



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO AMBIENTAL
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTAO AMBIENTAL**

TIAGO BATISTA CERQUEIRA

**CONCENTRADOR SOLAR DISCO PARABÓLICO DE FOCO FIXO PARA
PASTEURIZAÇÃO SOLAR DA ÁGUA**

Recife, 2018

TIAGO BATISTA CERQUEIRA

**CONCENTRADOR SOLAR DISCO PARABÓLICO DE FOCO FIXO PARA
PASTEURIZAÇÃO SOLAR DA ÁGUA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco.

Prof. Dr. Marco Antônio de Oliveira Domingues
Orientador

Profa. Dra. Marília Regina Costa Castro Lyra
Coorientadora

Recife, 2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Ana Lia Moura CRB4 974

C416 Cerqueira, Tiago Batista.
Concentrador solar disco parabólico de foco fixo para pasteurização solar da água.
/ Tiago Batista Cerqueira. – Recife, PE: O autor, 2018.
92 f.: il., color. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio de Oliveira Domingues.

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Marília Regina Costa Castro Lyra. .

Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco - IFPE, Campus Recife, Coordenação de Pós-Graduação - Mestrado

1. Energia Solar. 2. Disco de Scheffler. 3. Pasteurização Solar. 4. Potabilidade. 5. Tecnologias Sociais I. Domingues, Marco Antônio de Oliveira (Orientador). II. Lyra,

621.47 CDD (22 Ed.)

TIAGO BATISTA CERQUEIRA

**CONCENTRADOR SOLAR DISCO PARABÓLICO DE FOCO FIXO PARA
PASTEURIZAÇÃO SOLAR DA ÁGUA**

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental.

Data da aprovação: ____ / ____ / ____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marco Antônio de Oliveira Domingues
Orientador - MPGA

Profa. Dra. Marília Regina Costa Castro Lyra
Coorientadora - MPGA

Prof. Dr. Ronaldo Faustino da Silva
Examinador Interno - MPGA

Prof. Dr. Obionor de Oliveira Nóbrega
Examinador Externo – UFRPE

APRESENTAÇÃO

Graduado em Gestão Ambiental pelo Instituto Federal de Alagoas em 2013, sempre fui um cidadão respeitoso com a natureza e que sabia que podia trabalhar em função de sua preservação. Temas relacionados a tecnologias sociais e energias renováveis sempre me despertaram interesse devido a potencialidade, inovação e capacidade de melhorar a qualidade socioambiental. Atualmente, trabalhando como gestor ambiental no ramo da Assistência Técnica e Extensão Rural (ATER) percebo ainda mais que as tecnologias sociais podem favorecer na qualidade de vida das pessoas e na conservação do meio ambiente. Minha paixão pela energia solar aumentou durante a graduação quando fui convidado pelo professor Dário Nicácio para participar de um projeto de iniciação científica relacionado a construção de um fogão solar. Eis que tive o meu primeiro contato com a tecnologia termossolar de concentração com foco pontual fixo e desde então tenho me dedicado a aprender mais sobre este dispositivo, visto o potencial que o mesmo possui para ser utilizado desde a fins residenciais a industriais e em propósitos comerciais. Desta forma, a escolha deste tema para a pesquisa da dissertação uniu o útil com o agradável, uma vez que pude aprofundar meus conhecimentos sobre o assunto e vivenciar a experiência de ser mestre, o que é excelente para o crescimento pessoal e profissional.

Dedico este trabalho à minha mãe (Mary Batista), ao meu pai (Advaldo Cerqueira), ao Delber Jardim, aos meus avós (Antônio Lopes, Diva Batista e à minha falecida vovó Filhinha), aos meus tios (as) e primos (as) e a minha namorada Lara Nobre e sua família.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Pernambuco em seu Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental pela oportunidade de ingressar e cursar uma qualificação a nível de mestrado, o que é uma experiência enriquecedora para a minha formação pessoal e profissional.

Em especial aos meus orientadores Marco Domingos e Marília Castro Lyra e à coordenadora do MPGA Renata Carvalho pelas suas orientações, contribuições, “puxões de orelha” e incentivos para progredir com esta dissertação.

Aos professores e doutores Ronaldo Faustino da Silva e Obionor de Oliveira Nóbrega que juntamente com meus orientadores fizeram críticas construtivas durante a banca examinadora para aperfeiçoar este trabalho.

Meus sinceros agradecimentos aos professores (as) Marco, Hernandes, Núbia, Sofia, Marília, Renata, Eduardo e Ronaldo que muito me ensinaram e aconselharam durante o curso e o desenvolvimento desta pesquisa.

Devo um agradecimento especial ao meu pai (Advaldo Cerqueira) e ao meu primo Filipe Cerqueira que muito colaboraram com a construção desta pesquisa, à minha mãe (Mary Batista) que sempre me incentivou e me deu os alicerces para eu crescer, e aos meus demais parentes.

Agradeço com carinho a minha namorada (Lara Nobre) e toda sua família (especialmente as tias Juraci, Aparecida, Neide e Celina) que me incentivaram e deram suporte para que eu fizesse uma pós *stricto sensu*.

Aos colegas de sala que sempre apoiaram e encorajaram uns aos outros durante toda a pós-graduação. Aos meus amigos e amigas que compartilhamos os momentos da vida. Aos meus amigos Jamerson dos Santos e Arley Gomes que me ajudaram em momentos da pesquisa.

Também sou agradecido a Diamantina Projetos, empresa que atuo atualmente como gestor ambiental, na qual desde o meu ingresso aceitou as condições de flexibilizar minha jornada de trabalho para que eu pudesse conciliar os meus serviços com o mestrado, bem como por valorizar profissionais dedicados aos estudos.

Sou bastante grato também ao pessoal do Hostel Boa Viagem (Dona Célia, Ângela e Ana Célia) que me acolheram com muito carinho logo quando eu cheguei na cidade de Recife.

