

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL - UCS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA REGIÃO DOS VINHEDOS - CARVI
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANDERSON FERNANDO RESTELATO

**ANÁLISE DO IMPACTO DA ANGULAÇÃO EM UM SISTEMA DE COLETORES
SOLARES DE TUBO A VÁCUO**

BENTO GONÇALVES

2020

ANDERSON FERNANDO RESTELATO

**ANÁLISE DO IMPACTO DA ANGULAÇÃO EM UM SISTEMA DE COLETORES
SOLARES DE TUBO A VÁCUO**

Trabalho apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à aprovação da disciplina MEC0291 – Trabalho de Conclusão de Curso II a qual é obrigatória na grade curricular GRA000660H – Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Me. Tiago Cassol Severo

BENTO GONÇALVES

2020

ANDERSON FERNANDO RESTELATO

**ANÁLISE DO IMPACTO DA ANGULAÇÃO EM UM SISTEMA DE COLETORES
SOLARES DE TUBO A VÁCUO**

Trabalho apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à aprovação da disciplina MEC0291 – Trabalho de Conclusão de Curso II a qual é obrigatória na grade curricular GRA000660H – Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Me. Tiago Cassol Severo

Banca Examinadora

Prof. Me. Tiago Cassol Severo
Orientador / Universidade de Caxias do Sul

Prof. Me. André Carlos Contini
Professor convidado / Universidade de Caxias do Sul

Prof. Me. Jean Greselle Balotin
Professor convidado / Universidade de Caxias do Sul

AGRADECIMENTOS

A Deus por esta conquista, sem Ele não somos nada, e ao longo desta caminhada que se encerra a dedicação e a fé foram fundamentais para tudo dar certo.

Aos meus pais Juceli e Deonir pelo apoio incondicional diariamente, sempre procurando oferecer o melhor independentemente da situação.

Aos meus colegas e amigos que me incentivaram em todos os momentos, os quais sou grato pelas ajudas e por entender as minhas ausências.

A Universidade de Caxias do Sul pela oportunidade de realização do curso de Engenharia Mecânica.

A todos os professores que acabei conhecendo durante a graduação, pelos seus ensinamentos e conselhos prestados. Em especial ao professor Tiago Cassol Severo, responsável pela orientação deste trabalho por sua atenção e suporte.

A Fernanda Tavares Vasconcelos de Oliveira, a qual sempre esteve disponível para o que fosse necessário, mesmo estando do outro lado do mundo.

A todos, meus sinceros agradecimentos.

*“ Há uma força motriz mais poderosa que o vapor,
a eletricidade e a energia atômica: a vontade. ”*

Albert Einstein

RESUMO

Os sistemas solares de aquecimento de água são uma forma de produção de energia limpa e renovável. A utilização deste tipo de sistema traz benefícios a quem os utiliza, devido a economia no uso de outras fontes de energia, além de contribuir positivamente com o meio ambiente. Os coletores solares são responsáveis pela conversão da radiação solar em energia térmica e podem ser confeccionados em diferentes tipos. Neste trabalho é realizada uma análise com um sistema de aquecimento de água composta a partir da tecnologia de tubo a vácuo, o qual tem uma alta absorvidade da radiação solar e um significativo isolamento térmico, resultando assim em uma satisfatória eficiência do sistema. O objetivo é observar o impacto da angulação sobre o sistema e obter o ângulo que resulte a maior conversão de energia solar em aquecimento de água. Partindo deste princípio, foi desenvolvido um algoritmo responsável por fazer as simulações numéricas através do software Matlab, o qual mostra o comportamento da radiação solar total em função do ângulo de inclinação em todos os meses do ano para a cidade de Bento Gonçalves. Os ângulos de inclinações foram os de aproveitamento máximo do sistema, o ângulo de 22° foi o que obteve a maior média anual de radiação total e os ângulos de maior aproveitamento na divisão entre verão e inverno para a região em análise foram os de 5° e 45° respectivamente.

Palavras-chave: radiação solar, tubo a vácuo, simulações numéricas, ângulo de inclinação.

ABSTRACT

The Solar water heating systems are a way of producing clean and renewable energy. The use of this kind of system brings benefits to whom uses it, due to the savings in the usage of other energy source, in addition to, contributing positively to the environment. Solar collectors are responsible for converting solar radiation into thermal energy and can be made of different types. In this report, an analysis is carried out with a water heating system, composed of a vacuum tube technology, which has a high absorbance of solar radiation and significant thermal insulation, resulting in a satisfactory system efficiency. The objective is to observe the impact of the angulations on the system and obtain the angle that results in the greatest conversion of solar energy to water heating. Based on this principle, an algorithm responsible for performing numerical simulations using the Matlab software was developed, which shows the conduct of the total solar radiation regarding the angle inclination in all months of the year for the city of Bento Gonçalves. The angles inclination were the greatest utilization of the system, the angle of 22° was the one that obtained the highest annual average of total radiation, and the angles with the greatest utilization between summer and winter, for the region analyzed, were the 5° and 45° respectively.

Keywords: solar radiation, vacuum tube, numerical simulations, angle inclination.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ângulos da instalação de coletores.....	16
Figura 2 - Sistema convencional de aquecimento de água.....	19
Figura 3 - Coletores solares abertos	20
Figura 4 - Coletores solares fechados.....	21
Figura 5 - Reservatório térmico	21
Figura 6 - Sistemas acoplados	23
Figura 7 - Coletor solar de tubos de vidro a vácuo.....	23
Figura 8 - Componentes de um tubo de vidro a vácuo.....	24
Figura 9 - Diversas configurações dos tubos a vácuo.....	24
Figura 10 - Distribuição da radiação solar incidente transiente no tubo a vácuo.....	27
Figura 11 - Perfil de velocidade na saída do tubo para o reservatório: (a) para inclinação de 45° e irradiância de 800, 500 e 300 W/m ² ; (b) para irradiância de 500 W/m ² e inclinação de 45° e 30°	29
Figura 12 - Economia estimada com implementação dos sistemas de aquecimento solar	31
Figura 13 - Fluxograma das atividades	32
Figura 14 - Média mensal da radiação total diária em função do ângulo de inclinação de janeiro a junho.....	35
Figura 15 - Média mensal da radiação total diária em função do ângulo de inclinação de julho a dezembro.....	36
Figura 16 - Inclinação de telhados	38
Figura 17 - Comparação entre as radiações máximas e as radiações com 14°.....	39
Figura 18 - Comparação entre as radiações máximas e as radiações com 17°.....	40
Figura 19 - Comparação entre as radiações máximas e as radiações com 20°.....	41
Figura 20 - Comparação entre as radiações máximas e as radiações com 22°.....	42
Figura 21 - Comparação entre as radiações máximas e as radiações com 25°.....	43
Figura 22 - Média mensal da radiação total diária em função do ângulo de inclinação nos meses de primavera e verão	44
Figura 23 - Média mensal da radiação total diária em função do ângulo de inclinação nos meses de outono e inverno	45
Figura 24 - Comparação entre as radiações máximas e as radiações com 5° e 45°	46
Figura 25 - Comparação entre as radiações máximas e as radiações com 45°.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Radiação máxima mensal e o seu ângulo de inclinação.....	37
Tabela 2 - Radiação mensal com inclinação de 14°.....	38
Tabela 3 - Radiação mensal com inclinação de 17°.....	39
Tabela 4 - Radiação mensal com inclinação de 20°.....	40
Tabela 5 - Radiação mensal com inclinação de 22°.....	41
Tabela 6 - Radiação mensal com inclinação de 25°.....	42
Tabela 7 - Média anual de radiação total das inclinações correspondentes	43
Tabela 8 - Radiação mesal com inclinação de 5° e 45°	46
Tabela 9 - Radiação mensal com inclinação de 45°.....	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 TEMA.....	13
1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	13
2 OBJETIVOS DO TRABALHO	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1 ENERGIA SOLAR TÉRMICA.....	15
3.2 FLUXO DE CÁLCULO	16
3.3 SISTEMAS SOLARES PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA.....	18
3.3.1 Coletor solar de tubos evacuados	23
3.4 ESTADO DA ARTE.....	26
3.4.1 Análise transiente do processo de aquecimento em tubos a vácuo	26
3.4.2 Avaliação experimental da vazão mássica em um coletor solar de tubos evacuados	27
3.4.3 Avaliação numérica da convecção natural em coletor solar de tubo evacuado	28
3.4.4 Otimização do ângulo de inclinação e orientação de painéis solares para a cidade de Petrolina	29
3.4.5 Análise econômica comparativa entre aquecedores solares de baixo custo e aquecedores com tubos de vidro evacuados	30
4 METODOLOGIA	32
4.1 LINHA DE PROGRAMAÇÃO.....	32
4.2 SIMULAÇÕES MENSAIS PARA A REGIÃO EM ANÁLISE	33

4.3 COMPARAÇÕES DE RADIAÇÕES.....	33
4.4 DIVISÃO NAS ESTACÕES DO ANO.....	33
4.5 SOLUÇÕES PARA O INVERNO	34
5 RESULTADOS E ANÁLISES	35
6 CONCLUSÕES.....	49
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
APÊNDICE A – LINHA DE PROGRAMAÇÃO NO SOFTWARE MATLAB	54
APÊNDICE B – ESCOLHA DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO PARA PRIMAVERA E VERÃO E PARA OUTONO E INVERNO.....	55
ANEXO A – TABELA DA REFLETÂNCIA DOS MATERIAIS.....	56
ANEXO B – TABELA DO DIA MÉDIO DE CADA MÊS E SUA DECLINAÇÃO.....	57
ANEXO C – MÉDIA MENSAL DA RADIAÇÃO GLOBAL DIÁRIA EM UMA SUPERFÍCIE HORIZONTAL PARA A CIDADE DE BENTO GONÇALVES	58
ANEXO D – MÉDIA MENSAL DA RADIAÇÃO DIFUSA DIÁRIA EM UMA SUPERFÍCIE HORIZONTAL PARA A CIDADE DE BENTO GONÇALVES	59

1 INTRODUÇÃO

O Brasil tem uma posição privilegiada dentre outros países devido a sua extensão com significativos índices de radiação solar. A matriz energética brasileira é predominantemente renovável, onde a principal fonte são as usinas hidrelétricas junto ao uso de outras energias como biomassa, eólica e solar.

Diante do aquecimento global, a energia solar ganha maior atenção sendo uma das energias renováveis a ser empregada em grande escala para substituir alguns tipos de energias poluentes (POZZEBON, 2009).

Com a busca do máximo aproveitamento desta fonte de energia, algumas técnicas para conversão da energia solar em uma energia utilizável foram criadas, como a conversão em energia elétrica e térmica.

Em relação ao aquecimento, o método mais utilizado é o de coletores solares térmicos. Os mesmos, tem como seu funcionamento sistemas de absorção da radiação solar transformando-a em energia térmica e direcionam esta energia para o aquecimento de um fluido de trabalho, que geralmente é água.

O uso da tecnologia de sistemas de aquecimento baseado em tubos a vácuo faz parte deste método e possui vantagens como: isolamento térmico, temperaturas elevadas, economia, resistência e vida útil.

Este trabalho tem como objetivo principal analisar o impacto da angulação em um sistema de coletores solares a vácuo e obter o ângulo que resulta em um maior aproveitamento deste processo através simulações computacionais.

No primeiro momento é realizada uma linha de programação através do software Matlab, a mesma está no apêndice deste trabalho. Com isso são feitas as simulações, onde são encontrados os valores das radiações solares totais em função do ângulo de inclinação que elas ocorrem, em todos os meses do ano para a cidade de Bento Gonçalves.

Nos resultados, destaque nos ângulos de inclinações da Tabela 1, que foram os de aproveitamento máximo do sistema. O ângulo de 22° foi o que obteve a maior média anual de radiação total, com aproveitamento de 94,91% do sistema, os ângulos de maior aproveitamento na divisão entre verão e inverno para a região em análise foram os de 5° e 45° respectivamente, com 99,06% e somente o ângulo de 45° para enfatizar a parte do inverno da região com um aproveitamento anual de 89,48%.

1.1 TEMA

O presente trabalho tem como principal finalidade ampliar o conhecimento no setor de aproveitamento da energia solar para aquecimento de água baseado na tecnologia do tubo à vácuo mediante a inclinação do sistema frente ao posicionamento solar.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA

A busca por sistemas de energias renováveis é necessária devido a inúmeros fatores que as favorecem, como: inesgotável, economia, geração de empregos, criação de novas tecnologias, desenvolvimento econômico, menor impacto ambiental e futuro.

O território brasileiro apresenta uma irradiância com boa uniformidade e pequena variabilidade anual, sendo assim possível obter uma ótima utilização da energia solar em todo território nacional (PEREIRA, *et al.*, 2006).

É uma das fontes de energia renovável com potencial de desenvolvimento onde os consumidores podem produzir a sua própria energia através de diversos sistemas. A utilização de sistemas com coletores solares de tubos evacuados é procurada pelas vantagens que possui, a sua implementação e a busca pelo uso da sua maior eficiência tem importância, além de não existir muitos trabalhos com este assunto na região em análise.

2 OBJETIVOS DO TRABALHO

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o impacto da angulação em um sistema de coletores solares baseado na tecnologia de tubo a vácuo para a obtenção do ângulo ótimo que promova um maior aproveitamento do sistema, na cidade de Bento Gonçalves, região da serra gaúcha.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

(a) Desenvolver um algoritmo que forneça a radiação total diária em função do ângulo de inclinação para todos os meses do ano no local específico;

(b) Realizar simulações em software matemático para gerar a radiação máxima total em cada mês com o ângulo de inclinação em que ela ocorre.

(c) Encontrar o ângulo de inclinação em um sistema de tubos a vácuo que terá o maior aproveitamento anual de radiação total através de simulações;

(d) Encontrar com as simulações numéricas ângulos de inclinação específicos para as estações do ano que possuam um maior aproveitamento do sistema.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 ENERGIA SOLAR TÉRMICA

O núcleo do Sol é o lugar onde a energia solar tem a sua origem, com reações de fusão nuclear que liberam uma imensa quantidade de energia. Essa energia a qual o Sol emite corresponde ao poder de emissão de um corpo negro com temperatura de 5777 K.

