

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
Centro Tecnológico
Engenharia Mecânica

Daniel Cordeiro Camata
Gabriel de Paula Lima

Projeto de Graduação
Software para Dimensionamento de Coletores
Solares de Placa Plana

Vitória/ES
2016

Daniel Cordeiro Camata
Gabriel de Paula Lima

Projeto de Graduação
Software para Dimensionamento de Coletores
Solares de Placa Plana

Trabalho entregue à coordenação do
Curso de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Espírito Santo
como requisito para obtenção do título de
Bacharelado em Engenharia Mecânica

Vitória/ES
2016

Daniel Cordeiro Camata
Gabriel de Paula Lima

Projeto de Graduação
Software para Dimensionamento de Coletores
Solares de Placa Plana

Trabalho entregue à coordenação do
Curso de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Espírito Santo
como requisito para obtenção do título de
Bacharelado em Engenharia Mecânica

Vitória, _____ de _____ de 2016

Banca Examinadora

Juan Sergio Romero Asenz
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Federal do Espírito Santo

Leonardo Belichi
Mestrando em Engenharia Mecânica
Universidade Federal do Espírito Santo

Marcelo Almeida Azeredo
Mestrando em Engenharia Mecânica
Universidade Federal do Espírito Santo

Nota: _____

A Deus que se mostrou criador, foi criativo. Seu fôlego de vida em mim me foi sustento e me deu coragem para questionar realidades e propor sempre um novo mundo de possibilidades.

Agradecimentos

É difícil agradecer todas as pessoas que de algum modo, nos momentos serenos e ou apreensivos, fizeram ou fazem parte da nossas vidas, por isso primeiramente agradecemos à todos de coração.

RESUMO

Coletores solares são dispositivos utilizados para transformar energia solar em energia térmica, afim de aquecer água, por exemplo. Nos dias atuais existe uma preocupação crescente com os efeitos negativos que fontes de energia sujas, como combustíveis fósseis, causam sobre o planeta. Isso eleva o interesse da sociedade científica nas fontes de energia limpas, como eólica, nuclear, marémotriz e a energia solar. Esta é uma das formas de energia limpa em que existe um interesse cada vez maior em desenvolvimento de melhores tecnologias que a envolvam. O objetivo aqui então é a criação de um software de dimensionamento de coletores solares de placas planas, passando por toda teoria envolvida no funcionamento deste dispositivo e também demonstrando o passo-a-passo da programação em Octave que será feita.

Palavras-chave: Energia Solar, Octave, Energia limpa, Programação.

ABSTRACT

Year after year it becomes easier to see the impacts that non-clean energy sources have on the planet. The adverse effects it provides to the overall quality of life of every living being are alarming and need to be studied and improved. With that in mind, the search for clean technology and the enhancement of the existing ones turns out to be one of the biggest missions of the current scientific society. Solar energy is a clean form of energy that can be used in various forms; from heating water, to creating electricity itself. Solar collectors are devices used to heat fluids through the absorption of the solar radiation and converting it into heat. The objective of this paper is to develop a software, using Octave platform, to scale out solar collectors and more importantly, to elucidate step-by-step of all the theory, formulas, calculations and the programming involved in this process.

Key words: Solar energy, Octave, Clean energy, Programming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Esquema simplificado de um SAS com circuito para circulação forçada (FONTE: ABNT NBR 15569) -----	17
Figura 2 Componentes Básicos de um coletor plano (FONTE: Autoral) -----	18
Figura 3 Orientação de um coletor (FONTE: ABNT NBR 15569)-----	19
Figura 4 Inclinação de um coletor (FONTE:ABNT NBR 15569)-----	19
Figura 5 Cobertura e tubos do coletor solar (FONTE: Autoral) -----	22
Figura 6 Temperaturas de distribuição em uma placa absorvedora de Duffie e Beckman (1974) (FONTE: Autoral).-----	22
Figura 7 Rede Térmica para um coletor plano com duas coberturas (FONTE: Autoral) -----	24
Figura 8 Equivalente de uma rede térmica para um coletor de placa plana (FONTE: Autoral) -----	25
Figura 9 Dimensões dos tubos e placa (FONTE: Autoral) -----	29
Figura 10 Balanço de energia na tubulação de água (FONTE: Autoral) -----	31
Figura 11 Fator de fluxo do coletor F'' em função de $(mC_p)/(AcU_{IF})$ (FONTE: Solar Engineering Of Thermal Processes, 4th Edition - Gearteam)-----	32
Figura 12 Tipos de posicionamento das tubulações (FONTE: Autoral) -----	35
Figura 13 Configuração geral do coletor gerado (FONTE: Autoral)-----	35
Figura 14 Mapa da radiação solar média no Brasil (FONTE: Atlas brasileiro de energia solar)-----	36
Figura 15 Fluxograma da programação utilizada-----	39
Figura 16 Resultados obtidos no primeiro caso (FONTE: Autoral) -----	41
Figura 17 Grafico Q_u vs Tempo do caso 1 (FONTE: Autoral) -----	42
Figura 18 Gráfico temperatura vs número de coletores do caso (FONTE: Autoral) -	42
Figura 19 Resultados do caso 2 -----	43
Figura 20 Grafico Q_u vs Tempo do caso 2(FONTE: Autoral) -----	43
Figura 21 Gráfico temperatura vs número de coletores do caso 2 (FONTE: Autoral) -----	44
Figura 22 Resultados do caso 3(FONTE: Autoral)-----	44
Figura 23 Grafico Q_u vs Tempo do caso 3 (FONTE: Autoral) -----	45
Figura 24 Gráfico temperatura vs número de coletores do caso 3 (FONTE: Autoral) -----	45
Figura 25 Resultados do caso 4 (FONTE: Autoral) -----	46
Figura 26 Grafico Q_u vs Tempo do caso 4 (FONTE: Autoral) -----	47
Figura 27 Gráfico temperatura vs número de coletores do caso 4 (FONTE: Autoral) -----	47
Figura 28 Resultados do caso 5 (FONTE: Autoral)-----	48
Figura 29 Grafico Q_u vs Tempo do caso 5 (FONTE: Autoral) -----	48
Figura 30 Gráfico temperatura vs número de coletores do caso 4 (FONTE: Autoral) -----	49

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 Principais componentes de um SAS (FONTE: ABNT NBR 15569).....</i>	<i>14</i>
<i>Tabela 2 Classificação dos SAS (FONTE: ABNT NBR 15569).....</i>	<i>14</i>
<i>Tabela 3 Consumo de pontos de utilização de água quente(FONTE: ABNT NBR 15569)</i>	<i>37</i>

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Ac – Área do coletor
Cb – Coeficiente de condutibilidade da junta tubo placa
Cp – Calor específico da água a pressão constante
D – Diâmetro da tubulação
 ε_c – Emitância do coletor
 ε_p – Emitância da Placa
F – Eficiência de uma aleta de perfil retangular padrão
F' – Fator de eficiência do coletor
F'' – Fator de fluxo do coletor
Fr – Fator de remoção de calor do coletor
Tf – Temperatura do fluido
Hc – Coeficiente de transferência de calor por convecção
Hr – Coeficiente de transferência de calor por radiação
hw – Índice de convecção pelo vento nas coberturas
It – Irradiação total
K – Condutividade térmica da placa
L – Comprimento do coletor
N – Número de coberturas
 η – Eficiência de recolha
Qu – Energia útil
qu' – Energia conduzida para o tubo por unidade de comprimento
S - Radiação solar absorvida por unidade de área
Ta – Temperatura ambiente
Tc – Temperatura da cobertura
Tp – Temperatura da placa
Tpm – Temperatura média da placa
Ub – Coeficiente de perda de fundo
UL – Coeficiente de perda total
Ut – Coeficiente de perda de topo
Ue – Coeficiente de perda de borda
W – Distância entre tubos
 δ – Espessura da placa
 σ - Constante de Stefan Boltzmann

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 CONCEPÇÃO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR (SAS). 13	
2.2 CLASSIFICAÇÃO DO SAS	14
2.3 SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR ADOTADO	17
2.4 DESCRIÇÃO DE COLETORES PLANOS	18
2.5 COMPONENTES BÁSICOS DE COLETORES PLANOS.....	18
2.6 ORIENTAÇÃO GEOGRÁFICA E ÂNGULO DE INCLINAÇÃO	19
2.7 EQUAÇÃO BÁSICA DO BALANÇO DE ENERGIA EM PLACAS PLANAS	19
2.8 DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA EM COLETORES DE PLACA PLANA.....	21
2.9 COEFICIENTE DE PERDA DE CALOR GLOBAL DO COLETOR.....	23
2.10 DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA ENTRE TUBOS E O FATOR DE EFICIÊNCIA DO COLETOR	28
2.11 DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NA DIREÇÃO DO FLUXO	31
2.12 FATOR DE REMOÇÃO DE CALOR DO COLETOR E FATOR DE FLUXO.....	31
2.13 TEMPERATURA MÉDIA DO FLUIDO E DA PLACA COLETORA.....	33
2.14 GEOMETRIA DOS COLETORES	34
2.15 RADIAÇÃO SOLAR	36
3 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE FUNCIONAMENTO	37
4 PROGRAMAÇÃO EM OCTAVE	38
4.1 ENTRADA DE DADOS	38
4.2 MÉTODO DA CONVERGÊNCIA.....	39
4.3 FIM DO LOOP E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS.....	40
5 ESTUDO DE CASOS E DISCUSSÃO	40
5.1 PRIMEIRO ESTUDO DE CASO (REFERÊNCIA)	41
5.2 INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE COBERTURAS.....	43
5.3 NÚMERO DE PESSOAS QUE MORAM NA RESIDÊNCIA	44
5.4 MUDANÇA NA TEMPERATURA AMBIENTE	46
6 CONCLUSÃO	50

1 INTRODUÇÃO

Coletores solares são dispositivos que utilizam a energia solar para aquecer fluidos, normalmente água, transformando energia solar em energia térmica. Esses dispositivos têm se tornado cada vez mais comuns, podendo ter utilização residencial e também industrial. O objetivo deste trabalho é a criação de um software para dimensionamento de coletores solares de placa plana, transmitindo com clareza o passo-a-passo da programação em Octave e a teoria que está envolvida em todo o processo.

Nos dias de hoje existe uma preocupação crescente em relação ao uso de fontes de energia suja e seus efeitos nocivos ao meio ambiente e, por consequência, aos seres vivos em geral. As energias sujas podem ser definidas como todo tipo de energia que provoca danos à saúde e ao meio ambiente, interferindo diretamente no ciclo do carbono. Um grande exemplo de fonte de energia suja são os combustíveis fósseis.

A utilização dessas fontes indesejáveis de energia cresceu exponencialmente a partir Primeira Revolução Industrial, na Inglaterra, de 1760 até meados de 1870. Carvão mineral era utilizado em larga escala para alimentar as máquinas à vapor e fortalecer o parque industrial inglês que crescia a passos largos.

Com o passar das décadas, novas tecnologias foram criadas em diversas áreas, mas os combustíveis fósseis continuam sendo a principal fonte de energia na maior parte dos casos, sendo largamente utilizadas para produção de energia elétrica e como combustível para automotores.

Fontes de energia limpa como solar, eólica, marémotriz e nuclear vem sendo estudadas e aprimoradas, afim de minimizar o impacto que o meio ambiente veio sofrendo ao longo das décadas.

Os coletores solares incorporam a radiação proveniente do Sol através de suas placas absorvedoras, transmitindo essa energia em forma de calor para a água que deverá ser aquecida. Geralmente, existem coberturas transparentes de vidro que impedem que o calor seja perdido para o ambiente por convecção, reduzindo perdas e aumentando a eficiência global do processo. Esses dispositivos podem ser utilizados de diversas formas; desde uma residência, para aquecer água do banho; até em uma

indústria para se atingir temperaturas adequadas para determinados processos e reações químicas.

Torna-se então plausível o desenvolvimento de softwares que automatizem ou facilitem o processo de desenvolvimento desses dispositivos que utilizam energias limpas, uma vez que a tendência é que haja um aumento cada vez maior da demanda pelos mesmos.

A plataforma Octave foi a escolhida para a programação do software desenvolvido neste projeto, visto que possui um bom tempo de resposta na resolução de problemas complexos, além de também ser um freeware, ou seja, não é preciso comprar uma licença.

Dever-se-á então, elucidar a teoria por de trás do dimensionamento de coletores de placas planas, bem como a programação em Octave de cada etapa e ao final obter um programa que forneça resultados dentro de padrões aceitáveis.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCEPÇÃO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR (SAS).

O SAS é constituído basicamente por três elementos principais:

- Coletor Solar
- Reservatório térmico
- Sistema de aquecimento auxiliar

Onde o projeto do SAS deve considerar e especificar a vida útil projetada para cada um dos elementos principais. Ressaltamos que o presente trabalho dará uma atenção especial aos coletores solares para SAS sem sistema de aquecimento auxiliar.

Para melhor compreensão de um SAS, a seguir uma tabela com os principais componentes e respectivas funções de um SAS de acordo com a norma ABNT NBR 15569.