RESUMO

A água é um recurso essencial a vida que deve atender a parâmetros de potabilidade para que não ofereça riscos à saúde humana. Anualmente morre milhões de pessoas no mundo por doenças de veiculação hídrica, principalmente em comunidades carentes e na zona rural, onde se tem maior dificuldade de acesso a abastecimento público. Diante disso, a adoção de barreiras sanitárias como filtragem e desinfecção no ponto de consumo são importantes para assegurar a qualidade da água. Um método viável e sustentável para realizar a desinfecção da água em comunidades remotas, sobretudo no semiárido brasileiro, é pela pasteurização solar (SOPAS), na qual consiste em um tratamento físico capaz de erradicar os indicadores de contaminação microbiológica utilizando as propriedades da radiação solar para aquecer a água a temperaturas acima dos 65°C. A técnica de SOPAS pode ser realizada utilizando diferentes modelos de coletores ou concentradores solares. O concentrador solar parabólico de foco pontual fixo desenvolvido por Scheffler é uma tecnologia modular que pode ser construído em diferentes dimensões e possui o diferencial de manter o ponto focal estacionário durante todo seu funcionamento, permitindo inclusive que o foco e o operador fiquem sob uma sombra. Pelo o exposto, este trabalho teve como objetivo construir um protótipo de concentrador solar parabólico de foco fixo de 0,30m² e um forno receptor para reduzir perdas térmicas para avaliar o seu desempenho energético e testa-lo para o processo de pasteurização solar da água em sistema de bateladas. A eficiência ótica do painel refletor foi de 0,73 e a média da eficiência de conversão da energia solar absorvida em energia térmica útil foi de aproximadamente 0,955. Considerando combinações de tempo de exposição a determinadas temperaturas estimadas na literatura bibliográfica, foi constatado durante os ensaios que o concentrador aqueceu 5 litros de água a temperaturas suficientes para ocorrer a pasteurização solar, demonstrando assim, ter potencial para o tratamento microbiológico em sistemas de solução alternativas individuais, sobretudo na região semiárida.

Palavras-chave: Energia solar. Disco de Scheffler. Pasteurização Solar. Potabilidade. Tecnologias Sociais.

ABSTRACT

Water is an essential resource for life that must meet drinking parameters so that it does not pose risks to human health. Annually millions of people worldwide die from waterborne diseases, especially in underprivileged communities and in rural areas, where it is more difficult to access public supplies. Therefore, the adoption of sanitary barriers such as filtration and disinfection at the point of consumption are important to ensure water quality. A viable and sustainable method to disinfect water in remote communities, especially in the Brazilian semi-arid region, is by solar pasteurization (SOPAS), which consists of a physical treatment capable of eradicating microbiological contamination indicators using the properties of solar radiation for heat the water to temperatures above 65 ° C. The SOPAS technique can be performed using different models of collectors or solar concentrators. Scheffler's fixed-point parabolic solar concentrator is a modular technology that can be constructed in different dimensions and has the differential of keeping the focal point stationary throughout its operation, even allowing the focus and the operator to be under a shadow. Therefore, the objective of this work was to construct a prototype fixed parabolic solar concentrator of 0.30m² and a receiver furnace to reduce thermal losses to evaluate its energy performance and test it for the solar water pasteurization process in batch system. The optical efficiency of the reflector panel was 0.73 and the average conversion efficiency of absorbed solar energy into useful thermal energy was approximately 0.955. Considering combinations of exposure time at certain temperatures estimated in the literature, it was found during the tests that the concentrator heated 5 liters of water at temperatures sufficient to occur the solar pasteurization, thus demonstrating potential for microbiological treatment in alternative solution systems individuals, especially in the semi-arid region.

Keywords: Solar energy. Scheffler's disc. Solar Pasteurization. Potability. Social Technologies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Espectro eletromagnético.....	21
Figura 2. Radiação Direta, Difusa e Global.....	22
Figura 3. Variação da inclinação solar em diferentes latitudes, considerando um dia de Equinócio e às 12 horas (a linha vermelha indica o zênite do local).....	23
Figura 4. a) Média da Incidência Solar Global; b) Média da Incidência Solar Direta.	24
Figura 5. a) Média da Incidência Solar Global; b) Média da Incidência Solar Direta.	25
Figura 6. a) Concentrador Solar de Lavoisier (1774); b) Máquina de imprimir exposto por Augustin Mouchot (1878); c) Usina solar para bombeamento de água projetado por Frank Shuman (1913).	28
Figura 7. Fluxo energético no sistema de concentração solar e o esquema de conversão da radiação solar em energia térmica.	30
Figura 8. Modelos de concentradores solares.....	32
Figura 9. Representação do concentrador solar modelo de Scheffler.....	34
Figura 10. Projeção da parabólica offset usado no refletor solar de foco pontual fixo.	34
Figura 11. Esboço de um WAPI (Indicador de Pasteurização Solar).	40
Figura 12. Concentrador solar projetado em SketchUp (2017).....	42
Figura 13. Projeção da base e identificação das peças que a constituem.	43
Figura 14. Identificação das peças que constituem a estrutura do painel refletor.	45
Figura 15. Gabarito do painel refletor.	45
Figura 16. Identificação das peças que compõem os ajustadores sazonais.	46
Figura 17. Identificação das peças que compõem o gabarito do suporte de rotação.....	47
Figura 18. Identificação das peças que compõem o suporte de rotação.....	48
Figura 19. Diagrama elétrico do sistema de rotação.	50
Figura 20. Desenho das peças que foram furadas para passar os parafusos.....	51
Figura 21. Protótipo reduzido do Concentrador de Scheffler.....	52
Figura 22. Forno receptor projetado em SketchUp (2017) e construído.	54
Figura 23. Imagem elíptica da borda do painel refletor.....	55
Figura 24. Concentrador solar durante o experimento de 05/09/2018.	63