É medida fora da atmosfera da Terra a irradiação solar máxima, devido a interferência por elementos que existem na atmosfera terrestre, nuvens ou poluição.

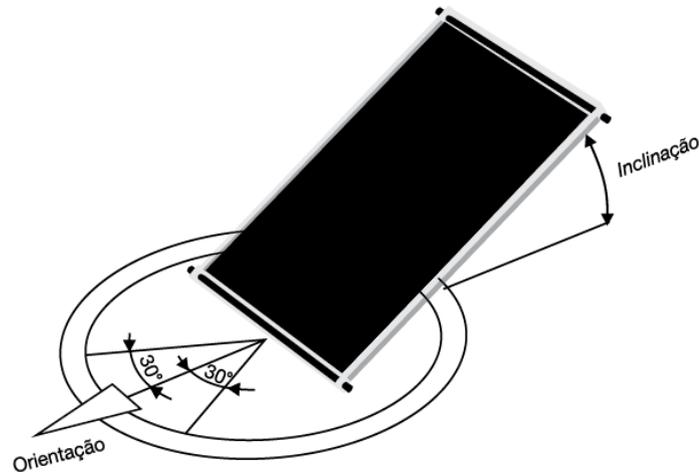
A constante solar é definida como a energia por unidade de tempo emitida pelo Sol e recebida por uma unidade de área de uma superfície perpendicular à direção de propagação da radiação situada fora da atmosfera terrestre e possui um valor de 1367 W/m² (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

A radiação solar sofre modificações na sua intensidade ao atravessar a atmosfera terrestre. A irradiação solar que atinge o topo da atmosfera sofre uma série de atenuações antes de atingir a superfície terrestre. A radiação solar incidente sobre os coletores solares é decomposta em duas componentes. A primeira é radiação solar direta, definida como a fração da irradiação solar que atravessa a atmosfera sem sofrer alteração na sua direção original. A segunda componente corresponde à radiação difusa, ou seja, a componente da irradiação solar que é espalhada e refletida pelos elementos constituintes da atmosfera (SANTOS, 2013).

A radiação incidente na superfície terrestre depende das coordenadas geográficas, latitude, longitude e altura. A radiação solar também varia com as estações do ano e região, por causa dos movimentos de translação e rotação da Terra.

Para um melhor funcionamento dos sistemas solares à escolha do ângulo de inclinação e do ângulo de orientação é de extrema importância. Conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Ângulos da instalação de coletores



FONTE: (SANTOS, 2013).

O ângulo de inclinação é formado entre o plano do coletor e o plano horizontal de referência. A inclinação ideal é onde o sistema tem uma eficiência máxima, onde fatores como latitude local e estações do ano são determinantes. Sua variação é entre 0° e 90° (SANTOS, 2013).

Já o ângulo de orientação é formado entre o eixo norte-sul e a projeção no plano horizontal da reta normal a superfície da placa do coletor. Varia no intervalo de -180° até 180° e a orientação dos coletores no hemisfério sul deve ser feita de forma a direcionar a superfície do coletor para o norte geográfico, onde o rendimento é maior (SANTOS, 2013).

3.2 FLUXO DE CÁLCULO

No fluxo de cálculo são encontradas as equações fundamentais para o desenvolvimento dos resultados, as mesmas são retiradas de livros relacionados com a área de interesse do presente trabalho.

A média mensal da radiação solar total diária \bar{H}_T em uma superfície inclinada é dada pela equação (1).

$$\bar{H}_T = \bar{H}_B + \bar{H}_D + \bar{H}_R \quad (1)$$

Onde \bar{H}_B é a radiação direta, \bar{H}_D é a radiação difusa e \bar{H}_R é a radiação refletida. Estas componentes de radiação podem ser escritas segundo Duffie e Beckman (Duffie e Beckman, 2006). A radiação difusa é representada pela equação (2).

$$\bar{H}_D = \bar{R}_d \bar{H}_d \quad (2)$$

Já a radiação direta é representada pela equação (3).

$$\bar{H}_B = (\bar{H} - \bar{H}_d) \bar{R}_b \quad (3)$$

Onde \bar{H} e \bar{H}_d são a média mensal da radiação global e difusa diária em uma superfície horizontal, e \bar{R}_b e \bar{R}_d são as razões entre a radiação diária média mensal direta e difusa em uma superfície inclinada em relação a uma superfície horizontal, respectivamente.

Para uma superfície inclinada localizada no hemisfério sul e voltada para o Equador, \bar{R}_b é dada pela equação (4).

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos \delta \operatorname{sen} \omega'_s + (\pi/180) \omega'_s \operatorname{sen}(\phi + \beta) \operatorname{sen} \delta}{\cos \phi \cos \delta \operatorname{sen} \omega_s + (\pi/180) \omega_s \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta} \quad (4)$$

Onde β é o ângulo de inclinação, ϕ é a latitude, δ é a declinação, ω_s é a hora angular do pôr do sol, dada pela equação (5).

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (5)$$

O ω'_s é a hora angular do pôr do sol para uma superfície inclinada, representada pela equação (6).

$$\omega'_s = \min \left\{ \begin{array}{l} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \\ \cos^{-1}(-\tan(\phi + \beta) \tan \delta) \end{array} \right. \quad (6)$$

Onde o “min” significa usar o menor dos dois termos entre parênteses. A declinação é dada pela equação (7). Onde n é o dia médio de cada mês (Kalogirou, 2009).

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (7)$$

Para saber o valor de \bar{R}_d é usado o método de Liu e Jordan (Liu e Jordan, 1961) devido a sua simplicidade e por estimar satisfatoriamente a radiação solar total em superfícies voltadas para o norte. Portanto, o fator \bar{R}_d é representado na equação (8).

$$\bar{R}_d = \frac{[1 + \cos \beta]}{2} \quad (8)$$

A radiação refletida na superfície inclinada é dada pela equação (9). Onde ρ é a refletância difusa da radiação solar total para os arredores.

$$\bar{H}_R = \bar{H} \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (9)$$

Então, a radiação total em uma superfície inclinada de acordo com o modelo de Liu e Jordan é representada na equação (10).

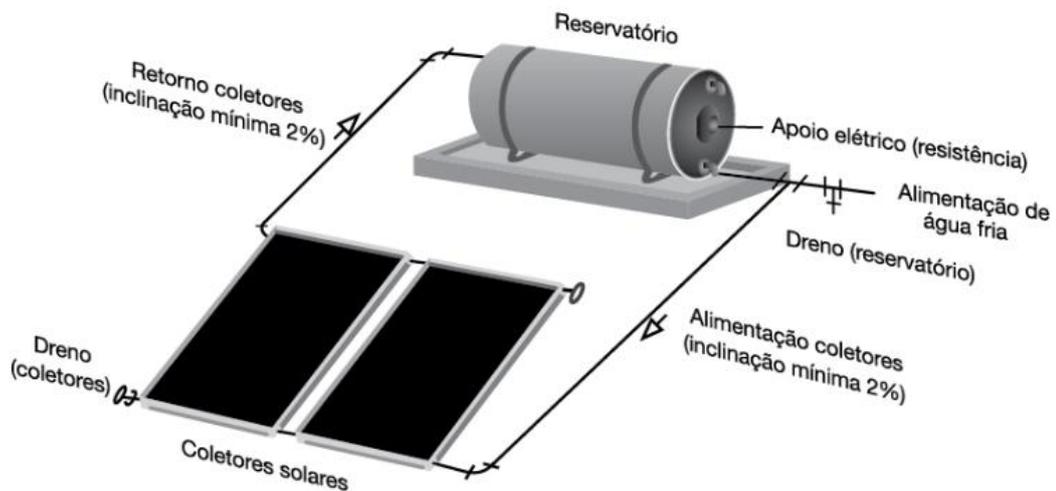
$$\bar{H}_T = (\bar{H} - \bar{H}_d) \bar{R}_b + \bar{H}_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \bar{H} \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (10)$$

Através desta equação, a radiação solar total em relação ao ângulo de inclinação pode ser calculada através dos valores de radiações diárias global e difusa.

3.3 SISTEMAS SOLARES PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA

O sistema de aquecimento solar de água é dividido em três partes: captação da energia solar, armazenamento da água aquecida e o consumo desta água, apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Sistema convencional de aquecimento de água



FONTE: (SANTOS, 2013).

A captação é composta pelos coletores solares e as tubulações que ligam os coletores com o reservatório. Em instalações maiores, é usado uma bomba hidráulica para fazer a circulação do fluido de trabalho, geralmente é água.

Já o armazenamento tem como componente importante o reservatório térmico, responsável por acumular a água quente, a qual é usada na hora que precisar. Existem também os sistemas auxiliares que ajudam no fornecimento de energia em períodos de chuva, baixa insolação ou aumento da demanda. Normalmente são usados eletricidade ou gás como auxiliares.

Além dos itens anteriores, tem o consumo que consiste na distribuição da água aquecida entre o reservatório térmico e o ponto de consumo. Chamado também de circuito secundário.

O responsável pelo aquecimento do fluido de trabalho é o coletor, pela conversão da radiação solar em energia térmica, este fluido normalmente é água mas pode ser também ar ou outro fluido térmico e a escolha do tipo de coletor vai depender da temperatura de operação exigida. Podem ser divididos em abertos ou fechados.

Os coletores abertos, conforme a Figura 3, são adequados para o aquecimento na faixa de 26 a 30°C. É chamado aberto por não possuir cobertura transparente ou isolamento térmico. Em baixas temperaturas possuem um bom rendimento, mas à medida que a temperatura aumenta o rendimento cai. Alguns modelos de coletores abertos abaixo.

Figura 3 - Coletores solares abertos



FONTE: (SANTOS, 2013).

Já os coletores solares fechados possuem alguns componentes denominados como principais, entre eles estão:

- Caixa externa: sua função é de suporte do sistema, geralmente de alumínio, chapa dobrada ou algum plástico resistente.

- Isolamento térmico: seu objetivo é reduzir a perda de calor para o meio, normalmente de lã de vidro ou de rocha e a espuma de poliuretano.

- Tubos (calha superior e inferior): são interconectados para que o fluido escoar no interior do coletor, pela necessidade de alta condutividade térmica e resistência a corrosão o material usado é o cobre.

- Aletas (placa absorvedora): função de absorver e transferir a energia solar para o fluido de trabalho, são feitas de cobre ou alumínio e para aumentar a absorção da energia solar são pintadas de preto fosco.

- Cobertura transparente: tem a função de facilitar a passagem da radiação solar e diminuir as perdas por convecção e radiação para o meio ambiente, produzidas de vidro, policarbonato ou acrílico.

- Vedação: com a função de manter os coletores isolados da umidade externa.

Os coletores fechados, apresentados na Figura 4, atingem temperaturas na faixa de 70 a 80°C. A seguir alguns modelos de coletores fechados.

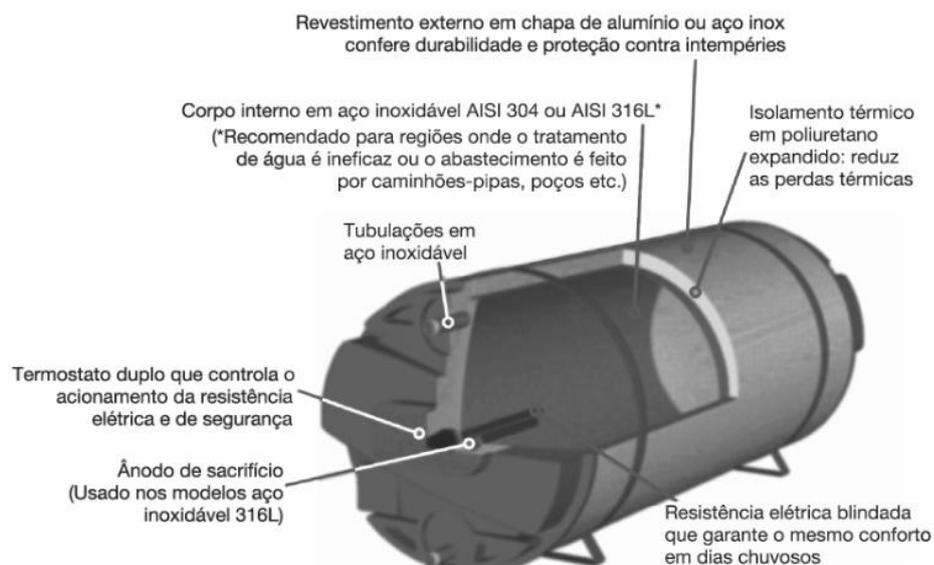
Figura 4 - Coletores solares fechados



FONTE: (SANTOS, 2013).

As diversas variações da radiação solar, as vezes em um mesmo dia, com períodos de chuva, nublado, ensolarado, interfere na produção de água quente pelos coletores solares e o seu uso. Assim, o uso dos reservatórios térmicos se faz indispensável para que se possa fazer a adequação entre a produção e o uso da água quente. A Figura 5 mostra um reservatório térmico com seus componentes.

Figura 5 - Reservatório térmico



FONTE: (SANTOS, 2013).

Em um reservatório térmico, os principais componentes são:

- Corpo interno: seu contato é diretamente com a água e, portanto, deve ser fabricado de materiais resistentes a corrosão, por exemplo, aço inoxidável ou cobre.
- Isolante térmico: é colocado sobre o corpo interno com o objetivo de reduzir as perdas de calor, normalmente de lã de vidro ou a espuma de poliuretano.
- Proteção externa: função de proteção do isolante térmico, geralmente de alumínio, aço galvanizado ou carbono pintado.
- Sistema auxiliar de aquecimento: usado em períodos de pouca insolação ou quando o consumo aumenta para completar o aquecimento solar. O sistema auxiliar elétrico pode ser acionado automaticamente com o uso de um termostato ou até mesmo manualmente, possui uma ou mais resistências dentro do reservatório em contato direto com a água que está armazenada.