Item	Componente	Função
1.	Coletor solar	Converter energia radiante em energia térmica
2.	Reservatório térmico	Acumular energia térmica na forma de água aquecida
3.	Controlador diferencial de temperatura	Controlar o funcionamento da motobomba hidráulica do sistema de aquecimento solar e eventualmente possui funções de segurança
4.	Sensor de temperatura	Medir a temperatura da água em pontos específicos do SAS
5.	Reservatório de expansão	Proteger o sistema contra variações de pressão e expansão volumétrica durante o funcionamento do SAS
6.	Válvula de alívio de pressão	Aliviar automaticamente a pressão do SAS caso a pressão máxima seja atingida
7.	Válvula de retenção	Não permitir o movimento reverso da água
8.	Válvula eliminadora de ar	Permitir a saída de ar do SAS
9.	Válvula quebra-vácuo	Aliviar pressões negativas formadas durante o funcionamento do SAS, permitindo a entrada de ar
10.	Dreno	Possibilitar o escoamento ou drenagem da água do SAS
11.	Motobomba	Promover a circulação forçada da água pelo SAS
12.	Tubos e conexões	Interconectar os componentes e transportar água aquecida
13.	Isolamento térmico	Minimizar perdas térmicas dos componentes e acessórios do SAS
14.	Equipamento auxiliar de aquecimento	Suprir a demanda térmica complementar do SAS
15.	Respiro	Equalizar pressões positivas e negativas do SAS e permitir a saída de ar e vapor

Tabela 1 Principais componentes de um SAS (FONTE: ABNT NBR 15569)

2.2 CLASSIFICAÇÃO DO SAS

O SAS pode ser classificado conforme tabela abaixo:

Atributo	Categorias		
	I	II	III
Arranjo	Solar mais auxiliar	Somente solar	Preaquecimento solar
Circulação	Natural ou termossifão	Forçada	-
Regime	Acumulação	Passagem	-
Armazenamento	Convencional	Acoplado	Integrado
Alimentação	Exclusiva	Não exclusiva	-
Alívio pressão	Respiro	Conjunto de válvulas	-

Tabela 2 Classificação dos SAS (FONTE: ABNT NBR 15569)

À seguir as definições de cada tipo de atributo conforme norma ABNT NBR 15569.

- Arranjo

- a) Solar mais auxiliar: Sistema que utiliza, de forma integrada, ambas as fontes de energia, solar e auxiliar, e é capaz de proporcionar uma vazão específica de água quente independente da disponibilidade de energia solar

- b) Somente Solar: Não utiliza o aquecimento auxiliar.

- c) Preaquecimento Solar: Sistema que não utiliza nenhuma forma de aquecimento auxiliar e é instalado para pré-aquecer água fria, previsto na entrada de qualquer outro tipo de aquecedor de água.

- Circulação

- a) Natural ou termossifão: Sistema que utiliza somente a mudança de densidade do fluido de trabalho para obter a circulação entre o coletor e o dispositivo de armazenamento

- b) Forçada: sistema em que o fluido de trabalho é forçado a circular entre o coletor e o reservatório térmico por pressão gerada externamente, geralmente uma motobomba.

- Regime

- a) Acumulação: sistema em que a água circula entre os coletores solares e o dispositivo de armazenamento durante os períodos de funcionamento.

- b) Passagem: sistema em que a água a ser aquecida passa diretamente desde os coletores solares até o uso.

- Armazenamento

- a) Convencional: sistema em que o dispositivo de armazenamento está separado do coletor e está localizado a certa distância deste.
- b) Acoplado: sistema em que o dispositivo de armazenamento termina com o coletor e está montado sobre uma estrutura de suporte comum.
- c) Integrado: sistema em que as funções de coleta e armazenamento de energia solar são realizadas dentro do mesmo dispositivo.

- Alimentação

- a) Exclusiva: sistema em que a alimentação de água fria abastece somente o SAS.
- b) Não exclusiva: sistema em que a alimentação de água fria abastece o SAS e outros pontos de consumo.

- Alívio de pressão

- a) Respiro: sistema em que a equalização das pressões positivas e negativas do SAS, saída de ar e vapor é realizada por comunicação direta entre o reservatório e a atmosfera.
- b) Conjunto de válvulas: sistema em que a equalização das pressões positivas e negativas do SAS, saída de ar e vapor é realizada por dispositivos mecânicos.

2.3 SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR ADOTADO

Neste projeto faremos o estudo e o projeto de SAS de circulação forçada, no qual uma motobomba será instalada entre os coletores solares e o reservatório térmico, acionada por comando que garanta o ganho de energia térmica no sistema de armazenamento.

A figura 1 retirada da ABNT NBR 15569 mostra o esquema simplificado do circuito para circulação forçada com os componentes básicos para o seu correto funcionamento.

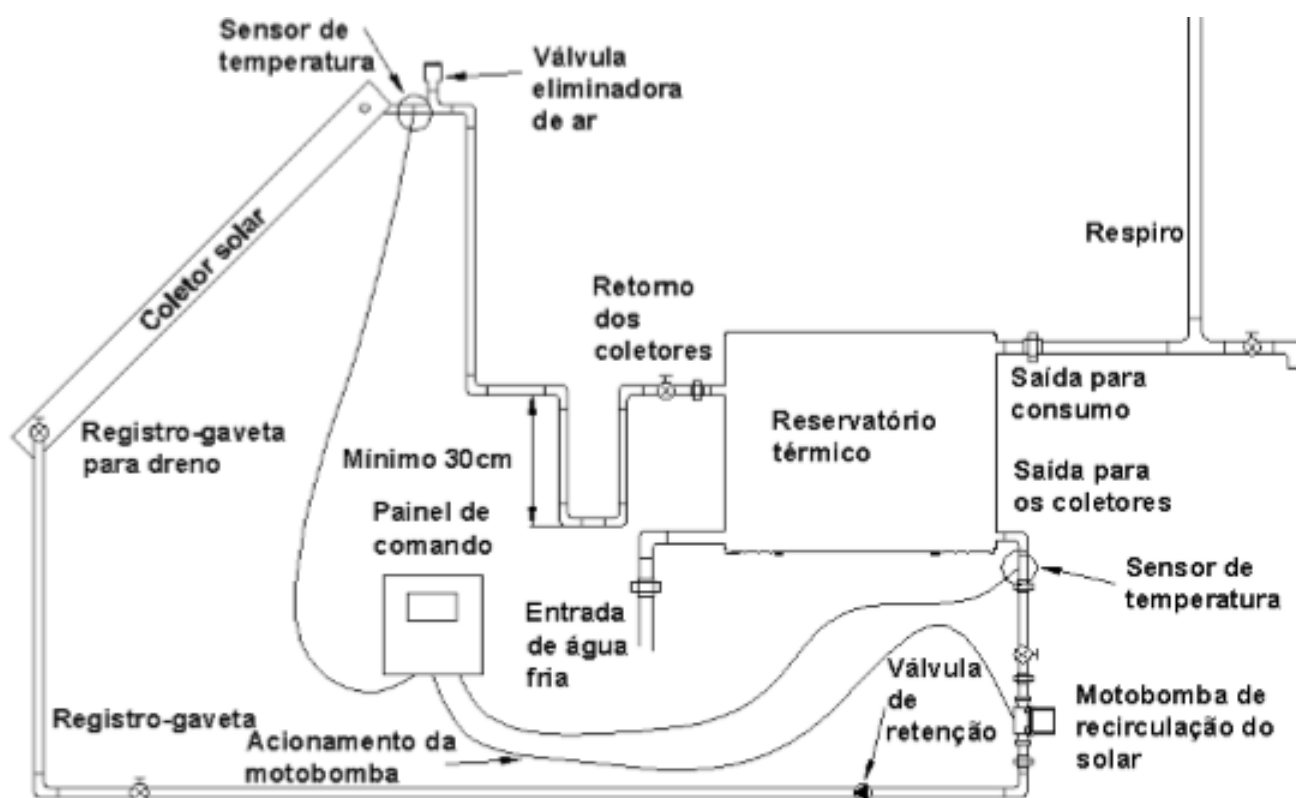


Figura 1 Esquema simplificado de um SAS com circuito para circulação forçada (FONTE: ABNT NBR 15569)

2.4 DESCRIÇÃO DE COLETORES PLANOS

Em regra geral, os coletores solares se diferenciam dos trocadores de calor comuns pelo fato de que a radiação solar é sua principal fonte de calor. O fluxo de radiação incidente é de aproximadamente 1000 w/m^2 e que varia com o tempo. De acordo com John Duffie e Willian Beckman, o comprimento de onda varia de 0,3 a 3 micrometros, a qual é considerada pequena. Logo, podemos concluir que a análise de coletores solares apresenta dificuldades singulares de baixa e variável fluxo de energia e alta dependência da radiação solar.

Segundo John Duffie e Willian Beckman coletores planos podem ser aplicados onde a temperatura exigida para o fluido de trabalho seja no máximo 110 graus célsius acima da temperatura ambiente, usa radiação direta e difusa, não requer rastreamento solar e exige pouca manutenção.

2.5 COMPONENTES BÁSICOS DE COLETORES PLANOS

Os componentes básicos de um coletor de placa plana é mostrada na figura 2. Ele possui uma superfície de absorção de energia solar, com meios para transferir a energia absorvida para o fluido, coberturas transparentes a radiação solar sobre a superfície absorvente de radiação para reduzir perdas por convecção e radiação e isolamento em volta para reduzir perdas por convecção

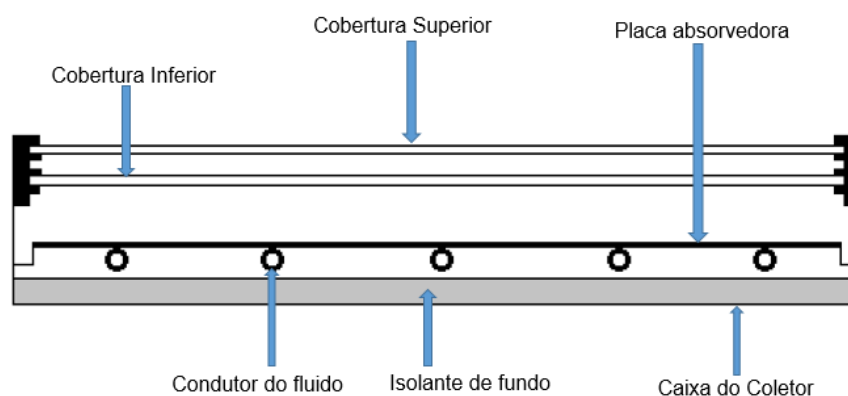


Figura 2 Componentes Básicos de um coletor plano (FONTE: Autoral)

2.6 ORIENTAÇÃO GEOGRÁFICA E ÂNGULO DE INCLINAÇÃO

Os coletores solares, segundo sugestão da norma ABNT NBR 15569, devem ser instalados voltados para o Norte geográfico com desvio máximo de até 30° desta direção.

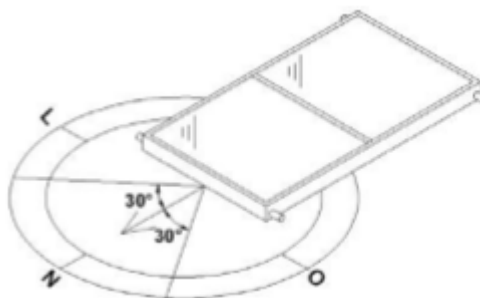


Figura 3 Orientação de um coletor (FONTE: ABNT NBR 15569)

Já a sua inclinação, também segundo sugestão da norma ABNT NBR 15569, deve ser igual ao da latitude local, acrescido de 10° nunca inferior a 15° .

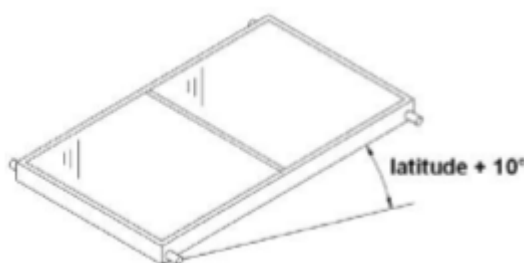


Figura 4 Inclinação de um coletor (FONTE:ABNT NBR 15569)

2.7 EQUAÇÃO BÁSICA DO BALANÇO DE ENERGIA EM PLACAS PLANAS

No estado estacionário, o desempenho de um coletor solar é descrita por um equilíbrio de energia que indica a distribuição de energia solar incidente em ganho de energia útil, as perdas térmicas, e as perdas ópticas. A radiação solar absorvida por um coletor por unidade de área do absorvedor S é igual à diferença entre a radiação solar incidente e as perdas ópticas conforme definido pela equação 1 abaixo:

$$S = I_b R_b (\tau\alpha)_b + I_d (\tau\alpha)_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_g I (\tau\alpha)_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (1)$$

Vale lembrar que o projeto apresentado tem como característica o estudo dos fenômenos de troca de calor por convecção, radiação e condução, sendo assim as perdas ópticas sofridas pela irradiação solar não serão calculadas. No entanto, consideraremos uma perda fixa e constante da irradiação total incidente sobre o coletor, a qual nos permitirá encontrar S.

A energia térmica perdida no coletor para os arredores por condução, convecção e radiação infravermelha pode ser representado como o produto de coeficiente U_L vezes a diferença entre a temperatura média da placa absorvedora TPM e a temperatura ambiente T_a . Em estado estacionário a saída de energia útil de um coletor de área A_c é a diferença entre a radiação solar absorvida e a perda térmica:

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_{pm} - T_a)] \quad (2)$$

O problema com esta equação é que a temperatura média da placa absorvente é difícil para calcular ou medir, uma vez que é uma função da concepção do coletor, radiação solar incidente e das condições do fluido de entrada. A equação 2 será reformulada de modo que o ganho de energia útil poderá ser expresso em termos da temperatura de entrada do fluido e um parâmetro chamado fator de remoção de calor do coletor (Fr), o que pode ser avaliadas analiticamente à partir de princípios básicos ou medida experimentalmente.