Figura 25. Concentrador solar durante o experimento de 02/10/2018.	64
Figura 26. Instalação dos concentradores de Scheffler na indústria Tapi Food.	66
Figura 27. Temperatura ambiente, temperatura interior do forno e da superfície externa do forno.....	73
Figura 28. Temperatura ambiente e da água (superfície, fundo da garrafa e a média).....	74
Figura 29. Temperatura ambiente, temperatura interior do forno e da superfície externa do forno.....	79
Figura 30. Temperatura ambiente e da água (superfície, fundo da garrafa e a média).....	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Peças que compõem a base do concentrador solar.	43
Quadro 2. Peças que compõem o painel refletor do concentrador solar.....	44
Quadro 3. Peças que compõem os ajustadores sazonais do concentrador solar.	46
Quadro 4. Peças que compõem o gabarito do suporte de rotação do concentrador solar.....	47
Quadro 5. Peças que compõem o suporte de rotação do concentrador solar.	48
Quadro 6. Descrição das despesas da construção do Concentrador Scheffler de 0,30m ²	67
Quadro 7. Descrição das despesas da construção do forno receptor.	68
Quadro 8. Fator de abertura e área refletora útil do concentrador solar de 0,30m ² para algumas datas do ano de 2018.	69
Quadro 9. Dados de projetos e de desempenho calculados pelo teste de 05/09/2018.....	71
Quadro 10. Dados medidos durante o experimento do dia 05/09/2018 (Garanhuns / PE).....	72
Quadro 11. Combinação de temperatura e tempo para ocorrer a desinfecção da água por pasteurização.	74
Quadro 12. Dados de projetos e de desempenho calculados pelo teste de 02/10/2018.....	76
Quadro 13. Dados medidos durante o experimento do dia 02/10/2018 (Olho D'água do Casado / AL).....	77
Quadro 14. Combinação de temperatura e tempo para ocorrer a desinfecção da água por pasteurização.	80

LISTA DE EQUAÇÕES

(1) A_t – área refletora teórica em m^2 (total).....	55
(2) Fator de abertura do concentrador solar parabólico de foco fixo	56
(3) A_u – área útil da superfície refletora do concentrador (m^2).....	56
(4) A_f – área do foco (m^2).....	56
(5) C – fator de concentração	57
(6) $P_{\text{útil}}$ – potência térmica útil (W).....	57
(7) P_{abs} – potência máxima absorvida (W).....	57
(8) Q_g – radiação solar global diária ($MJ.m^2.dia$) estimada pela Relação de Angstrom	58
(9) Q_g – radiação solar global diária ($MJ.m^2.dia$) - fórmula aproximada de Angstrom.....	58
(10) I_c – radiação solar direta interceptada na superfície refletora (W/m^2).....	59
(11) P_{perda} – energia perdida ao ambiente (W).....	59
(12) Gr – número de Grashof	60
(13) Pr – número de Prandtl	60
(14) Ra – número de Rayleigh.....	60
(15) Nu – número de Nusselt.....	60
(16) h – coeficiente de transferência térmica por convecção ($W/(m^2K)$).....	61
(17) η_U – eficiência útil da convenção da radiação solar em energia térmica	61
(18) η_o – eficiência ótica do sistema de captação de energia solar	61
(19) η_t – eficiência de conversão térmica.....	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo geral.....	17
1.1.2 Objetivos específicos	18
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE ENERGIA SOLAR	19
2.2 TECNOLOGIAS SOLARES	27
2.2.1 Concentrador solar parabólico de foco pontual fixo (Modelo de Scheffler).....	33
2.3 PASTEURIZAÇÃO SOLAR (SOPAS)	36
3 METODOLOGIA	41
3.1 CONSTRUÇÃO DO CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIXO.....	41
3.2 CONSTRUÇÃO DO FORNO RECEPTOR.....	52
3.3 CÁLCULOS DE DESEMPENHO DO CONCENTRADOR SOLAR.....	54
3.4 ENSAIOS DE PASTEURIZAÇÃO SOLAR E DE DESEMPENHO DO PROTÓTIPO.....	62
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
4.1 ENSAIO 1 – GARANHUNS / PE	70
4.2 ENSAIO 2 – OLHO D’ÁGUA DO CASADO	75
5 CONCLUSÕES.....	81
6 RECOMENDAÇÕES	83
REFERÊNCIAS	84
APÊNDICE A – Fator de abertura e área refletora útil do concentrador solar de Scheffler de 0,30m ² para cada dia do ano.....	93
ANEXO A – Propriedades do ar seco sob pressão normal	96

1 INTRODUÇÃO

O planeta Terra tem sofrido constantes transformações em virtude das ações humanas. A Revolução Industrial e a concepção mecanicista de natureza possibilitaram rápido crescimento econômico e avanços tecnológicos. Porém, este desenvolvimento também promoveu ascendente e cumulativos impactos sobre o meio ambiente e a sociedade, como efeitos do aquecimento global e das mudanças climáticas; destruição da camada de ozônio; poluição dos recursos hídricos, solos e ar; redução da biodiversidade; insalubridade ambiental; desigualdade e vulnerabilidade social; entre outros.

Tais consequências do progresso econômico somado aos trágicos episódios que ocorreram no século passado, como guerras mundiais, detonações de armas nucleares, acidentes e desastres industriais, por exemplo o de Minamata¹ (1950), Torrey Canion² (1967), Bhopal³ (1984), Chernobyl⁴ (1986), e conotações científicas sobre capacidade de suporte do planeta contribuíram para que a humanidade se mobilizasse e questionasse o rumo e a segurança socioambiental do modelo de desenvolvimento vigente (THOMÉ, 2015).

Eis que surge um marco histórico no movimento ambientalista mundial, a realização da Primeira Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano ocorrida em Estocolmo em 1972, tendo entre seus resultados a criação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Anos mais tarde, com a publicação do Relatório Nosso Futuro Comum em 1987, também conhecido como Relatório de Brundtland, foi consagrado o conceito de desenvolvimento sustentável, que é aquele capaz de satisfazer as necessidades das gerações atuais sem comprometer a capacidade das futuras gerações também satisfazerem as suas.

Não obstante, deste marco aos tempos atuais houve muitos avanços sobre a temática homem e meio ambiente, ocorrendo outros grandes eventos globais de alta relevância como a

¹ Japão, caso de envenenamento de milhares e morte de centenas de pessoas pelo consumo de pescados contaminados com mercúrio que era despejado no oceano por uma indústria em Minamata.

² Inglaterra, petroleiro que se dividiu em duas partes na costa inglesa, causando um dos primeiros e mais graves derramamentos de petróleo no mar.

³ Índia, entre as piores tragédias com a indústria química, onde 40 toneladas de gases tóxicos vazaram de uma usina norte-americana de pesticidas causando a morte de milhares de pessoas.