Já nos sistemas de circulação forçada ou bombeada, a circulação da água entre os coletores e o reservatório é realizada com uma motobomba. É usado em sistemas de médio e grande porte ou quando o sistema de funcionamento do termossifão não consegue atender.

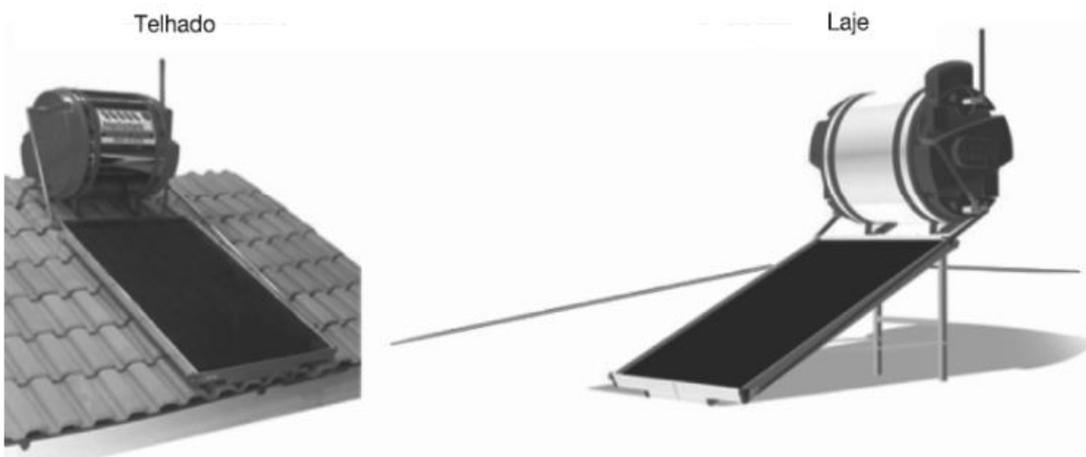
O aquecimento solar por circulação forçada além da motobomba, possui também controlador diferencial de temperatura e o quadro de comando. O controlador tem a função de comandar a motobomba, ela é acionada quando o controlador registra uma diferença preestabelecida entre os sensores de saída do reservatório e saída dos coletores, e é desligada quando essa diferença de temperatura atinge um valor estabelecido.

No caso dos sistemas de termossifão, não precisa de motobomba pois a circulação da água acontece de forma natural. O funcionamento do sistema de termossifão é dada pela mudança de densidade da água. Quando a temperatura da água aumenta a sua densidade diminui. Assim, a água quente fica na parte de cima de cima do reservatório, pois sua densidade é menor que a da água fria. À medida que a água quente é usada o sistema é alimentado com água fria e o ciclo continua até que exista radiação solar incidente nos coletores.

Os sistemas acoplados mostram separação física entre o reservatório e o coletor, mesmo assim ficam bem próximos. Suas vantagens são os custos de instalação e a redução de erros, porém, com a sua grande área de exposição e o desnível entre o reservatório e o coletor diminuem a sua eficiência térmica, com isso

no período da noite causa grandes perdas. É uma opção indicada onde a demanda seja menos de 200 litros de água aquecida por dia. A Figura 6 mostra dois exemplos de sistemas acoplados.

Figura 6 - Sistemas acoplados



FONTE: (SANTOS, 2013).

3.3.1 Coletor solar de tubos evacuados

Os tubos de vidro evacuados são os responsáveis por receber a radiação solar e a transformar em energia térmica. Além dos tubos de vidro a vácuo, o sistema possui também o cabeçote (de passagem ou acoplado), o qual interliga os tubos e onde circula o fluido de trabalho. Estas partes são demonstradas na Figura 7.

Figura 7 - Coletor solar de tubos de vidro a vácuo



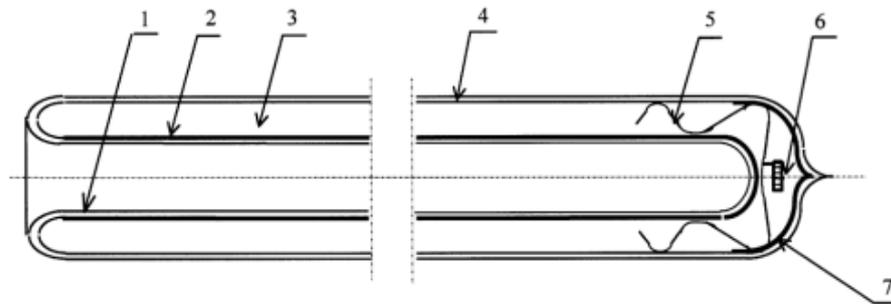
FONTE: (ROSA, 2012).

O tubo evacuado basicamente consiste em 2 cilindros de vidro que estão concêntricos entre si. Entre eles há uma camada de vácuo, que proporciona níveis insignificantes de perdas térmicas por condução e convecção. A superfície do menor cilindro está recoberta por uma camada de material seletivo, que proporciona alta absorvidade da irradiação solar e baixa emissividade. No interior do menor cilindro há uma pequena área livre cuja função é receber a energia térmica proveniente do tubo evacuado, transmitindo-a a um sistema de aletas ou diretamente ao fluido de trabalho (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

Os coletores com tubos evacuados têm uma eficiência maior do que os coletores planos quando se trata de alta temperatura, podendo também trabalhar em baixas temperaturas.

A Figura 8 apresenta os componentes de um tubo de vidro a vácuo. As numerações significam: (1) tubo de vidro interno; (2) superfície de material seletivo; (3) espaço evacuado; (4) tubo de vidro externo; (5) grampo; (6) capturador; (7) camada capturadora.

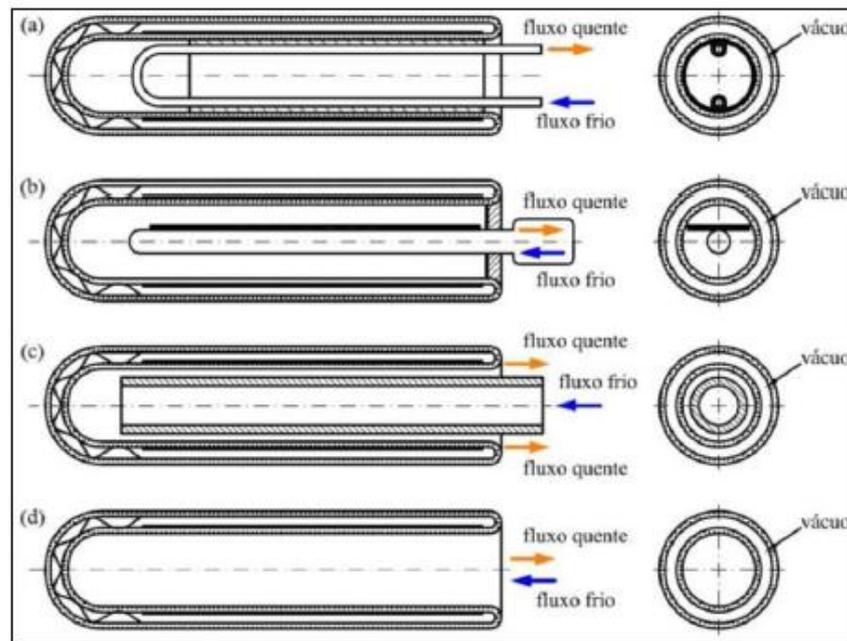
Figura 8 - Componentes de um tubo de vidro a vácuo



FONTE: (ZHIQIANG, 2005).

A extração do calor que os tubos a vácuo produzem pode ser feita de várias maneiras, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Diversas configurações dos tubos a vácuo



FONTE: (SOUZA, 2013).

A configuração (a) é chamada de “tubo em U”. A água percorre o caminho indicado pelas setas de fluxo frio e fluxo quente. O tubo evacuado permanece seco em seu interior, sendo o calor transferido ao tubo através de uma aleta que posteriormente transfere esta energia ao fluido de trabalho. Neste modelo precisa utilizar a circulação forçada através do bombeamento mecânico (SOUZA, 2013).

A configuração (b) é conhecido como tubo de calor, e é composto por aleta e tubo metálico que contem em seu interior um fluido de baixa capacidade térmica, desta forma quando o fluido recebe o calor ele evapora e movimenta-se para a parte mais elevada, efetuando assim a troca de calor com a água presente em um cabeçote. Ao término o vapor condensa, retornando assim ao fundo do tubo. Este ciclo é mantido enquanto haja irradiação solar e precisa da circulação forçada de água (MANEA, 2012).

No formato (c), tubo concêntrico, a água absorve calor diretamente da parte interna do tubo evacuado. O tubo metálico, concêntrico ao tubo evacuado, é utilizado para conduzir a entrada da água ao fundo do tubo, fazendo com que absorva calor enquanto retorna para a saída, que é o espaço remanescente entre o tubo metálico e o tubo evacuado. Como as duas primeiras configurações, faz o uso de circulação forçada (SOUZA, 2013).

O formato (d), chamado de tubo livre, é acoplado diretamente ao reservatório térmico e a circulação de água se dá através de um princípio chamado de termossifão, onde a circulação acontece de maneira natural, por causa da diferença de densidades entre a água quente e a água fria (SOUZA, 2013).

Os tubos a vácuo são feitos de vidro, portanto, são frágeis e o cuidado é necessário na hora da sua instalação e em casos de mal tempo, granizo por exemplo, que podem quebrar facilmente.

3.4 ESTADO DA ARTE

Este capítulo é relacionado a trabalhos já realizados, onde cada subtítulo são resumos de artigos desenvolvidos na mesma área por outros autores, os quais contribuem ainda mais para a compreensão e aperfeiçoamento do assunto estudado.

3.4.1 Análise transiente do processo de aquecimento em tubos a vácuo

O objetivo do trabalho é analisar o efeito de soluções em regime transiente em relação às soluções obtidas com a hipótese de regime permanente. O estudo é feito por meio de simulação numérica pelo software comercial ANSYS, o modelo numérico é tridimensional e é composto pelas equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia.

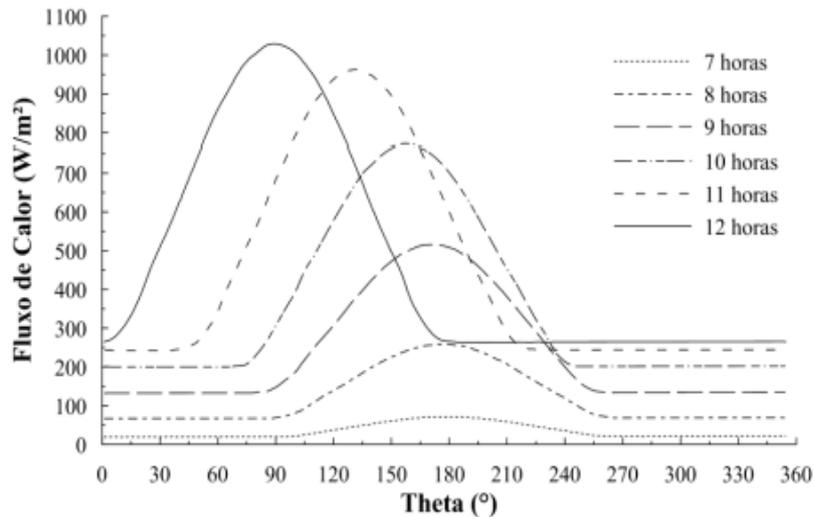
O modelo tridimensional foi usado apenas um tubo, evacuado, de comprimento $L = 1,42$ m e diâmetro interno de $d = 0,034$ m, desse modo o contorno do domínio computacional é o mesmo da superfície interna do tubo interno. Considerar o tubo com inclinação de 45° com o eixo horizontal, o fluido de trabalho usado é a água, onde é incompressível, regime laminar e suas propriedades permaneçam constantes.

Entre os resultados obtidos: campos de velocidade em quatro seções transversais do tubo, campos de temperatura e velocidade no mesmo ponto do tubo, em diferentes horários do dia, perfil de vazão mássica ao longo do tubo conforme a mudança de horário.

A Figura 10, mostra o perfil de radiação solar recebida pelo tubo das 6-12 h. Simplificações foram necessárias para viabilizar a implementação da expressão que permitisse a variação simultânea do fluxo (em função de θ), da sua intensidade e da rotação deste perfil ao redor do tubo em função do tempo. Observa-se que θ é a

coordenada circunferencial de cada ponto da circunferência do tubo. Os perfis dos horários entre 12-18 h são inversamente simétricos aos mostrados na Figura 10.

Figura 10 - Distribuição da radiação solar incidente transiente no tubo a vácuo



FONTE: (OLIVESKI; DALLA CORTE; KRENZINGER, 2016).

Portanto, os campos transientes de temperatura e velocidade apresentaram valores quantitativos e qualitativos satisfatórios, muito em decorrência da intensidade da radiação solar.

3.4.2 Avaliação experimental da vazão mássica em um coletor solar de tubos evacuados

O objetivo do trabalho é estimar a vazão mássica de água trocada entre um tubo evacuado e o reservatório térmico e avaliar os perfis de temperatura na seção de abertura e saída do tubo e ao longo da altura do tanque. Para isso foi usado um coletor de 24 tubos e um reservatório de 150 l, com inclinação de 37°.

A vazão mássica de água trocada entre um tubo evacuado e o reservatório térmico foi estimada a partir de um balanço de energia, demonstrado na equação (11).

$$Q_{ra} = Q_r - Q_{rloss} \quad (11)$$

Onde Q_r é a quantidade de calor fornecida pelo tubo para o reservatório, Q_{ra} é a quantidade de calor acumulado no reservatório, e Q_{rloss} é a quantidade de calor perdida pelo reservatório para o ambiente (MANEA; KRENZINGER; OLIVESKI, 2015).

Após usa-se outra fórmula onde o Q_r fica em evidência contendo a vazão mássica, e então, substitui a equação acima nesta segunda fórmula isolando a vazão mássica.

Com o balanço de energia entre tubo e reservatório é possível estimar a vazão mássica do sistema apenas com medidas de temperatura, é isso que o experimento faz, com o suporte de uma bancada de ensaio junto ao coletor solar e o reservatório.

