



CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO
DE UM CONCENTRADOR SOLAR CILINDRICO
PARABÓLICO
PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA RESIDENCIAL**

Fabício Augusto Kroth

Lajeado, novembro de 2016

Fabício Augusto Kroth

**CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO
DE UM CONCENTRADOR SOLAR CILINDRICO
PARABÓLICO
PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA RESIDENCIAL**

Monografia apresentada na disciplina de TCC I, do curso de graduação em Engenharia Química, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Maria Cristina de Almeida Silva

Lajeado, novembro de 2016

RESUMO

Dentre as causas que reforçaram a procura por fontes de energia renováveis, ressaltam-se a crise do petróleo dos anos 70, bem como os problemas ambientais gerados pela queima de combustíveis fósseis. A energia solar teve um grande avanço, tanto em relação à pesquisa, como à utilização, e já é possível encontrar diversos equipamentos para geração de eletricidade, ou mesmo, para o aquecimento de água em prédios e residências. Um exemplo é o concentrador solar cilíndrico parabólico, o qual é utilizado em diversas usinas para geração de energia elétrica de forma sustentável. Este trabalho apresenta o projeto, construção e avaliação de um protótipo deste concentrador para o aquecimento de água residencial, e a sua comparação com um coletor solar de tubos a vácuo de 5 m², encontrado no mercado brasileiro. Primeiramente realizou-se o teste com 500 mL de água pelo período de dez minutos com sistema aberto, obtendo até variação de temperatura de 33,7°C, após com sistema fechado obtendo uma variação de 52,4°C. A temperatura máxima da água obtida no protótipo foi de 65,4°C. Na comparação entre os sistemas o coletor de tubos a vácuo apresentou potência de 1,15 kW enquanto o protótipo apresentou 0,91 kW. A comparação foi realizada pelo sistema de termossifão e a temperatura da água no reservatório de 150 L do protótipo ficou em torno dos 30°C. O custo do protótipo foi de R\$ 520,00, e com a instalação de um sistema de isolamento térmico na tubulação teria a capacidade de aquecer a água a mais de 40°C, fazendo com que o equipamento se tornasse viável para aplicação do aquecimento de água em residências sem o uso de aquecimento externo. Considerando o custo do kWh de R\$ 0,70, o retorno do investimento seria em torno de sete meses.

Palavras-chave: Energia Solar. Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico. Aquecimento de Água.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeito Estufa	12
Figura 2 - Derretimento das Geleiras	13
Figura 3 - Geração de Energia Eólica no mar	16
Figura 4 - Coletor Solar de Placa Plana.....	19
Figura 5 - Coletor Parabólico Composto.....	20
Figura 6 - Painéis Fotovoltaicos	20
Figura 7 – Planta de Geração de Energia a partir de Concentradores Cilíndricos Parabólicos instalada em Nevada, EUA.....	21
Figura 8 - Sistema de Rastreamento de uma Torre de Recepção Central	22
Figura 9 - Captador Solar Parabólico	22
Figura 10 - Concentrador Fresnel.....	23
Figura 11 - Termossifão	25
Figura 12 - Circulação Forçada	26
Figura 13 - Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico.....	27
Figura 14 - Dimensões e Ângulos	28
Figura 15 – Desenho inicial do protótipo projetado, com suas respectivas dimensões (em milímetros).	34
Figura 16 - Ilustração do Projeto	34
Figura 17 - Esquema Coleta de Dados do Protótipo	36
Figura 18 - Esquema para Coleta de Dados da comparação entre o protótipo e o sistema por tubos a vácuo.	37
Figura 19 – Protótipo do concentrador cilíndrico parabólico e suas medidas em milímetros..	40
Figura 20 – Variação da temperatura em função do aumento da radiação no dia 11 de setembro.	43
Figura 21 – Variação da temperatura em relação a velocidade do vento no dia 11 de setembro.	43
Figura 22 - Variação da temperatura em relação a velocidade do vento dia 22 de outubro.....	48
Figura 23 - Variação da temperatura em relação a velocidade do vento dia 30 de outubro.....	48
Figura 24 – Sistema por tubos a vácuo utilizado para comparação dos resultados.....	49
Figura 25 – Sistema utilizado pelo protótipo para comparação dos resultados.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Concentrador do Ângulo de Borda e Desvio Angular.....	29
Tabela 2 - Propriedades Radioativas Solares para Materiais Seleccionados a Temperatura de 300K, com Refletividade e Emissividade expressas em porcentagem.	30
Tabela 3 - Propriedades radioativas solares para materiais seleccionados a temperatura de 300K, com Absortividade e Emissividade Expressas em Porcentagem.	31
Tabela 4 – Dados do protótipo com um registro obtidos no dia 11 de setembro de 2016....	41
Tabela 5 – Variação da temperatura em função da radiação e da velocidade do vento no dia 11 de setembro.	42
Tabela 6 – Protótipo com dois registros no dia 21 de outubro de 2016.	44
Tabela 7 - Variação da temperatura, radiação, velocidade do vento e temperatura ambiente.	45
Tabela 8 - Protótipo com dois registros no dia 22 de outubro de 2016.	45
Tabela 9 - Variação da temperatura, radiação e velocidade do vento para o dia 22 de outubro.	46
Tabela 10 - Protótipo com dois registros no dia 30 de outubro de 2016.	46
Tabela 11 – Variação da Temperatura, radiação e velocidade do vento no dia 30 de outubro.	47
Tabela 12 – Dados obtidos no sistema do protótipo e o sistema de tubos a vácuo no dia 08 de novembro.	51
Tabela 13 - Dados obtidos no sistema do protótipo e o sistema de tubos a vácuo no dia 12 de novembro.	51

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS

CO₂ – Dióxido de Carbono

°C – Graus Célsius

aC – Antes de Cristo

GLP – Gás de Petróleo Liquefeito

R – Raio

C – Corda

c – Semi-corda

A – Arco

F – Flecha

α – Ângulo / Semi-ângulo

f – Foco

π – Pi

θ φ – Grau

ρ – Refletividade

ε – Emissividade

α_s – Absortividade

Q – Vazão

V – Volume

t – Tempo

kWh – Quilowatt-hora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 Objetivos.....	9
1.1.1 Objetivos Gerais	9
1.1.2 Objetivos Específicos	9
1.2 Justificativa	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1 Obtenção de Energia e os Impactos Ambientais	11
2.1.1 O Efeito Estufa.....	12
2.2 Fontes de Energia Renováveis	15
2.2.1 Energia Solar.....	15
2.2.2 Energia Eólica.....	15
2.2.3 Energia Geotérmica	16
2.2.4 Energia das Marés.....	16
2.2.5 Biocombustíveis.....	17
2.3 Avanço da Energia Solar	17
2.4 Equipamentos para Utilização de Energia Solar.....	18
2.4.1 Coletores Planos	19
2.4.2 Coletores Parabólicos Compostos	19
2.4.3 Solar Fotovoltaica	20
2.4.4 Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico	21
2.4.5 Torre de Receptor Central.....	21
2.4.6 Captador Solar Parabólico	22
2.4.7 Concentrador Fresnel.....	23
2.4.8 Coletor Solar de Tubos a Vácuo	23
2.5 Aquecimento de Água em Residências	23
2.5.1 Termossifão	25
2.5.2 Circulação Forçada	25
2.6 Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico	26
2.7 Dimensionamento de um Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico.....	27
2.7.1 Calculo para Determinação do Foco e das Dimensões do Concentrador Cilíndrico Parabólico	27

2.7.2 Determinação do Ângulo de Borda do Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico	28
2.8. Materiais para Revestimento da Superfície Refletora de um Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico.	29
2.9 Materiais para Tubo Absorvedor	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 Dimensionamento do Protótipo	32
3.2 Revestimento	35
3.3 Tubo Absorvedor.....	35
3.4 Construção do Protótipo.....	35
3.5 Coleta de Dados	35
3.6 Viabilidade Economica	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1 Resultados Obtidos para a Análise do Protótipo com Um Registro	41
4.2 Resultados Obtidos para a Análise do Protótipo com Dois Registros	44
4.3 Comparação e Viabilidade Economica do Protótipo	49
5 CONCLUSÃO.....	54
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1 INTRODUÇÃO

A crescente necessidade de energia, provocada após a Revolução Industrial, fez com que as pessoas desfrutassem uma vida mais confortável. Porém, o consumo desenfreado de energia e a não preocupação com o meio ambiente, gerou um aumento acima do normal na concentração de dióxido de carbono (CO_2), devido à queima de combustíveis fósseis. Além disso, a utilização destes combustíveis também acarretou a degradação dos recursos naturais, sendo o principal responsável pelo efeito estufa.

Cientes dos problemas causados pelo efeito estufa, muitos países assinaram tratados em que são obrigados a se adequar às normas ambientais relacionadas à diminuição da emissão de gases de efeito estufa, bem como a pesquisar e utilizar novas fontes de energia menos poluidoras, ou renováveis. A intenção dos países em frear suas emissões de gases de efeito estufa fez com que houvessem incentivos fiscais e em pesquisas para fontes de energias renováveis, como a energia eólica, energia das marés, energia solar, energia geotérmica e biocombustíveis.

A utilização da energia solar, para facilitar atividades humanas, é utilizada desde os antigos. Contudo, o seu crescimento tecnológico avançado acontece, aproximadamente, nos últimos 150 anos, o qual foi impulsionado a partir de meados dos anos 70 devido à crise energética sofrida na época, fortalecendo a busca por novas fontes de energia, não derivadas do petróleo.

São utilizadas fontes alternativas de energia, como por exemplo a energia solar, gerada em usinas solares, as quais geram menos impactos ao ambiente, por utilizarem a energia provinda do sol, tendo apenas o impacto ao ambiente de sua construção. Também há a utilização da energia provinda do sol para geração de vapor para indústrias, painéis fotovoltaicos, para geração direta de energia elétrica, que também é utilizada em escala industrial. Recentemente, com a baixa no custo dos painéis, estes são encontrados em residências com maior frequência.

Outra utilização da energia solar, e talvez a mais encontrada, é o aquecimento de água em residências e hotéis a partir de placas planas. Neste processo, depois de aquecida, a água é armazenada em um reservatório para sua posterior utilização. A aplicação desta tecnologia gera uma economia significativa em relação à energia elétrica, pois a utilização de resistências ou gás para aquecimento de água gera um consumo relativamente alto de energia.

O seguinte trabalho apresenta o projeto, construção e avaliação de um concentrador solar cilíndrico parabólico para o aquecimento de água residencial, em comparação com um modelo de aquecedor solar disponível no mercado. O concentrador utilizará materiais facilmente encontrados e com custo inferior aos já comercializados. Este tipo de concentrador solar possui uma ampla utilização em plantas solares para geração de vapor, energia elétrica, ou até mesmo, em aplicações industriais.

O concentrador solar cilíndrico parabólico tem como características o seu formato cilíndrico parabólico, com revestimento reflexivo, e em sua linha focal está localizado um tubo absorvedor, pelo qual passa o fluido a ser aquecido. É indicado para aquecimento de fluidos a temperaturas de até 400°C.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo projetar, construir e avaliar um protótipo de um concentrador solar cilíndrico parabólico, de baixo custo, para o aquecimento de água em residências, comparando-o com ao menos um dos modelos de aquecedores solares encontrados no mercado nacional.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Dimensionar geometricamente e definir as condições operacionais de um concentrador cilíndrico parabólico;
2. Construir um protótipo do concentrador solar.
3. Avaliar a viabilidade econômica da instalação do protótipo para o aquecimento de água em residências, comparando-o com os atuais modelos de aquecedores solares encontrados no

mercado, e realizar o levantamento de dados com ao menos um sistema já utilizado, para comparação de aplicabilidade e custos.

1.2 Justificativa

O aproveitamento da energia solar em substituição a energia elétrica, para a redução de custos e a diminuição de impactos ambientais, torna a elaboração de trabalhos relacionados à energia solar muito interessante, ainda mais, tendo-se em vista a pouca pesquisa encontrada nesta área no Brasil.

A utilização de um concentrador solar de calha parabólica possui um grande potencial, pois podem ser utilizados materiais de baixo custo, apresentando um bom rendimento. Já que o mesmo é comumente utilizado para geração de energia elétrica através da geração de vapor da água, esperam-se bons resultados no seu aproveitamento para aquecimento de água residencial.

Além disso, este trabalho permitirá a aplicação de diversos conhecimentos obtidos ao longo da graduação no curso de Engenharia Química, dentre eles: propriedades dos materiais utilizados, trocas térmicas, transferências de massas, entre outros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

No referencial teórico serão levantados dados sobre os atuais problemas ambientais gerados pela queima de combustíveis fósseis, bem como a apresentação de algumas alternativas para geração de energia com fontes alternativas e renováveis citadas pela literatura. O maior enfoque será dado ao avanço da energia solar, os equipamentos utilizados, a sua aplicação para aquecimento de água em residências e detalhes sobre o concentrador cilíndrico de calha parabólica.

2.1 Obtenção de Energia e os Impactos Ambientais

A necessidade de suprir os requerimentos energéticos da sociedade, como transporte, aquecimento e refrigeração, faz com que seja produzida cada vez mais energia. O atual sistema energético mundial é fortemente dependente de combustíveis fósseis (GOLDEMBERG, 2012). Em 2014, o consumo mundial de petróleo totalizou 92,1 milhões de barris/dia, totalizando um aumento de 0,9% em comparação ao ano de 2013 (ANP, 2015).

