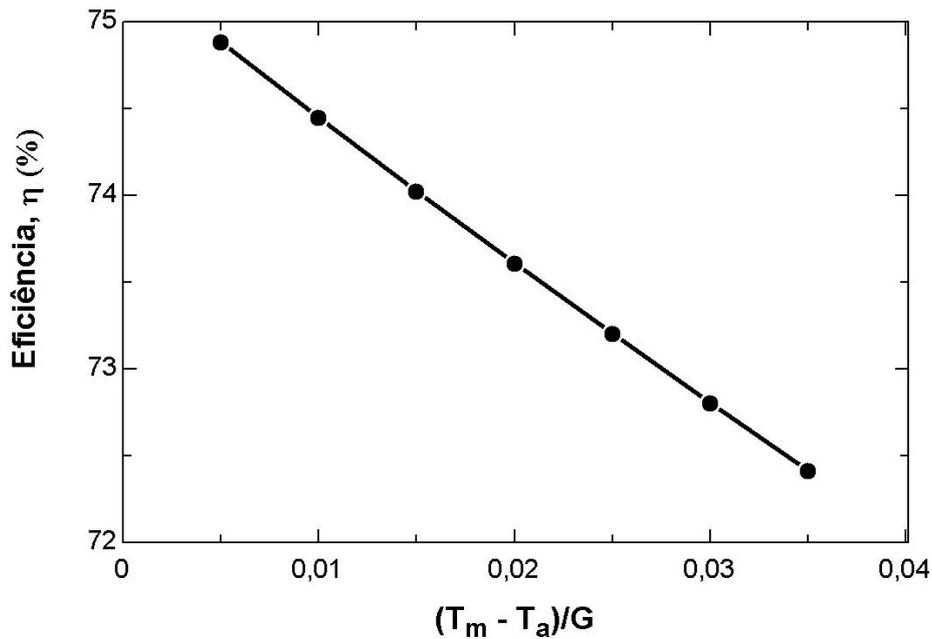


Figura 20: Eficiência em função do fator de perda térmica para validação do modelo matemático.
Fonte: Pesquisa Direta, 2020.

Além disso, a fim de obter o gráfico da figura 20, também foram adotados os parâmetros de temperatura média da placa absorvedora ($T_p = 393$ K); absorvidade do revestimento ($\alpha = 0,93$) e radiação solar incidente ($G = 950$ W/m). Através do gráfico da Figura 20, em comparação com a Figura 19, torna-se explícita a semelhança entre os resultados no ensaio do coletor típico conduzido por Manea *et al.* (2013) com os resultados teóricos por meio do equacionamento adotado no presente no estudo. Observa-se que os resultados do programa desenvolvido são ligeiramente superiores aos da Figura 19, fornecendo maiores diferenças para maiores valores da razão $(T_m - T_a)/G$, conforme tabela 3.

Tabela 3: Validação do modelo

$(T_m - T_a) / G$	Manea <i>et al.</i> (2013)	Equacionamento	Diferença
0,005	0,746	0,749	0,38%
0,010	0,737	0,745	1,02%
0,015	0,727	0,740	1,83%
0,020	0,720	0,736	2,24%
0,025	0,710	0,732	3,10%
0,030	0,700	0,728	4,01%
0,035	0,694	0,724	4,34%

Fonte: Pesquisa direta

Como pode ser observado pela tabela 3, a diferença entre os resultados obtidos através do equacionamento descrito neste estudo e conduzido por Manea *et al.* (2013) concordam significativamente, o que torna o equacionamento válido para realizar a avaliação dos parâmetros.

Uma vez validado o programa com o equacionamento matemático sugerido, inicia-se a análise dos parâmetros de projeto no desempenho do coletor solar de tubos evacuados.

4.2 Base de dados para o cálculo

A fim de se iniciar a análise, foi elaborada uma base de dados contendo valores que foram adotados como referência tanto por meio de catálogos quanto na literatura disponível sobre o tema. Os seguintes valores iniciais foram adotados: Temperatura ambiente, $T_a = 293$ K; Temperatura média da placa absorvedora, $T_p = 373$ K; velocidade do ar, $v_w = 3$ m/s; radiação solar incidente, $G = 950$ W/m² e um coletor com 20 tubos.

Ao alterar algum dos parâmetros para análise, os demais permanecem com valores constantes iguais aos expostos na base de dados para cálculo. A tabela 4 apresenta os dados e propriedades dos coletores utilizados como base para os cálculos.

Tabela 4: Parâmetros de projeto

MATERIAL	PARÂMETRO	SIGLA	VALOR	UNIDADE
Revestimento absorvente	Absortividade	A	0,93	-
	Emissividade	ε_p	0,08	-
Tubo de vidro externo	Diâmetro externo	D_g	47	mm
	Espessura	δ_1	1,2	mm
	Condutividade	k_g	1,2	W/ (m.K)
	Transmitância	T	0,907	-
	Emissividade	ε_g	0,88	-
Tubo Absorvedor	Diâmetro externo	D_p	37	mm
	Espessura	δ_1	1,2	mm
	Condutividade	λ_1	1,2	W/ (m.K)
Aleta de Cobre	Espessura	Δ	0,6	mm
	Condutividade	Λ	307	W/ (m.K)
Camada de ar	Espessura	δ_2	1	mm
	Condutividade	λ_2	0,03	W/(m.K)
Tubo-U	Diâmetro externo	D	8	mm
	Coef. De Transf.	h_{fi}	700	W/ (m ² .K)
Comprimento do coletor tubular			1,2	m
Condutância de contato		C_B	5	W/ (m.K)
Condutância sintética		C_b	5	W/ (m.K)
Fluido de trabalho (Água)	Calor específico	C_p	4182	J/kg.K
	Vazão mássica	\dot{m}	0,003	kg/s

Fonte: Pesquisa direta, 2020.

Conforme a tabela 4, adota-se o valor de 5 W/m.K para a condutância sintética uma vez que através do estudo conduzido por Badran *et al.* (2008) atesta-se que os coletores solares de tubos evacuados avaliados possuem uma condutância sintética entre 6,3 e 1,8 W/m.K. Além disso, toma-se como precedente o estudo conduzido por MA *et al.* (2010) em que baseado na análise de condutância de coletores feita por Badran *et al.* (2008), opta por utilizar o valor de 5 W/m.K para a condutância sintética.

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: eficiência (η), temperatura do fluido na saída (T_o), fator de remoção de calor (F_R) e ganho de calor útil fornecido pelo coletor (Q_u). Serão analisados os impactos do comprimento do coletor (L), da condutância sintética (C_b), da vazão mássica do fluido de trabalho no interior do tubo em U (\dot{m}), da velocidade do ar (V_w), da temperatura de entrada (T_i), do produto da transmitância e a absortividade ($\tau\alpha$), do

coeficiente de transferência de calor por convecção do tubo em U com relação à água (h_{fi}) e por fim, da radiação solar incidente.

Através do *software EES* versão demonstrativa, torna-se possível criar tabelas paramétricas que propiciam a variação dos parâmetros desejados gerando múltiplos valores, que quando organizados graficamente proporcionam a análise dos resultados apresentados.

4.3.1 Variação do fator produto da transmitância e a absortividade - $\tau\alpha$

O produto da transmitância do vidro pela absortividade do revestimento seletivo, $\tau\alpha$, é o que irá impactar diretamente no calor transferido para o coletor. Desta forma, ao realizar a variação de $\tau\alpha$ entre 0,5 e 1,0 mantendo-se os demais parâmetros constantes, foi observado um aumento de 104,7% na eficiência e no ganho de calor útil, conforme figuras 21 e 22.

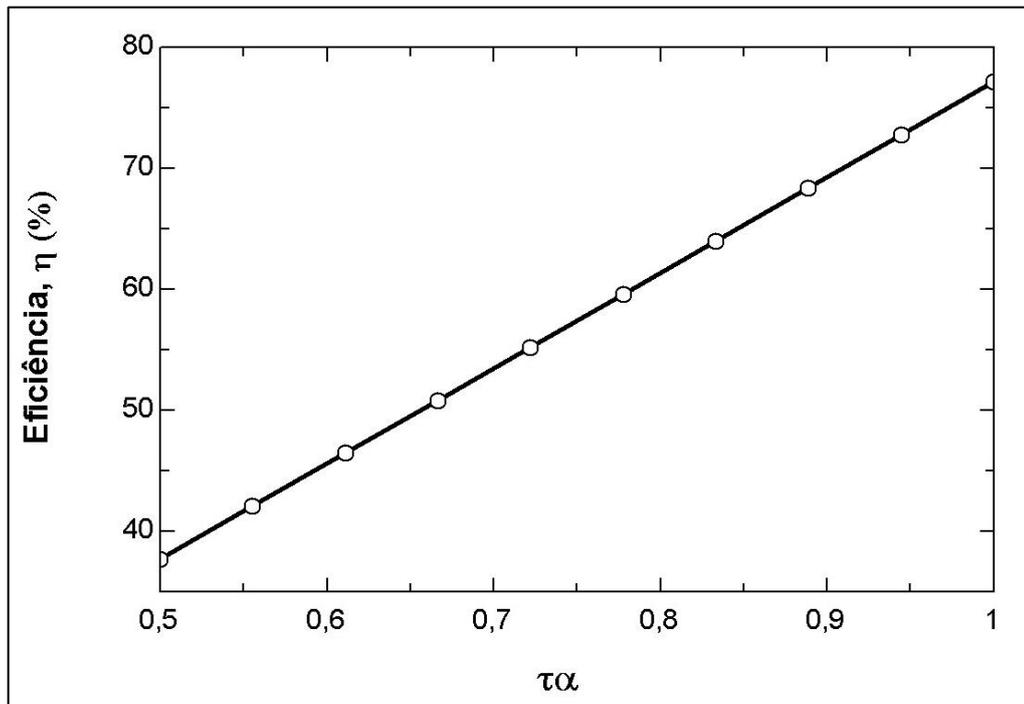


Figura 21: Variação da eficiência em função do fator $\tau\alpha$.
Fonte: Pesquisa direta, 2020.

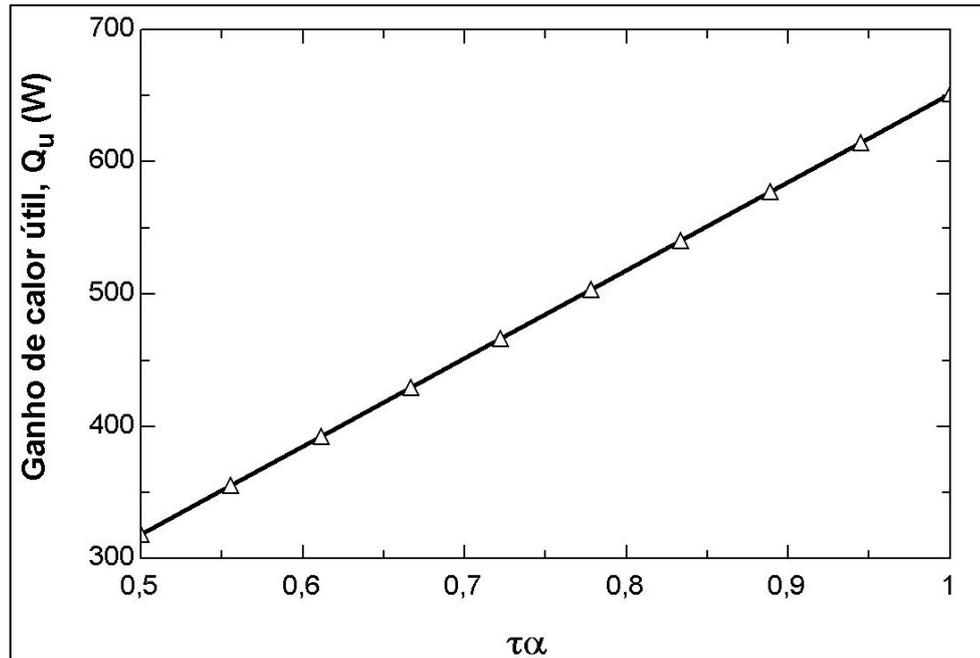


Figura 22: Variação do ganho útil de calor em função do fator $\tau\alpha$.
Fonte: Pesquisa direta, 2020.