A equação 2 é uma equação da taxa de energia (em unidades SI) e produz o ganho de energia útil em watts (J/s) quando S é expresso em W/m^2 e U_L em W/m^2K . A base mais conveniente de tempo para a radiação solar é horas em vez de segundos uma vez que este é o período normal para relatórios de dados meteorológicos. Pode-se considerar S sendo uma taxa média de energia ao longo de um período de 1 h com unidades de J/m^2h , no qual o termo perda térmica $U_L(T_{PM} - T_a)$ deve ser multiplicado por 3600 s/h, para se obter os valores numéricos do ganho de energia útil em J/h. A base de tempo hora não é um uso adequado das unidades do SI, mas essa interpretação é muitas vezes conveniente.

Uma medida do desempenho do coletor é uma eficiência de recolha, definido como a razão entre o ganho útil durante algum período de tempo especificado para a energia solar incidente sobre o mesmo período de tempo:

$$\eta = \frac{\int \dot{Q}_u dt}{A_c \int G_t dt} \quad (3)$$

Se as condições forem constantes ao longo de um período de tempo, a eficiência irá se reduzir a:

$$\eta = \frac{Q_u}{I_t A_c} \quad (4)$$

O projeto de um sistema de energia solar está preocupado com a obtenção de energia a custo mínimo. Assim, pode ser desejável conceber um coletor com uma eficiência mais baixa do que é tecnologicamente possível, pois o custo é significativamente reduzido. Em qualquer caso, é necessário ser capaz de prever o desempenho de um coletor.

2.8 DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA EM COLETORES DE PLACA PLANA

A análise detalhada de um coletor solar é um problema complicado. Felizmente, uma análise relativamente simples irá produzir resultados muito úteis. Estes resultados mostram as variáveis mais importantes, como elas estão relacionadas, e como elas afetam o desempenho de um coletor solar. Os princípios básicos de um coletor para aquecimento de líquidos, como mostrado na figura 5 abaixo, será examinada primeiro. A análise apresentada segue a derivação de base por Whillier (1953, 1977) e Hottel e Whillier (1958).

Para o desenvolvimento de nosso projeto, é desejável ter uma compreensão da distribuição da temperatura que existe num coletor solar construído como se mostra na figura 6 abaixo e a figura 6A mostra uma região entre dois tubos. Uma parte da energia solar absorvida pela placa deve ser conduzida ao longo da placa para a região dos tubos. Assim, a temperatura a meio caminho entre as câmaras de ar será

mais elevado do que a temperatura na proximidade dos tubos. A temperatura acima dos tubos será quase uniforme, devido à presença do tubo e o metal de solda.

A energia transferida para o fluido vai aquecê-lo, provocando um gradiente de temperatura na direção do fluxo. Uma vez que em qualquer região do coletor o nível de temperatura geral é regulada pelo nível da temperatura local do fluido, uma situação como mostrado figura 6B é esperado. Em qualquer localização y , a distribuição de temperatura em geral na direção x é como mostrado na figura 6C, e em qualquer posição x , a distribuição de temperatura na direção y será parecida com a figura 6D.

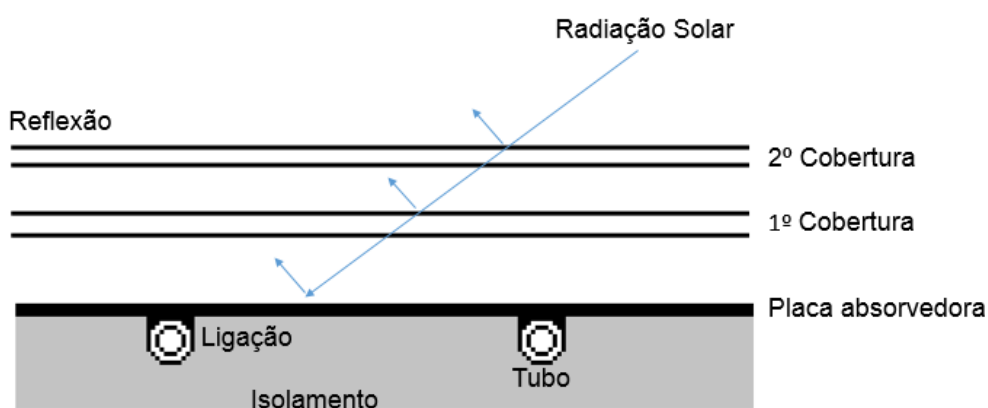


Figura 5 Cobertura e tubos do coletor solar (FONTE: Autoral)

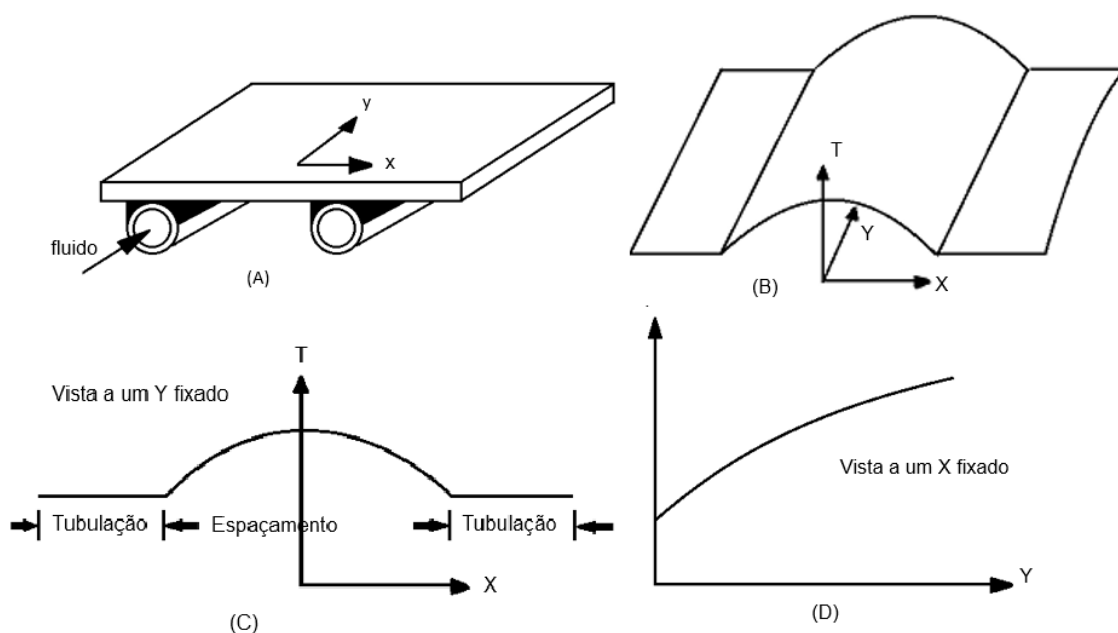


Figura 6 Temperaturas de distribuição em uma placa absorvedora de Duffie e Beckman (1974) (FONTE: Autoral).

Para modelar a situação mostrada na figura 5 e 6, uma série de hipóteses simplificadoras foram feitas para estabelecer a base principal do problema sem obscurecer a situação física básica. Essas hipóteses são as seguintes:

- O desempenho está em estado estacionário.
- A construção da chapa é do tipo de tubo paralelo.
- Os suportes superiores cobrem uma área pequena do coletor e podem ser desprezados.
- Os cabeçalhos proporcionam um fluxo uniforme para os tubos.
- Não há absorção de energia solar pelas coberturas (Cobertura ideal (Absorbtância igual a zero)).
- O fluxo de calor através de uma cobertura é unidimensional.
- Há uma queda de temperatura através de uma tampa negligenciável.
- As tampas são opacas à radiação infravermelha.
- Há fluxo de calor unidimensional através do isolamento das laterais.
- O céu pode ser considerado como um corpo negro para a radiação de comprimento de onda longo para uma temperatura equivalente ao do céu.
- Gradientes de temperatura em torno dos tubos podem ser negligenciado.
- Os gradientes de temperatura na direção do fluxo e entre os tubos pode ser tratada de forma independente.
- As propriedades são independentes da temperatura.
- Perda através do topo e da base estão à mesma temperatura ambiente.
- Poeira e sujeira no coletor são desprezíveis.
- Sombreamento da placa absorvente pode ser desprezada.

**Corpo negro é um corpo capaz de absorver toda radiação nele incidente.*

2.9 COEFICIENTE DE PERDA DE CALOR GLOBAL DO COLETOR.

As equações desenvolvidas no restante deste projeto serão muitas vezes acopladas com álgebra não linear e/ou equações diferenciais. As equações serão apresentadas de uma forma que seja conveniente para a resolução manual ou por programação. Normalmente, isso significa equações não-lineares são linearizadas, equações diferenciais são discretizadas e soluções iterativas são obrigatórias. Uma série de programas computacionais estão disponíveis, os quais podem resolver sistemas de equações algébricas e diferenciais, sendo necessário apenas escrever as equações em uma forma natural e deixar que o programa organize a solução.

É útil desenvolver o conceito de um coeficiente de perda global para um coletor solar para simplificar a matemática. Considere a rede térmica para um sistema de duas coberturas mostrado na figura 7. Em um local típico na placa, onde a temperatura é de T_p , a quantidade de energia solar S é absorvida pela placa, em que S é igual à radiação solar incidente reduzido por perdas ópticas. Esta energia absorvida S é distribuída para as perdas térmicas através da parte superior e inferior do coletor, obtendo-se energia útil. O propósito é converter a rede térmica da figura 7 na rede térmica da figura 8.

A perda de energia através do topo é o resultado da convecção e radiação entre as placas paralelas. A transferência de energia de estado estacionário entre a placa a T_p e a primeira cobertura no T_{c1} é a mesma que entre quaisquer outras duas tampas adjacentes e também é igual à energia perdida para o ambiente a partir do topo da cobertura. A perda através da área de topo por unidade é, em seguida, igual à transferência de calor da placa absorvente para a primeira cobertura:

$$q_{perda,topo} = h_{c,p-c1}(T_p - T_{c1}) + \frac{\sigma(T_p^4 - T_{c1}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_{c1}} - 1} \quad (5)$$

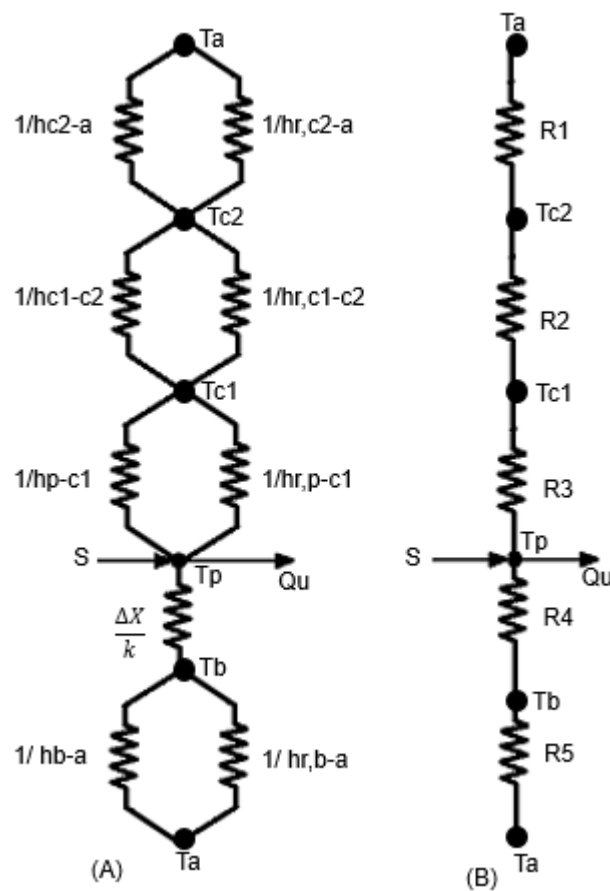


Figura 7 Rede Térmica para um coletor plano com duas coberturas (FONTE: Autoral)

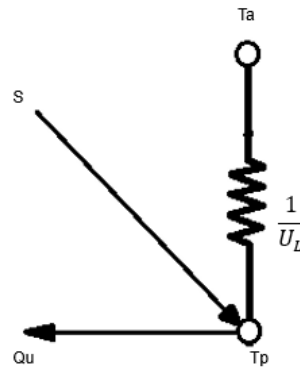


Figura 8 Equivalente de uma rede térmica para um coletor de placa plana (FONTE: Autoral)

Onde $H_{c, p-c1}$ é o coeficiente de transferência de calor por convecção entre duas placas paralelas inclinadas. Quando a definição de o coeficiente de transferência de calor por irradiação é utilizado, a perda de calor se torna:

$$q_{perda,topo} = (h_{c,p-c1} + h_{r,p-c1})(T_p - T_{c1}) \quad (6)$$

Onde:

$$h_{r,p-c1} = \frac{\sigma(T_p + T_{c1})(T_p^2 - T_{c1}^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_{c1}} - 1} \quad (7)$$

A resistência R_3 pode ser expressa como:

$$R_3 = \frac{1}{h_{c,p-c1} + h_{r,p-c1}} \quad (8)$$

Uma expressão semelhante pode ser escrita para R_2 , a resistência entre as tampas. Em geral, podemos ter tantas coberturas quanto desejado, mas o limite prático é de dois e a maioria dos coletores usam apenas um.