Este crescente aumento no consumo energético se deu após a Revolução Industrial, e principalmente no século XX, em que houve grande aumento populacional e do consumo *per capita*, em especial em países industrializados. Nesta época, a preocupação com o crescimento econômico e tecnológico não considerava os impactos causados para obtenção da energia necessária para tal quantidade de energia requerida (GOLDEMBERG, 2012).

Hoje em dia, os impactos gerados para geração de energia são alvos de discussões internacionais, a fim de diminuir ou reverter os impactos ambientais, especialmente relacionados ao efeito estufa. A ameaça da ocorrência de mudanças climáticas, provocadas pelo aumento da temperatura global, é o maior desafio ambiental a ser enfrentado. Este problema coloca em risco a estabilidade social e econômica mundial, pois podem haver profundas

mudanças na disponibilidade de recursos naturais e na forma em que a energia é produzida (TESKE, et al., 2010).

O efeito estufa e as principais fontes de emissão de gases que o geram serão abordados a seguir no texto.

2.1.1 O Efeito Estufa

A atmosfera é composta por diversos gases, principalmente nitrogênio e oxigênio, em que o somatório da concentração de ambos totaliza 99%. Além destes, outros gases estão presentes em pequenas quantidades, alguns conhecidos como gases de efeito estufa. Entre os mesmos, destacam-se o CO₂, ozônio, metano e óxido nitroso, e também o vapor da água. Estes gases recebem tal denominação por terem capacidade de absorver calor (CARDOSO, 2006).

O efeito estufa é um fenômeno natural existente na superfície terrestre. Contudo, após a Revolução Industrial, tem sido intensificada a sua ocorrência, pois as atividades antrópicas exalam cada vez mais gases de efeito estufa, principalmente o CO₂ (SUGUIO, 2008).

A Figura 1 demonstra o esquema do efeito estufa. Com o aumento da concentração dos gases e a quantidade de radiação absorvida por estes, é gerado o aquecimento da superfície terrestre e da atmosfera.

Figura 1 - Efeito Estufa



Fonte: EXPLICATÓRIUM, 2016.

Muitas são as discussões a respeito do CO₂, metano e o óxido nitroso. No entanto, a maior atenção está no CO₂, devido ao volume de suas emissões para atmosfera corresponderem

a aproximadamente 55% do total de emissões de gases do efeito estufa e também pela sua permanência na atmosfera, de no mínimo 100 anos (CARDOSO, 2006).

Em países desenvolvidos, os seres humanos têm consumido grandes quantidades de petróleo e carvão mineral para poder desfrutar de uma vida confortável. São exaladas na atmosfera, devido à queima de combustíveis fósseis, cerca de 20 bilhões de toneladas anuais de CO₂. O desmatamento, acompanhado de decomposição de matéria orgânica no solo, libera por ano 7 bilhões de toneladas de CO₂. Em média, 6 bilhões de habitantes exalam 2 bilhões de toneladas de CO₂ pela respiração (SUGUIO, 2008).

Estima-se que teor deste gás, atinja até o final do século 550 ppm. Este aumento poderá acarretar aumento de o aumento da temperatura terrestre, desencadeando uma sequência de fatos que irão interferir na subsistência dos seres vivos. Um dos problemas do aquecimento global é o descongelamento das geleiras, que acaba gerando um aumento no nível do mar, e a possível inundação de diversas cidades, principalmente litorâneas (RODRIGUES, 2012).

A Figura 2 evidencia o derretimento excessivo de uma geleira localizada no Alasca, em um período inferior a 100 anos.

Figura 2 - Derretimento das Geleiras



Fonte: CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM FOCO, 2016.

Entre os anos de 1929 a 1999, houve um aumento de 0,6°C na temperatura da superfície do globo. Os níveis de CO₂ aumentaram de 280 partes por milhão, antes da revolução industrial, para 360 partes por milhão (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL, 1999). Em 2015, a concentração atingiu a marca de 400 partes por milhão de CO₂ na atmosfera (NASA, 2016).

Desta forma, percebeu-se que deveriam ser tomadas atitudes para conter os crescentes níveis de CO₂. Em 1998, foi instituído o Protocolo de Quioto, que incluiu países responsáveis por pelo menos 55% das emissões totais de CO₂ em 1990 (MAGNOLI, 2008).

Os países que assinaram o Protocolo de Quioto se comprometeram em reduzir as emissões de gases de efeito estufa, a fim de promover o desenvolvimento sustentável, crescendo de maneira econômica, mas garantindo a preservação ambiental e social para as futuras gerações. Os Países devem implementar e/ou apropriar as políticas e medidas de acordo com as circunstâncias nacionais, tais como (MAGNOLI, 2008):

- Aumento da eficiência energética em setores relevantes da economia nacional;
- A proteção e o aumento de sumidouros e reservatórios de gases de efeito estufa não controlados, levando em conta compromissos assumidos em acordos internacionais relevantes sobre o meio ambiente, bem como a promoção de práticas sustentáveis de manejo florestal, florestamento e reflorestamento;
- A promoção de formas sustentáveis de agricultura à luz das considerações sobre mudanças do clima;
- A pesquisa, promoção, desenvolvimento e o aumento do uso de formas novas e renováveis de energia, de tecnologias de sequestro de CO₂ e de tecnologias ambientalmente seguras, que sejam avançadas e inovadoras;
- Redução gradual ou eliminação de imperfeições de mercado, de incentivos fiscais, de isenções tributárias e tarifárias e de subsídios para todos os setores emissores de gases do efeito estufa que sejam contrários ao objetivo da Convenção e aplicação de instrumentos de mercado;
- Medidas para limitar e/ou reduzir as emissões de gases do efeito estufa no setor de transportes;
- A limitação e/ou redução de emissões de metano por meio de sua recuperação e utilização no tratamento de resíduos, bem como na produção, no transporte e na produção de energia.

Os incentivos às novas fontes de energia resultaram na pesquisa e implementação de inovações nas formas de geração de energia. Passou-se a ter muito interesses nestas energias, como a energia solar, energia eólica, energia geotérmica, energia das marés e biocombustíveis (GOLDEMBERG, 2012).

2.2 Fontes de Energia Renováveis

Há uma ampla variedade de tecnologias para produzir eletricidade a partir de fontes renováveis, as principais são: energia solar, energia eólica, energia geotérmica, energia das marés e biocombustíveis.

2.2.1 Energia Solar

A energia solar incidente sobre a superfície da terra é superior a cerca de 10000 vezes a demanda bruta de energia atual da humanidade. Porém, a baixa densidade (energia/área), a sua variação geográfica e temporal representam grandes desafios técnicos para a sua utilização direta em larga escala. Na busca do aproveitamento da energia solar, diversas tecnologias vêm sendo estudadas, com destaque para a conversão fotovoltaica e térmica e a arquitetura bioclimática, aproveitando elementos arquitetônicos para aproveitar o clima local, fornecendo conforto e economia de energia (GALDINO et al., 2000).

As projeções da área energética dos países desenvolvidos alertam o esgotamento, encarecimento progressivo e impactos ambientais dos combustíveis fósseis, bem como do grande risco, no caso da energia nuclear. O cálculo tradicional do custo da energia elétrica gerada por fontes convencionais não incorpora a substancial parcela decorrente de seus impactos ambientais, pois são repassados para toda a sociedade. O aprofundamento das discussões sobre questões de energia e meio ambiente favorecerá o investimento em energia solar (CARVALHO e CRAVEIRO, 2006).

O Brasil tem uma vantagem significativa sobre os países desenvolvidos no que tange a utilização de energia solar, pois se localiza em uma faixa de latitude na qual a incidência de radiação solar é muito maior que naqueles países (GALDINO et al., 2000).

2.2.2 Energia Eólica

Aparentemente simples, a tecnologia de produção de eletricidade eólica é consideravelmente sofisticada, com grandes desenvolvimentos nas áreas de controle, aerodinâmica e de materiais. Velocidades e direções variáveis no rotor e pás com diferentes ângulos permitem que o rotor gire com uma velocidade ótima a uma ampla faixa de condições

de vento, aumentando a produção de energia, reduzindo a fadiga do material e os custos de manutenção (GOLDEMBERG, 2012).

A Figura 3 apresenta a geração de energia eólica no mar, em que a ação do vento faz com que as pás do cata-vento girem. A energia mecânica gerada pelo movimento das pás é posteriormente transformada em energia elétrica e transportada para a rede.

Figura 3 - Geração de Energia Eólica no mar



Fonte: IGUI, 2016.

2.2.3 Energia Geotérmica

A energia geotérmica é a que atinge a superfície da Terra pela condução de calor proveniente do seu interior. A Terra é um enorme reservatório de energia térmica, porém, grande parte desta energia está distribuída de maneira difusa ou em profundidades muito grandes, inacessíveis para ser considerada uma fonte prática de energia (GOLDEMBERG, 2012).

A evolução da utilização da geotermia para geração de energia elétrica a nível mundial foi lenta e se caracterizou pela construção de pequeno número de unidades em (ANATEL apud ARBOIT, 2013).

2.2.4 Energia das Marés

A energia provinda do fenômeno das marés decorre da influência das forças gravitacionais exercidas principalmente pela lua e também pelo sol sobre os oceanos. Quando a lua está sobre um determinado ponto do mar ou do litoral, a um ângulo de 0 ou de 180 graus, há a maré alta. Já quando está posicionada a 90 ou 270 graus desse ponto, haverá maré baixa.

Este ciclo é repetido a cada 6 horas e 12 minutos. Dependendo das condições da região litorânea, podem provocar grandes variações de nível entre as marés e também elevadas correntes, que serão utilizadas para gerar energia elétrica (TAVARES, 2005).

2.2.5 Biocombustíveis

A maior motivação para o uso de biocombustíveis é seu potencial de reduzir a emissão de gases de efeito estufa de uma forma sustentável. A produção mundial de biocombustíveis é dada a partir da produção de etanol a partir de açúcares ou amidos e biodiesel de óleos vegetais ou gordura animal (LEITE e LEAL, 2007).

Os biocombustíveis são combustíveis produzidos a partir da biomassa, ou seja, de produtos vegetais ou compostos de origem animal. Os biocombustíveis são biodegradáveis, por isso provocam menos impacto à natureza. Essas fontes são renováveis, pois podem se recompor em um ritmo capaz de suportar sua utilização sem restrições ou risco de esgotamento (PETROBRAS apud NETTO e LEAL, 2012).

2.3 Avanço da Energia Solar

Cerca de 150 anos após à Revolução Industrial, os impactos ambientais de origem antropogênica se tornaram comparáveis aos causados por efeitos naturais. Em 2012, as 6 bilhões de pessoas que habitavam a Terra consumiram em torno de 48 bilhões de toneladas de recursos minerais. Como resultado, novos tipos de problemas no campo ambiental estão sendo verificados. O consumo de energia é a principal origem de grandes partes dos impactos ambientais encontrados, principalmente causados pela emissão de gases de efeito estufa, que ocorre pela queima de combustíveis fósseis (GOLDEMBERG, 2012).

A crise do petróleo ocorrida em 1973, obrigou o homem a buscar novas fontes de energia renováveis. Nesta época o governo se mostrou preocupado, e começou a investir em pesquisas que procurassem a solução para a falta do petróleo, amplamente utilizado para geração de energia. Os investimentos empregados na tentativa de utilizar métodos naturais renováveis para geração de energia, ainda são muito inferiores aos necessários (AMALFI, 2005).

Muitos cientistas acreditam que a energia solar se tornará a mais importante a longo prazo, pois diferente das outras fontes alternativas de energia, o sol está presente em toda parte. Existem muitos métodos diferentes de conversão da energia solar em formas mais funcionais

de energia térmica ou elétrica. Dentre esses, destacam-se os sistemas ativos, os quais coletam, concentram, processam e convertem a luz do sol em um nível mais elevado de energia. A energia solar é bastante utilizada para aquecimento de água em residências e piscinas. Esta água, após ser aquecida, é encaminhada a um reservatório, ficando a disposição para ser empregada nas atividades cotidianas, diminuindo a utilização de resistências elétricas ou de sistemas a gás (WALISIEWICZ, 2008).

No Sol, a irradiação é de cerca de 63 MW/m^2 , mas a geometria Sol-Terra diminui drasticamente o fluxo de energia solar para cerca de 1 kW/m^2 na superfície da Terra. No entanto, esta desvantagem pode ser superada com a utilização de sistemas solares de concentração, que transformam a energia vinda do sol, em energia térmica. Estes sistemas são classificados devido a sua geometria: sistemas de foco de ponto, receptor central e antenas parabólicas, ou focos de linha concentradores, coletores parabólicos e linear (GOLDEMBERG, 2012).

2.4 Equipamentos para Utilização de Energia Solar

Experimentos visando a utilização da energia solar datam de tempos remotos. Registros mostram que Herão de Alexandria, no século I, havia construído um dispositivo para bombeamento de água, a partir de uma fonte térmica, com o auxílio do calor emanado pelo sol (AMALFI, 2005).