Com relação ao fator de remoção de calor, conclui-se que o fator ($\tau\alpha$) não possui relevância, impactando somente na forma que o coletor retira o calor do ambiente e não na forma que ele perde.

Enfim, quanto à temperatura do fluido na saída do tubo em U, têm-se um aumento de 7,83%, segundo aponta a figura 23.

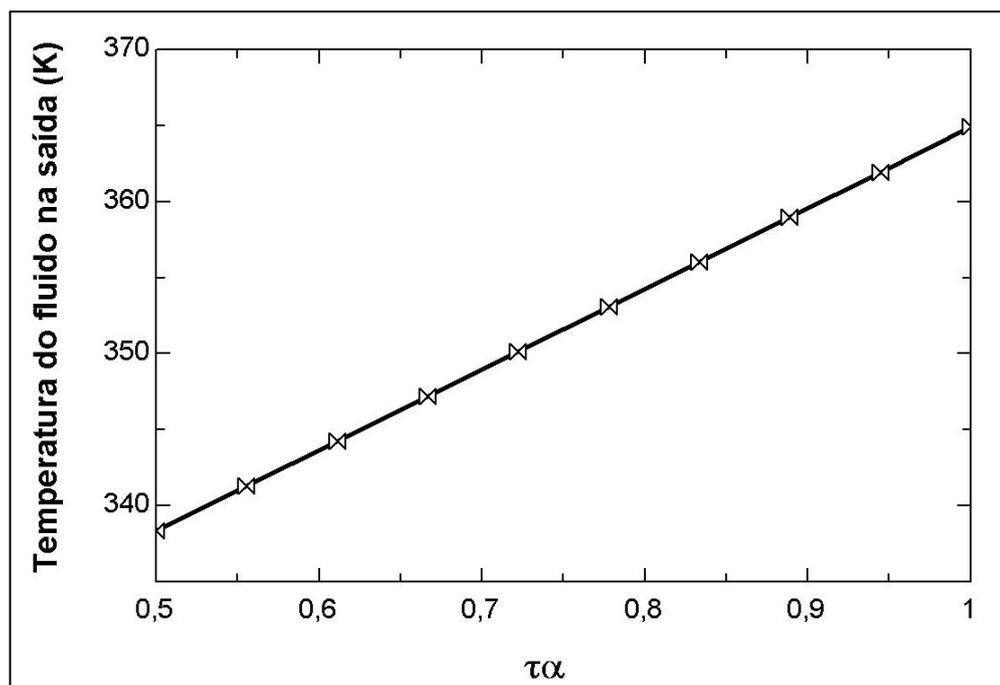


Figura 23: Variação da Temperatura do fluido na saída em função do fator $\tau\alpha$.
Fonte: Pesquisa direta, 2020.

De acordo com a Figura 23, é interessante notar que, embora se tenha um aumento da eficiência e do ganho útil de calor no coletor, não há um aumento na mesma proporção da temperatura do fluido na saída porque este fator sofre influência do produto do calor específico do fluido de trabalho pela vazão mássica, que está no denominador na equação (3), com Q_u no numerador.

4.3.2 Variação da Condutância sintética do coletor

Houve uma variação da condutância sintética do coletor (C_b) entre 2 e 50 W/m.K, considerando-se os demais parâmetros de entrada como constantes. Os resultados são representados através das figuras 24 a 27.

Na figura 24 nota-se que a curva de influência da variação da condutância sintética provoca um aumento na eficiência de 45,54%, entre 2 e 28,67 W/m.K, e de 1,47% entre 28,67 e 50 W/m.K da condutância sintética do coletor. Ao todo, a variação da condutância sintética entre 2 e 50 implica em um aumento de 47% na eficiência, mostrando o impacto que este fator tem no desempenho do coletor solar.

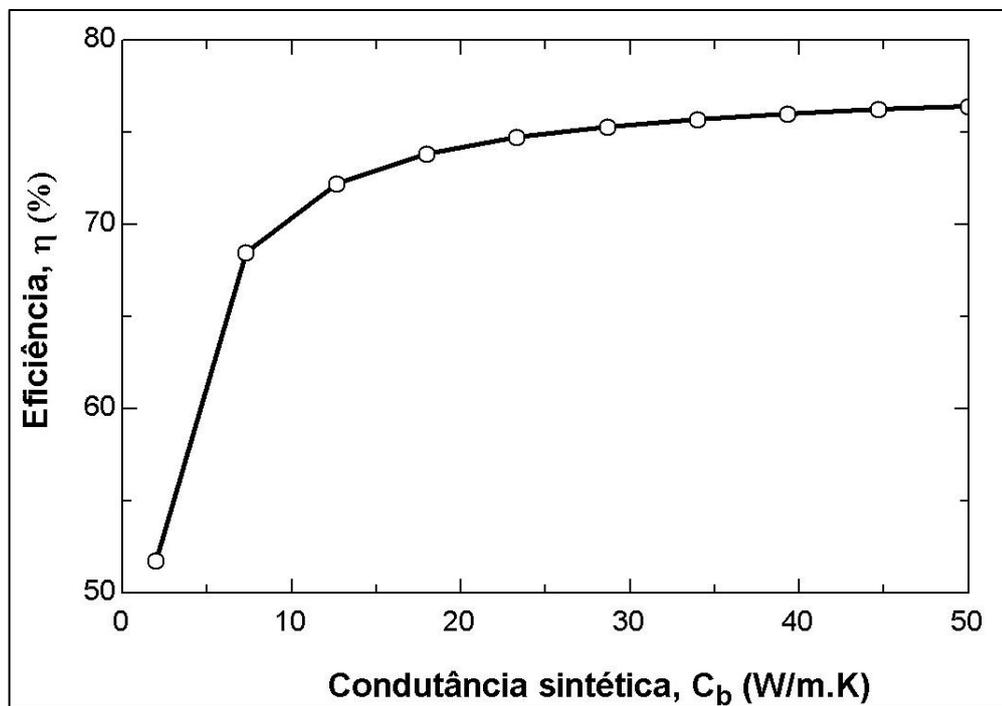


Figura 24: Variação da eficiência em função da condutância sintética, C_b .
Fonte: Pesquisa direta, 2020.

Seguindo este comportamento, segundo a Figura 25, o ganho útil de calor também aumenta 47% através da variação da condutância sintética seguindo o mesmo padrão observado na eficiência.

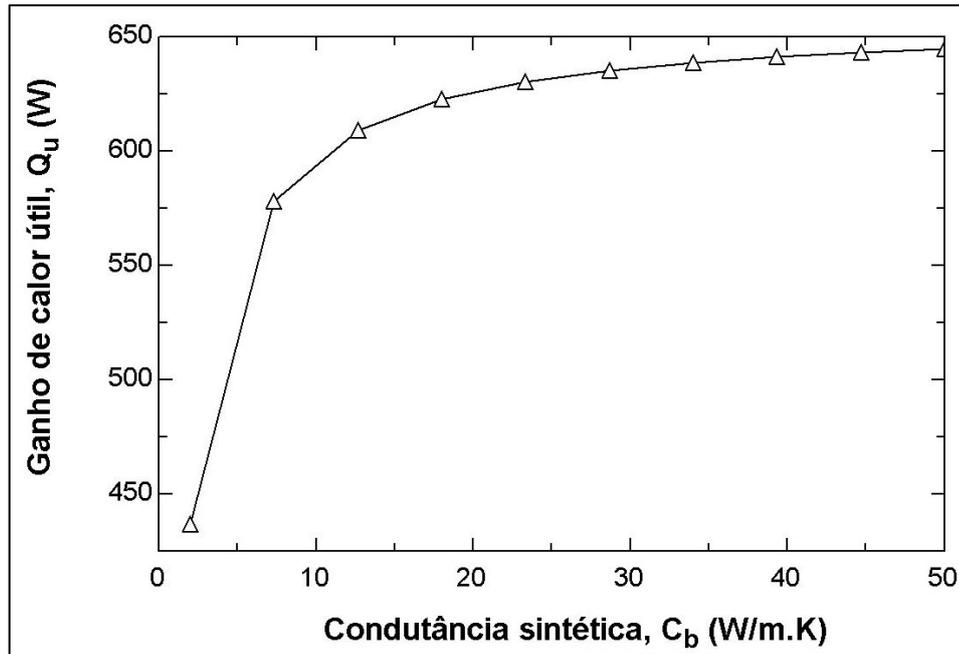


Figura 25: Variação do ganho de calor útil em função da condutância sintética, C_b .
 Fonte: Pesquisa direta, 2020.

Com relação ao fator de remoção de calor, Figura 26, o aumento de 47% se mantém, isto pode ser justificado através do fato de que a condutância aparece no cálculo do F_R e posteriormente este fator é utilizado no cálculo do ganho útil de calor e da eficiência de maneira diretamente proporcional, logo a proporção é a mesma para estes parâmetros com relação à condutância.

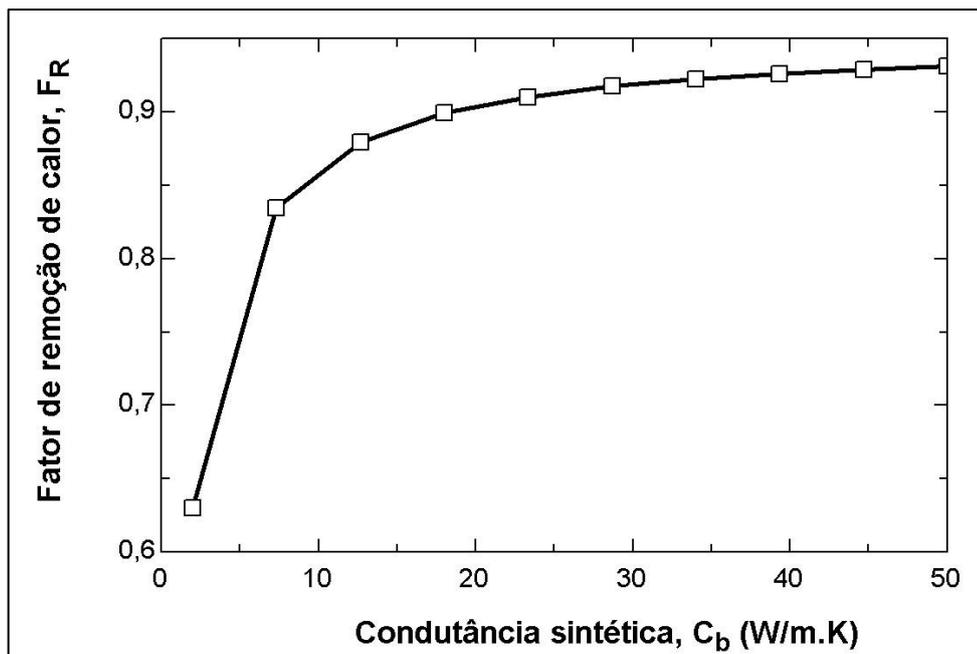


Figura 26: Variação do fator de remoção de calor (F_R) em função da condutância sintética, C_b .
 Fonte: Pesquisa direta, 2020.