⁴ Ucrânia, explosão de uma usina nuclear que emitiu grande quantidade de radiação na atmosfera espalhando alto nível de radioatividade em boa parte do globo terrestre, afetando a saúde de dezenas de milhares de pessoas.

Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento ou ECO-92 (Rio de Janeiro, 1992); a Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável (Johanesburgo, 2002); e a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável ou Rio+20 (Rio de Janeiro, 2012). Consolidando o termo desenvolvimento sustentável, a RIO-92 foi uma conferência de destaque que teve entre resultados a Convenção Quadro sobre Mudanças Climáticas, base para o Protocolo de Quioto (1997) e Acordo de Paris (2015); a Convenção da Diversidade Biológica; e a Agenda 21, documento com diretrizes voltadas para implementação do desenvolvimento sustentável local, nacional e globalmente (MACHADO et al, 2012).

Com a crescente consciência ecológica tornou-se mais evidente a finitude dos recursos naturais e das externalidades negativas decorrente de suas explorações. Neste panorama, ressalta-se a importância dos esforços internacionais frente à convenção sobre as mudanças do clima, visando um novo paradigma de desenvolvimento baseado na prosperidade econômica, equidade social e preservação ambiental, promovendo a inovação de tecnologias mais eficientes, o uso de energias renováveis e a responsabilidade socioambiental.

Diante disso, o desenvolvimento e difusão de tecnologias que fazem uso de fontes renováveis de energia e que reduzem a dependência de recursos não renováveis é fator chave para mitigação do efeito estufa e na construção do desenvolvimento sustentável . Dentre as fontes renováveis, a energia solar se destaca por ser um recurso abundante, gratuito, limpo e versátil, podendo ser destinada em aplicações térmicas ou na produção de eletricidade desde em grandes atividades industriais a pequenos projetos domésticos e comerciais.

Uma das vantagens da energia solar é a possibilidade de utilizá-la localmente para suprir diversas necessidades primárias de energia através de sistemas simples e de baixo custo. Deste modo, é possível utilizar tecnologias sociais de fácil reaplicação e com recursos encontrados localmente para a desinfetar e dessalinizar a água para o consumo, para cozinhar, secar, desidratar, aquecer águas sanitárias e ambientes, produzir eletricidade, entre outros fins, promovendo assim a qualidade e inclusão socioambiental e reduzindo a situação de vulnerabilidade social em zonas remotas e carentes.

Entre as aplicações supracitadas, este trabalho aborda sobre a técnica de pasteurização solar (Solar Pasteurization – SOPAS), no qual consiste em usar as propriedades térmicas da luz do sol para aquecer a água a temperaturas acima dos 60°C durante um intervalo de tempo para

desinfetá-la (SANDEC; EAWAG, 2002). Este procedimento é uma alternativa viável para o tratamento biológico da água em áreas não atendidas por sistemas de abastecimento público e que possuem dificuldades de acesso a outros agentes desinfetantes, sendo uma boa opção para comunidades rurais, sobretudo em regiões áridas e semiáridas.

A água é recurso indispensável para a vida e está diretamente associada à saúde. Anualmente morrem milhões de pessoas no mundo decorrente de doenças infecciosas de veiculação hídrica, principalmente em comunidades carentes e no meio rural de países em desenvolvimento (RODRIGUES, 2011). Deste modo é essencial a difusão de tecnologias que servem como barreiras sanitárias contra os microrganismos patogênicos para assegurar a qualidade biológica da água e prevenir riscos à saúde dos consumidores.

O Brasil possui uma das regiões semiáridas mais extensa e populosa do mundo, cobrindo cerca de 11% do território brasileiro e mais da metade da região Nordeste (VENTURA; FERNÁNDEZ; ANDRADE, 2013). Conforme o IBGE (2011) o nordeste brasileiro abriga a maior quantidade de comunidades rurais do Brasil, onde muitos convivem em situação de vulnerabilidade devido as condições climáticas severas e deficiência hídrica. Em virtude dos fatores geográficos e climáticos, esta região tem os maiores índices incidência solar do Brasil, possuindo grande potencial para desfrutar das propriedades da energia solar.

Deste modo, a técnica SOPAS é uma opção viável e sustentável para o tratamento biológico da água em comunidades remotas desta região. Diante disso, neste estudo foi construído um protótipo de concentrador solar parabólico de foco pontual fixo de 0,30m² (modelo de Scheffler) e investigado o seu desempenho térmico e sua usabilidade no processo de pasteurização solar da água.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Construir e avaliar a eficiência e o desempenho térmico de um protótipo de concentrador solar parabólico de foco pontual fixo (Concentrador de Scheffler) com dimensões reduzidas e um forno receptor para pasteurização solar da água.

1.1.2 Objetivos específicos

- Projetar e construir um protótipo de concentrador solar parabólico de Scheffler com área refletora de aproximadamente $0,30\text{m}^2$
- Montar um forno receptor para reduzir as perdas térmicas da energia concentrada no foco
- Avaliar a potência, eficiência ótica, térmica e útil do protótipo de concentrador solar construído
- Testar o protótipo para aquecer a água a temperaturas que ocorra o processo de pasteurização solar.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é constituído por seis capítulos. No primeiro, que é a Introdução, explana-se os objetivos e as justificativas que motivaram pesquisar sobre energias limpas e a utilização de energia solar para garantir água segura biologicamente para o consumo humano, visto serem duas necessidades essenciais para o homem. No capítulo 2, de Revisão Bibliográfica, aborda-se o estado da arte dos seguintes temas: fundamentos básicos da energia solar; tipos de tecnologias solares, enfatizando em um subcapítulo específico o concentrador solar parabólico de foco pontual fixo (Modelo de Scheffler); e por último, o método de tratamento biológico da água pelo processo físico de pasteurização solar (SOPAS). Sequencialmente, o capítulo 3 descreve a metodologia empenhada neste estudo, que se divide em: construção do protótipo de concentrador solar parabólico de foco fixo de $0,30\text{m}^2$ de área refletora; construção do forno receptor; equações aplicadas para avaliar a potência e eficiência energética do protótipo; e por fim os procedimentos adotados para a realização dos ensaios de aquecimento da água. O capítulo 4 descreve sobre os resultados e discussões da pesquisa. O capítulo 5 aborda as conclusões da dissertação e o capítulo 6 finaliza com recomendações para próximos estudos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção abordam-se elementos presentes na literatura que fornecem suporte à concepção da pesquisa, evidenciando a princípio, a potencialidade da utilização da energia solar, sobretudo no território brasileiro devido as suas características climáticas e geográficas. Consecutivamente, é discorrido sobre os tipos de tecnologias solares, dando ênfase a tecnologia Disco de Scheffler, concentrador solar parabólico de foco fixo e sobre os fatores que influenciam o desempenho dos concentradores. Por fim, são discutidas as técnicas de tratamento microbiológico da água para consumo através da energia solar pelos métodos Desinfecção Solar (*Solar Water Disinfection – SODIS*) e Pasteurização Solar (*Solar Pasteurization – SOPAS*).