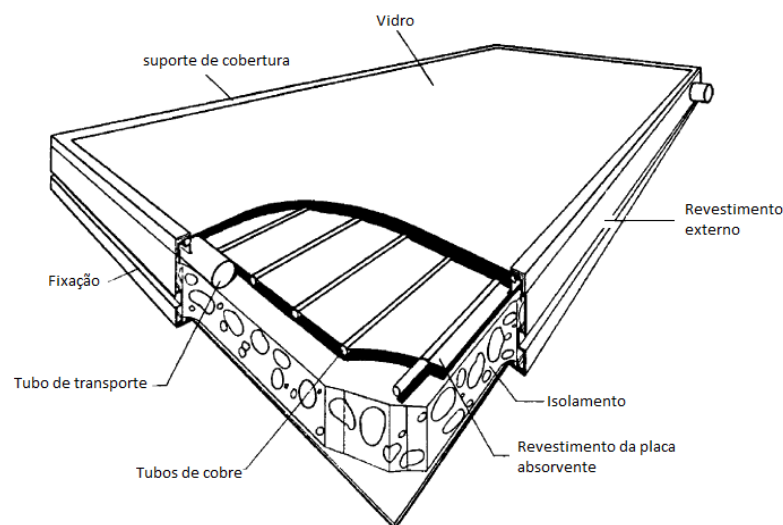
As primeiras notícias de coletores solares são atribuídas a Arquimedes, no ano de 212 aC., que fez uso da energia solar para acender fogueiras com o uso de lentes convergentes, que permitiam a convergência do feixe luminoso em um determinado ponto. Em 1615, Salomon de Caux, engenheiro francês, construiu uma caldeira solar, sendo esta a primeira notícia de conversão de energia solar em energia mecânica. No início do século XIX, surgiram efetivamente as primeiras aplicações em grande escala da energia solar (AMALFI, 2005).

O uso da energia solar teve um grande impulso nos anos 70, devido à crise energética, e também com o aumento extraordinário consumo de energia e suas poluições geradas nas últimas três décadas, (SOUZA, 2008). Nesta época, pesquisas foram realizadas para elaboração de equipamentos mais eficientes e mais baratos, conforme os sistemas apresentados a seguir.

2.4.1 Coletores Planos

O coletor solar de placa plana, conforme a Figura 4, tem seu funcionamento baseado na radiação solar que passa através de uma tampa transparente de vidro, colidindo na superfície de um absorvedor de alta absorvidade. Grande parte da energia é absorvida pela placa e, em seguida, transferida para o meio de transporte por tubos, para ser utilizado ou armazenado (KALOGIROU, 2004).

Figura 4 - Coletor Solar de Placa Plana



Fonte: Adaptado pelo Autor com base em KALOGIROU, 2004.

Os tubos de transporte são ligados nas extremidades, e a tampa transparente de vidro é utilizada para reduzir as perdas de convecção a partir da placa absorvente. A camada de ar entre o vidro e a placa absorvente ajuda a reduzir as perdas por radiação (KALOGIROU, 2004).

2.4.2 Coletores Parabólicos Compostos

O coletor parabólico composto tem características apropriadas para uma faixa de temperatura de até 240°C. Este coletor concentra a radiação solar de uma forma ideal máxima. Este coletor é iluminado em ambas as faces, o que torna toda a sua superfície útil para a absorção conforme a Figura 5 (BRANDÃO, 2004).

Figura 5 - Coletor Parabólico Composto



Fonte: WAYSE, 2016.

2.4.3 Solar Fotovoltaica

A perspectiva de geração elétrica com painéis fotovoltaicos é promissora, e no ano de 2006 havia cerca de 6 GW de potência instalados no mundo, em 2010 estima-se que tenha alcançado 14 GW. As limitações desta tecnologia são o seu custo, pouca eletricidade produzida e a falta de silício no mercado (GOLDEMBERG, 2012).

A Figura 6 apresenta painéis fotovoltaicos utilizados para geração de energia direta.

Figura 6 - Painéis Fotovoltaicos



Fonte: SANTARITA, 2016.

No Brasil, no ano de 2016, a potência total instalada é de aproximadamente 27 GW (ANEEL, 2016).

A tecnologia fotovoltaica se baseia na absorção da radiação solar pelas células fotovoltaicas, e a sua conversão direta em energia elétrica, sem um processo intermediário. Existem diversos materiais que podem ser utilizados na fabricação das células fotovoltaicas. As

placas mais habitualmente comercializadas são feitas com silício cristalino (BRIBIÁN et al., 2008).

2.4.4 Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico

As primeiras plantas de concentradores solares começaram a operar na década de 80 nos Estados Unidos. Estes coletores permitem o aquecimento de fluidos até temperaturas de 400°C. São coletores com geometria cilíndrica parabólica e revestidos por um material refletor. Ao longo da linha de foco do coletor é colocado um tubo metálico preto, chamado de receptor. Quando a parábola está apontada para o sol, os raios diretos são refletidos pela superfície da parábola e concentrados no tubo receptor, fazendo com que o fluido que circula dentro do tubo seja aquecido (MALGUETA, 2012).

A Figura 7 demonstra uma planta com concentradores solares cilíndricos parabólicos instalada em Nevada, EUA.

Figura 7 – Planta de Geração de Energia a partir de Concentradores Cilíndricos Parabólicos instalada em Nevada, EUA.



Fonte: ENERGÍAS PERSPECTIVAS ENERGÉTICAS, 2016.

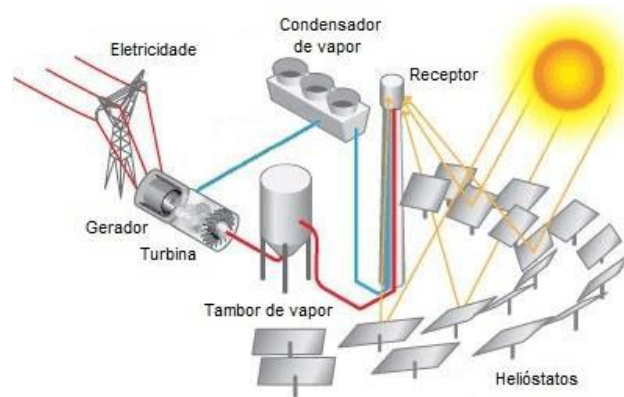
2.4.5 Torre de Receptor Central

O sistema de torre de receptor central se baseia em um campo de helióstatos que se movem independentemente e são capazes de rastrear o sol em dois eixos, direcionando a

radiação solar na direção do receptor central que se localiza no topo da torre próxima ao campo (BIANCHINI, 2013).

A Figura 8 demonstra o esquema do sistema de rastreamento utilizado.

Figura 8 - Sistema de Rastreamento de uma Torre de Recepção Central



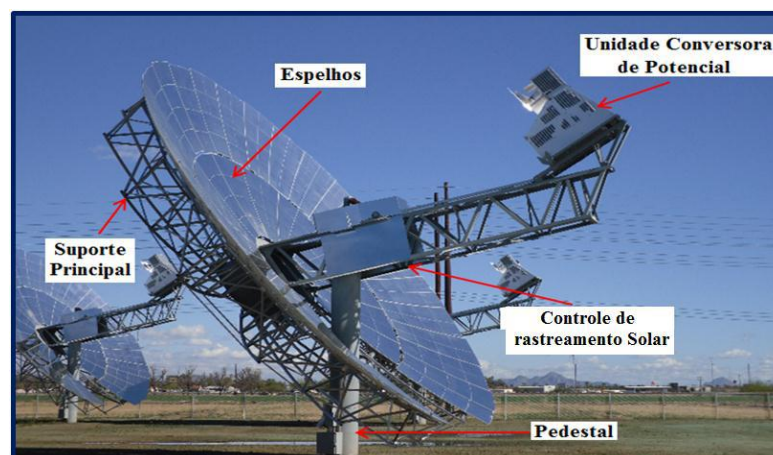
Fonte: ENERGY.GOV. 2016.

2.4.6 Captador Solar Parabólico

O sistema captador solar parabólico alcançou a maior eficiência de conversão de energia solar em energia elétrica dentre as tecnologias solar térmicas, com valores entre 29% e 30%. É utilizado para gerar energia elétrica através de um motor *Stirling*, sem o consumo de água. O grande problema apresentado por esta tecnologia se encontra no alto custo de seus componentes (CASTELLANOS, 2012).

A Figura 9 apresenta os elementos de um sistema captador solar parabólico.

Figura 9 - Captador Solar Parabólico



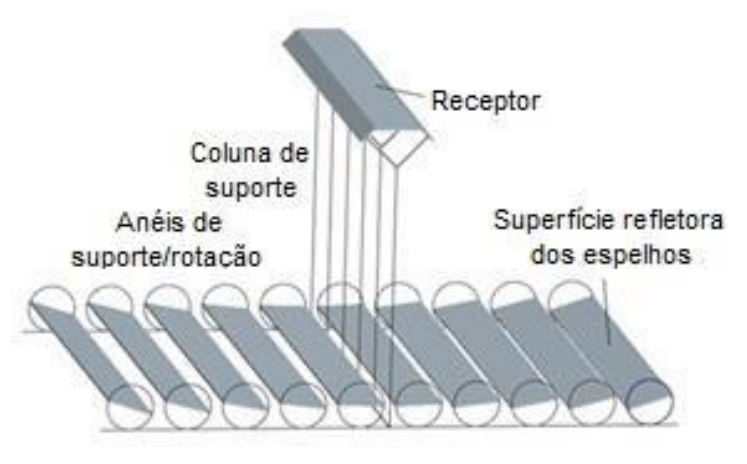
Fonte: CASTELLANOS, 2012.

2.4.7 Concentrador Fresnel

Os refletores lineares Fresnel se aproximam da forma de um coletor solar cilíndrico parabólico, porém são utilizadas longas fileiras de refletores no nível do solo, que refletem os raios na direção de um receptor linear central, fixado acima da torre de espelhos. Estes podem apresentar um sistema de rastreamento do sol nos refletores (BIANCHINI, 2013).

A Figura 10 apresenta um esquema de concentradores Fresnel.

Figura 10 - Concentrador Fresnel



Fonte: BIANCHINI, 2013.

2.4.8 Coletor Solar de Tubos a Vácuo

Os coletores solares de tubos a vácuo, visam diminuir as perdas térmicas, utilizando o vácuo em seu interior e em consequência disso aumentar a temperatura final do fluido. O sistema é composto por uma série de tubos, cada um com um absorvedor, o que faz com que a radiação solar incida perpendicularmente em sua superfície ao longo de quase todas as horas de sol. Estes equipamentos são utilizados em pré-aquecimento industrial, refrigeração solar e geração de energia térmica para aquecimento de água (ENVIRO-FRIENDLY, 2015).

2.5 Aquecimento de Água em Residências

Existem diversas formas de se aproveitar a energia solar para reduzir custos da conta de eletricidade. A forma mais utilizada é a transformação da energia solar em calor, para o

aquecimento da água a ser utilizada em chuveiros e piscinas (ALTOÉ, OLIVEIRA E CARLO, 2012).

Quase metade da energia elétrica gasta no Brasil é destinada a edifícios residenciais, comerciais e públicos, sendo uma grande parte gasta para o aquecimento de água, principalmente em chuveiros elétricos. Foi constatada que a utilização de um aquecedor solar na residência gera uma redução de aproximadamente 36% no consumo de energia elétrica. Além disso, é comum a instalação de um chuveiro elétrico junto aos coletores solares. A partir de sua utilização foi verificado que, em dias em que a radiação solar não é suficiente para o aquecimento de água do chuveiro, se obteve uma redução de 70% de energia elétrica neste local (ALTOÉ, OLIVEIRA E CARLO, 2012).

O uso de aquecedores solares pode evitar a utilização de diversas fontes convencionais de produção de energia. Como exemplo, para cada metro quadrado (m^2) de coletor solar instalado, podem ser economizados anualmente 55 kg de gás de petróleo liquefeito (GLP), ou 66 litros de diesel, ou 215 kg de lenha, ou evitar a inundação de cerca de 56 m^2 de terras para geração de energia elétrica (CARVALHO, 2013).

Os fatores mais importantes a serem considerados quando se investe em uma nova forma de energia são a redução do consumo de recursos naturais e o retorno sobre o investimento realizado. Conforme estudo realizado por Oliveira et al. (2008), em que foi analisada a possibilidade da substituição de chuveiros convencionais por aquecedores solares, verificou-se que o tempo de recuperação do investimento é, em média, 12,6 meses. A partir deste período, a economia se tornaria vantajosa, pois esse sistema de aquecimento de água tem um baixo custo de manutenção.

Como a energia solar que incide sobre a superfície terrestre é de baixa densidade, o atendimento de uma residência pode requerer a instalação de uma grande área com coletores. Para o suprimento de água quente de uma residência, com 3 ou 4 moradores, são necessários em média 4 m^2 de coletores (CARVALHO, 2013).

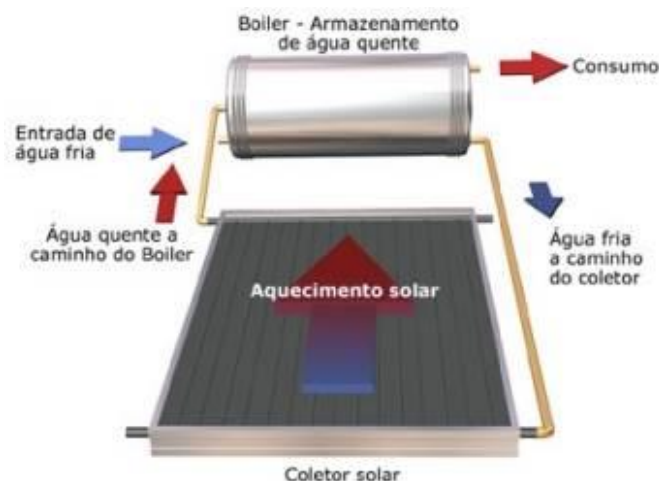
Existem diversos coletores solares utilizados para o aquecimento de água. Os habitualmente utilizados em residências são os coletores planos e os coletores concentradores parabólicos (MUND, 2014). Já os sistemas de aquecimento podem ser de circulação por termossifão ou pela circulação forçada.