Finalmente, a Figura 27 mostra a variação da temperatura do fluido na saída em função da condutância sintética.

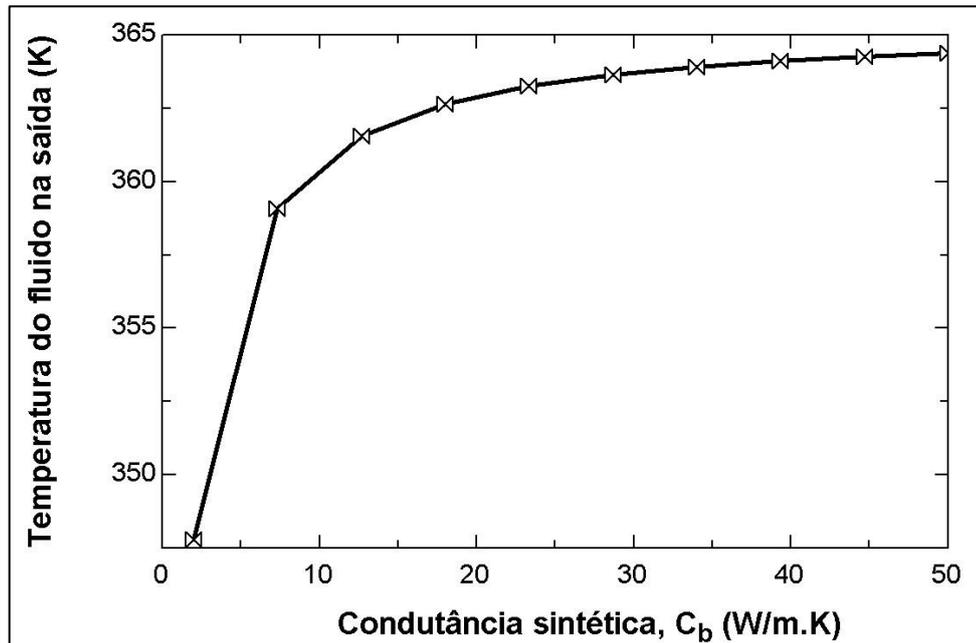


Figura 27: Variação da temperatura do fluido na saída em função da condutância sintética, C_b .
Fonte: Pesquisa direta, 2020.

Na Figura 27, em termos de temperatura do fluido na saída do tubo em U, a variação da condutância sintética provoca um aumento de 4,54% entre 2 e 28,67 W/m.K e depois disso estabiliza, tendo somente um aumento de 0,22% entre 28,67 e 50 W/m.K e a curva permanece semelhante à dos demais indicadores, totalizando um aumento de 4,76%.

4.3.3 Variação da radiação solar incidente

A radiação solar incidente foi variada entre 100 e 1000 W/m² a fim de observar as alterações em situações diversas. Neste cenário, os demais parâmetros de entrada foram considerados constantes. Com relação à eficiência, esta variação da radiação solar incidente proporcionou um aumento de 28,24% na eficiência entre 100 e 600 W/m² e então a curva se torna menos acentuada apresentando um aumento de 1,75% entre 600 e 1000 W/m², totalizando um aumento de 30%. Neste sentido, compreende-se que a radiação solar incidente é um parâmetro de grande relevância para o desempenho do coletor, conforme observado no gráfico exposto na figura 28.

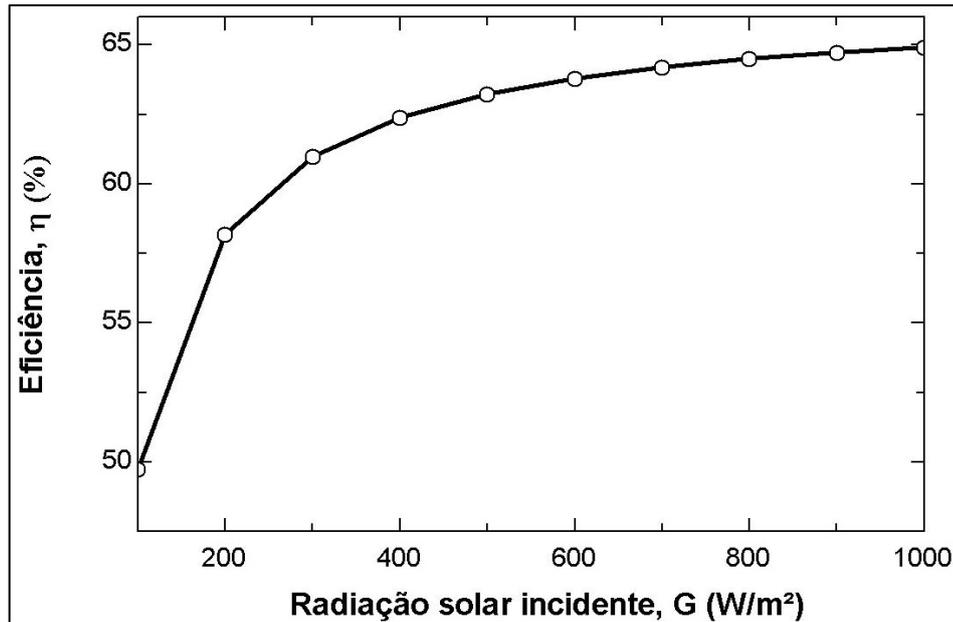


Figura 28: Variação da eficiência em função da radiação solar incidente.
Fonte: Pesquisa direta, 2020.

Já o ganho útil de calor (Figura 29) sofre um aumento total de 1205% (verifique este valor) por meio da variação citada da radiação solar incidente, ou seja, tem o seu valor multiplicado por mais de 12 vezes, sendo um fator que influencia fortemente neste indicador.

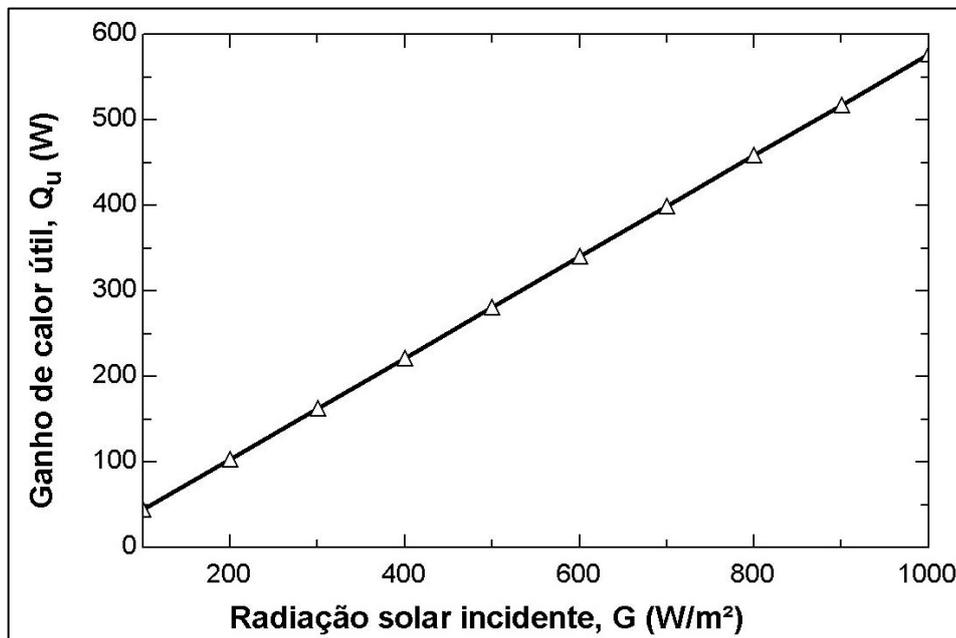


Figura 29: Variação do ganho útil de calor em função da radiação solar incidente.
Fonte: Pesquisa direta, 2020.

É importante pontuar que este aumento do ganho útil de calor, mostrado na Figura 29, não resulta em um aumento de mesma dimensão da eficiência do coletor uma vez que a radiação

solar (G) é um fator que se encontra no denominador do cálculo da eficiência, a fim de oferecer uma proporção desta radiação que foi de fato utilizada para gerar calor para o fluido.

Quanto ao fator de remoção de calor, uma vez que radiação solar incidente não é um fator presente explicitamente no cálculo deste parâmetro, ele não possui qualquer influência e sendo assim o gráfico possui comportamento constante.

Já a Figura 30 mostra a variação da temperatura do fluido na saída em função da radiação solar incidente.

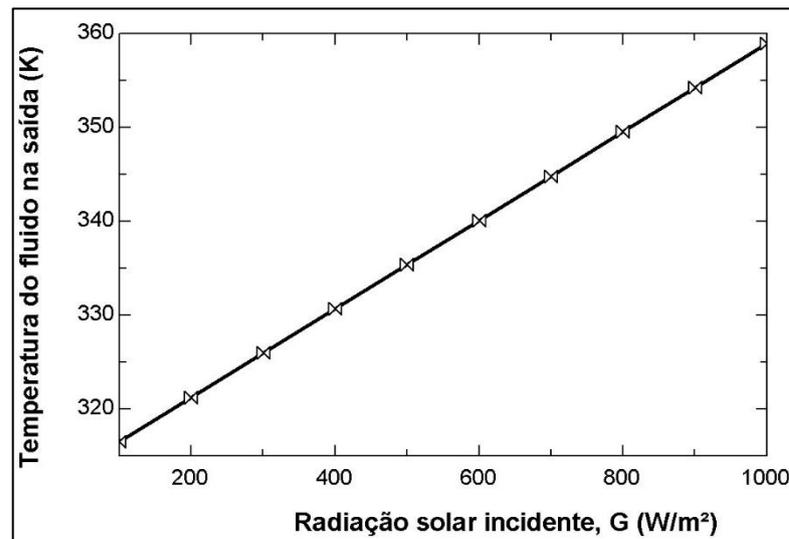


Figura 30: Variação da temperatura do fluido na saída em função da radiação solar incidente. Fonte: Pesquisa direta, 2020.

Com relação à temperatura do fluido na saída do tubo em U , pode-se observar através da figura 30 que a radiação solar incidente apresenta um aumento linear de 13,43%. Constituindo-se, portanto, em um parâmetro de relevância para aumento da temperatura da água.

4.3.4 Variação da vazão mássica

A vazão mássica do fluido é variada entre 0,001 e 0,01 kg/s, enquanto adota-se os demais parâmetros de entrada (base de dados) como constantes. Feito isto, é possível observar o impacto da variação deste parâmetro através dos gráficos representados nas figuras 31 a 34.

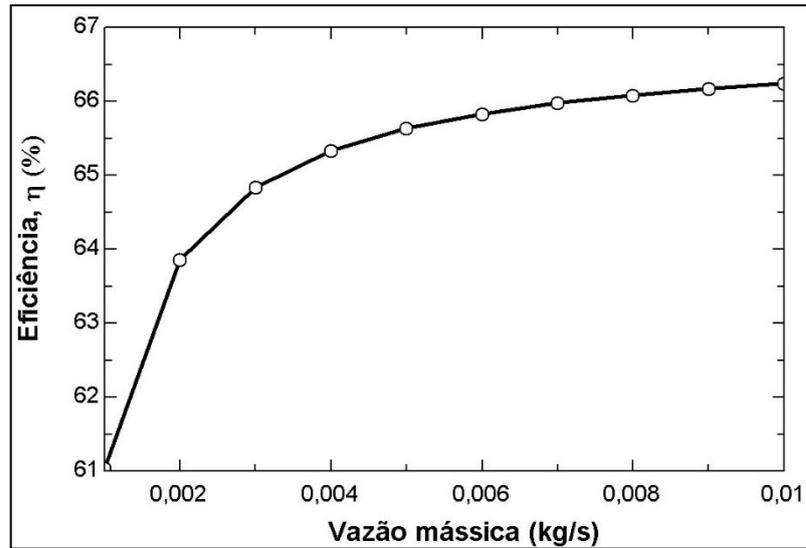


Figura 31: Variação da eficiência em função da vazão mássica do fluido de trabalho.
Fonte: Pesquisa direta, 2020.