A resistência de radiação da cobertura superior é responsável pela troca de radiação com o céu a T_s . Por conveniência, vamos referenciar esta resistência à temperatura ambiente T_a , de modo que o coeficiente de transferência de calor por radiação pode ser escrito como:

$$h_{r,c2-a} = \frac{\sigma \varepsilon_c (T_{c2} + T_s)(T_{c2}^2 + T_s^2)(T_{c2} - T_s)}{T_{c2} - T_a} \quad (9)$$

A resistência ao ambiente R_1 é dada por

$$R_1 = \frac{1}{h_w + h_{r,c2-a}} \quad (10)$$

Para o sistema de duas coberturas, o coeficiente de perda de topo da placa do coletor para o ambiente é:

$$U_t = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (11)$$

O procedimento de resolução para o coeficiente de perda superior usando a equação 5 através da 11 é necessariamente um processo iterativo. Primeiro uma suposição das temperaturas desconhecidas da cobertura é feita, a partir do qual os coeficientes de transferência de calor convectivos e radiativos entre superfícies paralelas são calculadas. Com estas estimativas, a equação 11 pode ser resolvida pelo coeficiente de perda superior. A perda de calor superior é o coeficiente de perda vezes a diferença geral de temperatura, e uma vez que a troca de energia entre as placas deve ser igual à perda de calor total, um novo conjunto de temperaturas de cobertura pode ser calculada. Começando na placa absorvente, uma nova temperatura é calculada pela primeira cobertura. Esta nova primeira temperatura de cobertura é usada para encontrar a próxima temperatura de cobertura, e assim por diante. Para quaisquer duas coberturas ou placas adjacentes, a nova temperatura de placa ou cobertura j pode ser expressa em termos da temperatura da placa de cobertura i como:

$$T_j = T_i - \frac{U_t(T_p - T_a)}{h_{c,i-j} + h_{r,i-j}} \quad (12)$$

O processo é repetido até que as temperaturas de cobertura não se alterem significativamente entre as iterações sucessivas.

Os gráficos para U_t são convenientes para cálculos manuais, mas eles são difíceis de usar em computadores. Uma equação empírica para U_t que é útil tanto para os cálculos feitos em computador e a mão foi desenvolvido por Klein (1979) seguindo o procedimento básico de Hottel e Woertz (1942) e Klein (1975). Esta relação encaixa os gráficos para U_t para temperatura média de placa entre ambiente e 200°C a $\pm 0,3$ W / m² °C:

$$U_t = \left(\frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} * \left[\frac{(T_{pm} - T_a)}{(N * f)} \right]^e} + \frac{1}{h_w} \right)^{-1} \quad (13)$$

$$+ \frac{\sigma(T_{pm} + T_a) * (T_{pm}^2 + T_a^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p + h_w N 0,00591} + \frac{2N + f - 1 + 0,133\varepsilon_p}{\varepsilon_g} - N}$$

A perda de energia através da parte inferior do coletor é representada por duas resistências em série R4 e R5, na figura 7, em que R4 representa a resistência ao fluxo de calor através do isolamento e R5 representa a convecção e radiação resistência ao meio ambiente. As magnitudes dos R4 e R5 são tais que é geralmente possível assumir o símbolo R5 representa zero e toda a resistência ao fluxo de calor é devido ao isolamento. Assim, o coeficiente de perda fundo U_b é aproximadamente:

$$U_b = \frac{1}{R_4} = \frac{k}{L} \quad (14)$$

Em que K e L são a condutividade térmica e espessura de isolamento, respectivamente.

Para a maioria dos coletores a avaliação das perdas de borda é complicada. No entanto, em um sistema bem concebido, as perdas de borda devem ser pequenas, de modo que não é necessário prevê-las com uma grande precisão. Tabor (1958) recomenda isolamento de borda de aproximadamente a mesma espessura como isolamento inferior. As perdas de borda são então estimadas assumindo fluxo de calor lateral unidimensional em torno do perímetro do sistema coletor. Essas perdas devem ser referenciadas para a área do coletor.

$$U_e = \frac{(U * A)_{edge}}{A_c} \quad (15)$$

Daí,

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

A perda da borda para campos de coletores de 30 m² é um pouco maior que 1% das perdas totais. Note, no entanto, que se este coletor for de 1 × 2 m, as perdas de borda aumentarão para mais de 5%. Assim, as perdas de borda para grandes filas coletores bem construídos são geralmente insignificantes, mas para pequenas matrizes ou módulos individuais as perdas de borda podem ser significativo. Observe também que somente o perímetro exterior foi utilizado para estimar perdas de borda. Se os coletores individuais não são embalados hermeticamente em conjunto, perdas de calor significativas podem ocorrer a partir da borda de cada módulo.

A discussão anterior do coeficientes de perda de topo, incluindo Equação 13, baseia-se, em tampas de vidro que são opacas à radiação de comprimento de onda longa. Esta foi uma das simplificações adotadas nesse trabalho, do contrário os cálculos para vidros parcialmente transparentes envolve equações bem diferentes das utilizadas.

2.10 DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA ENTRE TUBOS E O FATOR DE EFICIÊNCIA DO COLETOR

A distribuição de temperatura entre dois tubos pode ser derivada se assumirmos temporariamente que o gradiente de temperatura na direção do fluxo é negligenciável. Consideremos a configuração de chapa de tubo mostrado na Figura 9. A distância entre os tubos é W , o diâmetro do tubo é D , e a chapa é fina com uma espessura δ . Uma vez que o material da chapa é um bom condutor, o gradiente de temperatura através da chapa é negligenciável. Vamos assumir a chapa acima do título esta em alguma temperatura base local T_b . A região entre a linha central que separa as câmaras de ar e a base do tubo pode então ser considerada como um problema de aleta clássica.

A aleta, mostrado na Figura 9, é de comprimento $(W - D) / 2$. Um balanço energético neste elemento produz:

$$S \Delta x - U_L \Delta x (T - T_a) + \left(-k\delta \frac{dT}{dx} \right) \Big|_x - \left(k\delta \frac{dT}{dx} \right) \Big|_{x+\Delta x} = 0 \quad (17)$$

Onde S é a energia solar absorvida. Dividindo através de Δx e encontrando o limite de dx conforme este se aproxima de zero:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{U_L}{k\delta} \left(T - T_a - \frac{S}{U_L} \right) \quad (18)$$

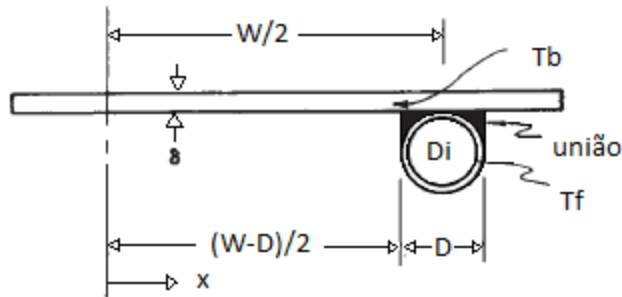


Figura 9 Dimensões dos tubos e placa (FONTE: Autoral)

As duas condições de contorno necessárias para resolver esta equação diferencial de segunda ordem são simetria na linha central e a temperatura de base é conhecida, tendo isso em mente e sabendo que:

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k\delta}} \quad (19)$$

Resolve-se a equação 18, obtendo:

$$\frac{T - T_a - S/U_L}{T_b - T_a - S/U_L} = \frac{\cosh mx}{\cosh m(W-D)/2} \quad (20)$$

A energia conduzida para a região do tubo por unidade de comprimento na direção de fluxo pode agora ser encontrado como:

$$q'_{fin} = (W-D)F[S - U_L(T_b - T_a)] \quad (21)$$

Onde:

$$F = \frac{\tanh[m(W - D)/2]}{m(W - D)/2} \quad (22)$$

A função F é a eficiência da aleta padrão para aletas retas com perfil retangular.

Agora queremos eliminar a T_b das equações e obter uma expressão para o ganho útil em termos de dimensões conhecidas, parâmetros físicos e da temperatura do fluido local. Tal equação é encontrada através de substituições nas próprias equações encontradas acima, resultando em:

$$q'_u = WF'[S - U_L(T_f - T_a)] \quad (23)$$

Onde o fator de eficiência do coletor F' é dada conforme:

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[\frac{1}{U_L[D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]} \quad (24)$$

Uma interpretação física para F' vem da análise da equação 23. Em um local particular, F' representa a relação entre o ganho de energia útil real e o ganho útil que resultaria se a superfície de absorção do coletor estivesse a temperatura do fluido no local. Para esta e a maioria das (mas não todas) geometrias, uma outra interpretação para o parâmetro F' torna-se claro quando se reconhece que o denominador da equação 24 é a resistência de transferência de calor do fluido para o ar ambiente. Esta resistência terá o símbolo $1/U_o$. O numerador é a resistência de transferência de calor da placa absorvente para o ar ambiente. Assim F' é a razão entre estes dois coeficientes de transferência de calor.

O fator de eficiência do coletor é essencialmente uma constante para qualquer projeto de coletor e taxa de fluxo de fluido. A proporção de U_L a C_b , a relação de U_L para HFI , e o parâmetro de eficiência da aleta F são as únicas variáveis que aparecem na equação 24 que podem ser funções de temperatura. Para a maioria dos projetos de coletor F é a mais importante destas variáveis na determinação F' . O fator F' é uma função de U_L e HFI , cada um dos quais tem alguma dependência da temperatura, mas não são fortes funções de temperatura.

2.11 DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NA DIREÇÃO DO FLUXO

O ganho útil por unidade de comprimento no sentido do fluxo calculado a partir da equação 23 será então, finalmente transferido para o fluido. O fluido entra no coletor a temperatura T_{fi} e saída do coletor a temperatura T_{fo} . Com referência à Figura 10, podemos expressar um balanço de energia no fluido que está passando através dos tubos de comprimento L como:

$$\frac{T_{fo} - T_a - S/U_L}{T_{fi} - T_a - S/U_L} = \exp\left(-\frac{U_L A_c F'}{\dot{m} C_p}\right) \quad (25)$$

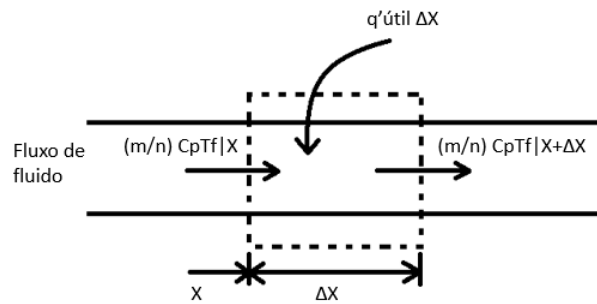


Figura 10 Balanço de energia na tubulação de água (FONTE: Autoral)

2.12 FATOR DE REMOÇÃO DE CALOR DO COLETOR E FATOR DE FLUXO

É conveniente definir uma quantidade que se relaciona com o ganho de energia útil efetiva de um coletor para o ganho útil, se a superfície do coletor inteiro estiver à temperatura de entrada do fluido. Esta quantidade é chamada de fator de remoção de calor do coletor F_R . Na forma de equação é:

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p (T_{fo} - T_{fi})}{A_c [S - U_L (T_{fi} - T_a)]} \quad (26)$$

O fator de remoção de calor do coletor pode ser expresso como:

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_c U_L F'}{\dot{m}C_p} \right) \right] \quad (27)$$

Para apresentar Equação 27 graficamente, é conveniente definir o fator de fluxo do coletor F'' como a razão entre F_R a F' . Assim:

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L F'} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_c U_L F'}{\dot{m}C_p} \right) \right] \quad (28)$$

Este fator de fluxo do coletor é uma função de uma única variável, a taxa de capacitância coletor adimensional $(\dot{m}C_p)/(A_c U_L F')$, e é mostrado na figura 11.

A quantidade F_R é equivalente à eficácia de um trocador de calor convencional, que é definido como a razão entre a transferência de calor efetiva para a transferência de calor máxima possível. O ganho de energia útil máxima possível (transferência de calor) em um coletor solar ocorre quando todo o coletor está na temperatura do fluido de entrada; as perdas de calor para o meio envolvente estão então, em um mínimo. O fator de remoção de calor do coletor vezes o ganho de energia útil máximo possível é igual ao ganho de energia útil real Q_u :

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_{fi} - T_a)] \quad (29)$$

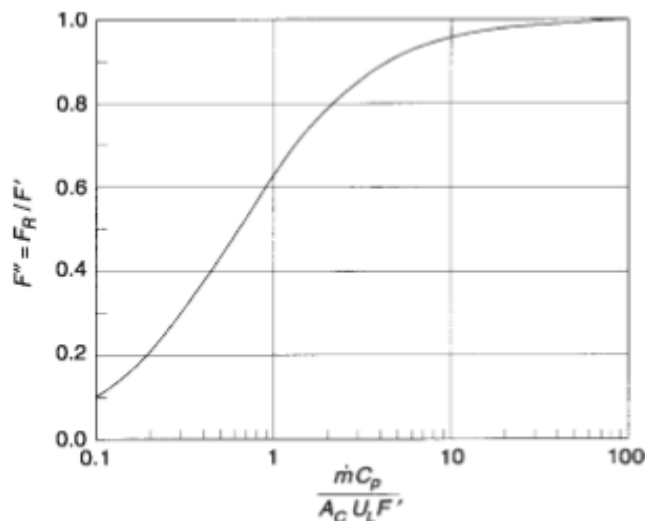


Figura 11 Fator de fluxo do coletor F'' em função de $(\dot{m}C_p)/(A_c U_L F')$ (FONTE: Solar Engineering Of Thermal Processes, 4th Edition - Gearteam)

Isso é uma equação extremamente útil e aplica-se a praticamente todos os coletores planos. Com isso, o ganho de energia útil é calculado como uma função da

temperatura do fluido de entrada. Esta é uma representação conveniente quando se analisam os sistemas de energia solar, uma vez que a temperatura do fluido de entrada é geralmente conhecida. No entanto, perdas com base na temperatura de entrada de fluido são muito pequenas, uma vez perdas ocorrem ao longo de todo o coletor de placa e a placa tem uma temperatura cada vez maior no sentido do escoamento.