2.1 FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE ENERGIA SOLAR

O aquecimento global e as mudanças climáticas têm proporcionado impactos adversos em todo o planeta. Os danos ambientais decorrentes das pressões antrópicas sobre o sistema climático podem se tornar irreversíveis, aumentar o estado de vulnerabilidade social e ocasionar consequências ainda mais graves caso não haja respostas emergentes. Conforme o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*), investir atualmente em técnicas de mitigação para reduzir emissões de gases do efeito estufa ficará mais em conta do que ter que defrontar os efeitos das mudanças climáticas (ALVES, 2014).

Atualmente os combustíveis fósseis compõe cerca de 80% da oferta energética mundial, sendo um dos principais responsáveis por emissões de gases do efeito estufa e agravante do aquecimento global, além de ser um recurso finito na natureza (BERMANN, 2008). Diante disso, para garantir a sustentabilidade e a meta do Acordo de Paris (2016) em limitar o aumento da temperatura média global até 1,5°C em relação aos níveis pré-industriais, políticas e ações devem priorizar meios para conservar os combustíveis fósseis, ampliar áreas de sumidouros de gases do efeito estufa, melhorar a eficiência energética e estimular o aproveitamento de fontes renováveis de energia (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

As fontes renováveis são recursos inexauríveis, como no caso da radiação solar, calor geotérmico, da energia mecânica dos ventos, dos rios e das marés, ou recursos abundantes que se repõem em curto médio prazo dentro da escala humana, como a biomassa, por exemplo (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). Embora ainda não tenha nem 1% da capacidade instalada, é enorme a potencialidade das energias limpas. Estima-se, por exemplo, que o potencial energético eólico seja cerca de 1700 TW, enquanto da energia solar cerca de 6500 TW (AMAN et al, 2015).

O recurso solar é a fonte energética mais abundante acessível no planeta. Com exceção da energia nuclear e geotérmica, basicamente todas outras reservas energéticas são formas indiretas de energia do sol, como a cinética dos ventos e da água, e a energia química da fotossíntese. O Sol é uma grande usina termonuclear que produz energia por meio de constantes fusões nucleares em seu interior a milhões de graus centígrados, que depois que alcança a superfície é emitida na forma de energia radiante para o espaço.

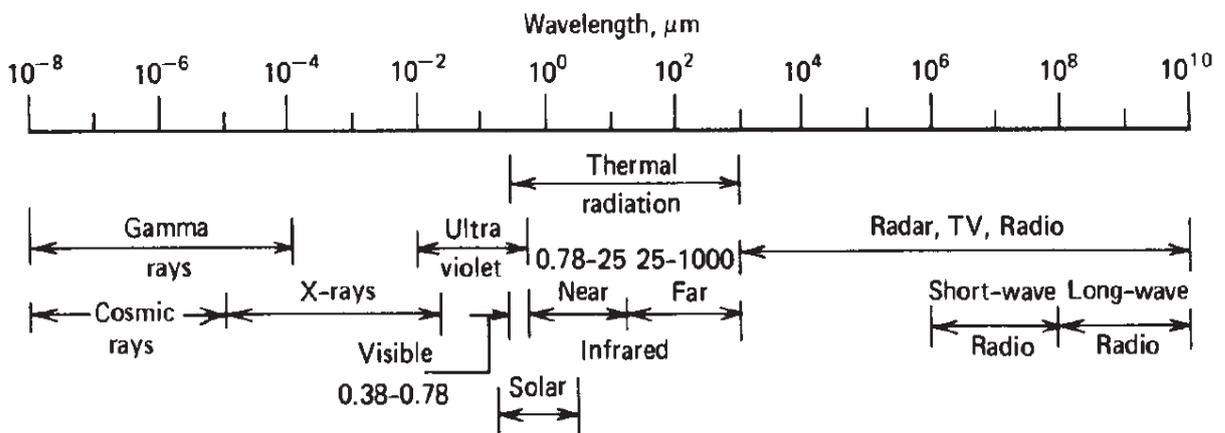
A radiação solar que atinge a Terra supera a somatória de todas as reservas de combustíveis não renováveis presentes no planeta, e sua abundância é enorme de modo que supera mais de 7.500 vezes o consumo energético atual da humanidade e se caso 0,1% desta energia fosse convertida a uma eficiência de 10%, a energia produzida ainda seria quatro vezes maior que a capacidade mundial de geração de energia (VICHI; MANSOR, 2009; THIRUGNANASAMBANDAM et al, 2010; MACEDO NETO et al, 2014; KEMERICH et al, 2016).

A luz solar é altamente energética, sendo capaz de provocar fotoreações como a fotossíntese, foto-oxidação e o efeito fotovoltaico, e causar aquecimento de ambientes, fluidos e objetos (PHILIBERT, 2011). Além de farta, a radiação solar não gera poluentes e ruídos, não emite gases do efeito estufa, é um recurso inexaurível, uma vez que o Sol ainda brilhará por bilhões de anos, e tem aplicação versátil, podendo ser empregada desde em grandes usinas para produção de energia elétrica e trabalho à pequena escala por meio de tecnologias sociais para satisfazer necessidades pontuais em comunidades remotas, como para cozer, aquecer, desinfetar e dessalinizar água.