Tendo em vista a eficiência do coletor solar, é possível observar pelo gráfico da figura 31 que acontece um aumento um pouco pronunciado da eficiência até em torno de entre 0,001 e 0,007 kg/s, e a partir deste valor até a vazão de 0,01 ocorre um aumento de apenas 1,4%. Ao todo, a variação mássica descrita ocasiona um aumento em torno de 8,5% da eficiência do equipamento.

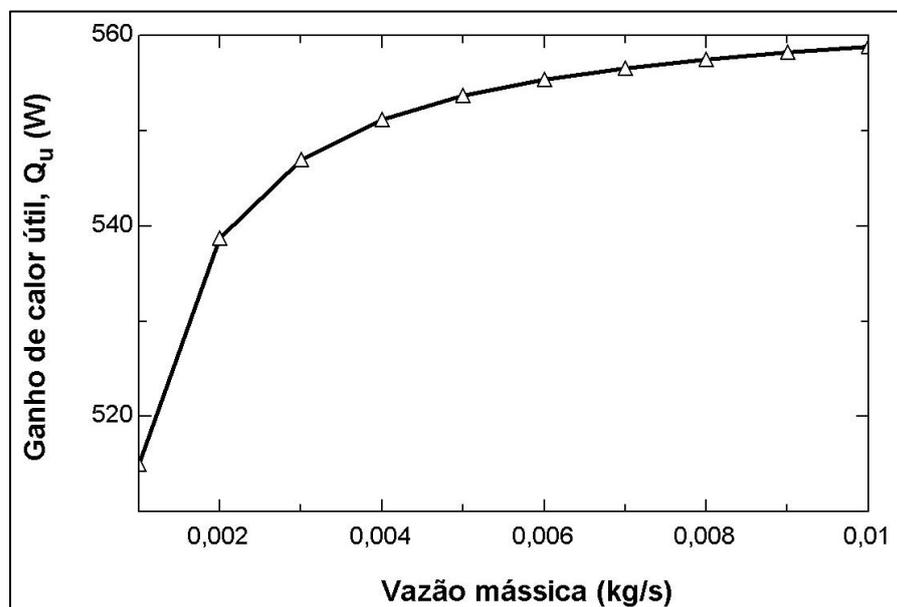


Figura 32: Variação do ganho de calor útil em função da vazão mássica do fluido de trabalho.
Fonte: Pesquisa direta, 2020.

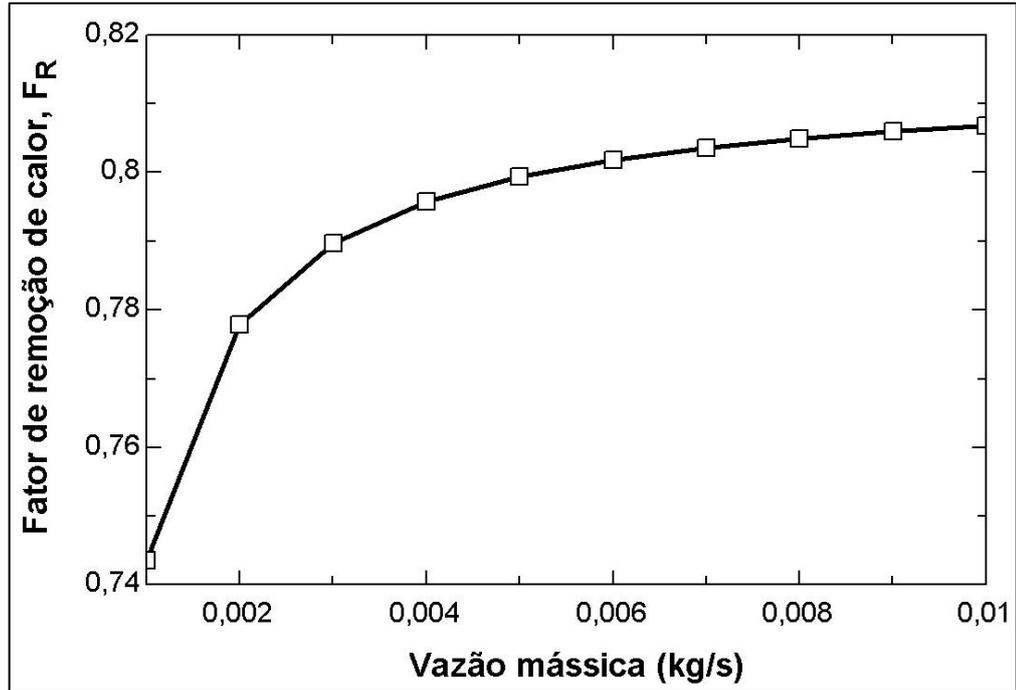


Figura 33: Variação do fator de remoção de calor (F_R) em função da vazão mássica do fluido de trabalho. Fonte: Pesquisa direta, 2020.

Como demonstrado nas figuras 32 e 33 o ganho útil de calor, Q_u , e o fator de remoção de calor F_R seguem a mesma proporção do aumento da eficiência, totalizando também 8,5%, pelos mesmos motivos descritos no tópico anterior.

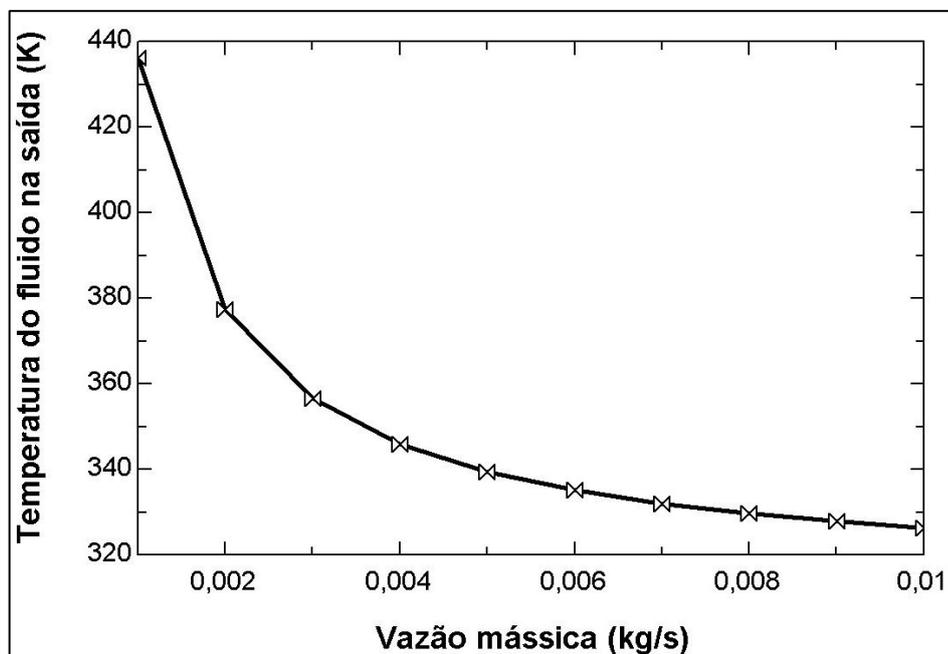


Figura 34: Variação da temperatura do fluido na saída em função da vazão mássica do fluido de trabalho. Fonte: Pesquisa direta, 2020.

Já com relação à temperatura do fluido na saída dos tubos, é possível verificar através do gráfico da figura 34, que a variação da vazão mássica gera uma redução de comportamento exponencial, de 25,15% ao todo.

4.3.5 Variação da temperatura de entrada do fluido em diferentes temperaturas ambiente

Ao realizar a análise do impacto da temperatura do fluido (água) na entrada, aproveitou-se a oportunidade para observar o comportamento deste índice em diferentes temperaturas ambiente, simulando diferentes cenários. A temperatura de entrada do fluido foi variada entre 293 K e 353 K e esta variação foi analisada com três temperaturas ambiente: 283 K, 293 K e 303 K. Com relação a eficiência do coletor, a variação da temperatura de entrada ocasionou uma redução linear de aproximadamente 8,08% no total (Figura 35).

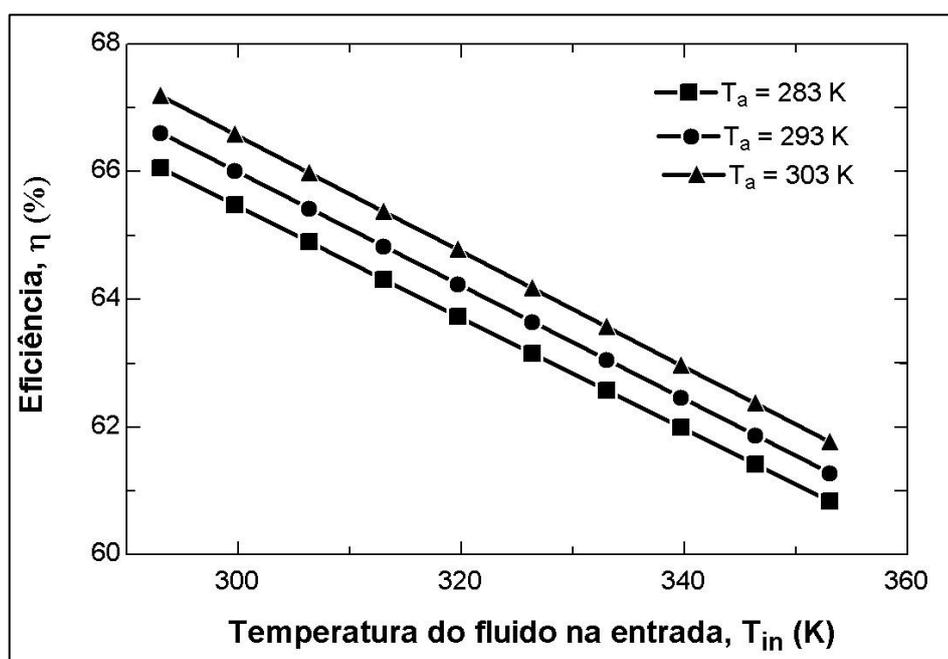


Figura 35: Variação da eficiência em função da temperatura do fluido na entrada em diferentes temperaturas ambiente.

Fonte: Pesquisa direta, 2020.

Uma vez que a eficiência e o ganho útil de calor são parâmetros diretamente proporcionais mantendo-se os demais parâmetros como constantes, uma vez que a temperatura de entrada do fluido não afeta os demais parâmetros, a proporção de redução provocada pela variação da temperatura de entrada permanece a mesma, 8,08% e quanto maior a temperatura ambiente, maiores os valores de eficiência e ganho útil de calor. O ganho útil de calor pode ser visto na Figura 36.