Para estimar Q_{ra} sensores de temperatura foram instalados no interior do reservatório ao longo de sua altura. A temperatura na qual a água entra e sai do tubo foi medida com sensores de temperatura instalados na seção de abertura do tubo. Já a perda de calor do tanque de armazenamento é estimada por uma equação.

Os resultados são descritos na forma de gráficos, tanto o de temperaturas ao longo do tempo medidas pelos sensores posicionados na seção de abertura do tubo quanto o da variação de temperatura da água no interior do reservatório em função do tempo, então observa-se detalhadamente e tira-se as informações necessárias para usar no cálculo da vazão mássica.

Conclui-se que a metodologia usada foi adequada, visto que, utilizou-se um problema com as mesmas condições do experimento e implementado numericamente no software ANSYS, a diferença entre os resultados de vazão mássica foi pequena, ficando dentro da margem de incerteza.

3.4.3 Avaliação numérica da convecção natural em coletor solar de tubo evacuado

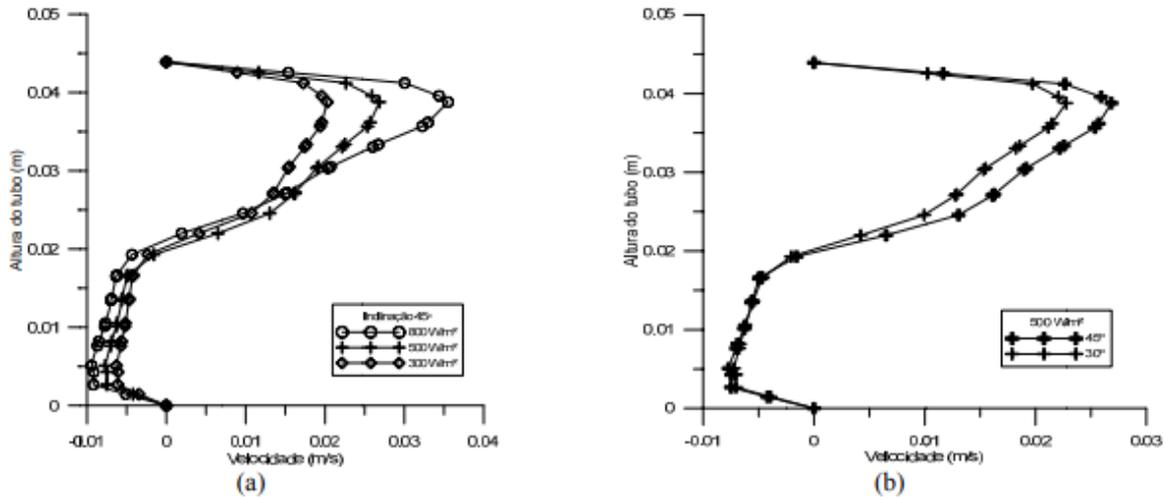
A proposta do trabalho é simular numericamente o movimento do fluido, que acontece por convecção natural, em um tubo evacuado acoplado ao reservatório, enquanto este recebe fluxo de calor. Foi utilizado a ferramenta fluidodinâmica computacional ANSYS, com simulações de irradiância sobre o tubo de 300, 500 e 800 W/m², combinado com ângulos de inclinação do coletor de 30° e 45°.

Para a simulação foi considerado que o fluido de trabalho (água) é incompressível, escoamento laminar e as propriedades da água são constantes com a temperatura (exceto a massa específica). As equações usadas são da conservação de massa, Navier- Stokes e energia.

Os resultados da simulação numérica foram comparados a um ensaio experimental já realizado com os mesmos dados, em ambos a velocidade máxima e

o comportamento fluidodinâmico ficaram semelhantes. A Figura 11 apresenta perfis de velocidade na saída do tubo a vácuo para diversos casos estudados.

Figura 11 - Perfil de velocidade na saída do tubo para o reservatório: (a) para inclinação de 45° e irradiância de 800, 500 e 300 W/m^2 ; (b) para irradiância de 500 W/m^2 e inclinação de 45° e 30°



FONTE: (MANEA; OLIVESKI; KREZNINGER, 2014).

Outros resultados foram analisados como a trajetória do fluido através de linhas de corrente e a estratificação térmica, ou campo de temperatura, no reservatório e na região de saída do tubo.

Portanto, o modelo numérico apresentado foi válido, pelas simulações e variações feitas, verificou-se a importância que essas variações trazem para o sistema e por apresentar uma boa concordância com resultados experimentais.

3.4.4 Otimização do ângulo de inclinação e orientação de painéis solares para a cidade de Petrolina

O trabalho tem como objetivo a otimização do ângulo de inclinação visando o melhor aproveitamento da radiação solar com sistemas fotovoltaicos para Petrolina no Pernambuco, para isso é necessário o estudo da variação da radiação total ao longo do ano.

As fontes para calcular e encontrar os ângulos de inclinação e orientação do presente trabalho são através de várias maneiras, com equações retiradas de livros específicos da área, dados radiométricos do Projeto SONDA, do Atlas Solarimétrico

do Brasil e da base de dados METEONORM usando o software PVsyst (as três últimas metodologias consideram o ângulo de orientação fixo em 180°).

Em geral, painéis solares localizados no hemisfério sul interceptam mais radiação solar quando voltados para o norte e vice-versa, porém a região em análise tem baixa latitude e então pode ser voltado tanto para o norte quanto para o sul.

Nos resultados obtidos com o Projeto SONDA, foi observado que o melhor ângulo de inclinação para um ajuste mensal variou de -22° a 36° ao longo do ano, com uma média anual de $5631,6 \text{ Wh/m}^2$. Devido à proximidade com o Equador, os valores mostram que durante 7 meses os painéis devem ser voltados para o norte e 5 meses é ideal que sejam voltados para o sul (estudos com variação de -30° a 60° no ângulo de inclinação).

O ângulo de inclinação anual que permite melhor aproveitamento da energia solar é de 6° , o qual possui uma média anual de $5413,3 \text{ Wh/m}^2$ (96,12%). Para ajuste conforme as estações do ano, os ângulos de inclinações ideais são: -3° na primavera, -17° no verão, 17° no outono e 29° no inverno, com essa combinação a média anual é de $5587,5 \text{ Wh/m}^2$ (aproveitamento de 99,22%).

Portanto, a escolha final sobre o ajuste do melhor ângulo de inclinação deve ser feita considerando os custos para serem realizados e a economia devido à redução do tamanho da planta solar, assim como considerações técnicas associadas à manutenção.

3.4.5 Análise econômica comparativa entre aquecedores solares de baixo custo e aquecedores com tubos de vidro evacuados

O objetivo do trabalho é analisar a viabilidade econômica para implantação de um sistema de aquecimento solar com tubos a vácuo e um sistema de aquecimento solar de baixo custo (ASBC).

Utilizando a Metodologia Multi-Índice Aplicada (MMIA) via aplicativo web SAVEPI e a Metodologia Simulação de Monte Claro (MSMC), foi comparada a energia gerada, tempo de retorno do investimento e risco de aquisição dos sistemas de água, para a redução no consumo de energia elétrica residencial.

Os dois modelos foram dimensionados para atender a demanda de uma residência com 4 pessoas, sendo considerado o consumo diário de 200 litros de água quente (em um único ponto, o chuveiro). Para a aquisição e instalação em ambos os modelos foram realizados três orçamentos em diferentes lugares.

Para o custo com equipamentos e materiais o sistema de aquecimento solar com tubos evacuados é mais elevado do que o sistema ASBC, porém ele gera uma economia maior, além da sua vida útil ser maior também. Quanto ao retorno do valor investido, a diferença é pequena, mas o sistema de tubos a vácuo leva vantagem em alguns meses. A Figura 12 mostra os dois sistemas em relação a valores.

Figura 12 - Economia estimada com implementação dos sistemas de aquecimento solar

Tipo de Aquecedor Solar	ASBC		Sistema com Tubos de Vidro Evacuados	
	Chuveiro Inverno	Chuveiro Verão	Chuveiro Inverno	Chuveiro Verão
Gasto Mensal com Chuveiro Elétrico	R\$ 112,80	R\$ 65,80	R\$ 112,80	R\$ 65,80
Economia do Sistema de Aquecimento Solar	42,00%	42,00%	84,60%	84,60%
Economia Mensal	R\$ 47,38	R\$ 27,64	R\$ 95,43	R\$ 55,67
Semestral	R\$ 284,26	R\$ 165,82	R\$ 572,57	R\$ 334,00
Economia Anual	R\$ 450,07		R\$ 906,57	
Média Mensal	R\$ 37,51		R\$ 75,55	

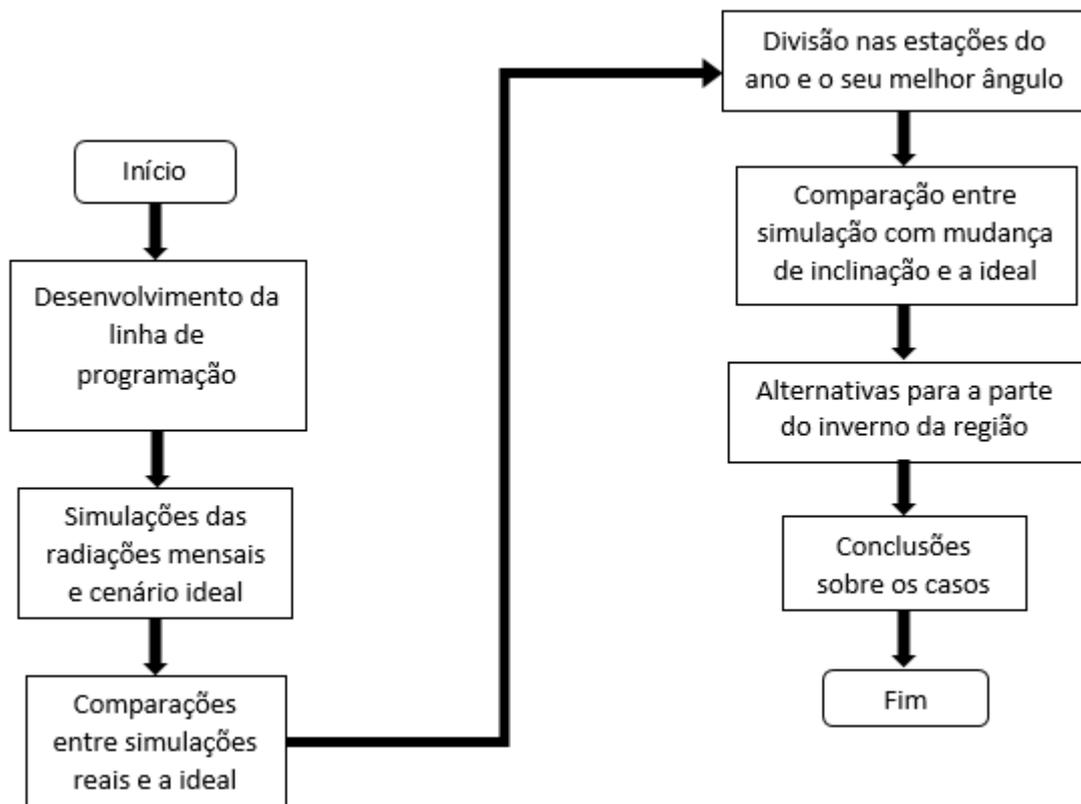
FONTE: (TORRICO; LIMA; BORTOLUZZI, 2016).

Contudo, observou-se que os dois sistemas de aquecimento solar estudados são viáveis, proporcionam a redução do consumo de energia elétrica, com um melhor desempenho econômico e associado a um menor risco obtido pelo sistema de aquecimento solar com tubos evacuados.

4 METODOLOGIA

Este trabalho tem como foco analisar o impacto que a angulação causa em um sistema de aquecimento solar com base em tubos a vácuo, desde a programação do algoritmo em software até a comparação dos resultados simulados com as suas devidas conclusões. A Figura 13 mostra um fluxograma com as atividades a serem realizadas.

Figura 13 - Fluxograma das atividades



FONTE: (AUTOR, 2020).

4.1 LINHA DE PROGRAMAÇÃO

Com as equações disponíveis no fluxo de cálculo foi desenvolvido uma linha de programação no software Matlab, o algoritmo informa com gráficos os resultados das radiações totais mensais em relação ao ângulo de inclinação do sistema para a região em análise do presente trabalho, com o suporte de informações dos anexos.

4.2 SIMULAÇÕES MENSAIS PARA A REGIÃO EM ANÁLISE

Nas simulações, foram realizadas análises com os valores de radiações em todos os meses do ano com a variação no ângulo de inclinação em um intervalo de 0° a 90°, assim foi possível saber a radiação máxima em cada mês juntamente com o ângulo em que ela acontece.

Essas radiações totais máximas representam um cenário ideal, onde cada mês tem a inclinação desejada para explorar ao máximo o sistema e conseqüentemente o aproveitamento de energia é total para a cidade em análise.

4.3 COMPARAÇÕES DE RADIAÇÕES

A situação ideal é pouco provável de pôr em prática por causa das suas inúmeras variações no ângulo de inclinação, portanto, com base nos resultados simulados mensais da cidade em análise e nas normas de inclinações de telhados, foram encontrados ângulos de inclinações que trazem situações reais nos quais os sistemas de tubos a vácuo são instalados.

Foram realizadas as simulações para encontrar as radiações totais em cada mês com esses ângulos e compará-las com as radiações totais máximas da situação ideal. Assim foram feitas as análises, e verificado qual é o ângulo de inclinação que possui um melhor desempenho para a região em destaque.

4.4 DIVISÃO NAS ESTACÕES DO ANO

A tecnologia de tubos a vácuo pode ser instalada em locais onde o sistema tenha mudança no seu ângulo de inclinação, e devido a região em análise, o comportamento na parte do verão e do inverno são diferentes.

Foram divididas as estações do ano em primavera e verão e em outono e inverno, para encontrar o ângulo de inclinação em cada uma das partes que resultará em um maior aproveitamento de energia do sistema.

É realizado a comparação com esta mudança de inclinação e a do cenário ideal, onde foi verificado a diferença de radiações entre as duas situações.