2.5.1 Termossifão

É o sistema mais utilizado a âmbito nacional para o sistema solar de aquecimento de água. Neste sistema, o depósito deve estar localizado acima do coletor. O fluido é empregado em diferentes temperaturas, que permitem a variação de suas densidades, ou seja, com o seu aquecimento, maior será a sua temperatura e menor a sua densidade. Desta forma, há uma tendência de separação do fluido quente na parte superior, e do fluido frio na parte inferior (MUND, 2014).

A Figura 11 apresenta o esquema de funcionamento do sistema de termossifão.

Figura 11 - Termossifão



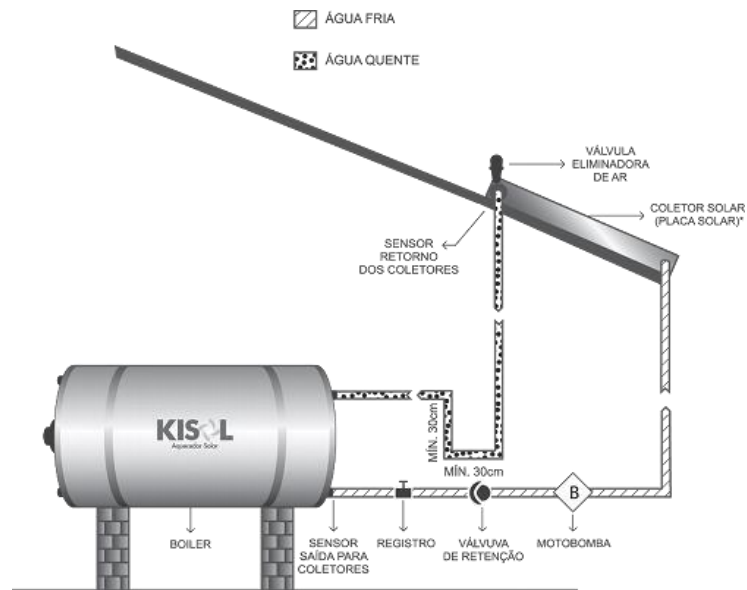
Fonte: PAINÉIS SOLARES, 2016.

2.5.2 Circulação Forçada

Em situações em que não é possível a colocação do depósito de água acima dos coletores solares, é necessária a utilização de uma bomba para movimentação do fluido térmico, e de um sistema de controle automático para a sua ativação. Estes sistemas são compostos por um coletor solar, depósito acumulador, bomba eletrocirculadora, controlador diferencial, purgador, vaso de expansão, entre outros acessórios (CARVALHO, 2013).

A Figura 12 demonstra um sistema de circulação forçada.

Figura 12 - Circulação Forçada



Fonte: KISOL, 2016.

2.6 Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico

O coletor solar concentrador utiliza sistemas óticos, capazes de aumentar a intensidade da radiação antes que os raios atinjam a superfície absorvedora. O sistema utiliza superfícies concentradoras que refletem a radiação solar no seu eixo, onde um tubo absorvedor recebe esta energia e a transfere ao fluido a ser aquecido que se encontra dentro do tubo (SOUZA, 2008).

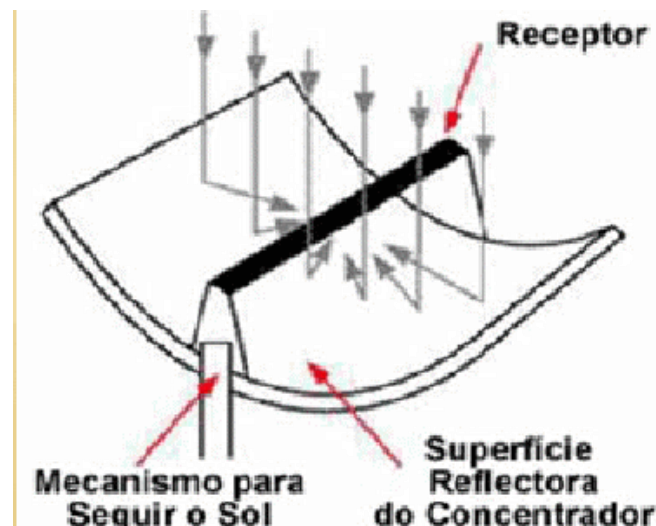
Este concentrador pode conter sistema para rastrear o sol e ter maior eficiência, atingindo temperaturas mais constantes durante o período de insolação. Já a escolha do sentido do concentrador se faz de acordo com a melhor utilização do terreno, entre duas configurações: no eixo Leste-Oeste ou no eixo Norte-Sul. Na configuração Norte-Sul, o concentrador realiza um rastreamento quase completo no verão, e no inverno, sua efetividade é reduzida devido ao sombreamento mútuo. Já na configuração Leste-Oeste, o movimento do coletor se torna mais complexo, devido ao deslocamento aparente do sol ser muito mais acentuado, mas apresenta menos problemas com as sombras (SALVADORETTI, 1983).

O concentrador cilíndrico de calha parabólica se destaca dentre os outros por apresentar uma simplicidade construtiva, possui foco axial e espelho contínuo. Este concentrador possui uma superfície refletora em forma de um cilindro de secção de reta parabólica, e no seu foco se encontra o absorvedor, este sendo um tubo metálico de secção circular. Sua superfície externa possui revestimento que aumenta a capacidade de absorver a radiação nele incidente. Este tubo

absorvedor ainda pode ser envolto por uma cobertura transparente, com o intuito de diminuir as perdas térmicas (SALVADORETTI, 1983).

A Figura 13 apresenta os detalhes de um concentrador cilíndrico de calha parabólica.

Figura 13 - Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico



Fonte: PALS, 1981.

2.7 Dimensionamento de um Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico

Os parâmetros principais considerados no dimensionamento de um coletor cilíndrico de calha parabólica são a determinação do raio a ser utilizado, sendo que o tubo absorvedor se localiza no seu foco, bem como o ângulo de abertura da calha cilíndrica.

2.7.1 Cálculo para Determinação do Foco e das Dimensões do Concentrador Cilíndrico Parabólico

Como o concentrador cilíndrico de calha parabólica possui propriedades óticas iguais às de espelhos esféricos côncavos, pode-se calcular o foco onde se localizará a partir da Equação (1), ou seja, na metade do raio desejado (HALLIDAY, 2012).

$$R = \frac{f}{2} \quad (1)$$

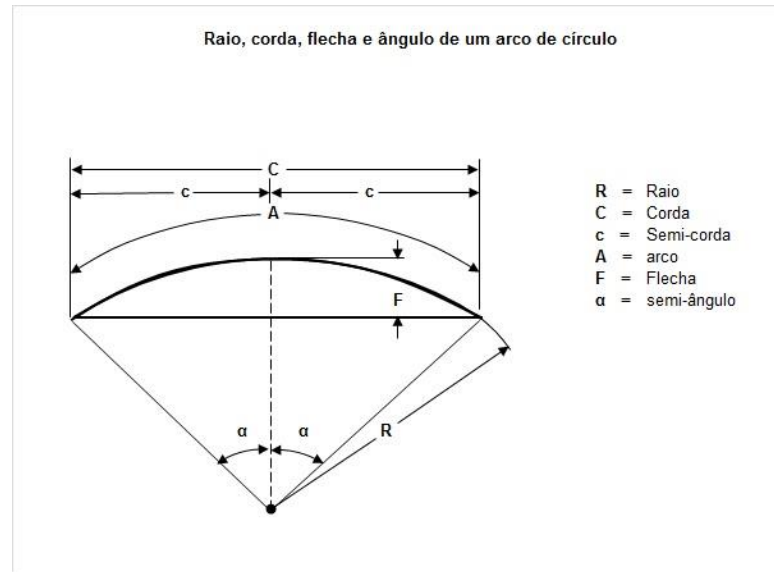
Sendo,

R = Raio

f = Foco

Para determinação das dimensões e ângulos, podem-se utilizar as seguintes equações baseadas na Figura 14.

Figura 14 - Dimensões e Ângulos



Fonte: CALDNAZZA, 2016.

$$F = R - (R \cdot \cos \alpha/2) \quad (2)$$

$$C = 2 \cdot R \cdot \sin (\alpha/2) \quad (3)$$

$$A = \frac{(\alpha \cdot \pi \cdot R)}{180^\circ} \quad (4)$$

2.7.2 Determinação do Ângulo de Borda do Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico

KANDLIKAR, VIJ (1978), elaboraram um estudo comparativo sobre os valores de ângulo de borda (θ_r) e do desvio, obtendo a Tabela 1. Foi observado que para qualquer desvio, a máxima concentração ocorre para um ângulo de borda de 70° .

Tabela 1 - Concentrador do Ângulo de Borda e Desvio Angular

φ (grau)	1	2,5	5	7,5
θ_r (grau)				
90	17,70	7,06	3,28	2,21
80	18,70	7,39	3,57	2,31
70	19,10	7,50	3,60	2,33
60	18,60	7,32	3,54	2,27
50	17,70	6,88	3,30	2,11
40	16,00	6,00	2,82	1,77
30	13,90	5,10	2,36	1,44
20	9,80	3,66	1,60	1,06

Fonte: KANDLIKAR E VIJ, 1978.

A concentração máxima de um concentrador bidimensional é dada pelo ângulo de 90°, o qual é o ângulo teórico de maior concentração possível (ROLIM, FRAIDENRAIN E VILELA, 2012).

Rolim (2007) realizou um estudo comparando a melhoria da concentração e o aumento do comprimento do espelho de um coletor parabólico linear. O autor observou que, a partir de 70° até 90°, existe um ganho de apenas 5% na concentração, contra um aumento de 32% no comprimento do espelho.

A escolha do ângulo em torno de 70° se mostra adequado para protótipos, principalmente pela redução significativa dos efeitos do vento sobre o coletor (ROLIM, FRAIDENRAIN E VILELA, 2012).

2.8. Materiais para Revestimento da Superfície Refletora de um Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico.

Um concentrador solar que reflete a radiação solar terá que possuir revestimento de superfície refletora com alta refletividade. A refletividade de uma superfície depende do ângulo da radiação incidente e do seu comprimento de onda, além de outros fatores, como o polimento da superfície (KEMPFER, 2011).

A tabela 2 apresenta alguns materiais possíveis de serem utilizados para construção de um concentrador solar, considerando a refletividade (ρ_s) e a emissividade para radiação (ϵ).

Tabela 2 - Propriedades Radioativas Solares para Materiais Seleccionados a Temperatura de 300K, com Refletividade e Emissividade expressas em porcentagem.

Descrição/Componente	Refletividade (ρ_s)	Emissividade para radiação (ϵ)
Alumínio		
Polido	0,91	0,03
Anodizado	0,86	0,84
Revestido de quartzo	0,89	0,37
Folha	0,85	0,05
Tintas		
Branca, Óxido de zinco	0,84	0,93
Branca, acrílica	0,74	0,90

Fonte: INCROPERA, 2011.

O material a ser escolhido considera as propriedades descritas na tabela, além de custo, facilidade de obtenção e fabricação.

2.9 Materiais para Tubo Absorvedor

O absorvedor é em geral um tubo metálico de seção circular, e sua superfície externa é tratada de modo a absorver a radiação nele incidente. O absorvedor ainda pode ser envolto por um tubo de vidro ou outro material transparente que funciona como cobertura, cuja função é minimizar as perdas térmicas (SALVADORETTI, 1983).

Apesar de haver materiais como o quartzo fundido, ou vidro com baixo conteúdo de ferro e lucite, o material mais utilizado para construção de protótipos é o vidro comum, pelo baixo custo. A transmitância de um vidro comum de 3 mm de espessura equivale a 0,79, o que significa que 79% da irradiação que atinge o vidro será transmitido através dele. O tubo metálico deve apresentar uma alta condutividade térmica, como o cobre ou alumínio. Além disso o tubo pode ser revestido por um material que possua uma maior absorvidade de radiação, para que se possa obter um aproveitamento máximo da radiação que atinge o tubo (KEMPFER, 2011).

A tabela 3 apresenta materiais para o revestimento do tubo absorvedor, baseado na absorvidade do material (α_s).

Tabela 3 - Propriedades radioativas solares para materiais selecionados a temperatura de 300K, com Absortividade e Emissividade Expressas em Porcentagem.

Descrição/Componente	Absortividade (α_s)	Emissividade para radiação (ε)
Material, revestido		
Sulfeto negro	0,92	0,10
Óxido de cobalto negro	0,93	0,30
Óxido de níquel negro	0,92	0,08
Cromo negro	0,87	0,09
Placa de metal galvanizada		
Limpa, nova	0,65	0,13
Oxidada ao tempo	0,80	0,28
Tintas		
Negras (Parsons)	0,98	0,98
Branca, acrílica	0,26	0,90

Fonte: INCROPERA, 2011.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo irá descrever os materiais e métodos utilizados para o projeto, construção e avaliação do protótipo de um concentrador solar cilíndrico parabólico.

3.1 Dimensionamento do Protótipo

O material utilizado para revestimento possui as dimensões de 2m x 1,25m x 0,4mm. Utilizando-se como base os dados da Tabela 1 e o estudo de Pedrosa (2013), determinou-se o ângulo de borda com 70°. Desta forma, calculou-se as variáveis raio, corda e flecha, os quais dimensionaram o concentrador.

Para o dimensionamento do protótipo, utilizou-se as equações 2, 3 e 4 para se definir o raio, a corda e a flecha, os quais determinaram as medidas do concentrador.