A luz emitida pelo Sol situa-se no domínio espectral correspondente a radiação térmica (Figura 1). Os raios solares que viajam pelo espaço concentram-se no intervalo de 0,25 a 3 μm

e atingem a exosfera da Terra com intensidade de 1.367 W/m^2 , fator conhecido como constante solar. Contudo por conta de absorções na camada de ozônio, vapor d'água e de outros gases presentes no ar, a banda espectral que atinge a crosta terrestre predomina-se entre $0,29$ a $2,5 \mu\text{m}$ e com irradiância máxima de 1000 W/m^2 em condições de céu limpo e ao longo de algumas horas de sol a pino. Desta radiação que chega ao solo, 10% é na forma de raios ultravioleta ($< 0,38 \mu\text{m}$), 50% em luz visível ($0,38$ a $0,78 \mu\text{m}$) e 40% de radiação infravermelha ($0,78 \mu\text{m} <$) (PHILIBERT, 2011; DUFFIE; BECKMAN, 2013; AMAN et al, 2015).

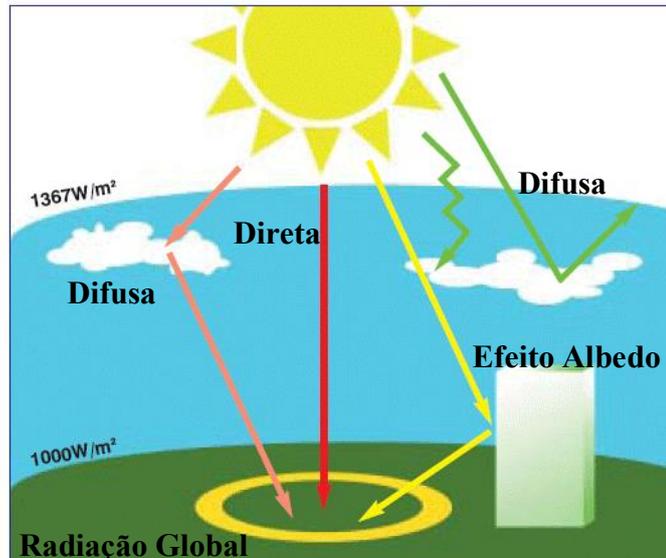
Figura 1. Espectro eletromagnético.



Fonte: DUFFIE; BECKMAN, 2013.

A incidência solar distingue-se entre radiação solar direta, difusa, refletida e global (Figura 2). Compreende-se radiação direta como o feixe de luz que atinge a superfície terrestre sem sofrer interrupção ou dispersão pelos componentes atmosféricos (é a luz que projeta sombra). Já a radiação difusa, é justamente a luz espalhada e atenuada pelas partículas, gases e nuvens presentes no ar (é a incidência que mantém um dia claro mesmo que nublado). O efeito albedo é a radiação refletida no solo e pelos objetos. A irradiação global é a somatória da incidência direta, difusa e refletida interceptada sobre uma unidade de superfície (DANTAS; CARVALHO; CASTRO NETO, [20--]); DUFFIE, BECKMAN, 2013).

Figura 2. Radiação Direta, Difusa e Global.

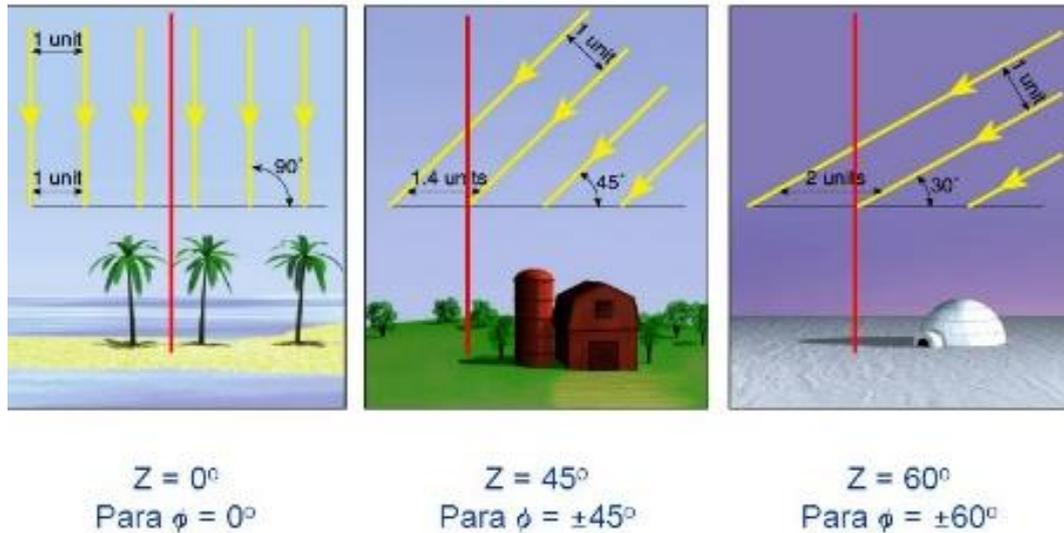


Fonte: Adaptado de QUADRADO, 2008.

Embora abundante, a energia solar não está uniformemente disponível, variando de acordo com a localidade, passar do tempo e fatores meteorológicos. O eixo de rotação da Terra (norte-sul) possui uma inclinação aproximada de $23,5^\circ$ em relação ao seu plano orbital de translação. Esta inclinação determina as estações do ano conforme o planeta percorre sua trajetória em torno do sol, provocando os solstícios de verão, quando o trópico de câncer (hemisfério norte) ou de capricórnio (hemisfério sul) recebem maior insolação, ou os solstícios de inverno quando menos, e os equinócios de primavera e outono quando ambos hemisférios recebem a mesma incidência (MILONE, 2003).

Devido este movimento de translação, a duração do dia solar (visibilidade do Sol) e o efeito cosseno (ângulo entre o zênite e os raios solar) também são alterados conforme a latitude do local, de modo que esta oscilação é mais acentuada rumo aos polos e durante os solstícios, e menos próximo a linha do Equador e durante os equinócios (Figura 3). Normalmente, os aparelhos solares devem ser instalados com declividade igual à latitude local para compensar o ângulo zenital e receber a luz de frente, isto é, para interceptá-la perpendicularmente (ANEEL, 2005).