4.5 SOLUÇÕES PARA O INVERNO

Como a cidade em análise está situada no sul do país, onde as temperaturas no período de inverno são baixas, o uso de um sistema de aquecimento de água residencial nesta época do ano é ainda mais necessário pelos benefícios que tem a oferecer para as pessoas que o possuem.

Sendo assim, é encontrado as radiações totais para todos os meses do ano com o ângulo de inclinação representado na parte do outono e inverno. Então, é comparado esta situação com o cenário ideal.

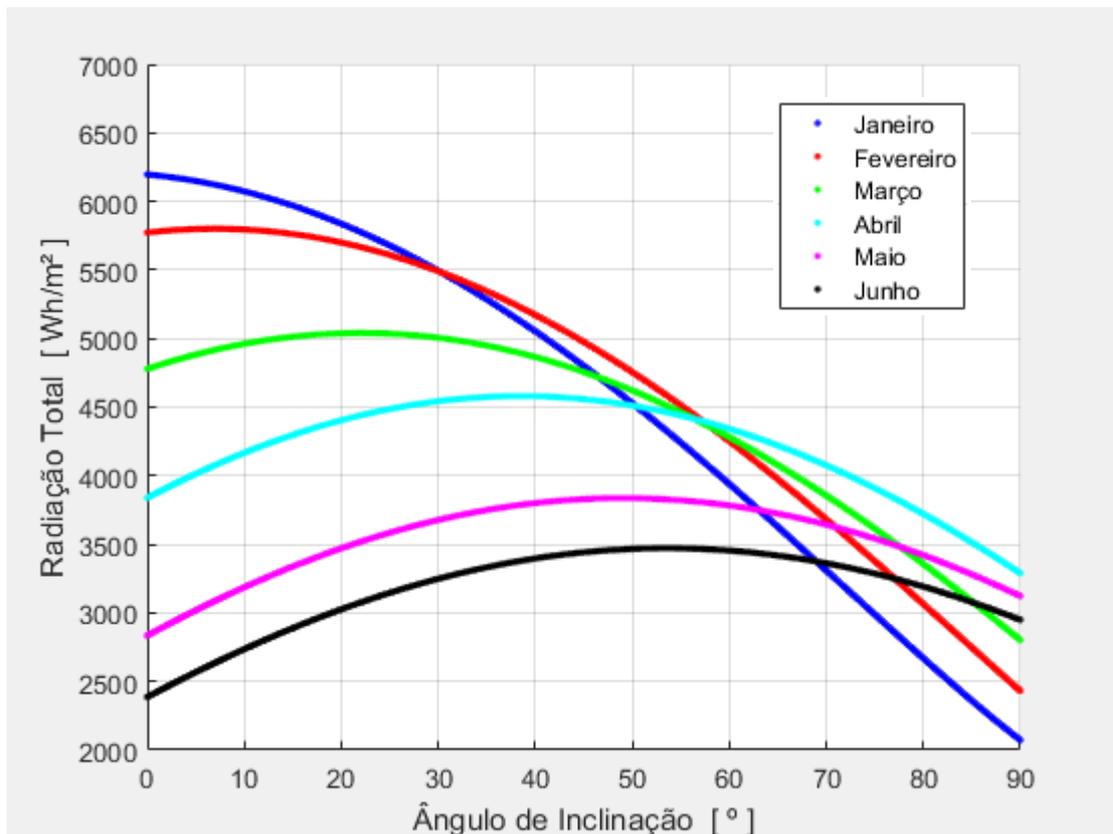
Observa-se que há uma perda anual por causa dos meses de primavera e verão, porém, a parte fria do ano, tem um ganho maior.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo será apresentada a aplicação da metodologia, com os resultados e análises, os quais são relacionados com o comportamento da angulação em um sistema de coletores solares baseado na tecnologia de tubo a vácuo.

A Figura 14 representa os valores das radiações totais de janeiro a junho com a variação no ângulo de inclinação de 0° a 90° . Observa-se que janeiro, fevereiro e março possuem radiações maiores (acima de 5000 Wh/m^2) em relação aos outros meses, devido os mesmos estarem no período do verão e conseqüentemente o aproveitamento da energia solar é maior. No período do outono os valores das radiações diminuem e conforme se aproxima do inverno os valores das radiações diminuem ainda mais (3500 Wh/m^2 aproximadamente).

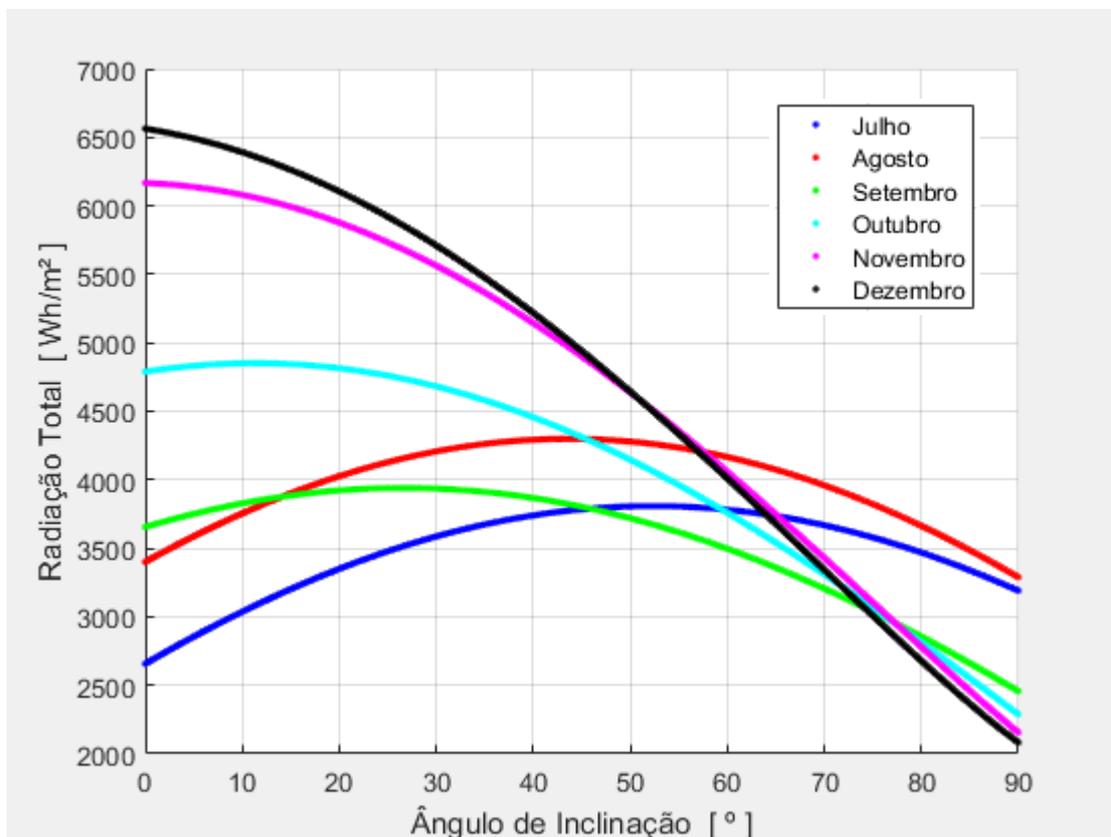
Figura 14 - Média mensal da radiação total diária em função do ângulo de inclinação de janeiro a junho



FONTE: (AUTOR,2020).

A Figura 15 representa os valores das radiações totais de julho a dezembro com a variação no ângulo de inclinação de 0° a 90° . Observa-se que os meses de julho, agosto e setembro possuem radiações menores (abaixo de 4500 Wh/m^2) devido os mesmos estarem no período do inverno e conseqüentemente o aproveitamento da energia solar é menor. No período da primavera os valores das radiações aumentam e conforme se aproxima do verão os valores das radiações aumentam ainda mais (acima de 6000 Wh/m^2).

Figura 15 - Média mensal da radiação total diária em função do ângulo de inclinação de julho a dezembro



FONTE: (AUTOR,2020).

Com as informações das Figuras 14 e 15 foram extraídos dados como os da Tabela 1, onde encontrou-se as radiações máximas totais em cada mês do ano seguido do ângulo de inclinação em que elas ocorrem, além da média anual que é $4879,1 \text{ Wh/m}^2$ neste caso. Os maiores valores das radiações máximas ocorrem em meses de primavera e verão e as mesmas acontecem em ângulos menores, já em meses de outono e inverno as radiações máximas acontecem em ângulos maiores.

Tabela 1 - Radiação máxima mensal e o seu ângulo de inclinação

Mês	Radiação [Wh/m²]	Ângulo [°]
Janeiro	6196,0	0
Fevereiro	5800,1	7
Março	5039,9	22
Abril	4579,8	38
Mai	3836,3	49
Junho	3471,1	54
Julho	3807,9	52
Agosto	4298,5	44
Setembro	3939,9	27
Outubro	4850,9	11
Novembro	6166,0	0
Dezembro	6563,0	0

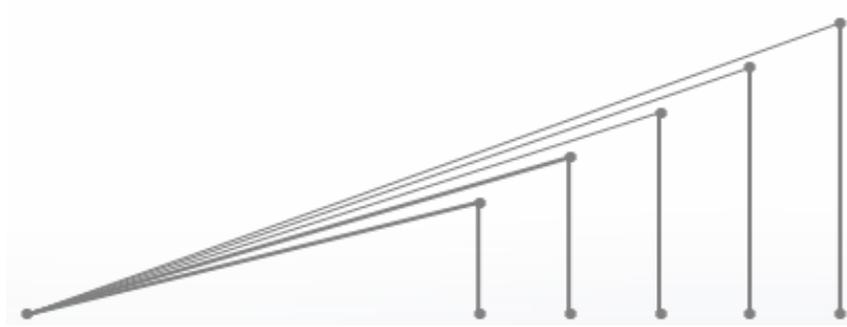
FONTE: (AUTOR,2020).

O sistema de coletores solares baseado na tecnologia de tubo a vácuo é colocado sobre os telhados de residências, e estes mesmos possuem regras para seguir. A inclinação do telhado depende do tipo de telha que será usada, elas podem ser galvanizadas, ecológicas, cerâmica, concreto, fibrocimento, vidro, metálicas, e policarbonato, alguns modelos suportam uma inclinação maior que outros.

A NBR responsável por coberturas é a 5720 nb 344, as mais usadas são as telhas cerâmicas que é regulamentada pela NBR 8039. A inclinação mínima para qualquer tipo de telhado é de 25%, para que com isso não haja problemas na cobertura.

As radiações máximas totais de cada mês apresentadas na Tabela 1 representam um cenário ideal, onde cada mês do ano tem uma determinada inclinação para tirar o máximo aproveitamento do sistema, foram feitas comparações desta situação com algumas inclinações de telhados com 25%, 30%, 35%, 40% e 45%, as quais são situações reais da região da serra gaúcha. A Figura 16 demonstra estas inclinações.

Figura 16 - Inclinação de telhados



Inclinação em porcentagem	25%	30%	35%	40%	45%
Inclinação em ângulo	14°	17°	20°	22°	25°

FONTE: (AUTOR,2020).

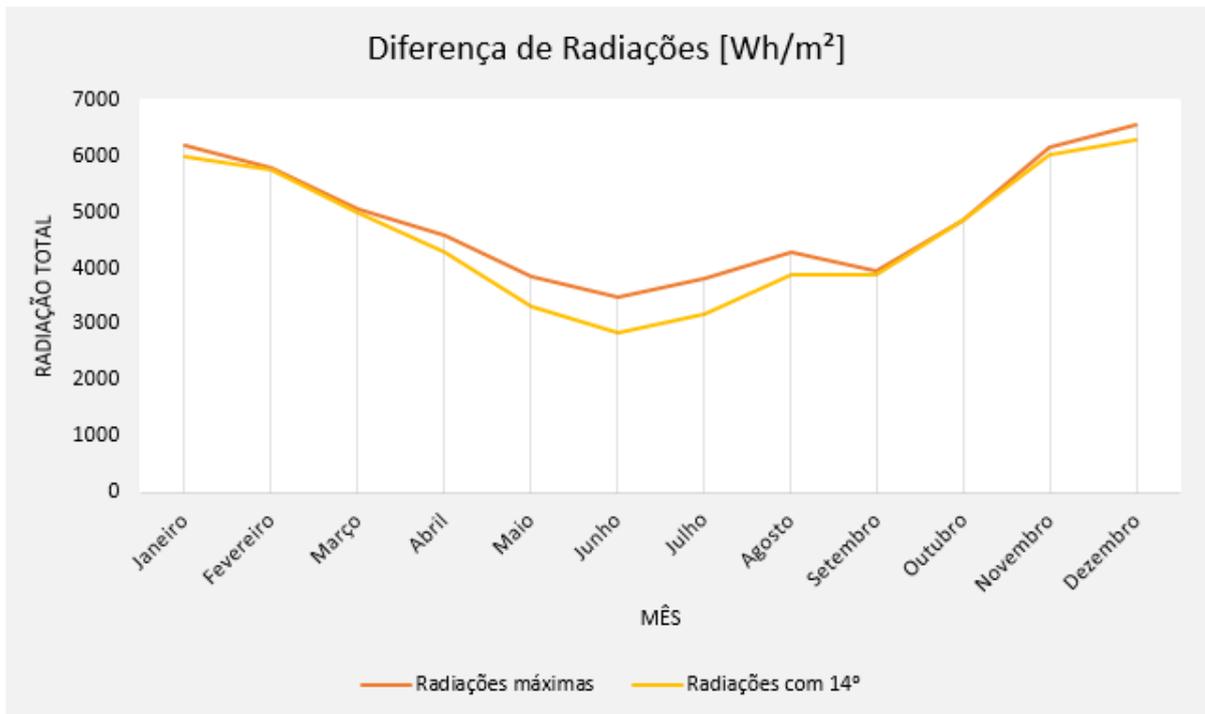
Nas Tabelas 2, 3, 4, 5 e 6 foram encontrados os valores das radiações totais de cada mês do ano com as inclinações de 14°, 17°, 20°, 22° e 25° respectivamente. São realizadas comparações destes valores com os da Tabela 1 onde é a situação ideal, apresentadas nas Figuras 17, 18, 19, 20 e 21.