Determinação do raio a partir da Equação 4, com o Arco (A) possuindo 1,25 metros e Abertura (α) de 70°.

$$A = \frac{(\alpha \cdot \pi \cdot R)}{180^\circ} \quad (4)$$

Sendo,

$$A = 1,25 \text{ m}$$

$$\alpha = 70^\circ$$

$$1,25 = \frac{(70^\circ \cdot \pi \cdot R)}{180^\circ} \quad R = 1,0231 \text{ m}$$

Substituindo os valores na Equação 4, encontra-se $R = 1,0231 \text{ m}$. Após encontrar o raio, calculou-se a corda com a Equação 3.

$$C = 2 \cdot R \cdot \sin(\alpha/2) \quad (3)$$

Sendo,

$$R = 1,0231 \text{ m}$$

$$\alpha = 70^\circ$$

$$C = 2 \cdot 1,0231 \cdot \sin(70^\circ/2) \quad C = 1,17 \text{ m}$$

Desta forma, $C = 1,17 \text{ m}$. Também se encontrou o valor da flecha, a partir da Equação 2.

$$F = R - (R \cdot \cos \alpha) \quad (2)$$

Sendo,

$$R = 1,0231 \text{ m}$$

$$\alpha = 70^\circ$$

$$F = 1,0231 - (1,0231 \cdot \cos 70^\circ/2) \quad F = 0,1931 \text{ m}$$

O valor encontrado é $F = 0,1931 \text{ m}$. Por último, calculou-se o foco do concentrador solar, onde se localiza o tubo absorvedor, com a Equação 1.

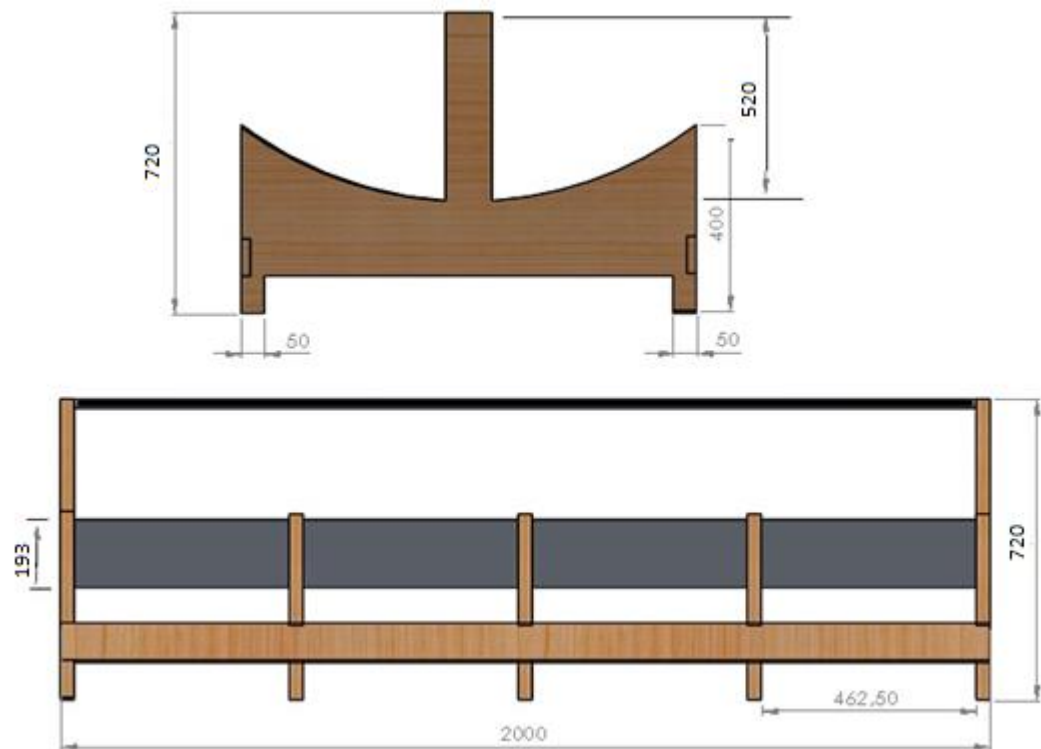
$$R = \frac{f}{2} \quad (1)$$

Sendo $R = 1,0231 \text{ m}$, obtém-se:

$$1,0231 = \frac{f}{2} \quad f = 0,51 \text{ m}$$

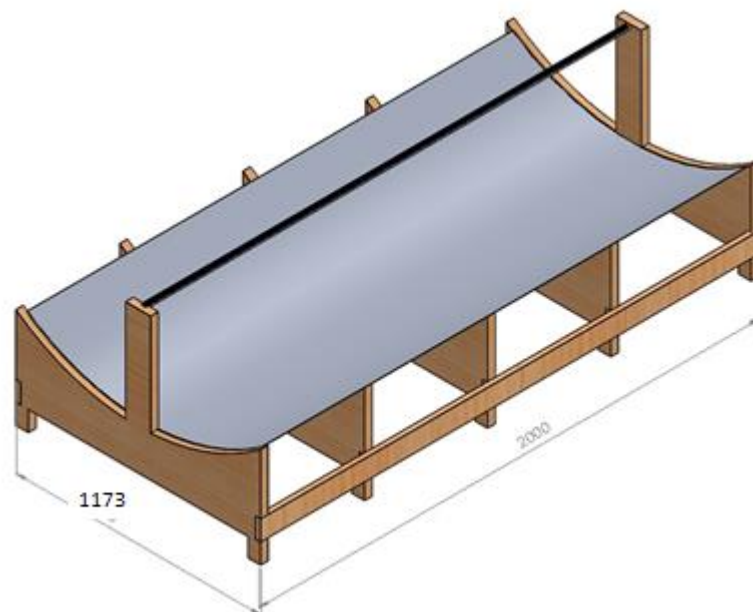
Desta forma, $f = 0,51 \text{ m}$. Após os cálculos, utilizou-se o software *Solid Works*, para se confeccionar o projeto, conforme as Figura 15 e 16.

Figura 15 – Desenho inicial do protótipo projetado, com suas respectivas dimensões (em milímetros).



Fonte: AUTOR.

Figura 16 - Ilustração do Projeto



Fonte: AUTOR.

3.2 Revestimento

O revestimento utilizado de folha de alumínio, com refletividade 0,85 (INCROPERA, 2011), pois este material apresenta baixo custo, facilidade de obtenção e boa refletividade.

3.3 Tubo Absorvedor

Foi utilizado um tubo absorvedor de cobre, por ser um bom condutor de calor e de fácil disponibilidade. O cobre possui condutividade térmica de 385,0 W/(m.K) (PERRY e GREEN, 1997).

O tubo de cobre foi revestido com uma tinta acrílica preta fosca, a qual possui uma alta absorvidade (α), de 0,98, conforme a Tabela 3. Neste protótipo, o tubo absorvedor não foi envolto por outro material para diminuição de perdas térmicas, pois estes acabam gerando um alto custo e dificuldades na produção.

3.4 Construção do Protótipo

O protótipo teve sua estrutura confeccionada em madeira, e seus cortes foram realizados em um centro de usinagem, para que se obtenha as dimensões desejadas. A chapa de alumínio utilizada foi colada na madeira, com uma cola específica para tal uso. O tubo absorvedor foi fixado a estrutura de madeira a partir de um encaixe projetado.

Como o concentrador tem como objetivo aquecer água, e possuir baixo custo de produção, sua estrutura foi fixa e sua orientação colocada no sentido Leste-Oeste.

3.5 Coleta de Dados

Para a coleta de dados, tanto no concentrador, como no coletor de tubos a vácuo, foi utilizado 1 termômetro localizado dentro do reservatório de água quente para a medição da temperatura pelo sistema termossifão, nos dois sistemas, conforme a Figura 18.

Já para o levantamento de dados do protótipo, utilizou-se 2 termômetros, conforme a Figuras 17.

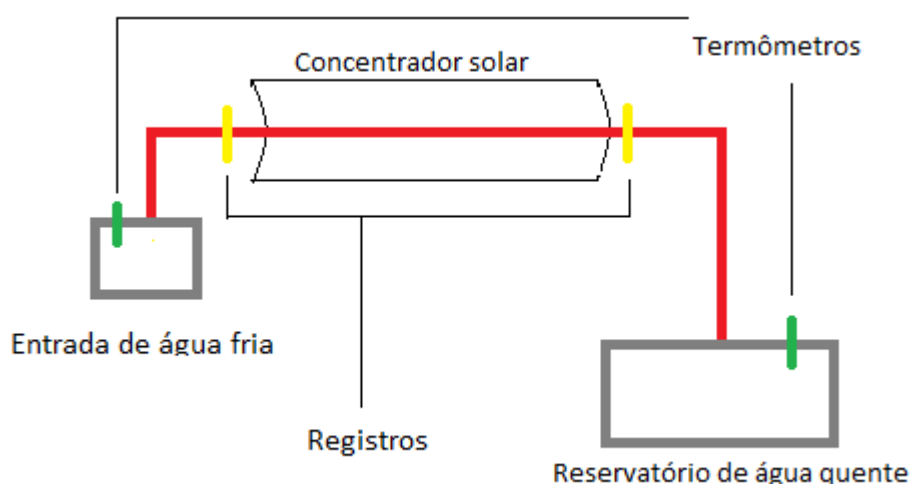
Para medida da radiação, foram utilizados dados da estação meteorológica da UNIVATES, que fornece dados precisos em um raio de 30 km. Assim, o sistema foi instalado dentro deste raio.

Para a medição da variação da temperatura no protótipo, utilizou-se 500 mL de água e mediu-se a temperatura da mesma, após, colocou-se a água no tubo de cobre e se aguardou por dez minutos, abriu-se o registro e se guardou a água em uma garrafa térmica como reservatório da água quente e mediu-se a temperatura novamente. O procedimento realizado no dia 11 de setembro com um registro, deixando a entrada da água em aberto, constatou-se após realizada a coleta, que a água evaporava, não permitindo um aumento maior em sua temperatura de saída. Desta forma, nas coletas de dados seguintes utilizou-se dois registros, deixando o sistema fechado, permitindo um aumento de pressão no sistema e aumento na temperatura da água.

Tanto o protótipo, quanto o coletor de tubos a vácuo a ser comparado, foram incorporados a um sistema com apenas um reservatório localizado acima dos sistemas, que funcionou pelo sistema por termossifão, fazendo com que a água quente, com menor densidade suba e a água fria com maior densidade desça, sem a necessidade de uma bomba para movimentar a água.

O esquema para coleta dos dados do concentrador solar, foi utilizado o esquema conforme a Figura 17.

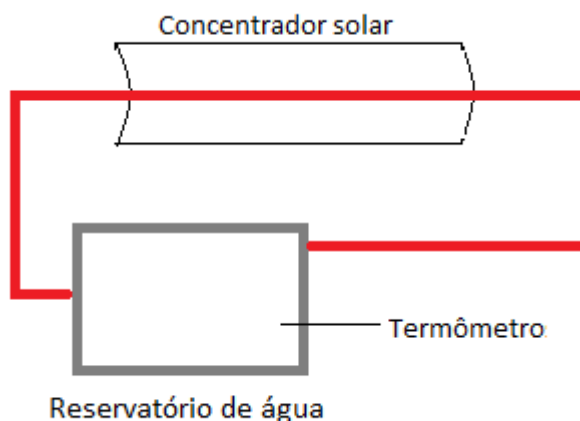
Figura 17 - Esquema Coleta de Dados do Protótipo



Fonte: Autor.

Já para a coleta dos dados do protótipo e do sistema com tubos a vácuo, o qual o será a comparação, foi utilizado o esquema da Figura 18.

Figura 18 - Esquema para Coleta de Dados da comparação entre o protótipo e o sistema por tubos a vácuo.



Fonte: AUTOR.

Os dados foram coletados no mesmo período, portanto nas mesmas condições climáticas, ambos os sistemas foram abastecidos com 150 Litros de água e se realizou a medição das temperaturas no reservatório, no dia 08 de novembro as leituras foram realizadas entre 10:43 a 16:13 com leituras a cada 30 minutos e no dia 12 de novembro, realizou-se uma leitura as 11:00 e outra as 13:00 para realização da comparação entre os equipamentos.

O reservatório de água do protótipo foi revestido de isopor, para se obter um isolamento térmico. Os tubos utilizados para a ligação entre o reservatório, o protótipo e o coletor, foram de PVC. Estes materiais são baratos e fáceis de se obter. O sistema de aquecimento por tubos a vácuo possui um reservatório próprio, revestido por materiais para isolamento térmico.

3.6 Viabilidade Econômica

Para avaliação da viabilidade econômica da instalação do concentrador em uma residência, foi considerado o tempo para o retorno do investimento, este causado pela redução esperada na conta de energia elétrica, e a viabilidade de instalação, para verificar se a água atingirá a temperatura desejada para o banho, em torno de 45°C. Desta forma, foi calculada a quantidade de calor que ambos os equipamentos ganharam com a Equação (5), e após a potência gerada pelos mesmos a partir da Equação (6), conhecendo a potência gerada, verificou-se a capacidade aquecer a água a temperatura desejada e assim, se o sistema tem capacidade para

ser aplicado em residências. Também, calculou-se as perdas térmicas a partir da Equação (7), geradas pela tubulação utilizada no protótipo, e sua interferência nos resultados obtidos.

Calculo para a quantidade de calor (INCROPERA, 2011).

$$Q = m \cdot cp \cdot (\Delta T) \quad (5)$$

Sendo

m = massa (Kg)

cp = Calor específico (J/(Kg.°C))

ΔT = Variação de temperatura (°C)

Calculo para potência do protótipo (INCROPERA, 2011).

$$P = \frac{Q}{t} \quad (6)$$

Sendo

P = Potência (W)

Q = Quantidade de calor (J)

t = Tempo (s)

Calculo da perda térmica da tubulação do protótipo (INCROPERA, 2011).