O efeito multiplicador do F_R é reduzir o ganho de energia útil a partir do que ele teria sido se toda a placa coletor absorvente estivesse na temperatura do fluido de entrada para o que realmente ocorre. Como a taxa de fluxo de massa através do coletor aumenta, o aumento de temperatura através do coletor diminui. Isto faz com que haja perdas menores uma vez que a temperatura média do coletor é menor e existe um correspondente aumento no ganho de energia útil. Este aumento é refletido por um crescimento no fator de remoção de calor do coletor F_R como um aumento da vazão mássica. Note que F_R nunca poderá exceder o fator de eficiência do coletor F' . Como a taxa de fluxo torna-se muito grande, o aumento de temperatura entre a entrada e a saída diminui para zero, mas a temperatura da superfície de absorção será ainda maior do que a temperatura do fluido. Esta diferença de temperatura é contabilizada pelo fator de eficiência do coletor F' .

2.13 TEMPERATURA MÉDIA DO FLUIDO E DA PLACA COLETORA

Para conhecer a performance do coletor, é necessário saber o coeficiente de perda total e os coeficientes de transferência de calor interno. Entretanto, tanto U_L quanto h_{fi} estão para algum grau de função de temperatura.

$$T_{fm} = \frac{1}{L} \int_0^L T_f(y) dy \quad (30)$$

Fazendo essa integral e substituindo F_R na equação 27 e Q_u da equação 29, a temperatura média do fluido é dada por Klein et al.(1974) como:

$$T_{fm} = T_{fi} + \frac{Q_u/A_c}{F_R U_L} (1 - F'') \quad (31)$$

Essa é a temperatura correta para se estudar as propriedades do fluido.

Quando o coletor está produzindo energia útil, a temperatura média da placa sempre será maior que a temperatura média do fluido devido à transferência de calor entre a superfície absorvedora e o fluido. Essa diferença de temperatura é

normalmente pequena para coletores de aquecimento de líquidos, mas pode ser significativa em coletores para aquecimento de ar.

A temperatura média da placa pode ser utilizada para calcular o ganho de energia útil de um coletor.

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_{pm} - T_a)] \quad (32)$$

Remanejando as equações 32 e 29 e resolvendo para a temperatura média da placa, temos:

$$T_{pm} = T_{fi} + \frac{Q_u / A_c}{F_R U_L} (1 - F_R) \quad (33)$$

A equação 33 pode ser resolvida de forma iterativa com a Equação 13. Primeiro uma estimativa da temperatura média da placa é feita a partir do qual é calculado U_L . Com valores aproximados de F_R , F'' e Q_u , uma nova temperatura média da placa é obtida a partir da Equação 31 e usada para encontrar um novo valor para o coeficiente de perda de topo. O novo valor de U_L é utilizado para refinar F_R e F'' , e o processo é repetido. Com uma estimativa inicial razoável, uma segunda iteração é raramente necessário. Um chute inicial razoável de T_{pm} para coletores de aquecimento de líquidos operados a taxas de fluxo típicos de 0,01 a 0,02 kg / s é $T_{fi} + 10^\circ\text{C}$.

2.14 GEOMETRIA DOS COLETORES

Para esse trabalho, considerou-se o coletor simples, tendo apenas a placa absorvedora e seus tubos paralelos aderidos ao fundo da placa. Entretanto, existem diversos tipos de designs para coletores solares para aquecimento de líquidos, a figura 12 mostra alguns deles. O primeiro deles é o design básico que fora utilizado nos tópicos anteriores. O design em (b) é o mesmo, mudando apenas os tubos que estão no topo da placa, ao invés de estarem no fundo. O modelo mostrado em (c) tem tubos centralizados no plano da placa, formando uma parte integrada da estrutura da placa.

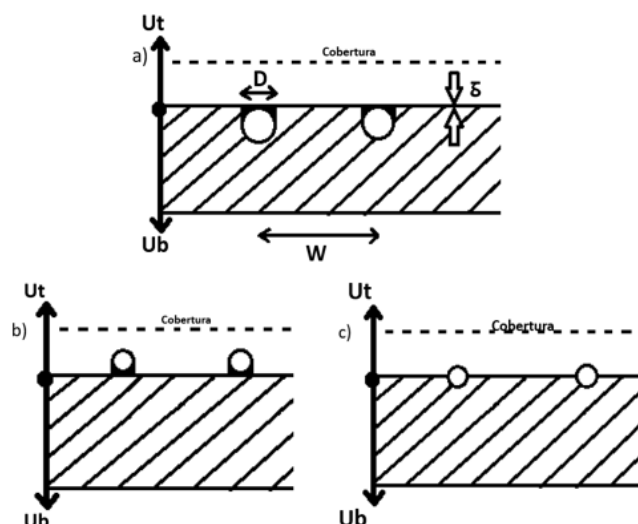


Figura 12 Tipos de posicionamento das tubulações (FONTE: Autoral)

O esquema a seguir ilustra o modelo do corpo do coletor a ser utilizado neste projeto, o qual busca uma menor perda de carga possível, pois assim a motobomba escolhida poderá ter uma potência reduzida o que acarretará em maior economia de energia.

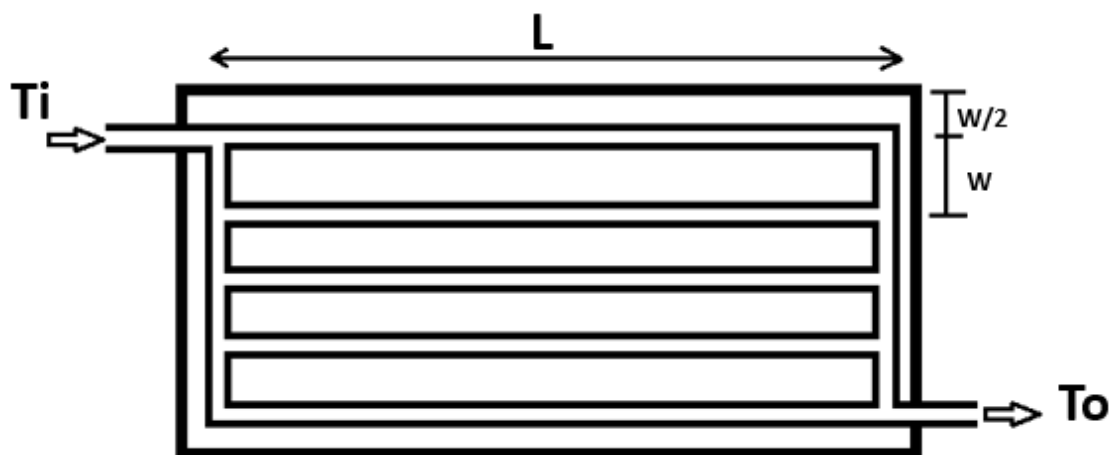


Figura 13 Configuração geral do coletor gerado (FONTE Autoral)

2.15 RADIAÇÃO SOLAR

Como foi visto em tópicos anteriores a radiação solar incidente é a única fonte de calor utilizada pelos coletores solares, sendo que uma parte dela é perdida por perdas ópticas, a parte da energia da irradiação solar total menos as perdas ópticas é a nossa variável S definida pela equação 1, que ainda sofrera uma perda por transferência de calor através de irradiação, condução e convecção.

Com o objetivo de estudar coletores solares no Brasil, fez se necessário conhecer a radiação solar global média anual brasileira.

De acordo com o atlas brasileiro de energia solar de 2006 primeira edição temos as seguinte distribuição de radiação.

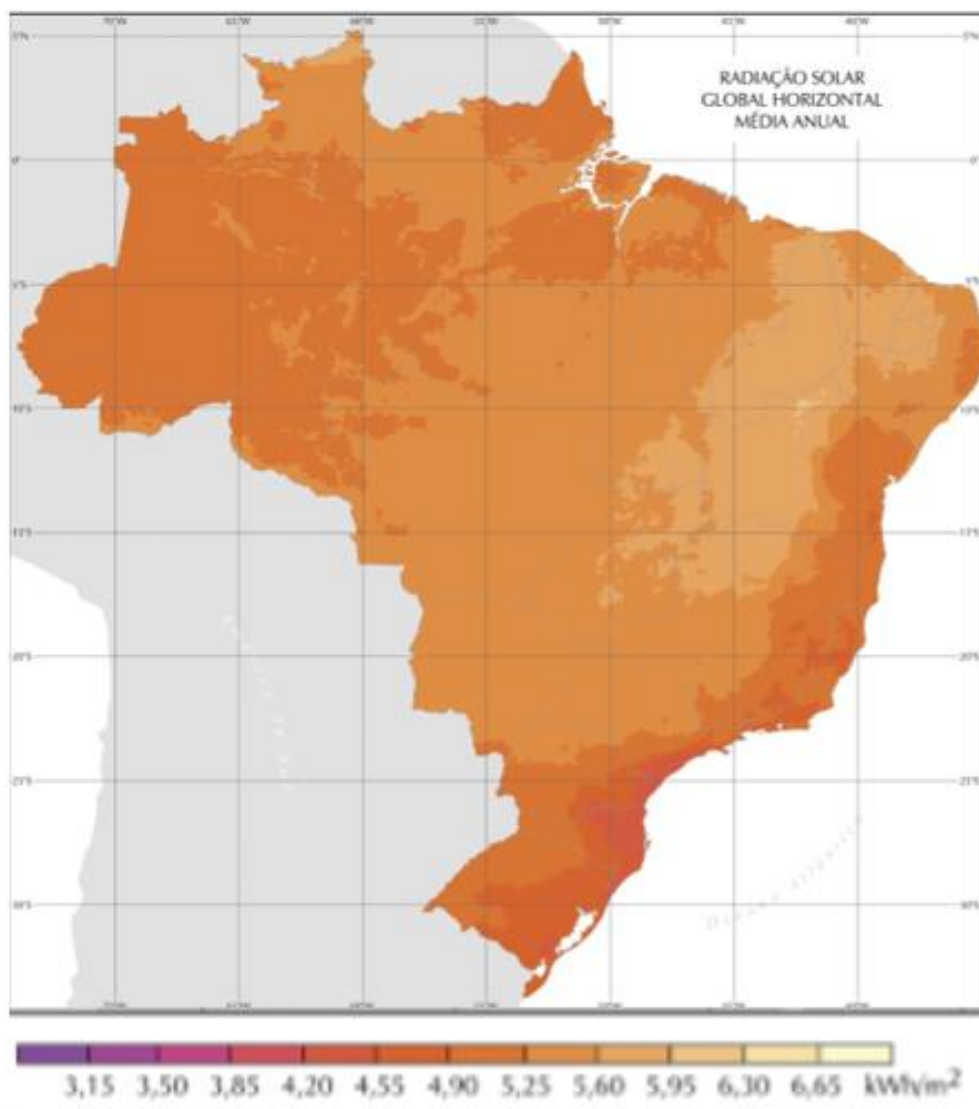


Figura 14 Mapa da radiação solar media no Brasil (FONTE: Atlas brasileiro de energia solar)

Conforme citado no Atlas Brasileiro de Energia Solar, o mapa apresentado acima mostra a média anual do total diário de irradiação solar global incidente no território brasileiro, sendo que o dia possui entre dez e doze horas de Sol. Apesar das diferentes características climáticas observadas no Brasil, pode-se observar que a média anual de irradiação global apresenta boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas em todo país. O valor máximo de irradiação global – 6,5kWh/m² - ocorre no norte do estado da Bahia, próximo à fronteira com o estado do Piauí. A menor irradiação solar global – 4,25kWh/m² – ocorre no litoral norte de Santa Catarina. Os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro (1500-2500 kWh/m²) são superiores aos da maioria dos países da União Européia, como Alemanha (900-1250 kWh/m²), França (900-1650kWh/m²) e Espanha (1200-1850 kWh/m²), onde projetos para aproveitamento de recursos solares, alguns contando com fortes incentivos governamentais, são amplamente disseminados.

3 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE FUNCIONAMENTO

Para os cálculos apresentados nas seções anteriores foi necessário pré-determinar a temperatura de uso da água e seu consumo diário, para que assim se pudesse calcular o volume do tanque de armazenamento utilizado no sistema de aquecimento solar.

Tendo em vista que o consumo diário e a temperatura de banho varia de pessoa para pessoa, e que este projeto tenta satisfazer as necessidades de uma população em geral, tentou-se ser o mais realista possível na escolha destes valores de projeto. Com isso adotou-se os dados sugeridos pela Norma ABNT NBR 15569, os quais são mostrados na Tabela 3.

Peças	Consumo mínimo	Consumo máximo	Ciclo diário (minuto/pessoa)	Temperatura de consumo °C
Ducha de banho	3,0 L/min	15,0 L/min	10	39 – 40
Lavatório	3,0 L/min	4,8 L/min	2	39 – 40
Ducha higiênica	3,0 L/min	4,8 L/min	2	39 – 40
Banheira	80 L	440 L	banho	39 – 40
Pia de cozinha	2,4 L/min	7,2 L/min	3	39 – 40
Lava-louças (12 pessoas)	20 L	20 L	ciclo de lavagem	39 – 50
Máquina de lavar roupa	90 L	200 L	ciclo de lavagem	39 – 40

Tabela 3 Consumo de pontos de utilização de água quente(FONTE: ABNT NBR 15569)

4 PROGRAMAÇÃO EM OCTAVE

Neste projeto foi utilizado o Octave como plataforma de programação, uma vez que ele possui boa performance, é perfeito para fazer cálculos numéricos, além de ser grátis e de fácil manuseio. Nele foi feito o código responsável por calcular, de forma iterativa, a área de coletores adequada à necessidade do usuário.