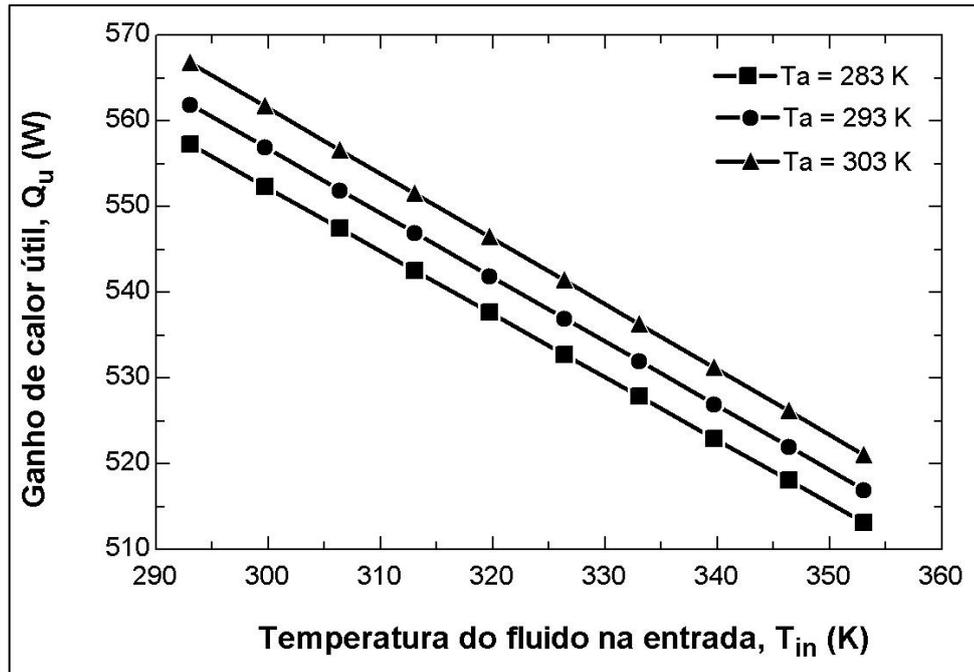


Figura 36: Variação do ganho útil de calor em função da temperatura do fluido na entrada em diferentes temperaturas ambiente.

Fonte: Pesquisa direta, 2020.

A temperatura de entrada do fluido não é um fator presente no cálculo do fator de remoção de calor (Figura 37) e, portanto, o gráfico possui comportamento constante. Já com relação à temperatura ambiente, observa-se um comportamento inversamente proporcional, tendo uma redução de aproximadamente 0,0004 para cada K de temperatura ambiente.

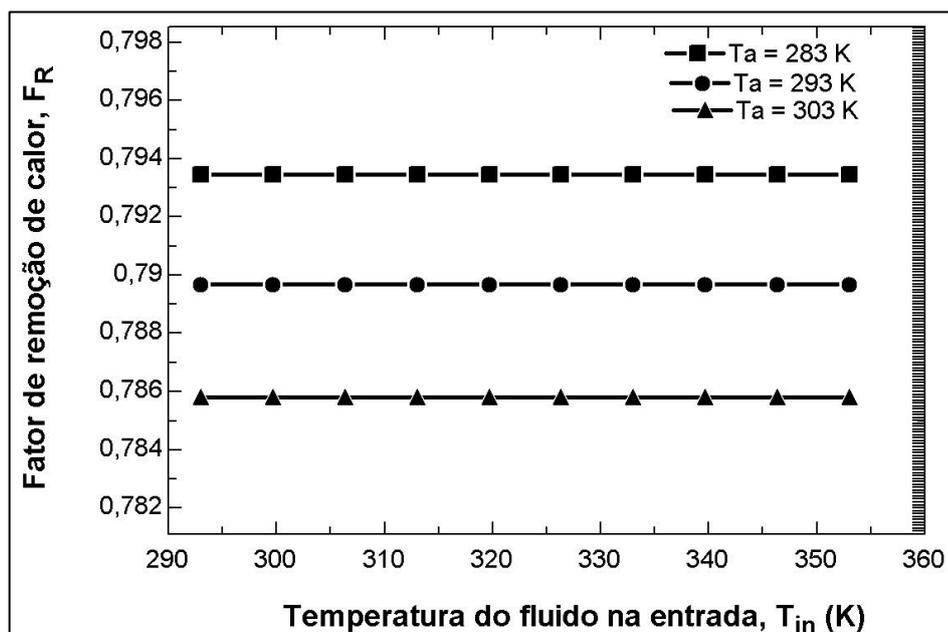


Figura 37: Variação do fator de remoção de calor (F_R) em função da temperatura do fluido na entrada em diferentes temperaturas ambiente.

Fonte: Pesquisa direta, 2020.

Com relação a temperatura do fluido na saída do tubo em U, o aumento provocado pela variação da temperatura de entrada é de aproximadamente 16,65% no total, enquanto que a temperatura ambiente não possui efeito significativo neste parâmetro, conforme observado na figura 38.

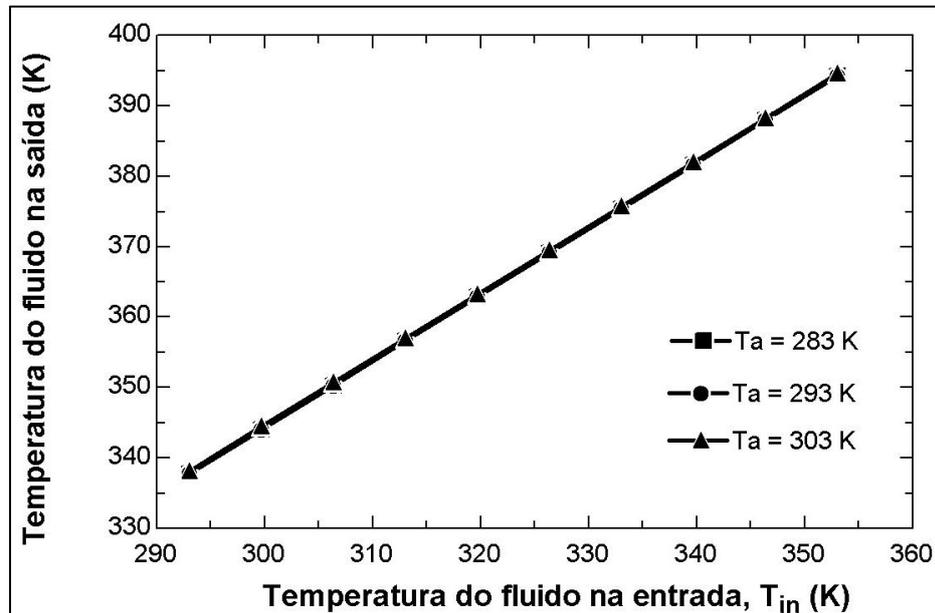


Figura 38: Variação da temperatura do fluido na saída em função da temperatura do fluido na entrada em diferentes temperaturas ambiente.

Fonte: Pesquisa direta, 2020.

4.3.6 Variação do comprimento do coletor

O comprimento do coletor foi variado entre 1 e 2 metros, considerando-se os demais parâmetros envolvidos como constantes. Feito isto, obteve-se os gráficos representados nas figuras 39 a 42. Com relação à eficiência observa-se uma redução linear de 2,5% através da variação total, conforme figura 39.

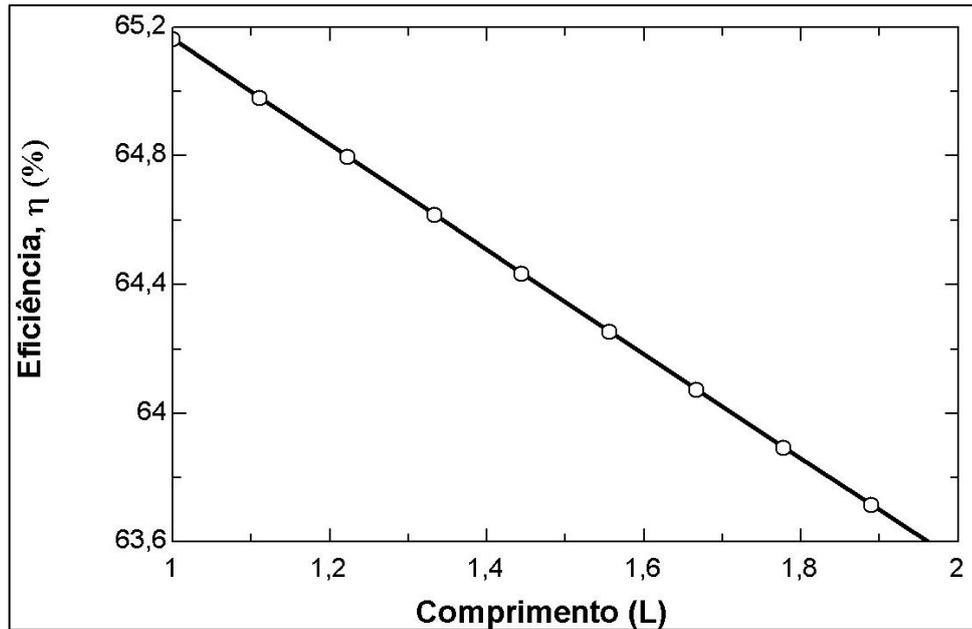


Figura 39: Variação da eficiência em função do comprimento dos tubos.
Fonte: Pesquisa direta, 2020.

Já o ganho útil de calor sofre um aumento linear de 95%, conforme figura 40, com o aumento do comprimento de 1 metro para 2 metros, mostrando que o comprimento possui um impacto grande neste parâmetro. É importante pontuar que este aumento do ganho útil de calor não resulta em um aumento de mesma dimensão da eficiência do coletor uma vez que o comprimento entra no cálculo da área de abertura, fator que está no denominador do cálculo da eficiência, e um comprimento maior vai ocasionar uma maior área de distribuição deste calor, reduzindo a eficiência.

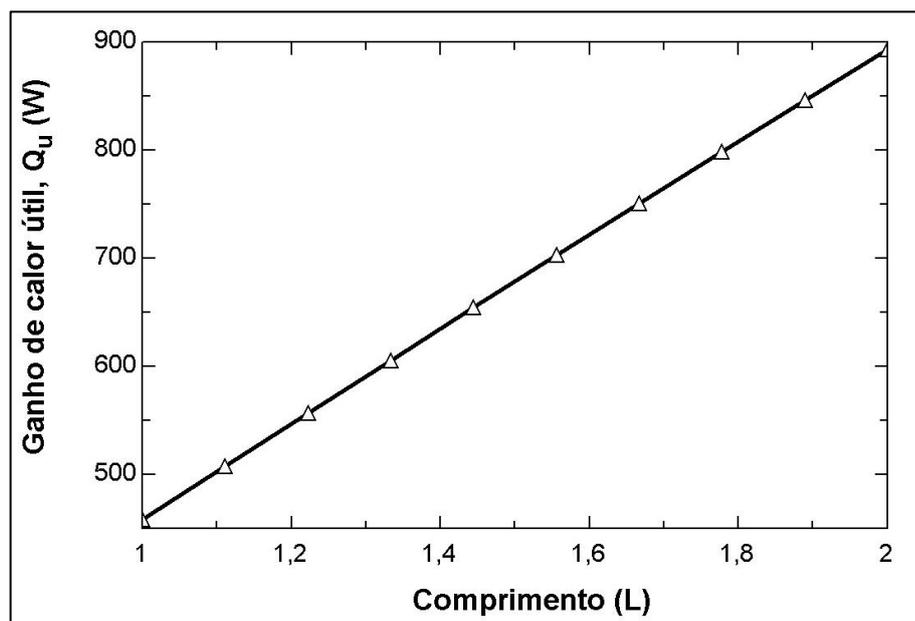


Figura 40: Variação do ganho útil de calor em função do comprimento.
Fonte: Pesquisa direta, 2020.