Tabela 2 - Radiação mensal com inclinação de 14°

Mês	Radiação [Wh/m ²]
Janeiro	5991,8
Fevereiro	5770,9
Março	5004,7
Abril	4272,8
Maio	3309,1
Junho	2859,0
Julho	3170,2
Agosto	3873,3
Setembro	3875,0
Outubro	4847,4
Novembro	6012,5
Dezembro	6290,1

FONTE: (AUTOR,2020).

Figura 17 - Comparação entre as radiações máximas e as radiações com 14°



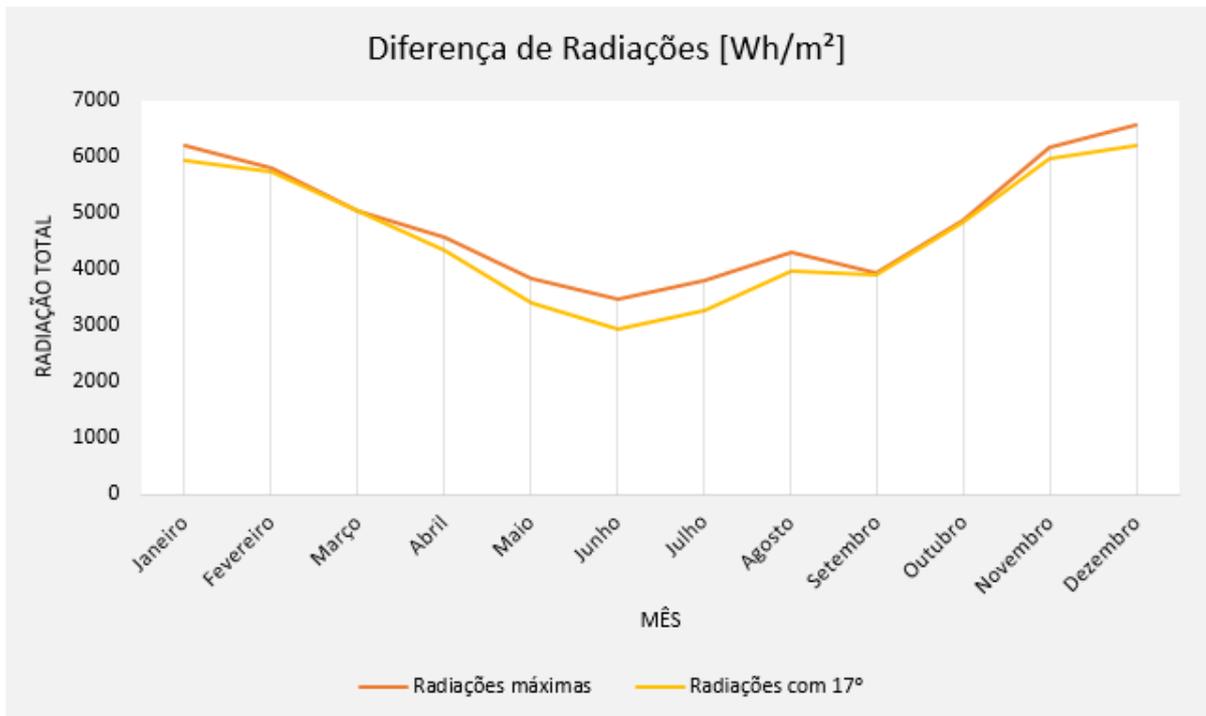
FONTE: (AUTOR,2020).

Tabela 3 - Radiação mensal com inclinação de 17°

Mês	Radiação [Wh/m ²]
Janeiro	5919,4
Fevereiro	5740,8
Março	5026,0
Abril	4342,6
Maio	3393,3
Junho	2945,3
Julho	3263,1
Agosto	3953,6
Setembro	3902,2
Outubro	4835,1
Novembro	5950,0
Dezembro	6202,5

FONTE: (AUTOR,2020).

Figura 18 - Comparação entre as radiações máximas e as radiações com 17°



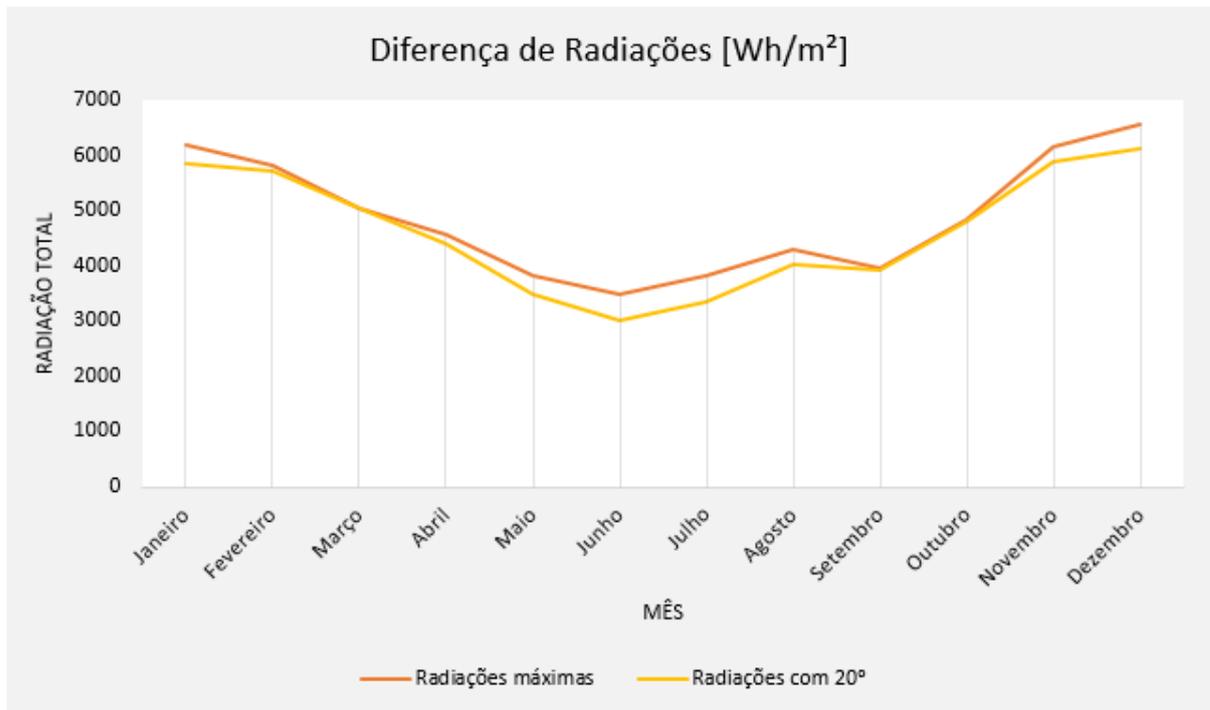
FONTE: (AUTOR,2020).

Tabela 4 - Radiação mensal com inclinação de 20°

Mês	Radiação [Wh/m ²]
Janeiro	5837,1
Fevereiro	5700,2
Março	5037,6
Abril	4403,8
Maio	3470,7
Junho	3025,7
Julho	3349,4
Agosto	4026,0
Setembro	3922,0
Outubro	4814,0
Novembro	5877,1
Dezembro	6104,8

FONTE: (AUTOR,2020).

Figura 19 - Comparação entre as radiações máximas e as radiações com 20°



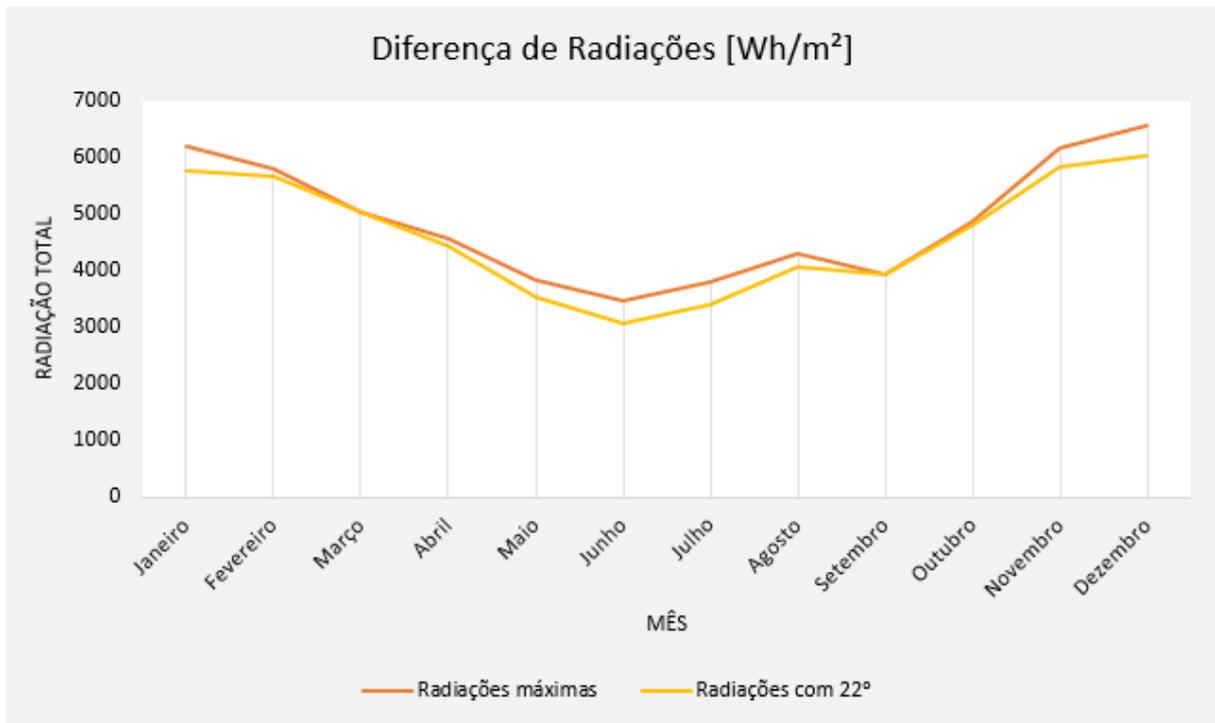
FONTE: (AUTOR,2020).

Tabela 5 - Radiação mensal com inclinação de 22°

Mês	Radiação [Wh/m²]
Janeiro	5776,9
Fevereiro	5667,3
Março	5039,9
Abril	4439,6
Maio	3518,5
Junho	3075,9
Julho	3403,1
Agosto	4069,7
Setembro	3931,2
Outubro	4795,2
Novembro	5822,9
Dezembro	6034,3

FONTE: (AUTOR,2020).

Figura 20 - Comparação entre as radiações máximas e as radiações com 22°



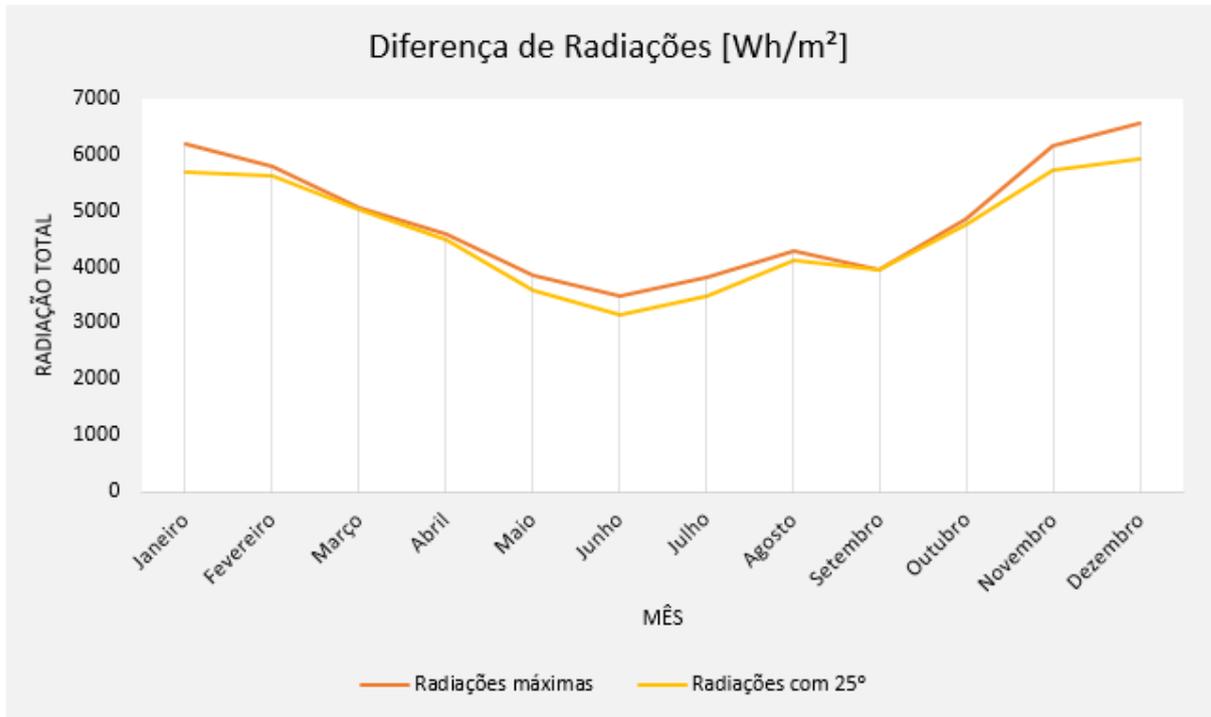
FONTE: (AUTOR,2020).

Tabela 6 - Radiação mensal com inclinação de 25°

Mês	Radiação [Wh/m ²]
Janeiro	5678,5
Fevereiro	5609,5
Março	5035,1
Abril	4485,8
Maio	3584,2
Junho	3146,0
Julho	3477,8
Agosto	4128,3
Setembro	3938,9
Outubro	4759,7
Novembro	5733,3
Dezembro	5920,4

FONTE: (AUTOR,2020).

Figura 21 - Comparação entre as radiações máximas e as radiações com 25°



FONTE: (AUTOR,2020).