Figura 3. Variação da inclinação solar em diferentes latitudes, considerando um dia de Equinócio e às 12 horas (a linha vermelha indica o zênite do local).



Fonte: RADIAÇÃO Solar Balanço de Energia. [20--].

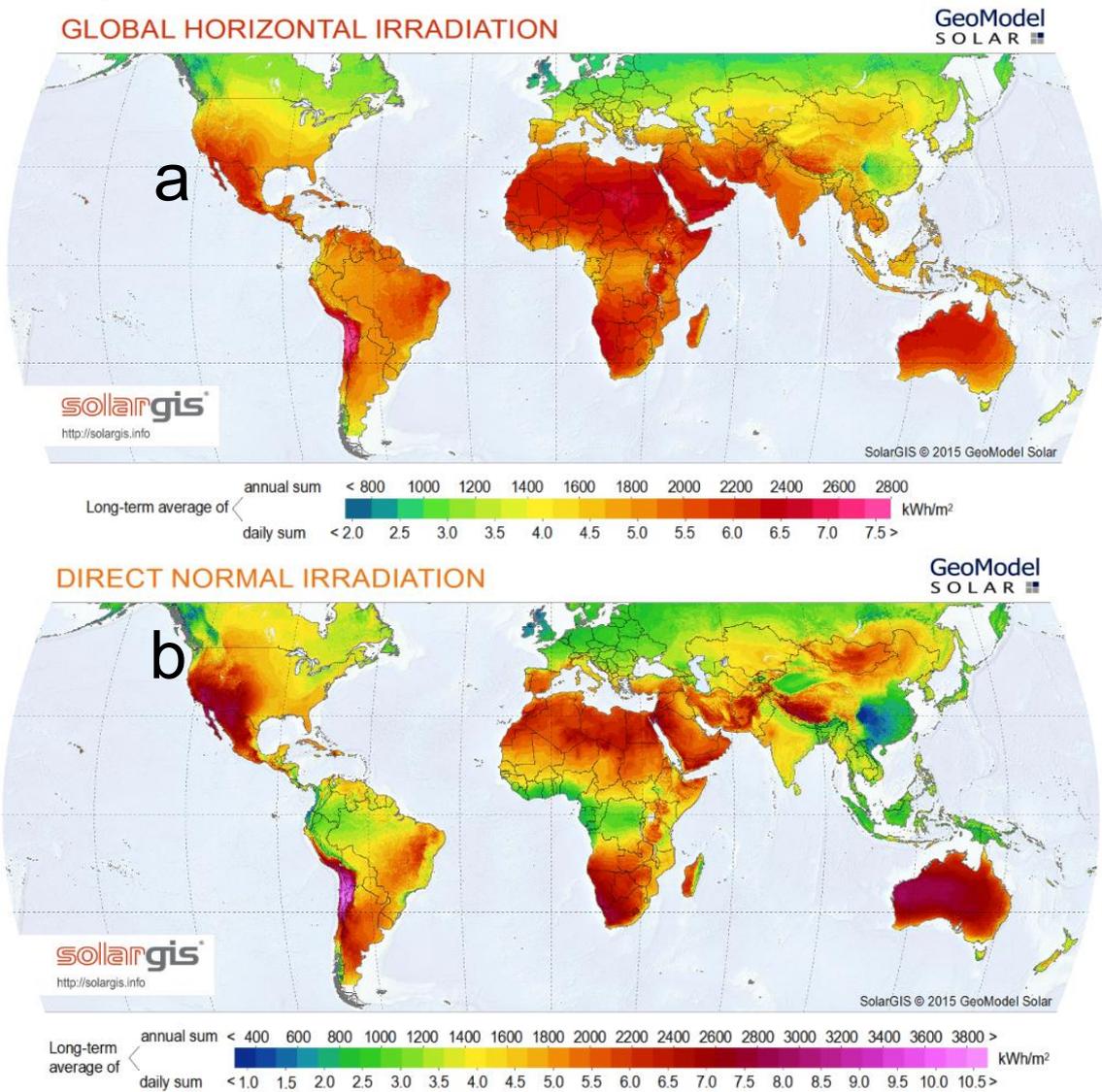
Por conta destes fenômenos a superfície da zona equatorial intercepta radiação média anual maior do que nas regiões acima dos trópicos. Para a maioria das aplicações da energia solar, o dado mais relevante a ser identificado é a irradiância direta. Embora sistemas fotovoltaicos e coletores de baixas temperaturas possam operar com a radiação difusa, seu rendimento é mais alto sobre incidência direta, enquanto que mecanismos de concentração solar, que tem o objetivo de convergir feixes de luz de uma superfície maior para uma área menor, são mais adequados em localidades em que a radiação direta é mais constante (PHILIBERT, 2011).

Apesar da zona equatorial receber mais incidência solar global, existe diferença da distribuição da insolação direta que atinge a superfície. Esta variância decorre das interferências meteorológicas sobre a radiação, de modo que em zonas tropicais úmidas há maior dispersão da luz por conta de grandes massas de ar, enquanto nas regiões mais áridas há menos variabilidade sazonal e atenuação da insolação e assim maior intensidade de radiação direta (SERRANO, 2017).

Por conta disso, apesar de haver menor efeito cosseno ao longo do ano e maior duração de dia solar sobre a linha do Equador, o potencial solar total normalmente é mais elevado

próximo aos trópicos, onde se encontra a maioria dos desertos. Observando os mapas da Figura 4 é possível constatar que muitos países em desenvolvimento são privilegiados com abundância deste recurso, possibilitando-os promover projetos que podem mitigar as mudanças climáticas ao mesmo tempo em que satisfazem suas demandas energéticas.