4.1 ENTRADA DE DADOS

Primeiro iniciou-se o código com uma entrada de dados dinâmica que pede informações ao usuário e ao mesmo tempo o impede de entrar com dados inválidos e/ou inadequados para cada entrada. Para isso utilizou-se o seguinte formato.

```
-----
ta = input('Digite o valor da temperatura ambiente em graus Celcius -> ');

while (ta<0)
ta = input('O valor da temperatura ambiente deve ser maior que 0, digite
novamente um valor correto -> ');
end
-----
```

O resultado fica como mostrado à seguir:

```
Digite o valor da temperatura ambiente em graus celcius -> -3
O valor da temperatura ambiente deve ser maior que 0, digite novamente o valor correto ->
```

Esse modelo é utilizado para:

- Latitude do local onde o coletor será instalado: Define a angulação que o coletor terá;
- Uso ou não de Lava-Louças: Define uma taxa extra de água quente necessária.
- Número de moradores da residência: determina a demanda principal de água;
- Número de coberturas: parâmetro definido pelo usuário.
- Temperatura ambiente: Além de ser um parâmetro utilizado para os cálculos, é também quem define o chute inicial no processo iterativo ($\text{chute} = T_a + 10$).

Após a entrada de dados o programa utiliza diversas constantes e parâmetros padronizados implementados no código para fazer os cálculos necessários na etapa seguinte. Esses parâmetros serão mostrados na seção 4.

4.2 MÉTODO DA CONVERGÊNCIA

Este método consiste em chutar um valor inicial para a temperatura média da placa T_{pm} . O código calculará o resultado de U_L para este chute, e com U_L calcula-se Q_u . Utiliza-se este resultado de Q_u para calcular uma nova temperatura média da placa, T_{pmN} , e retorna-se ao início dos cálculos. Dessa forma, cria-se uma rede de realimentação em loop que irá convergir para um valor bem próximo do correto. Quando a diferença entre o valor atual de T_{pm} e o valor calculado de T_{pmN} for menor que uma dada tolerância, o programa finalizará e mostrará os resultados.

Passo-a-passo da convergência:

- 1º Chute de T_{pm} (temperatura ambiente mais 10 °C);
- 2º Cálculo de U_L ;
- 3º Cálculo de U_t ;
- 4º Cálculo de Q_u ;
- 5º Com o resultado de Q_u , acha-se a nova T_{pm} , que será chamada T_{pmN} e com este valor reiniciam-se os cálculos;
- 6º Quando $|T_{pm} - T_{pmN}| < \text{Tolerância}$, finaliza-se o programa.

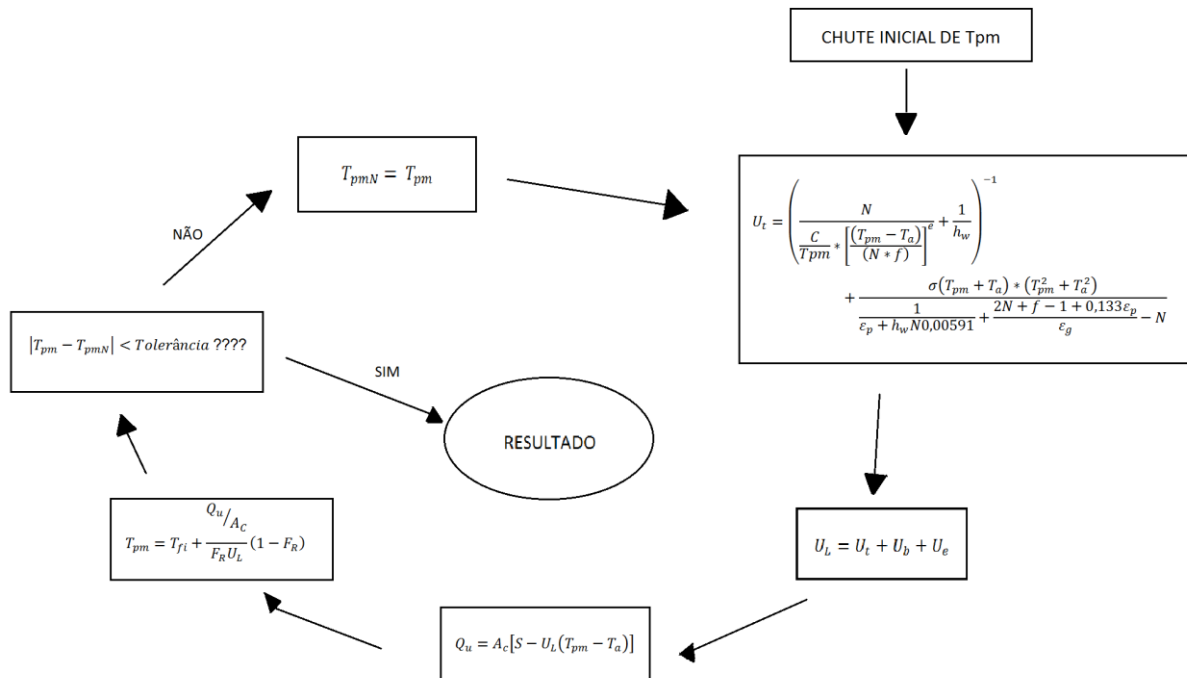


Figura 15 Fluxograma da programação utilizada

4.3 FIM DO LOOP E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Uma vez que a convergência termina, obtemos o resultado de T_{pm} e Q_u corretos e então é feito o balanço de energia para a quantidade de água total do sistema. Se ao final do cálculo não se atingir o valor desejado para a temperatura do fluido, o programa retorna ao início do código e adiciona mais um módulo, até que se encontre o número de módulos necessários para o sistema de aquecimento solar em questão.

Todos os valores de temperatura atingidos para o respectivo número de módulos são “printados”, assim o usuário pode escolher de maneira mais confortável quantos módulos ele necessita.

5 ESTUDO DE CASOS E DISCUSSÃO

Para este projeto padronizou-se determinadas dimensões e materiais, afim de se aproximar o máximo de um coletor residencial real, prezando manter estes parâmetros os mais comuns o possível. Segue os parâmetros que foram padronizados:

Diâmetro do tubo:	0,017 m
Comprimento de tubo:	2 m
Nº de fileiras de tubos:	7
Espaçamento entre tubos:	0,15 m
Material do isolamento do fundo:	madeira compensada
Condutividade térmica do isolamento do fundo:	0,17 W/mK
Espessura do material do fundo:	0,05 m
Emitância do vidro:	0,88
Emitância da placa:	0,95
Espessura da chapa:	0,0005 m
Condutividade térmica da placa:	385 W/mK
Vazão:	$3 * 10^{-5} m^3/s$
Condutividade térmica da água	0,61 W/mK
Viscosidade da água:	0,001 Pa* s
Temperatura de banho:	36 °C
Temperatura da água no reservatório:	60 °C
Radiação média solar diária:	4,44 kWh/dia m ²
Dia (Sol):	10 horas
Consumo de água do lava louças:	20 litros
Consumo de água no banho por pessoa:	100 litros

5.1 PRIMEIRO ESTUDO DE CASO (REFERÊNCIA)

Para as seguintes condições (dados de entrada):

- Temperatura ambiente: 10°C;
- Latitude local: -22 (Correspondente ao estado do Espírito Santo);
- Número de pessoas na casa: 4;
- Número de coberturas no coletor: 1;
- Sem ou com máquina de lavar louças: Com;

```

Digite o valor da latitude local -22
Digite o valor do número de cobertura 1
Faz-se uso de máquina de lavar louças na residência? Digite 1 para Sim e 2 para Não 1
Digite o valor da temperatura ambiente em graus Célcus 10
digite o número de moradores da residência 4
Nº de Coletores = 1, Temperatura da água = 28.7 °C,      Qut = 2.360416e+07
Fator de eficiência = 0.8832 e Reservatório de 259.2 litros

Nº de Coletores = 2, Temperatura da água = 48.6 °C,      Qut = 4.519576e+07
Fator de eficiência = 0.8775 e Reservatório de 259.2 litros

Nº de Coletores = 3, Temperatura da água = 57.1 °C,      Qut = 5.443242e+07
Fator de eficiência = 0.8756 e Reservatório de 259.2 litros

Nº de Coletores = 4, Temperatura da água = 59.2 °C,      Qut = 5.676137e+07
Fator de eficiência = 0.8751 e Reservatório de 259.2 litros

Nº de Coletores = 5, Temperatura da água = 59.6 °C,      Qut = 5.715027e+07
Fator de eficiência = 0.8751 e Reservatório de 259.2 litros

Nº de Coletores = 6, Temperatura da água = 59.6 °C,      Qut = 5.719655e+07
Fator de eficiência = 0.8750 e Reservatório de 259.2 litros

Nº de Coletores = 7, Temperatura da água = 59.6 °C,      Qut = 5.720068e+07
Fator de eficiência = 0.8750 e Reservatório de 259.2 litros

Nº de Coletores = 8, Temperatura da água = 59.6 °C,      Qut = 5.720097e+07
Fator de eficiência = 0.8750 e Reservatório de 259.2 litros

Nº de Coletores = 9, Temperatura da água = 59.6 °C,      Qut = 5.720099e+07
Fator de eficiência = 0.8750 e Reservatório de 259.2 litros

Nº de Coletores = 10, Temperatura da água = 59.6 °C,      Qut = 5.720099e+07
Fator de eficiência = 0.8750 e Reservatório de 259.2 litros

```

Figura 16 Resultados obtidos no primeiro caso (FONTE: Autoral)

No gráfico da energia total absorvida (Q_u) versus tempo é possível observar a quantidade total de energia que o sistema de aquecimento solar consegue absorver no período de um dia, e o decréscimo da absorção que ocorre ao final do dia, período

no qual as temperaturas do SAS são mais elevadas e consequentemente as perdas também crescem.

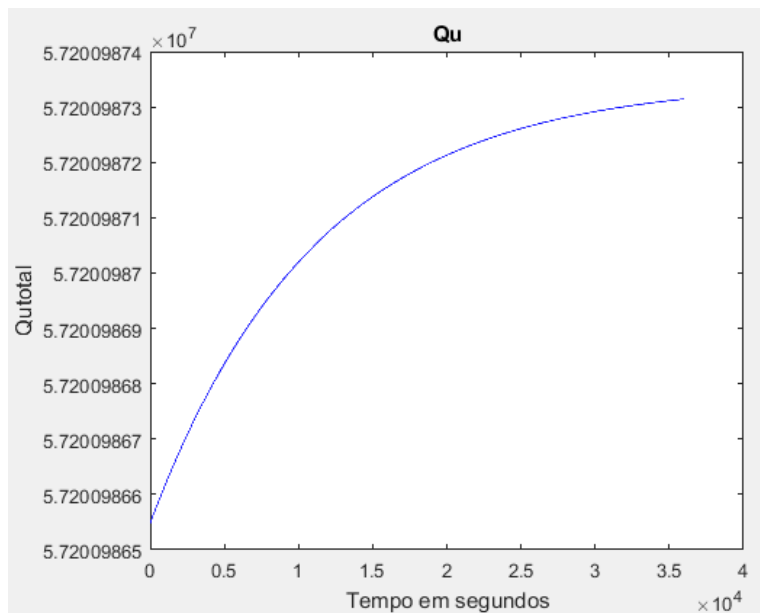


Figura 17 Gráfico Q_u vs Tempo do caso 1 (FONTE: Autoral)

No gráfico da temperatura do fluido versus o número de coletores podemos perceber que a temperatura do fluido aumenta de acordo com o número de coletores, até o ponto onde se tem 4 coletores onde, a partir daí, o acréscimo de temperatura pode ser considerada desprezível.