Com as comparações, observa-se que em ângulos menores como o de 14°, Figura 17, a quantidade de radiação nos meses de primavera e verão é maior, porém na parte do outono e inverno a perda é significativa. Conforme o ângulo de inclinação aumenta é visto um equilíbrio maior entre todos os meses.

A Tabela 7 estabelece a média anual de radiação total das inclinações comparadas com a Tabela 1, a que possui uma média anual maior é a inclinação de 22° com 4631,2 Wh/m², ou seja, 94,91% da média anual da Tabela 1, onde é a situação ideal com 4879,1 Wh/m².

Tabela 7 - Média anual de radiação total das inclinações correspondentes

Média anual [Wh/m²]	Ângulo [°]
4606.4	14
4622.8	17
4630.7	20
4631.2	22
4624.7	25

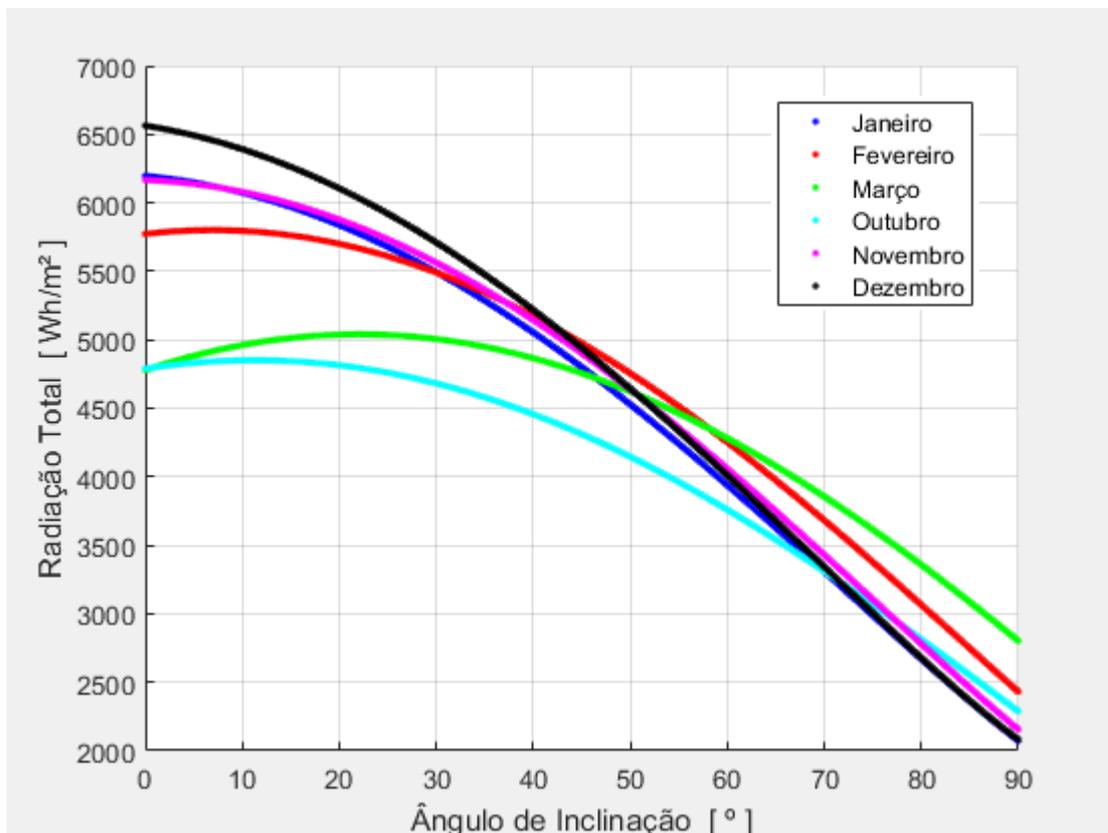
FONTE: (AUTOR,2020).

Além do sistema de aquecimento de água baseado na tecnologia de tubo a vácuo ser instalado sobre os telhados de residências e possuir a inclinação dos mesmos, podem ser instalados em lajes residenciais (casas mais modernas), onde o sistema é sustentado por um suporte ou bancada regulável, para assim mudar a sua inclinação e obter um maior aproveitamento de energia.

A Figura 22 representa os resultados dos meses de primavera e verão extraídos das Figuras 14 e 15, onde os valores das radiações são maiores e os ângulos de inclinações em que estas ocorrem são menores. Já a Figura 23 representa os resultados dos meses de outono e inverno extraídos das Figuras 14 e 15, onde os valores das radiações são menores e os ângulos de inclinações em que estas ocorrem são maiores.

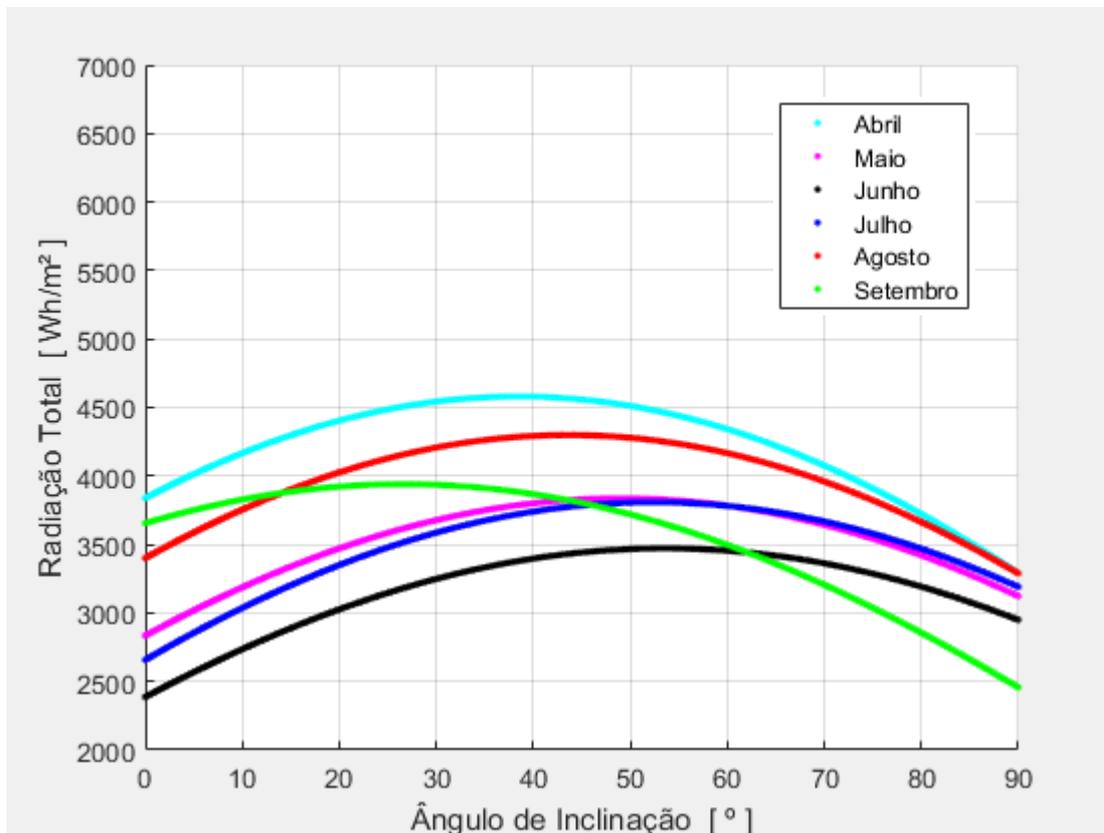
Com essas duas divisões nas estações do ano, é encontrado um ângulo de inclinação em cada uma delas para um melhor aproveitamento do sistema e conseqüentemente uma maior aproximação da situação ideal mostrada na Tabela 1.

Figura 22 - Média mensal da radiação total diária em função do ângulo de inclinação nos meses de primavera e verão



FONTE: (AUTOR,2020).

Figura 23 - Média mensal da radiação total diária em função do ângulo de inclinação nos meses de outono e inverno



FORNTE: (AUTOR,2020).

Conforme mostrado no Apêndice B, é encontrado que o ângulo de inclinação para os meses de primavera e verão é de 5° , e o ângulo de inclinação para os meses de outono e inverno é de 45° , para assim ter um maior aproveitamento de energia solar com os ângulos que exploram melhor as duas divisões das estações do ano. A Tabela 8 apresenta as radiações mensais com esses ângulos.

A média anual dos valores de radiações totais apresentados na Tabela 8 é de $4833,5 \text{ Wh/m}^2$, ou seja, $99,06\%$ da média anual da Tabela 1, onde é a situação ideal com $4879,1 \text{ Wh/m}^2$.

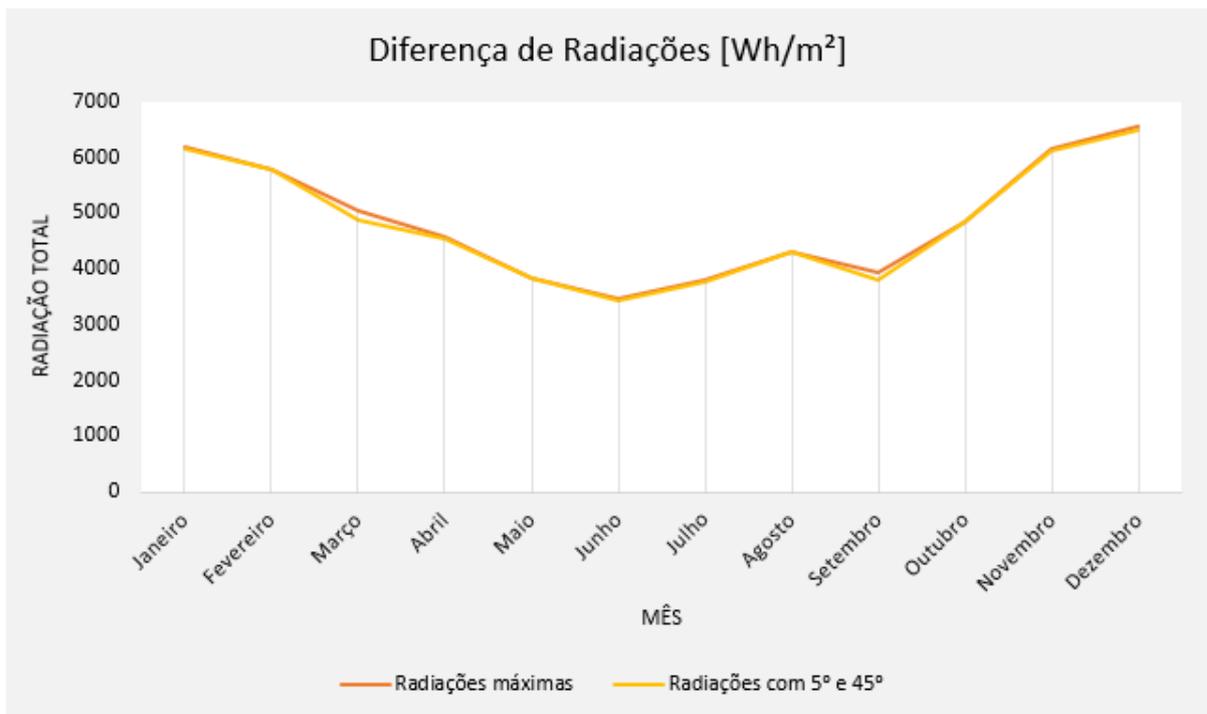
A Figura 24 compara os valores de radiações apresentados nas Tabelas 1 com os da Tabela 8. Percebe-se que a diferença entre as duas é pequena, com uma leve perda nos meses de março e setembro, com apenas essas duas variações no ângulo de inclinação consegue-se um resultado bem próximo da situação ideal.

Tabela 8 - Radiação mesal com inclinação de 5° e 45°

Mês	Radiação [Wh/m ²]	Ângulo [°]
Janeiro	6148,5	5
Fevereiro	5797,9	5
Março	4882,6	5
Abril	4557,8	45
Maio	3829,1	45
Junho	3441,4	45
Julho	3783,9	45
Agosto	4297,6	45
Setembro	3802,8	45
Outubro	4831,6	5
Novembro	6137,5	5
Dezembro	6491,4	5

FONTE: (AUTOR,2020).

Figura 24 - Comparação entre as radiações máximas e as radiações com 5° e 45°



FONTE: (AUTOR,2020).

A cidade de Bento Gonçalves é localizada no Rio Grande do Sul, na região da serra gaúcha, onde a diferença de temperatura entre o verão e o inverno é significativa, com uma variação média de 20°C ao longo do ano.

O uso do sistema de aquecimento de água baseado na tecnologia de tubo a vácuo para esta região é ainda mais indicado quando as temperaturas são baixas, que é durante o inverno e a importância de um sistema de aquecimento de água residencial faz a diferença no dia a dia.

Assim, o melhor ângulo de inclinação para a parte do inverno é de 45°, representado na Tabela 8. Com esse mesmo ângulo, é encontrado as radiações totais para todos os meses do ano, apresentados na Tabela 9.