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (t_i - t_f)}{\frac{1}{h \cdot r_i} + \frac{1}{k} \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) + \frac{1}{h \cdot r_e}} \quad (7)$$

Onde:

q = Quantidade de calor (W)

L = Comprimento (m)

h = Coeficiente convectivo (W/m².K)

re = Raio externo (m)

ri = Raio interno (m)

k = Condutividade térmica (W/m.°C)

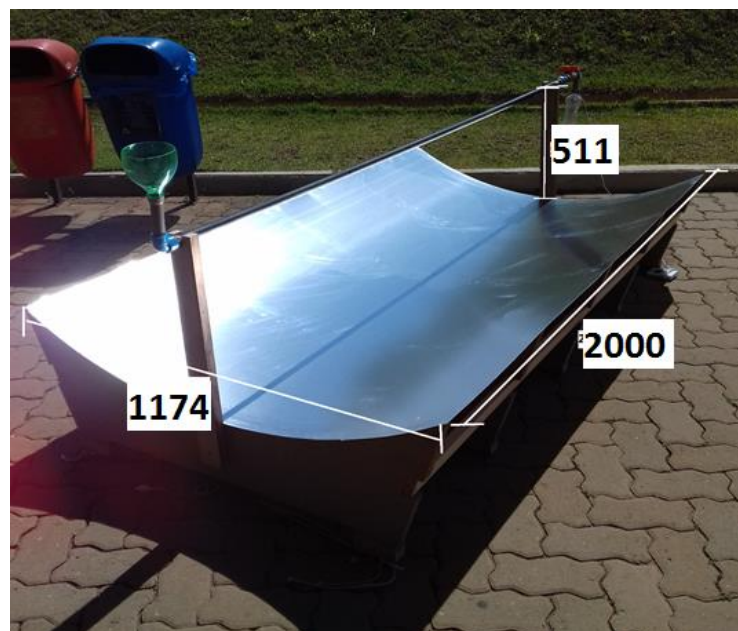
Utilizou-se a comparação dos custos da construção do protótipo, em relação ao valor do sistema por tubos a vácuo com 5 m², ambos os sistemas foram instalados na UNIVATES,

localizados ao fundo do prédio 17. Desta forma realizou-se a verificação da vantagem ou não, da construção do concentrador solar.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O capítulo irá apresentar os resultados obtidos e irá discuti-los. O protótipo foi instalado dentro do campus da UNIVATES, localizado aos fundos do prédio 17, e próximo ao coletor de tubos a vácuo a ser comparado, iste localizado a aproximadamente dois quilômetros do local de coleta dos dados de radiação fornecidos pela estação meteorológica da UNIVATES. A Figura 19 apresenta o protótipo do concentrador cilíndrico parabólico e suas medidas.

Figura 19 – Protótipo do concentrador cilíndrico parabólico e suas medidas em milímetros.



Fonte: AUTOR.

O capítulo está dividido em três tópicos, onde o primeiro apresenta os resultados obtidos para a análise do protótipo com um registro, a segunda parte, onde são apresentados os resultados do protótipo com dois registros e realizada a comparação entre os dois métodos e o

terceiro, que apresenta os resultados obtidos para a comparação entre o protótipo e o sistema de tubos a vácuo e a viabilidade econômica do protótipo.

4.1 Resultados Obtidos para a Análise do Protótipo com Um Registro

Inicialmente realizou-se a coleta dos dados para o protótipo com apenas um registro, os dados foram coletados no dia 11 de setembro, no período das 10:00 as 14:37, , onde a troca de água e a leitura da temperatura do sistema acontecia a cada dez minutos deixando um dos lados abertos. Desta forma obteve-se os dados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados do protótipo com um registro obtidos no dia 11 de setembro de 2016.

HORA INICIAL	HORA FINAL	TEMPERATURA INICIAL	TEMPERATURA FINAL	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA (°C)
10:00	10:10	9,2	29,3	20,1
10:12	10:22	10,1	32,9	22,8
10:23	10:33	8,7	34,2	25,5
10:35	10:45	9,5	35,5	26,0
10:48	10:58	9,0	36,5	27,5
11:00	11:10	11,1	38,4	27,3
11:12	11:22	9,0	38,0	29,0
11:24	11:34	10,0	39,5	29,5
11:35	11:45	9,5	37,8	28,3
11:50	12:00	10,2	41,3	31,1
12:02	12:12	9,4	37,1	27,7
12:13	12:23	9,1	40,7	31,6
12:24	12:34	9,3	39,7	30,4
12:35	12:45	9,7	41,3	31,6
12:47	12:57	9,9	39,3	29,4
12:58	13:08	10,1	41,7	31,6
13:09	13:19	10,8	43,0	32,2
13:20	13:30	14,0	42,3	28,3
13:31	13:41	11,6	45,3	33,7
13:42	13:52	11,5	45,0	33,5
13:53	14:03	10,3	41,6	31,3
14:04	14:14	19,8	45,7	25,9
14:15	14:25	10,0	40,0	30,0
14:26	14:36	10,4	40,3	29,9
14:37	14:57	10,3	45,7	35,4

Fonte: AUTOR.

Os dados observados na Tabela 4 foram obtidos em um dia ensolarado, onde percebe-se que o período de maior variação da temperatura foi o de 13:31 as 13:41 onde o protótipo estava totalmente iluminado, havendo a menor perda por sombras.

A variação de temperatura foi comparada com a radiação e a velocidade do vento no período do teste. Assim, foi possível verificar que os parâmetros estão diretamente relacionados. Os dados podem ser visualizados na tabela 5.

Tabela 5 – Variação da temperatura em função da radiação e da velocidade do vento no dia 11 de setembro.

HORA INICIAL	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA (°C)	RADIAÇÃO (W/m²)	VELOCIDADE DO VENTO (Km/h)
10:00	20,1	560	16,1
10:12	22,8	635	20,9
10:23	25,5	635	20,9
10:35	26,0	718	20,9
10:48	27,5	718	20,9
11:00	27,3	757	19,3
11:12	29,0	757	19,3
11:24	29,5	757	19,3
11:35	28,3	779	14,5
11:50	31,1	779	14,5
12:02	27,7	792	17,7
12:13	31,6	792	17,7
12:24	30,4	792	17,7
12:35	31,6	785	17,7
12:47	29,4	785	17,7
12:58	31,6	755	14,5
13:09	32,2	755	14,5
13:20	28,3	755	14,5
13:31	33,7	719	16,1
13:42	33,5	719	16,1
13:53	31,3	719	16,1
14:04	25,9	669	14,5
14:15	30,0	669	14,5
14:26	29,9	598	14,5

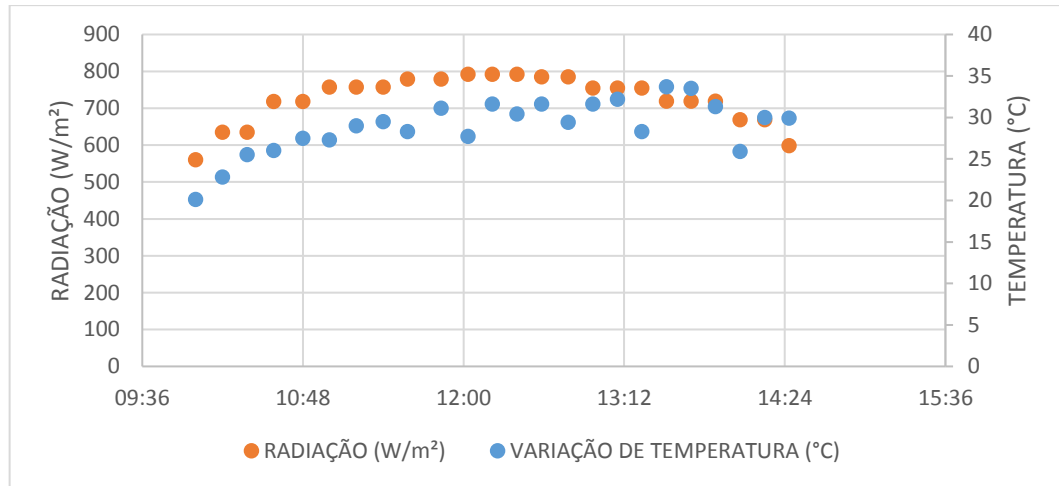
Fonte: AUTOR.

Como se observa na Tabela 5, o aumento da variação da temperatura se dá no período com aumento da radiação. A maior variação de temperatura obtida não foi a com maior radiação, isto ocorrendo pela velocidade do vento no período estar maior. Souza (2008)

constatou que quando a velocidade do vento ultrapassa 10,8 km/h ela exerce uma influência fundamental na temperatura do tubo absorvedor.

Pode-se observar na Figura 20, com maior clareza o aumento da temperatura em função do aumento da radiação.

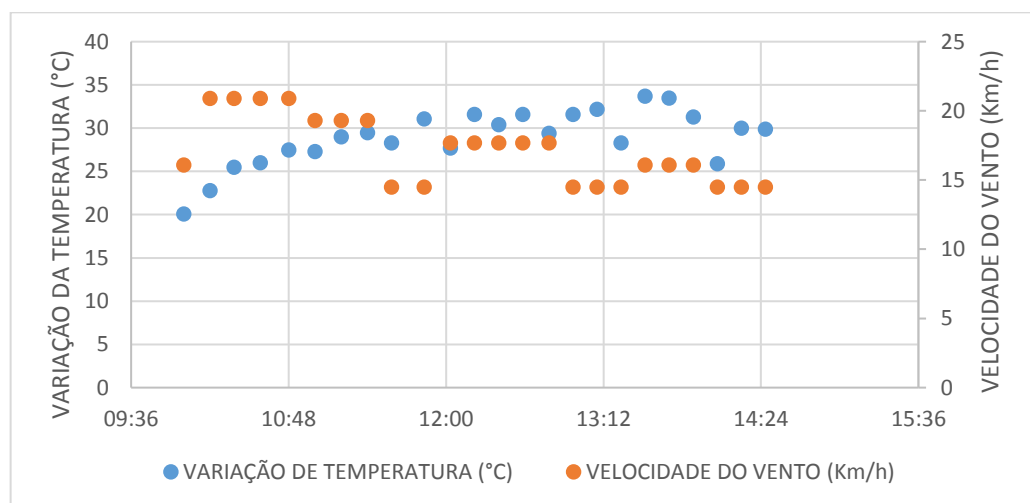
Figura 20 – Variação da temperatura em função do aumento da radiação no dia 11 de setembro.



Fonte: AUTOR.

Na Figura 20 se observa com clareza que o aumento da temperatura se dá justamente com o aumento da radiação. Já na Figura 21, realizou-se a comparação entre a variação da temperatura em relação a velocidade do vento.

Figura 21 – Variação da temperatura em relação a velocidade do vento no dia 11 de setembro.



Fonte: AUTOR.

Pode-se observar na Figura 21, que mesmo com uma radiação maior o vento não permitiu uma maior variação da temperatura, como constatado no estudo de Souza (2008), a

velocidade do vento acima de 10,8 km/h influencia significamente a temperatura do tubo absorvedor, no dia em questão a velocidade média do vento ficou próxima a 17 km/h, prejudicando significamente as temperaturas obtidas.

Conforme observado na Tabela 4 a maior temperatura obtida neste sistema foi de 45,7 °C, quando a água ficou um período de 20 minutos para verificação da temperatura máxima do sistema. Isto ocorreu devido ao sistema conter apenas um registro, desta forma a água esquentava chegando a temperatura de 45,7°C, onde ocorria a transferência de massa do sistema com o ar do ambiente, este perdendo o calor latente da água na sua evaporação, assim não permitindo o aumento da temperatura.

4.2 Resultados Obtidos para a Análise do Protótipo com Dois Registros

No protótipo com dois registros, foi realizada a coleta em três dias, 21 de outubro, onde se encontrou os dados obtidos na Tabela 6, dia 22 de outubro demonstrado na Tabela 8 e dia 30 de outubro, com os resultados mostrados na onde se obteve a Tabela 10.

No dia 21 de outubro foi realizado o monitoramento da temperatura da água no período das 09:33 às 11:39, devido ao tempo estar nublado e os resultados obtidos estarem constantes.

Tabela 6 – Protótipo com dois registros no dia 21 de outubro de 2016.

HORA INICIAL	HORA FINAL	TEMPERATURA INICIAL	TEMPERATURA FINAL	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA (°C)
09:33	09:43	11,1	23,6	12,5
09:45	09:55	9,8	18,6	8,8
09:59	10:09	8,9	21,1	12,2
10:11	10:21	8,7	21,4	12,7
10:25	10:35	9,9	26,2	16,3
10:37	10:47	10,7	25,5	14,8
10:48	10:58	10,0	25,0	15,0
11:05	11:15	9,5	24,4	14,9
11:17	11:27	9,0	23,6	14,6
11:29	11:39	11,5	25,7	14,2

Fonte: AUTOR.

Também é possível observar na Tabela 6, que houve uma pequena variação de temperatura no sistema, isto ocorrido pelo dia estar nublado e a radiação estar baixa, conforme observado na Tabela 7.

Tabela 7 - Variação da temperatura, radiação, velocidade do vento e temperatura ambiente.