Quanto ao impacto no fator de remoção de calor, o aumento do comprimento ocasiona uma redução linear de aproximadamente 2,5%, de acordo com análise do gráfico da figura 41.

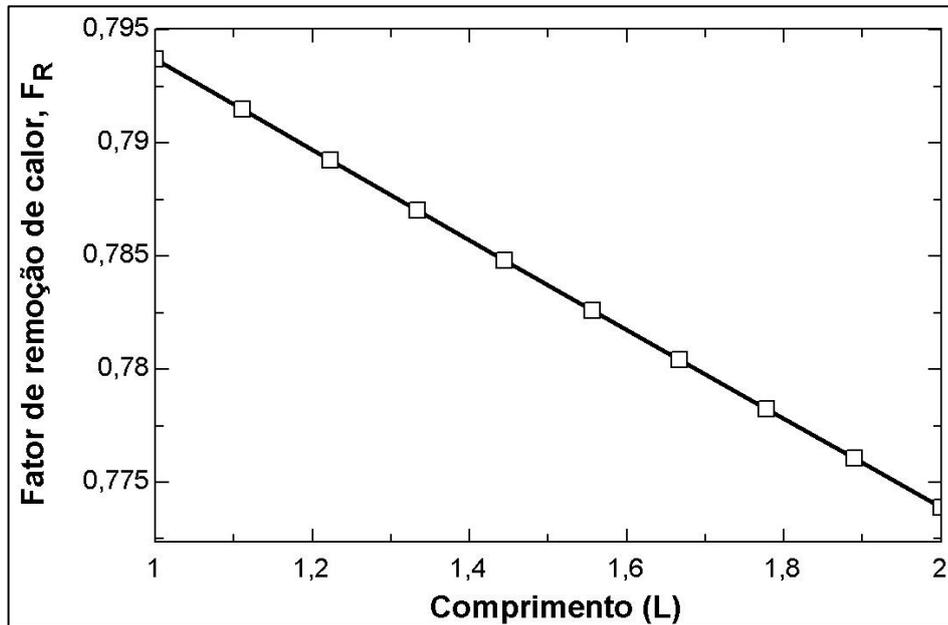


Figura 41: Variação do fator de remoção de calor em função do comprimento.
Fonte: Pesquisa direta, 2020.

A Figura 42 mostra a variação da temperatura do fluido na saída do coletor em função do comprimento dos tubos.

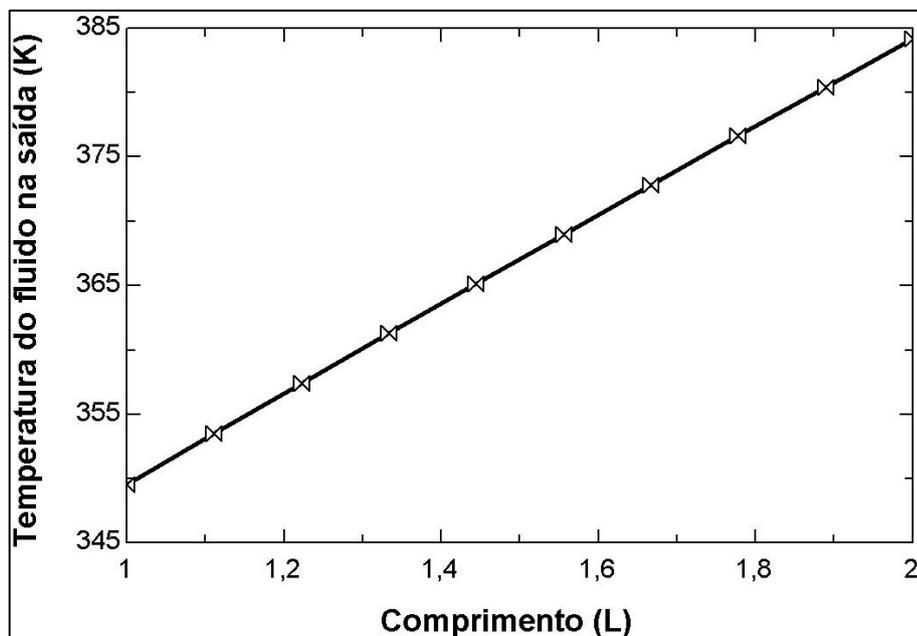


Figura 42: Variação da temperatura do fluido na saída em função do comprimento dos tubos.
Fonte: Pesquisa direta, 2020.

Com relação à temperatura do fluido na saída do tubo em U, conforme a Figura 42, o aumento do comprimento implica em um incremento linear de 9,93%.

4.3.7 Variação do coeficiente de transferência de calor por convecção do Tubo em U

O coeficiente de transferência de calor por convecção foi variado entre 100 e 1000 $\text{W/m}^2\text{K}$, adotando-se os demais parâmetros de entrada como constantes. Feito isso, nota-se através das figuras 43 a 45 que a eficiência, o ganho útil de calor e o fator de remoção de calor sofrem o mesmo aumento de 1,7%. Este comportamento ocorre porque o coeficiente de transferência de calor por convecção é um parâmetro que vai influenciar diretamente no F_R e sendo todos os outros parâmetros constantes, ele é diretamente proporcional ao ganho útil de calor e à eficiência.

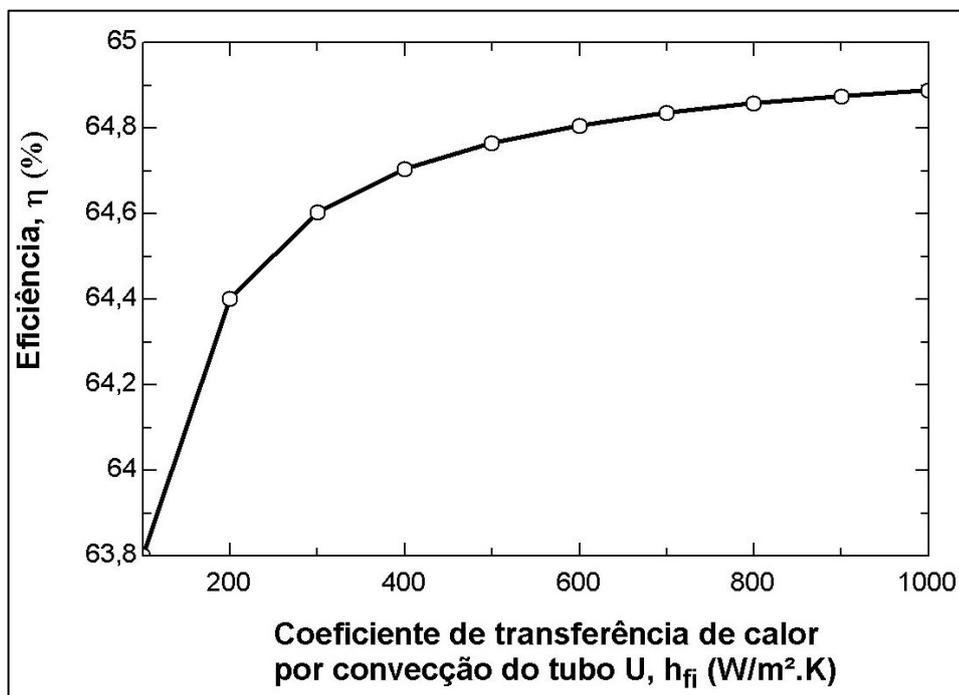


Figura 43: Variação da eficiência em função do coeficiente de transferência de calor por convecção no tubo em U. Fonte: Pesquisa direta, 2020.

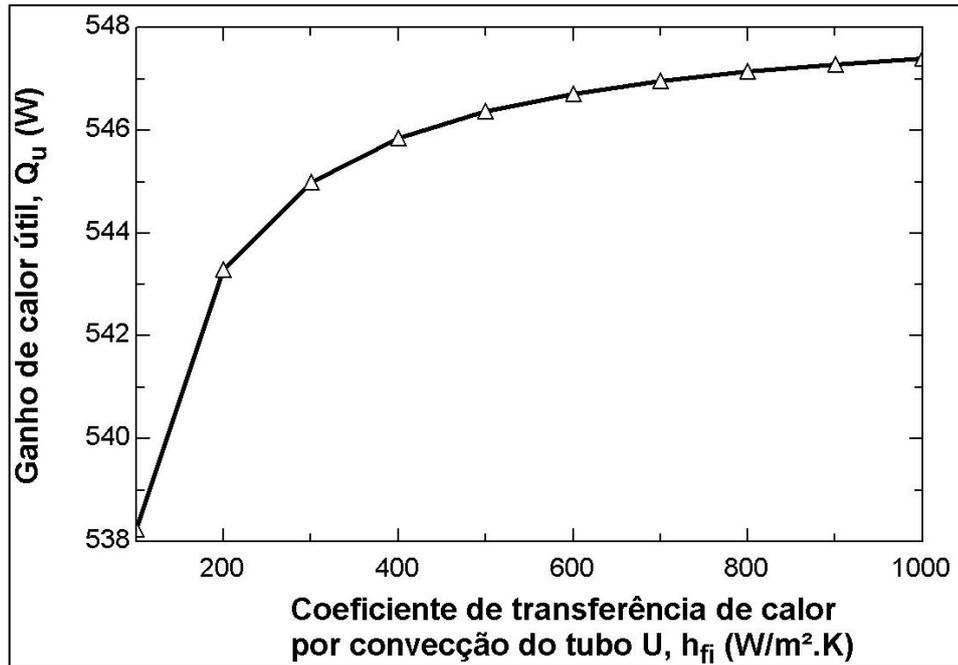


Figura 44: Variação do ganho útil de calor em função do coeficiente de transferência de calor por convecção no tubo em U.

Fonte: Pesquisa direta, 2020.

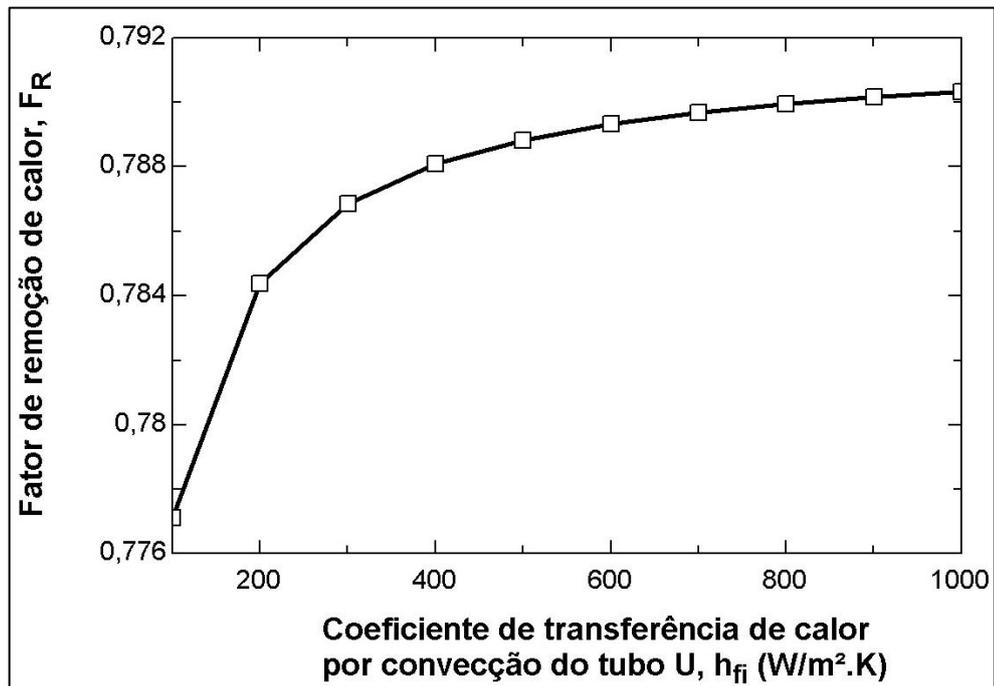


Figura 45: Variação do fator de remoção de calor em função do coeficiente de transferência de calor por convecção no tubo em U.