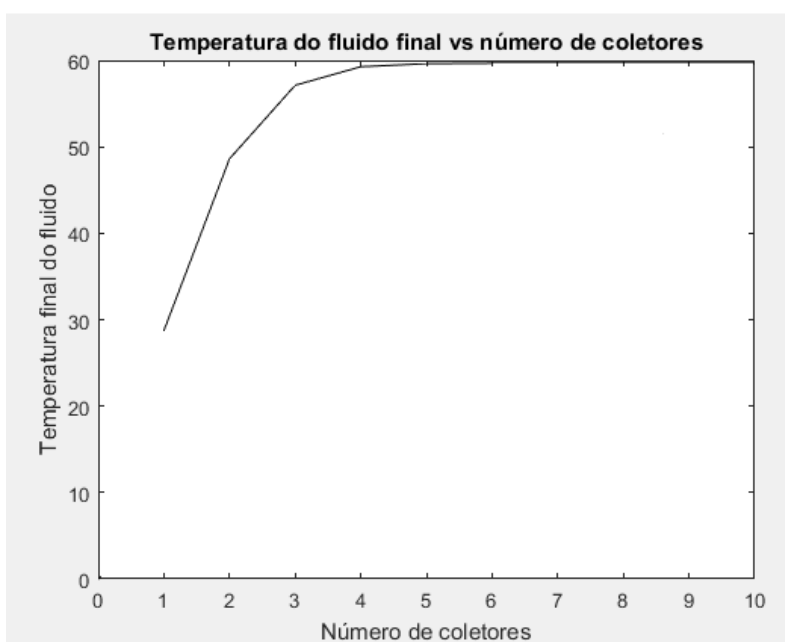


Figura 18 Gráfico temperatura vs número de coletores do caso (FONTE: Autoral)

5.2 INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE COBERTURAS

E se para o caso anterior tivesse sido escolhida a opção de duas coberturas ao invés de uma? Qual seria o impacto sobre os resultados?

```

Digite o valor da latitude local -22
Digite o valor do número de cobertura 2
Faz-se uso de máquina de lavar louças na residência? Digite 1 para Sim e 2 para Não 1
Digite o valor da temperatura ambiente em graus Célcius 10
digite o número de moradores da residência 4
Nº de Coletores = 1, Temperatura da água = 30.4 °C, Out = 2.544416e+07
Fator de eficiência = 0.9093 e Reservatório de 259.2 litros

Nº de Coletores = 2, Temperatura da água = 55.6 °C, Out = 5.281027e+07
Fator de eficiência = 0.9046 e Reservatório de 259.2 litros

Nº de Coletores = 3, Temperatura da água = 69.3 °C, Out = 6.769700e+07
Fator de eficiência = 0.9025 e Reservatório de 259.2 litros

```

Figura 19 Resultados do caso 2

No gráfico da energia total absorvida (Q_u) versus tempo para este caso é possível observar que a quantidade total de energia que o sistema de aquecimento solar consegue absorver no período de um dia é maior do que no caso um, devido à redução nas perdas totais do sistema e consequentemente ele demanda uma menor quantidade de módulos de coletores como visto no resultado acima.

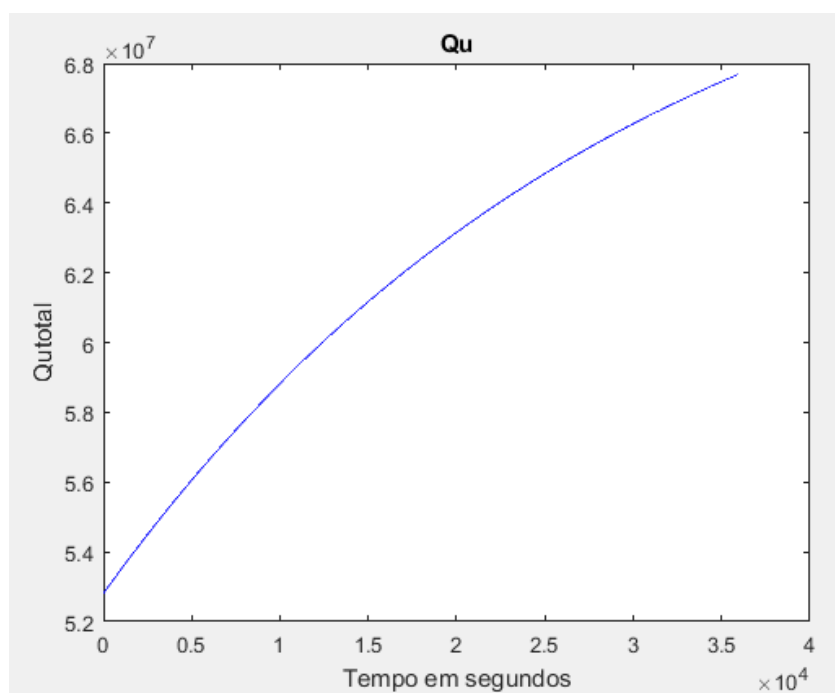


Figura 20 Gráfico Q_u vs Tempo do caso 2 (FONTE: Autoral)

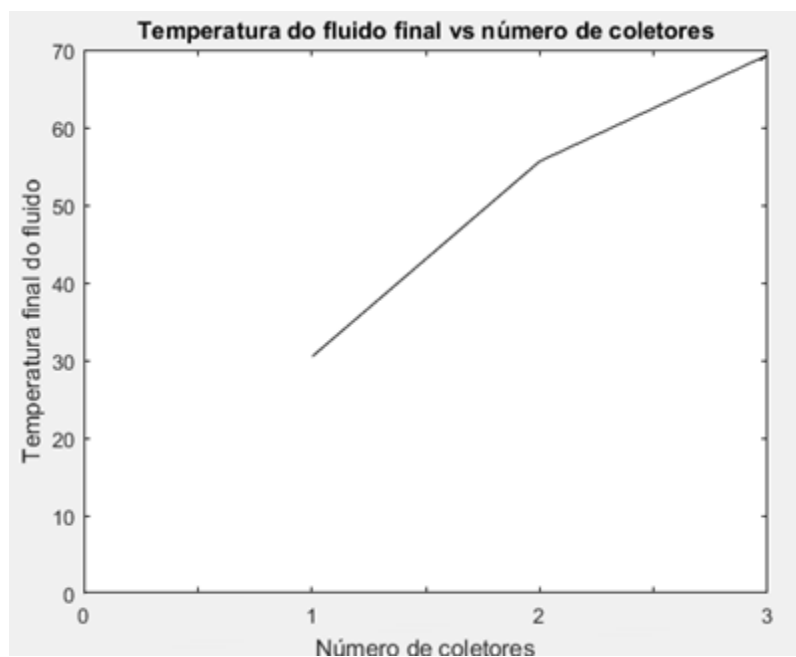


Figura 21 Gráfico temperatura vs número de coletores do caso 2 (FONTE: Autoral)

Vê-se que não só a temperatura máxima atingida é superior, mas que para o mesmo número de coletores, a temperatura máxima para duas coberturas é consideravelmente superior. Isso se dá pela redução das perdas de calor citadas nos tópicos iniciais deste trabalho.

5.3 NÚMERO DE PESSOAS QUE MORAM NA RESIDÊNCIA

Modificando novamente a entrada de dados, ainda para duas coberturas, e se agora a casa comportasse dez moradores, como seriam os novos resultados?

```

Digite o valor da latitude local -22
Digite o valor do número de cobertura 2
Faz-se uso de máquina de lavar louças na residência? Digite 1 para Sim e 2 para Não 1
Digite o valor da temperatura ambiente em graus Célcus 10
digite o número de moradores da residência 10
Nº de Coletores = 1, Temperatura da água = 17.9          Out = 2.831395e+07
Fator de eficiência = 0.9122 e Reservatório de 618.0 litros

Nº de Coletores = 2, Temperatura da água = 34.4°C,      Out = 7.101916e+07
Fator de eficiência = 0.9081 e Reservatório de 618.0 litros

Nº de Coletores = 3, Temperatura da água = 50.3°C,      Out = 1.121748e+08
Fator de eficiência = 0.9053 e Reservatório de 618.0 litros

Nº de Coletores = 4, Temperatura da água = 62.0°C,      Out = 1.424584e+08
Fator de eficiência = 0.9035 e Reservatório de 618.0 litros

```

Figura 22 Resultados do caso 3(FONTE: Autoral)

É notável que a necessidade de aumento na quantidade total de água, devido ao aumento da demanda, faz com que seja necessário um maior número de módulos com duas coberturas para que se atinja o resultado ótimo.

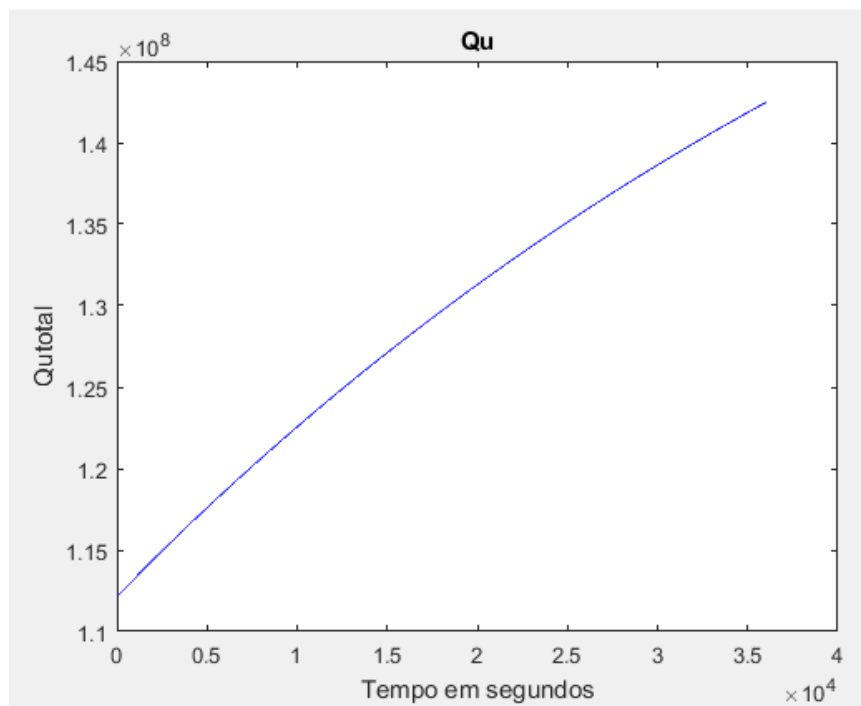


Figura 23 Gráfico Q_u vs Tempo do caso 3 (FONTE: Autoral)

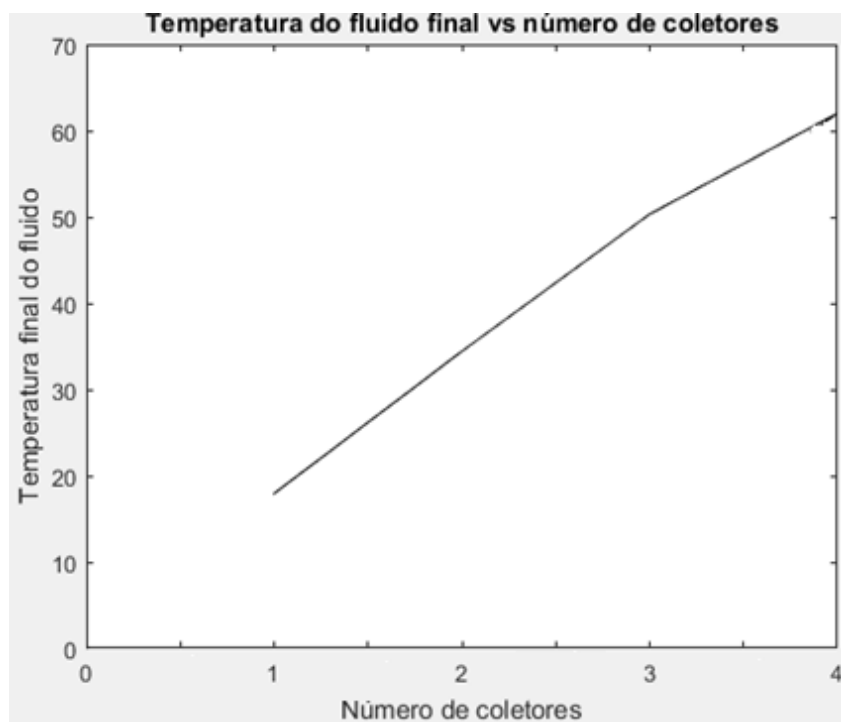


Figura 24 Gráfico temperatura vs número de coletores do caso 3 (FONTE: Autoral)

5.4 MUDANÇA NA TEMPERATURA AMBIENTE

De forma análoga às seções anteriores, será mostrado à seguir o impacto da mudança na temperatura ambiente utilizando os dados anteriores. Primeiramente para uma temperatura baixa (4°C) e posteriormente para uma temperatura de 30°C.

Para $T_a = 4^\circ\text{C}$:

```

Digite o valor da latitude local -22
Digite o valor do número de cobertura 2
Faz-se uso de máquina de lavar louças na residência? Digite 1 para Sim e 2 para Não 1
Digite o valor da temperatura ambiente em graus Célcius 4
digite o número de moradores da residência 10
Nº de Coletores = 1, Temperatura da água = 11.0 °C, Out = 2.855595e+07
Fator de eficiência = 0.9134 e Reservatório de 677.1 litros

Nº de Coletores = 2, Temperatura da água = 26.6 °C, Out = 7.266369e+07
Fator de eficiência = 0.9095 e Reservatório de 677.1 litros

Nº de Coletores = 3, Temperatura da água = 42.2 °C, Out = 1.169002e+08
Fator de eficiência = 0.9066 e Reservatório de 677.1 litros

Nº de Coletores = 4, Temperatura da água = 54.3 °C, Out = 1.512819e+08
Fator de eficiência = 0.9048 e Reservatório de 677.1 litros

Nº de Coletores = 5, Temperatura da água = 62.1 °C, Out = 1.733913e+08
Fator de eficiência = 0.9037 e Reservatório de 677.1 litros

```

Figura 25 Resultados do caso 4 (FONTE: Autoral)

Fica visível a necessidade de um maior número de coletores para atingir o ponto ótimo. Isso está relacionado não só à temperatura ambiente, mas também à outros fatores citados em seções anteriores, como a temperatura de entrada da água, perda de calor para o ambiente e etc.