HORA INICIAL	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA (°C)	TEMPERATURA FINAL	RADIAÇÃO (W/m²)	TEMPERATURA AMBIENTE	VELOCIDADE DO VENTO (Km/h)
09:33	12,5	23,6	247	17,4	6,4
09:45	8,8	18,6	247	17,4	6,4
09:59	12,2	21,1	247	17,9	6,4
10:11	12,7	21,4	247	17,9	6,4
10:25	16,3	26,2	247	17,9	6,4
10:37	14,8	25,5	304	18,3	8,0
10:48	15,0	25,0	304	18,3	8,0
11:05	14,9	24,4	363	18,9	8,0
11:17	14,6	23,6	363	18,9	8,0
11:29	14,2	25,7	403	19,5	9,7

Fonte: AUTOR

Pode-se observar na Tabela 7, que mesmo com o dia nublado e baixa radiação, a temperatura final da água, foi maior que a temperatura ambiente, demonstrando que o sistema independe da temperatura externa para a variação da temperatura.

No dia 22 de outubro, foi realizada uma nova coleta de dados. Este dia estava ensolarado, e a temperatura do ar, no momento de realização do teste variou de 20,7 à 23,1°C.

Tabela 8 - Protótipo com dois registros no dia 22 de outubro de 2016.

HORA INICIAL	HORA FINAL	TEMPERATURA INICIAL	TEMPERATURA FINAL	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA (°C)
12:25	12:35	9,4	41,1	31,7
12:36	12:46	10,5	38,1	27,6
12:47	12:57	8,7	38,8	30,1
12:57	13:07	9,0	41,9	32,9
13:07	13:17	9,1	40,3	31,2
13:18	13:28	10,7	44,2	33,5
13:30	13:40	11,7	41,5	29,8
13:42	13:52	22,3	48,2	25,9
13:54	14:04	11,1	41,7	30,6
14:05	14:15	9,6	39,7	30,1
14:16	14:26	9,7	47,8	38,1
14:30	14:40	11,0	52,1	41,1
14:41	14:51	11,1	48,8	37,7
14:53	15:03	11,0	47,7	36,7

Fonte: AUTOR.

Pode-se observar na Tabela 8, que a temperatura máxima obtida para o protótipo no dia foi de 52,1°C, e a variação máxima da temperatura obtida foi de 41,1°C.

Na Tabela 9 encontramos os valores da radiação, velocidade do vento e variação da temperatura encontrados no dia 22 de outubro de 2016.

Tabela 9 - Variação da temperatura, radiação e velocidade do vento para o dia 22 de outubro.

HORA INICIAL	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA (°C)	RADIAÇÃO (W/m²)	TEMPERATURA AMBIENTE	VELOCIDADE DO VENTO (Km/h)
12:25	31,7	929	20,7	20,9
12:36	27,6	929	20,7	20,9
12:47	30,1	929	20,7	20,9
12:57	32,9	954	21,4	20,9
13:07	31,2	954	21,4	20,9
13:18	33,5	954	21,4	20,9
13:30	29,8	954	21,9	19,3
13:42	25,9	954	21,9	19,3
13:54	30,6	954	21,9	19,3
14:05	30,1	937	22,6	17,7
14:16	38,1	937	22,6	17,7
14:30	41,1	904	23,1	19,3
14:41	37,7	904	23,1	19,3
14:53	36,7	904	23,1	19,3

Fonte: AUTOR.

A Tabela 9 demonstra a maior velocidade do vento observada nas análises.

No dia 30 de outubro, as análises foram realizadas, com o dia ensolarado, com a temperatura ambiente variando entre 23,9 à 26,3°C, onde se obteve os dados da Tabela 10.

Tabela 10 - Protótipo com dois registros no dia 30 de outubro de 2016.

HORA INICIAL	HORA FINAL	TEMPERATURA INICIAL	TEMPERATURA FINAL	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA (°C)
13:20	13:30	9,2	61,6	52,4
13:30	13:40	8,1	56,7	48,6
13:40	13:50	8,4	59,1	50,7
13:50	14:00	11,1	59,0	47,9
14:02	14:12	9,0	60,0	51,0
14:15	14:25	11,6	58,2	46,6
14:27	14:37	9,1	58,8	49,7
14:38	14:48	12,1	56,7	44,6
14:50	15:00	8,7	56,2	47,5
15:02	15:12	12,3	55,9	43,6
15:13	15:23	9,3	56,4	47,1
15:25	15:45	12,3	65,4	53,1

Fonte: AUTOR.

No dia 30 de outubro, conforme a Tabela 10, foram obtidos os maiores valores de de variação de temperatura chegando a 52,4 °C.

Se verificou a temperatura máxima suportada pelo protótipo no sistema com dois registros, obteve-se 65,4°C. Para isto, se deixou a água por 20 minutos no sistema, a temperatura não foi maior, pois, verificou-se um pequeno vazamento no sistema devido ao aumento da pressão interna ocorrida pelo aumento da temperatura da água dentro do tubo absorvedor.

Na Tabela 11, encontram-se os valores da variação da temperatura, radiação e velocidade do vento no dia 30 de outubro de 2016.

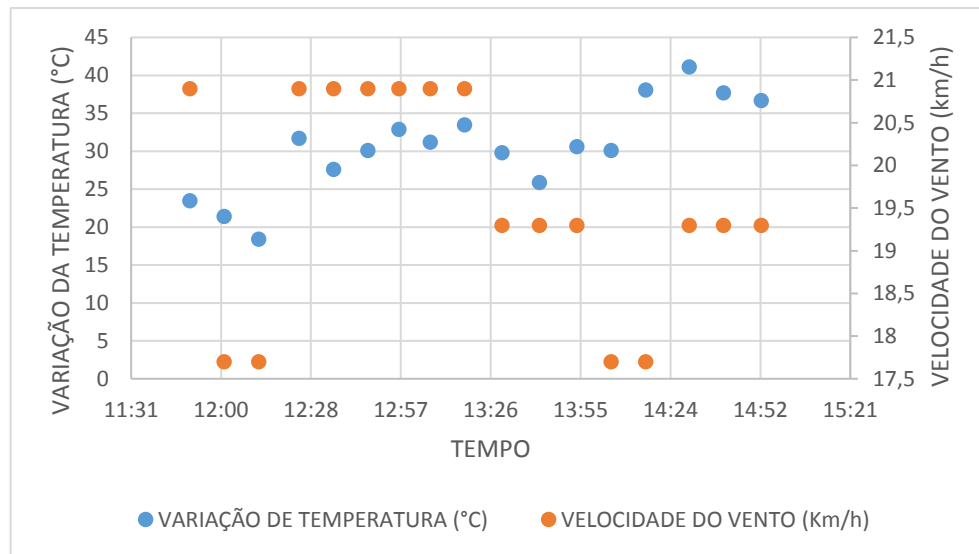
Tabela 11 – Variação da Temperatura, radiação e velocidade do vento no dia 30 de outubro.

HORA INICIAL	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA (°C)	RADIAÇÃO (W/m²)	TEMPERATURA AMBIENTE	VELOCIDADE DO VENTO (Km/h)
13:20	52,4	973	23,9	16,1
13:30	48,6	977	24,8	16,1
13:40	50,7	977	24,8	16,1
13:50	47,9	977	24,8	16,1
14:02	51,0	962	25,4	16,1
14:15	46,6	962	25,4	16,1
14:27	49,7	927	26,4	12,9
14:38	44,6	927	26,4	12,9
14:50	47,5	927	26,4	12,9
15:02	43,6	881	26,3	14,5
15:13	47,1	881	26,3	14,5

Fonte: AUTOR.

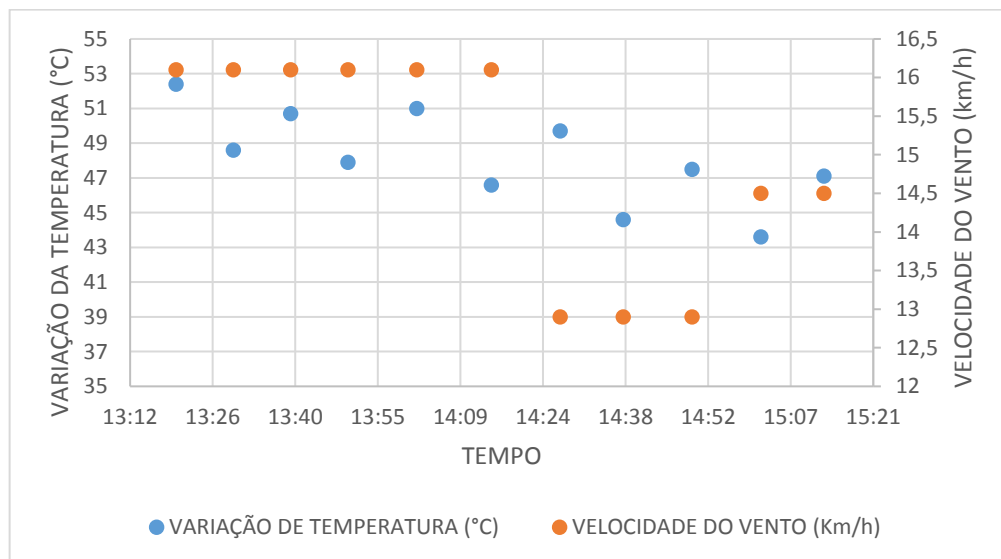
Pode-se verificar que comparando a Tabela 9 com a Tabela 10, que para os valores de radiação próximos, 962 W/m², no dia 30 de outubro, e 954 W/m², para o dia 22 de outubro, a variação de temperatura no período foi muito diferente. No dia 30, a variação da temperatura alcançou o valor de 51°C, já no dia 22, 33°C. Desta forma, verifica-se que os parâmetros velocidade do vento e radiação são os fatores mais importantes para o funcionamento do protótipo. No dia 22, a velocidade média do vento foi de 19,58 km/h, chegando a 20,9 Km/h, e dia 30, a velocidade média foi de 14,77 km/h, chegando a 16,1 Km/h, resultando em uma variação de temperatura 18°C maior, conforme demonstrado nas Figuras 22 e 23 Os dados obtidos para a radiação são resultados de uma média pelo periodo de 30 minutos, já para a velocidade do vento utilizados são os valores maximos no mesmo periodo, ou seja, os resultados obtidos são aproximados. Ainda assim é possível verificar que os dados apresentam coerencia com os resultados obtidos.

Figura 22 - Variação da temperatura em relação a velocidade do vento dia 22 de outubro.



Fonte: AUTOR.

Figura 23 - Variação da temperatura em relação a velocidade do vento dia 30 de outubro.



Fonte: AUTOR.

É visível o aumento da variação da temperatura a partir do aumento da radiação, desta forma quanto maior for a radiação, maior será a temperatura final da água. Outra observação é que a velocidade do vento faz com que as perdas convectivas do sistema aumentem muito como observado nas Figuras 22 e 23, assim reduzindo a temperatura da água, pela troca de calor com o ambiente, desta forma, o mais adequado seria a instalação do protótipo em local com menor exposição ao vento. A temperatura externa se mostrou irrelevante para os resultados obtidos, pois até mesmo no dia nublado a temperatura da água superou a temperatura ambiente.

4.3 Comparação e Viabilidade Econômica do Protótipo

Para realização da comparação entre o protótipo e outro sistema já comercializado, utilizou-se o sistema por tubos a vácuo. Este sistema é amplamente utilizado para aquecimento de água em residências, e está representado na Figura 24, seu reservatório térmico possui 150 Litros e está instalado na UNIVATES, à uma distância de 2 km da estação metereológica da instituição a qual fornecia os dados de radiação.

Figura 24 – Sistema por tubos a vácuo utilizado para comparação dos resultados.



Fonte: AUTOR.

O sistema utilizado pelo protótipo está representado na Figura 25, um dos lados foi levantado 40 cm para que ocorresse a circulação natural da água, pelo sistema por termossifão. A caixa de isopor foi utilizada como reservatório térmico e foi preenchida com 150 L de água. O termometro se localizou no meio da caixa para assim medir a temperatura média da água dentro da caixa.

A Figura 25, apresenta o sistema utilizado pelo protótipo para a comparação entre os métodos. Esta foi instalada na UNIVATES, e demonstra o protótipo inclinado, sua tubulação e seu reservatório.

Figura 25 – Sistema utilizado pelo protótipo para comparação dos resultados.



Fonte: Autor.

Os sistemas foram comparados nos dias 08 e 12 de novembro. No dia 08, grande parte do período coletado foi com tempo nublado, desta forma o protótipo apresentou variação de temperatura entre as 10:43 com 27,6°C até as 11:13, com sua temperatura alcançando 30,2°C, com tempo ensolarado, apresentando uma variação de 2,6°C no restante do período de análise o sistema a temperatura não aumentou, conforme demonstra a Tabela 12. Já o Aquecedor de tubos a vácuo foi analisado no mesmo período e em mesmas condições, a temperatura inicial foi de 31,3°C e a temperatura final de 34,6°C, com variação de temperatura 3,3°C. Ao final das análises do dia as 16:13 o aquecedor apresentou temperatura de 51,5°C, demonstrando uma variação de temperatura de 20,2°C.

No dia 08 de novembro durante o período analisado a temperatura ambiente variou entre 26,9 à 32,1°C, e se obteve os dados de temperaturas do protótipo e do sistema de tubos a vácuo sob as mesmas condições climáticas.

Tabela 12 – Dados obtidos no sistema do protótipo e o sistema de tubos a vácuo no dia 08 de novembro.