Fonte: Pesquisa direta, 2020.

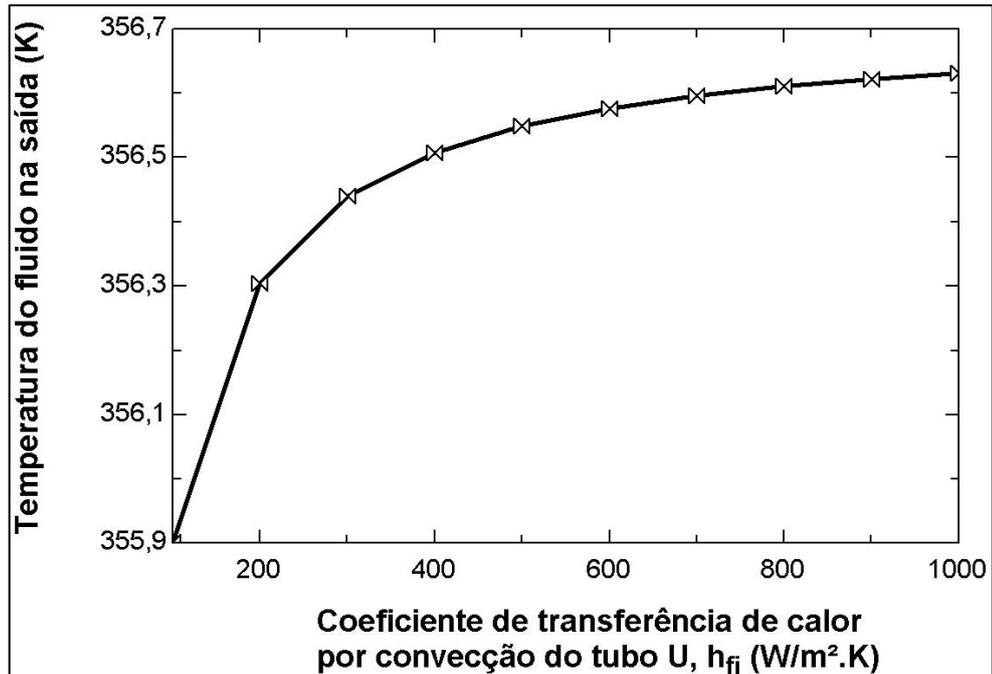


Figura 46: Variação da temperatura do fluido na saída em função do coeficiente de transferência de calor por convecção no tubo em U.

Fonte: Pesquisa direta, 2020.

Conforme observado na figura 46, a variação do coeficiente de transferência de calor por convecção do tubo impacta em um aumento de apenas 0,2% da temperatura do fluido na saída do tubo.

4.3.8 Variação da velocidade do ar

Adota-se uma variação na velocidade do ar entre 3 e 6 m/s, sendo os demais parâmetros de entrada mantidos constantes. Diante disso, é possível observar o impacto da variação deste parâmetro nos gráficos das figuras 47 a 50. A velocidade do ar é um parâmetro que irá impactar na perda de calor por convecção entre o vidro e o ambiente e consequentemente estará presente no cálculo do coeficiente global de perda de calor (U_L), que está presente tanto no cálculo do Fator de remoção de calor (F_R) quanto do ganho útil de calor (Q_u).

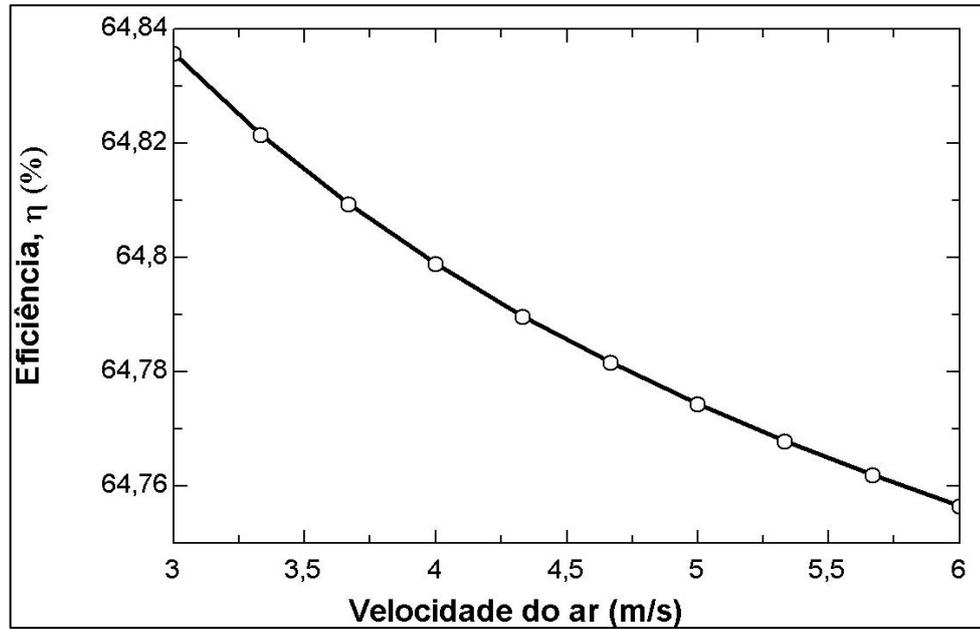


Figura 47: Variação da eficiência em função da velocidade do ar.
Fonte: Pesquisa direta, 2020.

Tendo em vista a eficiência do coletor solar, é possível observar através do gráfico da figura 47 que se tem uma redução de apenas 0,12%, mesma proporção observada no ganho útil de calor (Figura 48), uma vez que sendo todos os outros fatores constantes, a eficiência se torna diretamente proporcional ao ganho útil de calor. Contudo, esta redução impacta de maneira irrisória em ambos os indicadores de desempenho.

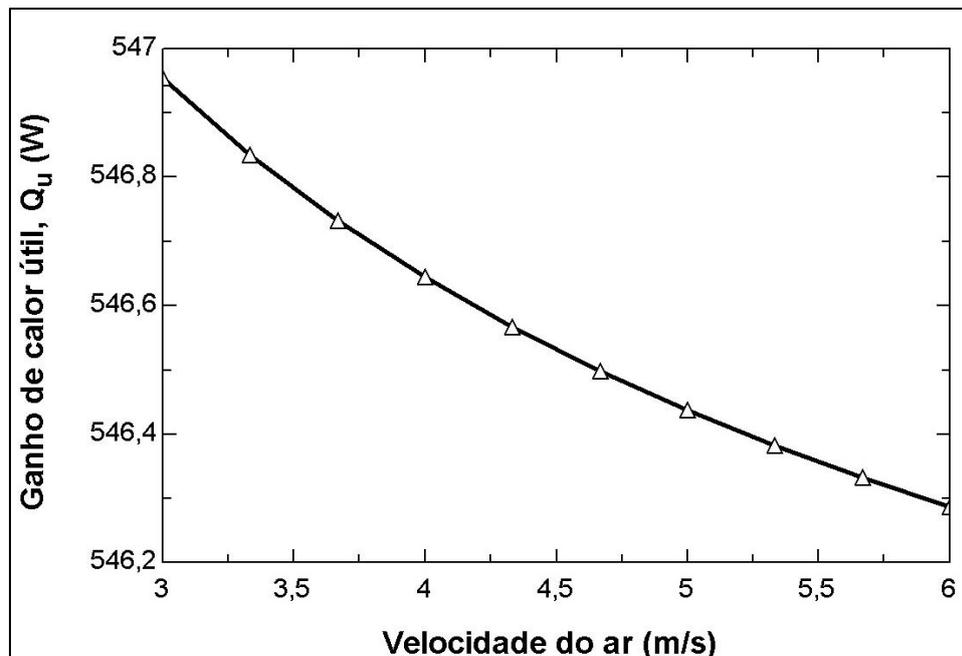


Figura 48: Variação do ganho útil de calor em função da velocidade do ar.
Fonte: Pesquisa direta, 2020.

Com relação ao fator de remoção de calor, conforme figura 49, a redução é de 0,11%. Portanto, a influência da velocidade do ar é ainda menos expressiva para com este indicador, que já possui valores relativamente baixos.

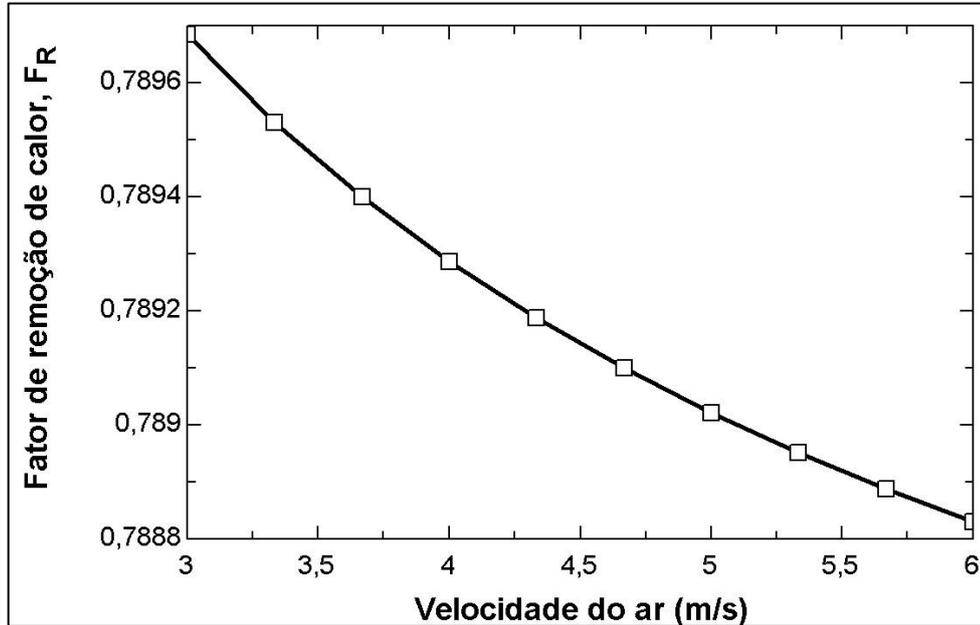


Figura 49: Variação do Fator de remoção de calor em função da velocidade do ar.
Fonte: Pesquisa direta, 2020.