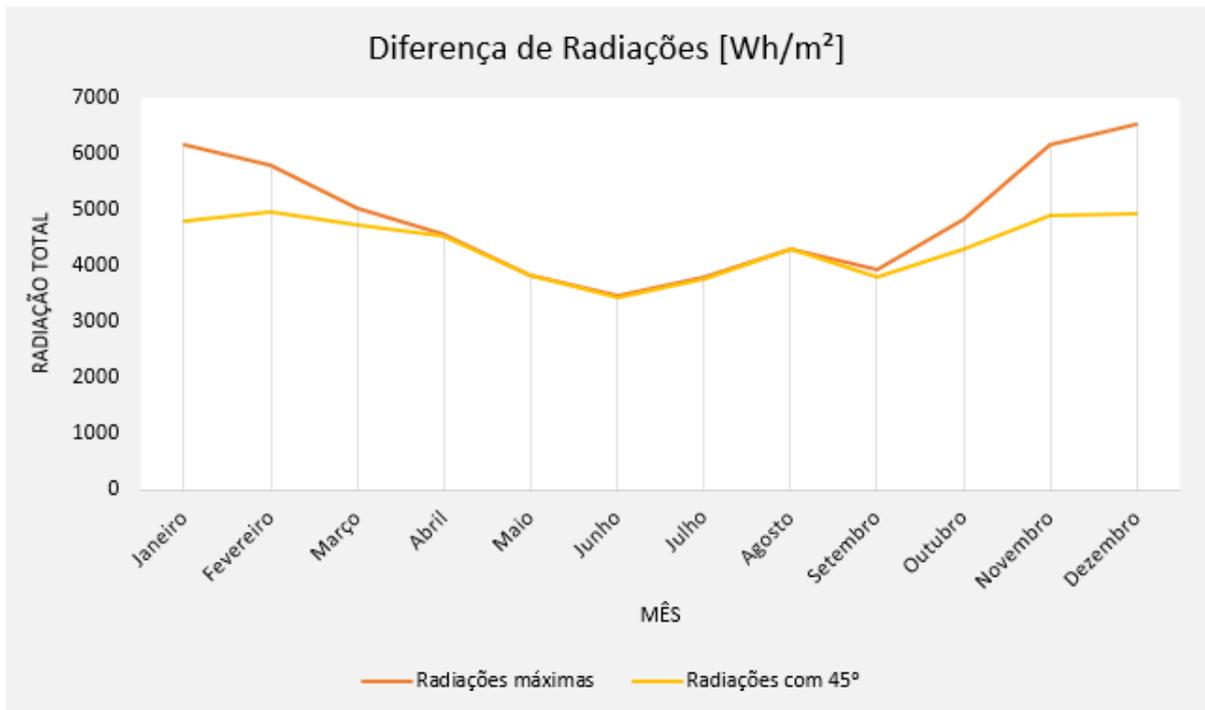
Tabela 9 - Radiação mensal com inclinação de 45°

Mês	Radiação [Wh/m²]
Janeiro	4800,3
Fevereiro	4975,2
Março	4755,8
Abril	4557,8
Maio	3829,1
Junho	3441,4
Julho	3783,9
Agosto	4297,6
Setembro	3802,8
Outubro	4311,2
Novembro	4901,2
Dezembro	4940,0

FONTE: (AUTOR,2020).

A média anual dos valores de radiações totais apresentados na Tabela 9 é de 4366,3 Wh/m², ou seja, 89,48% da média anual da Tabela 1, onde é a situação ideal com 4879,1 Wh/m². A Figura 25 faz a comparação das radiações totais nestes dois casos durante o ano.

Figura 25 - Comparação entre as radiações máximas e as radiações com 45°



FONTE: (AUTOR,2020).

Como mostra a Figura 25, nos meses de primavera e verão os valores das radiações totais são menores em relação aos valores das radiações totais dos ângulos de inclinações comparados anteriormente, devido ao ângulo de inclinação de 45° ser grande para esse período, porém na parte de outono e inverno o aproveitamento é ideal, assim o uso desta inclinação nestes meses do ano onde é mais necessário para esta região do país é a melhor possível.

Se comparar o ângulo de inclinação de 45° com o ângulo de inclinação de 22°, o qual teve a maior média anual apresentada na Tabela 7, com 4631,2 Wh/m², a perda na média anual é de 5,43 %, em compensação o ganho na parte do outono e inverno é de 5,32%, ou seja, média de radiação total menor ao longo do ano, porém uma média de radiação total maior na parte do inverno para a região em análise.

6 CONCLUSÕES

Com a crescente demanda na utilização das energias renováveis, pelos seus benefícios e o que elas oferecem, o foco do trabalho foi direcionado a energia solar e mais precisamente em analisar a influência da angulação frente a um sistema de aquecimento solar.

O sistema em análise são os coletores solares de tubos a vácuo, estes são mais usados em residências pelas vantagens e recompensas que possui, sendo assim, fazer o uso do seu maior aproveitamento é importante.

A angulação tem um papel fundamental para que este aproveitamento seja o maior possível, o ângulo de inclinação depende de alguns fatores como: latitude local, formato do telhado, mudanças nas estações do ano e instalações corretas. Os resultados do presente trabalho são relacionados a cidade de Bento Gonçalves localizada no Rio Grande do Sul, portanto, os valores mudam para outros locais.

Inicialmente foi feita a linha de programação localizada no apêndice, com base nas equações do fluxo de cálculo e de importância para posteriormente dar início as simulações no software Matlab.

As simulações mostram o comportamento da radiação total em função do ângulo de inclinação para todos os meses do ano na cidade em análise. Com essas informações, foram extraídos as radiações totais máximas em cada mês e o seu ângulo correspondente, a qual passou a ser a referência, com uma média anual de 4879,1 Wh/m².

Como a situação ideal é de alguma forma improvável de acontecer pelas inúmeras variações no ângulo de inclinação do sistema, observou-se o comportamento da radiação total nas simulações e foi encontrado o ângulo de inclinação em um sistema de tubos a vácuo que tem o maior aproveitamento anual de radiação total para a região em análise que é o de 22°, com média anual de 4631,2 Wh/m², ou seja, 94,91% da média anual da Tabela 1.

Outra observação foi a diferença nos valores de radiações entre o verão e o inverno da região, sendo assim, foi encontrado um ângulo de inclinação em cada uma das partes que possuam um maior aproveitamento do sistema. Na parte da primavera e verão o ângulo de inclinação é de 5° e na parte do outono e inverno o ângulo de inclinação é de 45°, com essas duas variações a média anual é de 4833,5 Wh/m², ou seja, 99,06% da média anual da Tabela 1.

Como a parte do inverno em Bento Gonçalves é rigoroso, com temperaturas baixas, optou-se por manter o ângulo de 45° o ano todo, o qual gera um maior aproveitamento no sistema de aquecimento solar nesta época. A média anual dos valores de radiações totais são de $4366,3 \text{ Wh/m}^2$, ou seja, $89,48\%$ da média anual da Tabela 1. Se for comparado com os resultados da inclinação de 22° , há uma perda na média anual é de $5,43 \%$, em compensação o ganho na parte do outono e inverno é de $5,32\%$.

Portanto, o ângulo de inclinação a ser utilizado para um maior aproveitamento de energia solar dependerá de alguns fatores como: cenário do cliente, custos para instalação e retorno financeiro, assim como considerações técnicas para a aprovação.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões para trabalhos futuros:

- a) Projetar uma bancada de ângulos para análises e posteriormente realizar a sua construção física;
- b) Fazer a parte experimental em um local adequado, com os equipamentos corretos e analisar o comportamento do sistema;
- c) Comparar os resultados obtidos experimentalmente com os resultados deste trabalho realizados em simulações de software.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017) – LABREN / CCST / INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) - labren.ccst.inpe.br.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal process**. 4.ed. Hoboken: JW&S, 2013.

KALOGIROU, S., **Solar energy engineering: Processes and systems**, Academic Press, 2009.

LIU, B.; JORDAN, R. **Daily insolation on surfaces tilted towards equator**. Trans. ASHRAE, vol. 10, pp. 53-59, 1961.

MANEA, Tiago Francisco. **Desenvolvimento de uma bancada para ensaios de coletores solares de tubos de vidro a vácuo**. Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 2012.

MANEA, Tiago Francisco; KRENZINGER, Arno; OLIVESKI, Rejane De Cesaro. Avaliação experimental da vazão mássica em um coletor solar de tubos evacuados. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 19, pp.03.25-03.34, 2015.

MANEA, Tiago Francisco; OLIVESKI, Rejane De Cesaro; KRENZINGER, Arno. Avaliação numérica da convecção natural em coletor solar de tubo evacuado. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 5, n. 1, p.11-17, jul. 2014.

OLIVESKI, Rejane De Cesaro; DALLA CORTE, Marcelo; KRENZINGER, Arno. Análise transiente do processo de aquecimento em tubos a vácuo. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 7, n. 2, p.106-114, dez. 2016.

OLIVEIRA, F.T.V.; GÓMEZ-MALAGÓN, L.A. Otimização do ângulo de inclinação e orientação de painéis solares para a cidade de Petrolina. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar** - Gramado, 17 a 20 de abril de 2018.

PEREIRA E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: [s.n.], 2006.

POZZEBON, Felipe B. **Aperfeiçoamento de um programa de simulação computacional para análise de sistemas térmicos de aquecimento de água por energia solar**. Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 2009.

ROSA, F. N. **Aplicabilidade de coletores solares com tubo evacuado no Brasil**. Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, 2012.

SANTOS, Marco Aurélio dos (org). **Fontes de energia nova e renovável**. 1.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

TORRICO, Giovana Moreira; LIMA José Donizetti de; BORTOLUZZI Sandro César. Análise econômica comparativa entre aquecedores solares de baixo custo e aquecedores com tubos de vidro evacuados. **Revista Espacios**, v. 37, n. 34, p.31, 2016.

ZHIQIANG, Y. Development of solar thermal system in China. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 86, pp. 427-442, 2005.

APÊNDICE A – LINHA DE PROGRAMAÇÃO NO SOFTWARE MATLAB

```

% Autor: Anderson Fernando Restelato

%% Algoritmo

% refletância (ANEXO A)
p = 0.2;

% latitude (ANEXO C ou D)
lat = -29.2005;

% dia médio de cada mês (ANEXO B)
n = ; 'valor do mês de interesse';

% declinação de cada mês (ANEXO B)
delta = ; 'valor do mês de interesse';

% média mensal da radiação global (ANEXO C)
H = ; 'valor do mês de interesse';

% média mensal da radiação difusa (ANEXO D)
Hd = ; 'valor do mês de interesse';

ws = acosd(-tand(lat)*tand(delta));
wLs1 = acosd(-tand(lat)*tand(delta));

for Beta = 0:1:90
    wLs2 = acosd(-tand(lat+Beta)*tand(delta));

    if wLs1 < wLs2
        wLs = wLs1;
    else
        wLs = wLs2;
    end

    Rb =
    (cosd(lat+Beta)*cosd(delta)*sind(wLs)+(pi/180)*wLs*sind(lat+Beta)*sind(delta)) / (cosd(lat)*cosd(delta)*sind(ws)+(pi/180)*ws*sind(lat)*sind(delta));

    HT = (H-Hd)* Rb+Hd*((1+cosd(Beta))/2)+ H*p*((1-cosd(Beta))/2)

    hold on;
    grid on;
    plot(Beta,HT, '.k')
end

legend('Nome do Mês')
xlabel ('Ângulo de Inclinação [ ° ]')
ylabel ('Radiação Total [ Wh/m² ]')

```

APÊNDICE B – ESCOLHA DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO PARA PRIMAVERA E VERÃO E PARA OUTONO E INVERNO

Mês	Radiação [Wh/m ²]			
	Inclinação 0°	Inclinação 5°	Inclinação 10°	Inclinação 15°
Janeiro	6196,0	6148,5	6072,8	5968,8
Fevereiro	5772,0	5797,9	5794,6	5762,0
Março	4778,0	4882,6	4961,1	5012,9
Outubro	4789,0	4831,6	4850,1	4844,3
Novembro	6166,0	6137,5	6079,7	5992,8
Dezembro	6563,0	6491,4	6391,1	6262,0
Mês	Radiação [Wh/m ²]			
	Inclinação 35°	Inclinação 40°	Inclinação 45°	Inclinação 50°
Abril	4573,6	4578,7	4557,8	4511,0
Maio	3749,6	3800,3	3829,1	3835,8
Junho	3332,2	3396,7	3441,4	3466,0
Julho	3673,8	3739,8	3783,9	3805,5
Agosto	4261,8	4292,1	4297,6	4278,3
Setembro	3911,2	3867,0	3802,8	3719,2

ANEXO A – TABELA DA REFLETÂNCIA DOS MATERIAIS

Material	ρ_s
Terra	0,04
Tijolo vermelho	0,27
Concreto	0,22
Grama	0,20
Barro/Argila	0,14
Superfície construção clara	0,60

FONTE: (SANTOS, 2013).

ANEXO B – TABELA DO DIA MÉDIO DE CADA MÊS E SUA DECLINAÇÃO

Month	n for i th Day of Month	For Average Day of Month		
		Date	n	δ
January	i	17	17	-20.9
February	$31 + i$	16	47	-13.0
March	$59 + i$	16	75	-2.4
April	$90 + i$	15	105	9.4
May	$120 + i$	15	135	18.8
June	$151 + i$	11	162	23.1
July	$181 + i$	17	198	21.2
August	$212 + i$	16	228	13.5
September	$243 + i$	15	258	2.2
October	$273 + i$	15	288	-9.6
November	$304 + i$	14	318	-18.9
December	$334 + i$	10	344	-23.0

FONTE: (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

ANEXO C – MÉDIA MENSAL DA RADIAÇÃO GLOBAL DIÁRIA EM UMA SUPERFÍCIE HORIZONTAL PARA A CIDADE DE BENTO GONÇALVES

(Wh/m².dia)

Mostrar registros ---- Inserir ID ----
Procurar:

ID ▲	Lon ↕	Lat ↕	Anual ↕	Jan ↕	Fev ↕	Mar ↕	Abr ↕	Mai ↕	Jun ↕	Jul ↕	Ago ↕	Set ↕	Out ↕	Nov ↕	Dez ↕
1801	-51,549	-29,2005	4419	6196	5772	4778	3838	2834	2386	2657	3400	3655	4789	6166	6563

FONTE: (Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017) – LABREN / CCST / INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)).

ANEXO D – MÉDIA MENSAL DA RADIAÇÃO DIFUSA DIÁRIA EM UMA SUPERFÍCIE HORIZONTAL PARA A CIDADE DE BENTO GONÇALVES

(Wh/m².dia)

Mostrar registros ---- Inserir ID ----
Procurar:

ID ▲	Lon ↕	Lat ↕	Anual ↕	Jan ↕	Fev ↕	Mar ↕	Abr ↕	Mai ↕	Jun ↕	Jul ↕	Ago ↕	Set ↕	Out ↕	Nov ↕	Dez ↕
1801	-51,549	-29,2005	1824	2367	2307	1943	1559	1281	1119	1161	1405	1772	2164	2321	2486

FONTE: (Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017) – LABREN / CCST / INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)).