HORA	TEMPERATURA DO PROTÓTIPO (°C)	TEMPERATURA TUBOS A VÁCUO (°C)	RADIAÇÃO (W/m²)	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	VELOCIDADE DO VENTO (Km/h)
10:43	27,6	31,3	676	26,9	16,1
11:13	30,2	34,6	734	27,7	16,1
11:43	30,1	38,6	777	28,4	16,1
12:13	30,1	40,9	823	29,0	17,7
12:43	29,9	43,1	835	30,1	14,5
13:13	30,2	45,8	906	30,9	14,5
13:43	30,0	47,9	938	31,6	11,3
14:13	30,0	48,3	591	32,2	12,9
14:43	29,8	49,3	587	32,1	16,1
15:13	29,9	51,2	738	32,9	12,9
15:43	30,1	51,5	537	32,8	14,5
16:13	30,2	51,5	386	32,1	16,1

Fonte: AUTOR.

No dia 12 de novembro, a comparação se deu no período de 11:00 as 13:00, onde o protótipo apresentou a temperatura inicial de 24,3°C e a temperatura final de 29,8°C com uma variação de 5,5°C e o concentrador de tubos a vácuo apresentou uma temperatura inicial de 25,8°C e a temperatura final de 38,3°C, com uma variação de 12,5°C. Verifica-se que houve uma variação de temperatura maior no concentrador de tubos a vácuo, também se observou que a temperatura final do concentrador ficou novamente próximo a 30°C, conforme observa-se na Tabela 13.

Tabela 13 - Dados obtidos no sistema do protótipo e o sistema de tubos a vácuo no dia 12 de novembro.

HORA DA LEITURA	TEMPERATURA DO PROTÓTIPO (°C)	TEMPERATURA TUBOS A VÁCUO (°C)	RADIAÇÃO (W/m²)	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	VELOCIDADE DO VENTO (Km/h)
11:00	24,3	25,8	909,75	21,0	18,5
13:00	29,8	38,3	909,75	21,0	18,5

Fonte: AUTOR.

Pode-se perceber que a temperatura máxima encontrada no sistema do protótipo foi de 30,2°C.

Aplicando a Equação (5), no dia 08 de novembro, calculou-se o ganho de energia de ambos os sistemas. Desta forma, obteve-se um ganho total de energia para o protótipo de 1632,54 kJ e um ganho de energia no sistema de tubos a vácuo de 2072,07 kJ, ambos no período de 30 minutos.

Pode-se assim encontrar a potência do sistema, dividindo o valor pelo tempo de 30 minutos (1800 segundos).

Potência do protótipo.

$$P = \frac{1632,54}{1800}$$

$$P = 0,907 \text{ kW}$$

Potência do aquecedor de tubos a vácuo.

$$P = \frac{2072,07}{1800}$$

$$P = 1,151 \text{ kW}$$

Verifica-se assim a maior potência do sistema de aquecedor por tubos a vácuo com 5 m², em comparação ao protótipo.

O protótipo gerou uma potência média de 0,91 kW por hora, com uma radiação média de 676 W/m². Tendo em vista uma coleta de 6 horas por dia, em 20 dias, obtém-se 109,2 kW por hora. Com o preço médio do kW de R\$ 0,70 se tem uma economia de R\$ 76,44 por mês. Com o custo do protótipo em R\$ 520,00, o retorno sobre o investimento do protótipo nestas condições seria de aproximadamente 7 meses.

Porém como a temperatura máxima obtida no sistema do protótipo foi em torno de 30°C e segundo Mund (2014), a temperatura ideal para o banho é em torno dos 40°C, desta forma ainda haveria a necessidade de um sistema de aquecimento externo para a água, tornando o sistema ineficiente para ser utilizado em residências.

Pode-se verificar que, para aumentar a temperatura da água de 20 à 45°C, seriam necessários 4,36 kW por hora por dia de potência. Considerando a capacidade do protótipo produzir 5,46 kW por hora por dia de potência, este teria a capacidade de aquecer a água a uma temperatura agradável ao banho, sem a necessidade de aquecimento externo.

O sistema do protótipo utilizou 4,5 m de comprimento e 25 mm de diametro de tubo PVC com espessura de 1,7 mm. Assim, calculou-se a perda térmica do protótipo utilizando a Equação (6), sendo a condutividade térmica do PVC de 0,21 W/m.K, o coeficiente convectivo do ar de 10 W/m².K e o coeficiente convectivo da água de 500W/m².K (INCROPERA, 2011).

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (t_i - t_f)}{\frac{1}{h \cdot r_i} + \frac{1}{k} \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) + \frac{1}{h \cdot r_e}} \quad (6)$$

Onde:

q = Quantidade de calor (W)

$L = 4,5$ (m)

$h = 10$ (W/m².K)

$r_e = 0,0125$ (m)

$r_i = 0,0108$ (m)

$k = 500$ (W/m.°C)

$$q = 10,50 \text{ W}$$

Pode-se verificar que no período da análise, houve uma perda térmica de 10,50 W causada pelos tubos de PVC, esta sendo aumentada pelo vento de 16,1 km/h naquele momento, aumentando as perdas por convecção e pelas perdas de calor no reservatório, desta forma verificou-se que o sistema não ultrapassou a temperatura dos 30°C. Assim, pode-se concluir que a adição de um isolamento térmico nos tubos de PVC e um revestimento na caixa de isopor, faria com que diminuísse a perda térmica e aumentasse a temperatura obtida ao final do dia, tornando o protótipo viável para a instalação em residências.

5 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o protótipo apresentou uma potência suficiente para o aquecimento de 150 litros de água a 45°C, em um dia.

Outro fator que se pode concluir é que o sistema proposto perderia calor, desta forma, ainda seria necessário a utilização de um sistema de aquecimento extra para um banho agradável. Propõe-se a utilização de um isolamento térmico nos tubos de PVC utilizados, permitindo a redução das perdas térmicas, sendo possível se obter uma maior temperatura no reservatório e tornando o protótipo aplicável a residências, sem a necessidade de um sistema de aquecimento extra.

Observou-se que o protótipo apresentou uma potência menor que o sistema de aquecimento de água por tubos a vácuo comparado, sendo o protótipo com 0,91 kW e o sistema de tubos à vácuo com uma potência de 1,16 kW. o sistema de tubos à vácuo com menor custo de aquisição encontrado no mercado foi de R\$ 2.900, já o protótipo apresentou um custo de R\$ 520,00.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTOE, L.; OLIVEIRA, D.; CARLO, J. C. **Análise energética de sistemas solares térmicos para diferentes demandas de água em uma residência unifamiliar.** Ambient. constr., Porto Alegre , v. 12, n. 3, 2012.

AMALFI, Silvio Luiz. **ENERGIA SOLAR.** Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2005.

ANEEL. 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 15 abr. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. ANUARIO ESTATISTICO BRASILEIRO DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTIVEIS. Rio de Janeiro, 2015.

ARBOIT, N. K. S. et al. **POTENCIALIDADE DE UTILIZAÇÃO DA ENERGIA GEOTÉRMICA NO BRASIL – UMA REVISÃO DA LITERATURA.** USP, Volume 26 (2013), p. 155-168.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECÔNOMICO E SOCIAL. EFEITO ESTUFA E A CONVENÇÃO SOBRE MUDANÇA DO CLIMA. Assessoria Especial de Meio Ambiente. 1999.

BIANCHINI, Henrique Magalhães; **AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR TÉRMICA.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

BRANDÃO, Bráulio Bezerra; **COLETOR CONCENTRADOR PARABÓLICO COMPOSTO (CPC) COM ABSORVEDOR V INVERTIDO COMPLETAMENTE ILUMINADO**. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

BRIBIÁN, Ignacio Zabalza et al. **Energías RENOBABLES em Aragón**. Navarro & Navarro Impresores. Zaragoza, 2008.

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos fluidos**. 2. ed. rev. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

CALDNAZZA. 2016. Disponível em: < <http://www.caldnazza.com/2012/02/arco-corda-flecha-e-angulo-de-um-arco.html#.V0OB4DUrLIV>>. Acesso em: 12 mai. 2016.

CARDOSO, Fátima. **Efeito estufa: por que a terra morre de calor**. Editora Terceiro Nome, São Paulo, 2006.

CARVALHO, P.C.M.; CRAVEIRO, P.M.A. **Introdução ao planejamento energético**. Fortaleza, 2006.

CARVALHO, Carlos Henrique Fiche de; **PROJETO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA PARA Pousadas**. Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2013.

CASTELLANOS, Luis Sebastian Mendoza, **MODELAGEM DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE ENERGIA SOLAR UTILIZANDO PRATOS PARABÓLICOS E MOTORES STIRLING (DISH/STIRLING)**. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

CIÊNCIA TECNOLOGIA EM FOCO. 2016. Disponível em: <<http://cienciatecnologiafoco.blogspot.com.br/2016/01/aquecimento-global.html>>. Acesso em: 23 mai. 2016.

CRAVEIRO, Paulo Marcos Aragão. ENERGIA SOLAR PARA A PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE. **Coletânea de Artigos, Energia Solar e Eólica. CRESESB**, v. 2, Rio de Janeiro, 2006.

ENERGÍAS Perspectivas energéticas. 2016. Disponível em: <<https://energias.wordpress.com/>>. Acesso em: 15 abr. 2016.

ENERGY.GOV. 2016. Disponível em: <<http://energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy>>. Acesso em: 16 abr. 2016.

ENVIRO-FRIENDLY. 2016. Disponível em: < <http://enviro-friendly.com/solar-hot-water/evacuated-tubes-solar-hot-water/>>. Acesso em: 21 nov. 2016.

EXPLICATORIUM. 2016. Disponível em:<<http://www.explicatorium.com/sociedade/efeito-de-estufa.html>>. Acesso em: 15 mar. 2016.

GALDINO, M. A. E. et al., “O Contexto das Energias Renováveis no Brasil”. **Revista da DIRENG**, 2000.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento.** 3. ed. São Paulo: USP, 2012.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física.** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

IGUI. 2016. Disponível em: <<http://www.iguiecologia.com/energia-eolica/>>. Acesso em: 23 mai. 2016.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

KALOGIROU, Soteris A.; Solar termal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science. **Progress in Energy and Combustion Science.** Ed. 30, Niscocia, 2004.

KANDLIKAR, S. G.; VIJ, S. K. Geometrical aspects of a cylindrical parabolic collector, Proc. ISES Congress, New Delhi, 1978.

KEMPFER, Tiago. Projeto e Construção de um Concentrador Solar. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

KISOL. 2016. Disponível em: <<http://www.kisol.com.br/instalacao-aquecedor-solar/5>>. Acesso em: 22 abr. 2016.

LEITE, Rogério Cezar de Cerqueira e LEAL, Manoel Régis L. V. **O BIOCOMBUSTÍVEL NO BRASIL. NOVOS ESTUDOS**. Campinas, 2007.

MALGUETA, Diego C. **GERAÇÃO HELIOTÉRMICA, PRINCÍPIOS E TECNOLOGIAS**. Eletrobras Cepel. Rio de Janeiro, 2012.

MALFI, Silvio Luiz. **ENERGIA SOLAR**. Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais, 2005.

MUND, Lucas Francisco. **Análise da Viabilidade Técnica e Econômica de Coletores Solares para Aquecimento de Água em Residências**. FAHOR – FACULDADE ORIZONTINA, Horizontina, 2014.

NASA. 2016. Disponível em: <<http://climate.nasa.gov/>>. Acesso em: 22 mai. 2016.

NETTO, Ernaldo Ferreira da Silva e LEAL, Francis Pinheiro da Silva. Biocombustíveis: uma vantagem para o futuro. **Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense**; v. 2, n. 1, Itaperuna, 2012.

PAINÉIS SOLARES. 2016. Disponível em: <<http://www.paineissolares.gov.pt/faq.html>>. Acesso em 22 abr. 2016.

PALZ, Wolfgang. **Energia solar e fontes alternativas**. São Paulo: Hemus, 1981.

PEDROSA, Manoel Henrique de Oliveira. **NOVA ABORDAGEM PARA A DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE FLUXO SOLAR NO ABSORVEDOR DE CONCENTRADORES SOLARES**. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2013.

PERRY, Robert H.; GREEN, Don W. Perry's. **Chemical engineers' handbook**. 7. ed. Nova York: McGraw-Hill, 1997.

ROLIM, M. M. Modelagem Analítica de Geração Solar Térmica de Eletricidade, com Concentradores Parabólicos de Foco Linear. Tese de Doutorado, DEN/UFPE. Recife, 2007.

ROLIM, M. M., FRAIDENRAIN N. E VILELA, O. de C.. **OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS CONSTRUTIVOS DE COLETORES PARABÓLICOS LINEARES**. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2012.

SALVADORETTI, José Luiz. **MODELO MATEMÁTICO PARA ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE COLETORES SOLARES CILINDRICO-PARABÓLICOS**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1983.

SANTARITA. 2016. Disponível em: <<http://www.santarita.com.br/o-que-e-um-painel-solar-fotovoltaico/>>. Acesso em: 12 mar. 2016.

SOUZA, José Ribeiro de. **PROJETO, CONSTRUÇÃO E LEVANTAMENTO DE DESEMPENHO DE UM CONCENTRADOR CILINDRICO PARABÓLICO COM MECANISMO DE RASTREAMENTO SOLAR**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2008.

SUGUIO, Kenitiro. **MUDANÇAS AMBIENTAIS DA TERRA**. Instituto Geológico Secretaria do Meio Ambiente. São Paulo, 2008.

TAVARES, Wagner Marques. **PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DA ENERGIA MAREMOTRIZ**. Consultoria Legislativa. Brasília, 2005.

TESKE, S. T. et al. Energy Revolution 2010. **A sustainable world energy outlook. Energy Efficiency**. 2010.

WALISIEWICZ, Marek. **Energia alternativa**. São Paulo: Publifolha, 2008.

WAYSE. 2016. Disponível em: < <http://www.wayse.pt/solartermico.html>>. Acesso em: 20 mai. 2016.