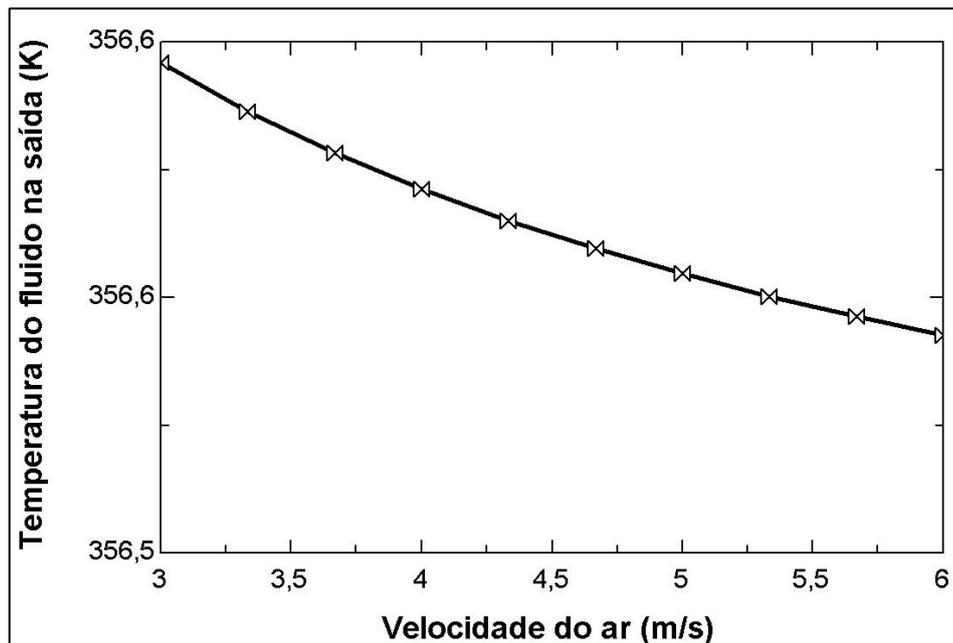


Figura 50: Variação da temperatura do fluido na saída em função da velocidade do ar.
Fonte: Pesquisa direta, 2020.

Em termos de temperatura do fluido na saída do tubo em U, conforme mostra a Figura 50, a velocidade do ar não influi nesta propriedade uma vez que a mantém praticamente constante, oferecendo uma redução de apenas 0,03% na temperatura final do fluido.

4.3.9 Considerações finais do capítulo

Em suma, os resultados discutidos neste capítulo são apresentados na tabela 5 a seguir.

Tabela 5: Resultados

Parâmetro	Variação	η (%)	Q_u (W/m ²)	F_R	T_o (K)
$\tau\alpha$	0,5 – 1,0	+104,7%	+104,7%	0%	+ 7,83%
C_b (W/m.K)	2 – 50	+ 47,69%	+ 47,69%	+ 47,69%	+ 4,77%
G (W/m ²)	100 – 1000	+30,5%	+1204%	0%	+ 13,43%
\dot{m} (kg/s)	0,001 – 0,01	+8,5%	+8,5%	+8,5%	-25,15%
T_i (K)	293 – 353	- 8,08%	- 8,08%	0%	+ 8,5%
L	1 – 2	- 2,5%	+ 95 %	- 2,5%	+ 9,93%
h_{fi} (W/m ² .K)	100 - 1000	+ 1,7%	+ 1,7%	+ 1,7%	+0,2%
v_w (m/s)	3 - 6	- 0,12%	- 0,12%	- 0,11%	- 0,03%

Fonte: Pesquisa Direta, 2020.

Através da tabela 5, têm-se uma compreensão dos resultados apresentados e discutidos graficamente no capítulo e compreender quais fatores se tornam mais relevantes para cada indicador.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

No decorrer do presente trabalho foram estudados os coletores solares de tubos evacuados com a finalidade principal de analisar a influência de parâmetros de entrada do projeto no desempenho final do equipamento. Diante disto, foi feito um estudo paramétrico da variação dos parâmetros e seus respectivos impactos em alguns indicadores relevantes através do *software Engineering Equation Solver (EES)*, versão demonstrativa, baseando-se nas equações matemáticas do balanço de energia de um coletor.

Diante da análise da bibliografia estudada, optou-se por avaliar o desempenho do coletor solar de tubos em U evacuados através da eficiência (η); ganho de calor útil fornecido pelo coletor (Q_u); do fator de remoção de calor (F_R) e da temperatura do fluido na saída (T_o). E então foram estudados os impactos do comprimento do coletor (L), da condutância sintética (C_b), da vazão mássica do fluido de trabalho no interior do tubo em U (\dot{m}), da velocidade do ar (V), da temperatura de entrada (T_{in}), do produto da transmitância e a absortividade ($\tau\alpha$), do coeficiente de transferência de calor por convecção do tubo em U (h_{fi}) e por fim, da radiação solar incidente (G).

Por meio da análise chega-se à conclusão de que os parâmetros que mais influenciam no desempenho do coletor são: o produto da transmissividade pela absortividade do revestimento seletivo ($\tau\alpha$) que oferece um aumento de 104,39% da eficiência e do ganho de calor útil do coletor através de uma variação entre 0,5 e 1,0; a condutância sintética (C_b) que oferece um aumento de 47,69% através de uma variação da condutância entre 2 e 50 W/m.K em ambos os indicadores e no fator de remoção de calor também e, finalmente a radiação solar incidente (G) que propiciou um aumento total de 30,49% da eficiência e multiplicou o ganho de calor útil em 12 vezes ao ser variada entre 10 e 1000 W/m². Outros fatores que devem ser levados em consideração são a vazão mássica e a temperatura de entrada do fluido, que tem uma influência relativamente expressiva, ainda que em uma menor proporção.

Com relação à temperatura final do fluido, o fator de maior influência foi a vazão mássica cuja variação total gerou uma redução de 25,15% da temperatura final do fluido, seguida pela temperatura de entrada no tubo que proporcionou um aumento de 16,65% na temperatura de saída através de uma variação entre 293 K e 353 K na entrada, embora a mesma variação tenha provocado uma redução total de 8,08% na eficiência e no ganho útil, ilustrando a necessidade de um bom dimensionamento dos coletores para equilibrar alguns parâmetros.

Outros fatores relevantes para a temperatura final são o comprimento dos tubos e a radiação solar incidente e, portanto, também devem ser levados em consideração.

Além disso, o estudo esclareceu a importância de se analisar a temperatura de entrada do fluido levando-se em consideração a temperatura ambiente. Bem como a compreensão de que parâmetros como velocidade do ar e coeficiente de transferência de calor por convecção do tubo em U não possuem uma influência tão grande em comparação aos demais.

5.2 Recomendações

Para trabalhos futuros recomenda-se:

- Criar um modelo matemático que contemple a conexão do coletor solar de tubos evacuados com o reservatório térmico;
- Realizar estudo para coletores com tubos evacuados com tubos de calor;
- Concretizar análise e desenvolvimento de equacionamento para estudar a operação do coletor em regime de operação transiente;
- Estudar uma maneira de sistematizar todos os parâmetros operacionais e geométricos do coletor de forma a analisar a variação de todos os parâmetros para o projeto otimizado de um coletor solar evacuado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARORA, Siddharth *et al.* Thermal analysis of evacuated solar tube collectors. **Journal of petroleum and gas engineering**, v. 4, n. 2, p. 74-82, 2011.

AVALLONE, Elson. **Avaliação da eficiência térmica de um coletor solar tipo tubo evacuado modificado**. 2013.

ÁVILA, Mônica Lacerda de. **Análise comparativa entre coletores solares planos e coletores solares a vácuo**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS (ABNT). NBR 15569: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto – projeto e instalação. Rio de Janeiro, 2008.

BADRAN, Ali A. *et al.* On the measurement of bond conductance in solar collector absorber plate. **Energy conversion and management**, v. 49, n. 11, p. 3305-3310, 2008.

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

DA ROSA, Fábio Niemezewski; MANEA, Tiago Francisco; KREZINGER, Arno. Estudo comparativo da utilização de coletores solares planos e tubulares para aquecimento de água. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 4, n. 2, 2013.

ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL. 3ª edição–**Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL (Brasil)**. 2008.

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

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

ENGINEERING EQUATION SOLVER (EES). F-Chart Software, LLC. Madison, Wisconsin. [s.d]. Disponível em: < <http://fchart.com/ees/demo-file.php>>. Acesso em: novembro, 2020

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2016: **Relatório síntese -Ano base 2015**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2018.

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.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, n. 72, p. 6-15, 2007.

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.

KIZILKAN, Onder; YAMAGUCHI, Hiroshi. **Thermal Modeling and Performance Analysis of U-Tube Evacuated Solar Collector using CO₂**. **Journal of Solar Energy Research Updates**, v. 6, p. 69-77, 2019.

KOMECO, **Manual do usuário e de instalação de sistema de aquecimento solar tubo a vácuo**. versão 19.05.2017. São José, 2017.

LIANG, Ruobing *et al.* Theoretical and experimental investigation of the filled-type evacuated tube solar collector with U tube. **Solar Energy**, v. 85, n. 9, p. 1735-1744, 2011.

LOVATEL, Jorge Vinnícius Bedin. **Estudo comparativo de eficiência de aquecedores solares, placas e tubos a vácuo**. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2017.

MA, Liangdong *et al.* Thermal performance analysis of the glass evacuated tube solar collector with U-tube. **Building and Environment**, v. 45, n. 9, p. 1959-1967, 2010.

MAHJOURI, F. **Vacuum tube liquid-vapor (heat-pipe) collectors**. In: **Proceedings of the solar conference**. AMERICAN SOLAR ENERGY SOCIETY; AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS, 2004. p. 341-346.

MANEA, Tiago Francisco; DA ROSA, Fábio Niemezewski; KRENZINGER, Arno. Determinação dos parâmetros de desempenho de um coletor solar de tubos de vidro a vácuo. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 3, n. 1, 2013.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica (Atlas SA)**. São Paulo: Atlas SA, 2003.

MARLA ENERGIAS. [s.l], 2014. Disponível em: <<http://www.marla.pt/imagens/vacu2.jpg>>. Acesso em: novembro, 2020

MENDES, Bárbara de Morais. Estudo da influência de parâmetros de projeto no desempenho de coletores solares planos. 2017.

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

MOSLEMI, Hamid R.; KESHTKAR, Mohammad M. Sensitivity analysis and thermal performance optimization of evacuated U-tube solar collector using genetic algorithm. **International Journal of Heat and Technology**, v. 36, n. 4, p. 1193-1202, 2018.

NAIK, B. Kiran *et al.* **Modelling and performance analysis of U type evacuated tube solar collector using different working fluids**. Energy Procedia, v. 90, p. 227-237, 2016.

ROSA, Fabio Niemezewski da. **Aplicabilidade de coletores solares com tubo evacuado no Brasil**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio grande do Sul, 2012.

SA, ELETROBRAS-Centrals Elétricas Brasileiras. Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso: ano-base 2005, classe residencial. **Relatório Brasil. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL**, 2007.

SANTOS, Ana Paula dos; GABRICH, Gabriela Ferreira. **Análise de troca térmica em trocador de calor de tubos concêntricos concorrente mediante diferentes configurações de aletas**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

TADACHI, N. T.; FLORES, Mario Cesar Xavier. **Indicadores da Qualidade e do Desempenho**. 1997.

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

TIBA, Chiguera *et al.* **Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres**. Recife: Editora Universitária da UFPE, p. 32, 2000.

TORO, Juan Diego Naranjo. **Análise comparativa de um sistema passivo com um sistema ativo de aquecimento de água por meio de um coletor solar de tubos de vidro a vácuo**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio grande do Sul, 2015.

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.

UCZAI, Pedro Relator; TAVARES, Wagner Marques; QUEIROZ FILHO, Alberto Pinheiro de. **Energias renováveis: riqueza sustentável ao alcance da sociedade**. 2012.

UNIVERSIDADE DO SOL. Eficiência de coletores solares e comparações entre tubos evacuados e coletores planos. São Manuel/SP, 2013. Disponível em: <<https://www.universidadedosol.org.br/wp-content/themes/esntv2016/publicações-tecnicas/Relatório-0001.pdf>>. Acesso em: novembro, 2020.

ZHEJIANG SIDITE NEW ENERGY CO., LTD. **U Pipe Solar Collector (SC-U)**. [s.l]. [s.d]. Disponível em: <https://www.sidite-solar.com/download/20190916/UPipeSolarCollector_1_1568617394.pdf>. Acesso em: novembro, 2020.