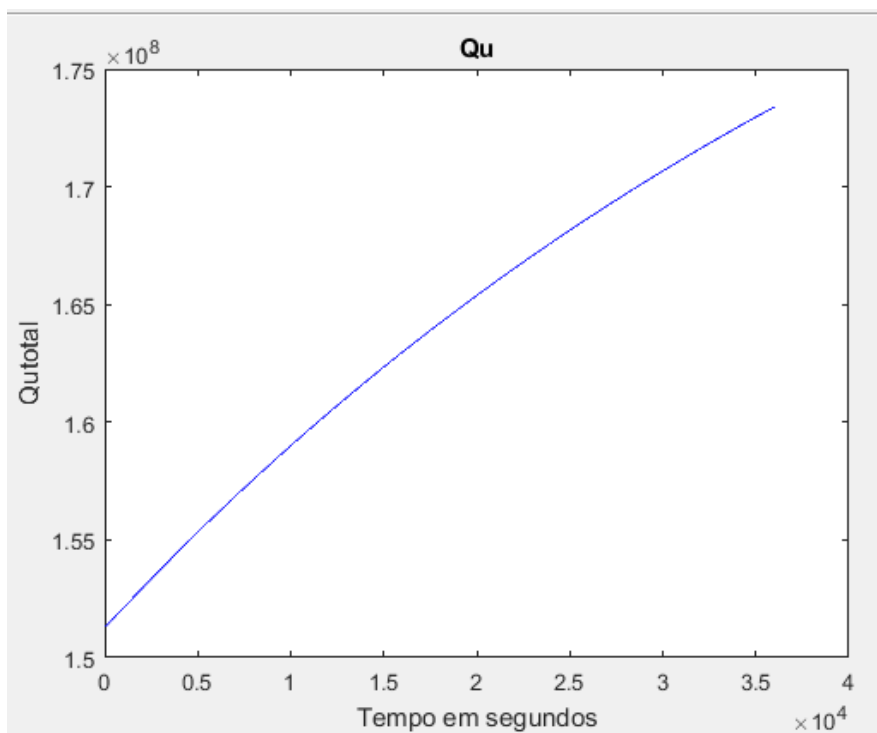


Figura 26 Gráfico Q_u vs Tempo do caso 4 (FONTE: Autoral)

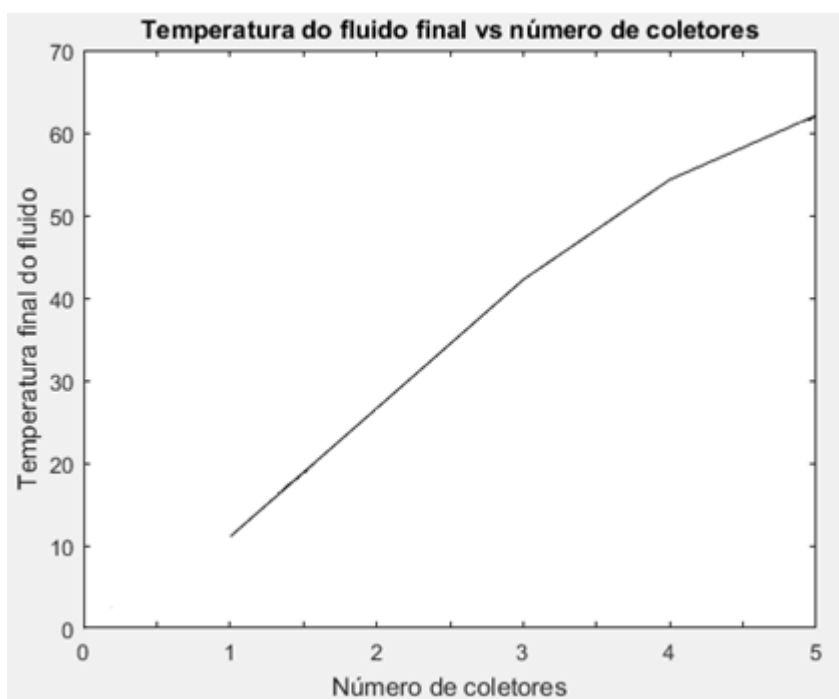


Figura 27 Gráfico temperatura vs número de coletores do caso 4 (FONTE: Autoral)

Para $T_a = 27^\circ\text{C}$:

```

Digite o valor da latitude local -22
Digite o valor do número de cobertura 2
Faz-se uso de máquina de lavar louças na residência? Digite 1 para Sim e 2 para Não 1
Digite o valor da temperatura ambiente em graus Célcius 27
digite o número de moradores da residência 10
Nº de Coletores = 1, Temperatura da água = 42.8 °C,      Qut = 2.630243e+07
Fator de eficiência = 0.9072 e Reservatório de 333.6 litros

Nº de Coletores = 2, Temperatura da água = 65.5 °C,      Qut = 5.803416e+07
Fator de eficiência = 0.9024 e Reservatório de 333.6 litros

```

Figura 28 Resultados do caso 5 (FONTE: Autoral)

Os resultados se distanciam como deveriam. Para uma temperatura ambiente elevada temos também uma elevada temperatura de entrada da água e uma menor necessidade de módulos no projeto do coletor.

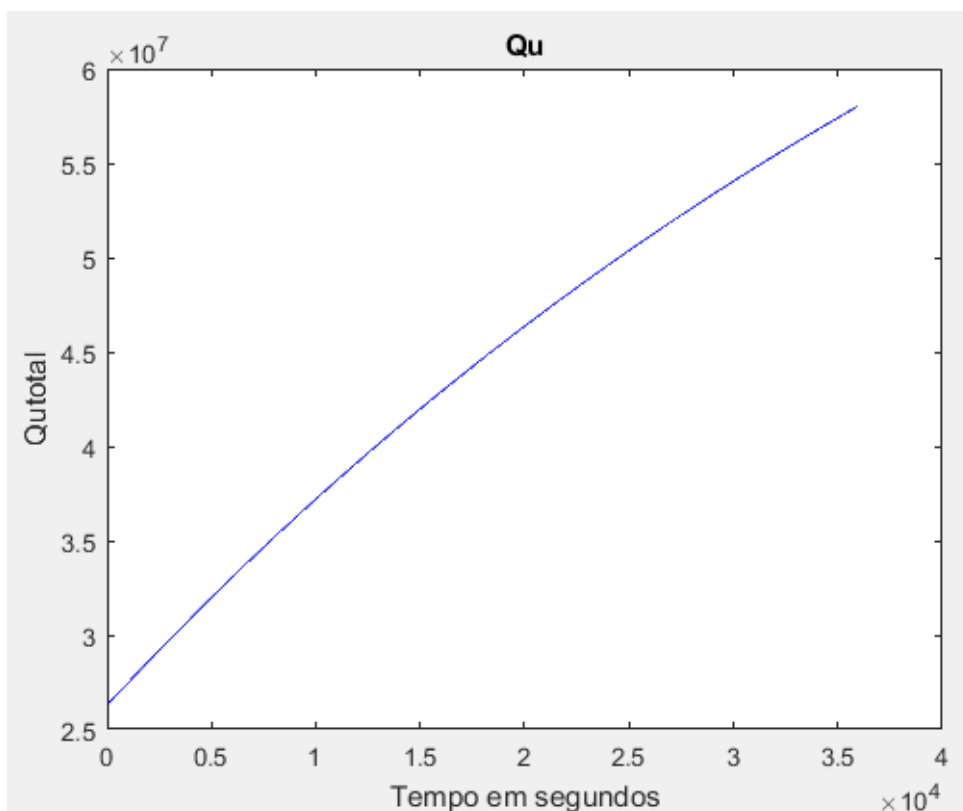


Figura 29 Grafico Q_u vs Tempo do caso 5 (FONTE: Autoral)

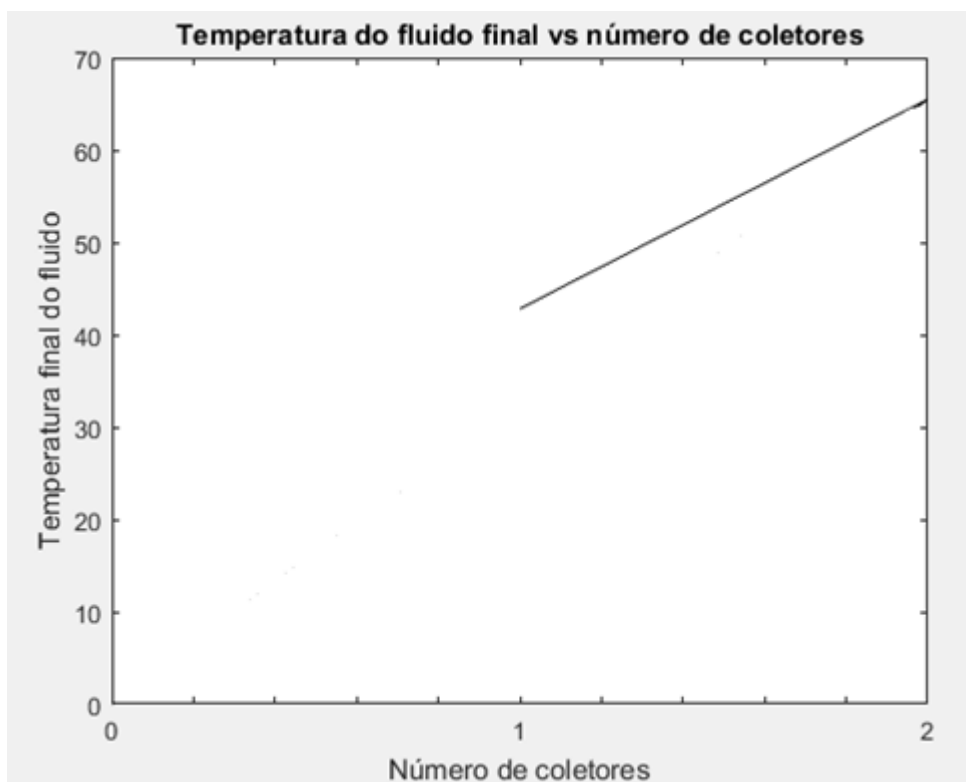


Figura 30 Gráfico temperatura vs número de coletores do caso 4 (FONTE: Autoral)

6 CONCLUSÃO

Após intensas pesquisas e estudos, pode-se notar antes de mais nada que o sol é uma enorme fonte de energia disponível na grande maioria do território brasileiro, sendo no entanto, os métodos para se utilizar esta energia de maneira viável um pouco complexa.

A utilização do programa Octave para programar um algoritmo com a finalidade de se dimensionar o coletor solar, a quantidade de coletores e o volume do tanque necessário para cada tipo de demanda diferente se mostrou uma forma muito útil e confortável para se alcançar os resultados esperados, tornando assim o processo de dimensionamento de um sistema de aquecimento solar mais fácil e acessível.

Com o intuito de testar o algoritmo programado de acordo com as teorias propostas no presente artigo, criou-se uma série de casos teóricos diferentes, e utilizou-se o programa para dimensionar os sistemas de aquecimento solar adequados para cada situação, e como foi visto, é notável que o programa foi capaz de responder adequadamente a cada um dos casos criados. É importante lembrar que os coletores possuem uma série de variáveis independentes como diâmetro de tubulação, espaçamento entre coberturas, espessura de chapa entre outras que foram pré-determinadas para nossos cálculos, porém as mesmas podem ser mudadas de acordo com cada projeto para melhor desempenho dos coletores, ressalvando-se de que quanto maior a eficiência de um coletor maior será o seu custo, o que pode torna coletores com grande grau de eficiência inviável para certos propósitos.

Como parâmetro de comparação de nossos resultados, comparou-se os sistemas de aquecimento solar sugerido por nosso programa e o sugerido pela empresa Heliotek, o qual possui um site com finalidade de dimensionar o número de coletores e o volume do tanque de armazenamento, e em todos os casos os resultados foram bem próximos.

Logo pode-se concluir por fim, que os parâmetros utilizados no presente trabalho respeitam as normas básicas para projeto de coletores solares, sendo até aceitável a utilização do mesmo para projetos reais de sistemas de aquecimento solar, os quais apresentaram um bom grau de eficiência.

REFÊRENCIAS

DUFFIE, John; BECKMAN, Willian. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4. Ed.

Klein, S. A., Solar Energy, 17, 79 (1975). **Calculation of Flat-Plate Loss Coefficients**.

Klein, S. A., **Personal Communication** (1979).

Klein, S. A., J. A. Duffie, and W. A. Beckman, Trans. ASME J. Eng. Power, 96A, 109 (1974). **Transient Considerations of Flat-Plate Solar Collectors**.

Hottel, H. C. and B. B. Woertz, Trans. ASME, 64, 91 (1942). **Performance of Flat-Plate Solar-Heat Collectors**.

Tabor, H., Bull. Res. Council Israel, 6C, 155 (1958). **Radiation, Convection and Conduction Coefficients in Solar Collectors**.

PEREIRA, Enio Bueno; MARTINS, Fernando Ramos; ABREU, Samuel Luna; RUTHER, Ricardo. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 1. Ed. São Jose dos Campos: INPE, 2006.

MORAN, Michael; SHAPIRO, Howard. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 5. Ed.

Escobar, Ana. Tomar um banho por dia, durante 5 minutos e com agua morna é o ideal – Consumo de agua e temperatura de um banho. Disponível em: <<http://g1.globo.com/bemestar/noticia/2011/11/tomar-um-banho-por-dia-durante-5-minutos-e-com-agua-morna-e-o-ideal.html>> Acesso em 07/06/2016

Norma Brasileira aprovada pela Associação Brasileira de Norma Técnicas 15569 (ABNT NBR 15569). 1Ed.

HELIOTEK, Bosh Group. Site de comparação de resultados do nosso programa com o da empresa Heliotek. Disponível em: <<http://www.heliotek.com.br/Dimensione/default.aspx>> Acesso em 12/06/2016.