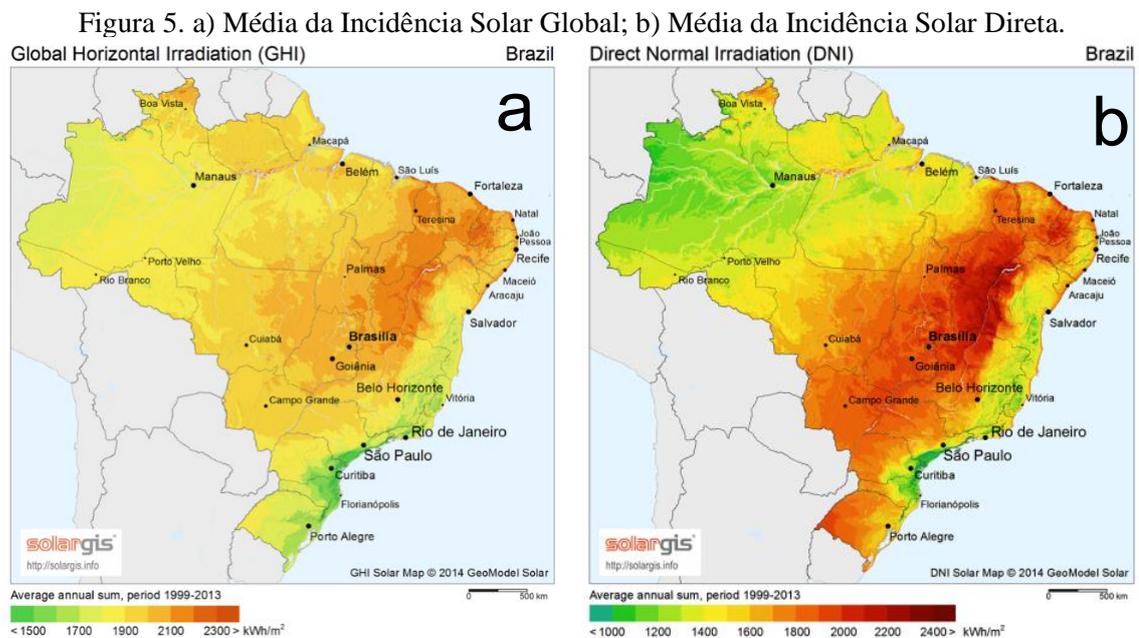
Figura 4. a) Média da Incidência Solar Global; b) Média da Incidência Solar Direta.



Fonte: SolarGIS © 2015.

Em todo território brasileiro há potencial para fazer uso do recurso solar, inclusive a região amazônica que tem o clima equatorial predominante com altos índices pluviométricos e

menor porção de radiação direta, onde os sistemas fotovoltaicos têm sido aplicados para o fornecimento descentralizado de eletricidade em comunidades isoladas (EPE, 2016). O semiárido nordestino é a região com a média de incidência solar direta anual mais alta do país, possuindo grande potencial para investimentos em usinas solares (Figura 5). A construção de plantas heliotérmicas ou fotovoltaicas podem contribuir na diversificação da matriz energética brasileira e fomentar a geração de empregos e alavancar o desenvolvimento econômico (BEZERRA; SANTOS, 2016; DIAS et al, 2017).



Fonte: SolarGIS © 2014.

O semiárido brasileiro envolve parte do norte de Minas Gerais e mais oito dos nove estados nordestinos, com uma extensão total de 969.589,4 km² abrangendo mais da metade do Nordeste (BRASIL, 2005). Marcado pela aridez, baixos índices pluviométricos, temperaturas médias altas e pouco variabilidade térmica anual, esta e outras áreas áridas pelo mundo são sensíveis aos efeitos das mudanças climáticas e possivelmente as regiões que mais sentirão os impactos do aquecimento global, como escassez de recursos hídricos, aumento de temperaturas, perdas na capacidade agrícola e de segurança alimentar, riscos de desertificação, entre outras consequências socioeconômicas e ambientais (VENTURA; FERNÁNDEZ; ANDRADE, 2013; RAMALHO, 2013).

Segundo dados do IBGE (2011), o Nordeste é a região com maior número de habitantes em zonas rurais do Brasil, abrigando mais de 14 milhões de pessoas, nos quais muitos destes vivem em condições climáticas severas (ARAÚJO, 2011). Sendo uma das áreas áridas mais populosas do mundo, o semiárido brasileiro apresenta um dos piores índices de desenvolvimento social e econômico do país (VENTURA; FERNÁNDEZ; ANDRADE, 2013). Visto a atual vulnerabilidade da população e do bioma local, e sobretudo perante os cenários projetados em função das mudanças do clima, torna-se necessário o desenvolvimento de projetos de mitigação e adaptação que favoreçam a convivência do homem com o semiárido.

Neste panorama, as tecnologias sociais assumem importante papel na solução de problemas socioambientais e na promoção do desenvolvimento sustentável e inclusivo. Tecnologias sociais concerne em metodologias que enfatizam o envolvimento comunitário no desenvolvimento, aplicação e apropriação de conjuntos de práticas para soluções de problemas capazes de propiciar transformações sociais, de modo que seja acessível e reprodutível (JESUS; COSTA, 2013; SEIXAS et al, 2015). Neste sentido, é oportuno a difusão dos saberes da ciência solar na construção de tecnologias sociais, uma vez que promove acesso a uma fonte de energia renovável, limpa e aplicável em diversas demandas elementar da sociedade, contribuindo na mitigação das mudanças climáticas e melhorias nos aspectos socioeconômicos e ambientais, sobretudo em regiões vulneráveis e com alto potencial solar, como no caso do nordeste brasileiro.

Assim, tecnologias sociais tem sido difundidas para sanar problemas sociais e melhorar a qualidade de vida de modo acessível e reprodutível, como no fornecimento de eletricidade em regiões remotas pelo projeto Poste de Luz Solar, que aplica módulos fotovoltaicos com lâmpadas de LED para iluminação; e na irrigação que utilizam as placas para alimentar motores; nas técnicas de desinfecção, pasteurização e dessalinização que usam as propriedades termossolares para o tratamento de água para beber; em sistemas de coletores solares para aquecimento de ambientes e águas; e para o beneficiamento e cocção de alimentos por meio de fogões solares (OELHER; SCHEFFLER, 1994; SANDEC; EAWAG, 2002; LOBO et al, 2013)

Existem alguns exemplos de tecnologias sociais validadas que fazem uso da energia solar e que favorecem o convívio do homem com o semiárido brasileiro, como no caso do projeto Pintadas Solar, onde dentro de suas práticas emprega painéis fotovoltaicos para

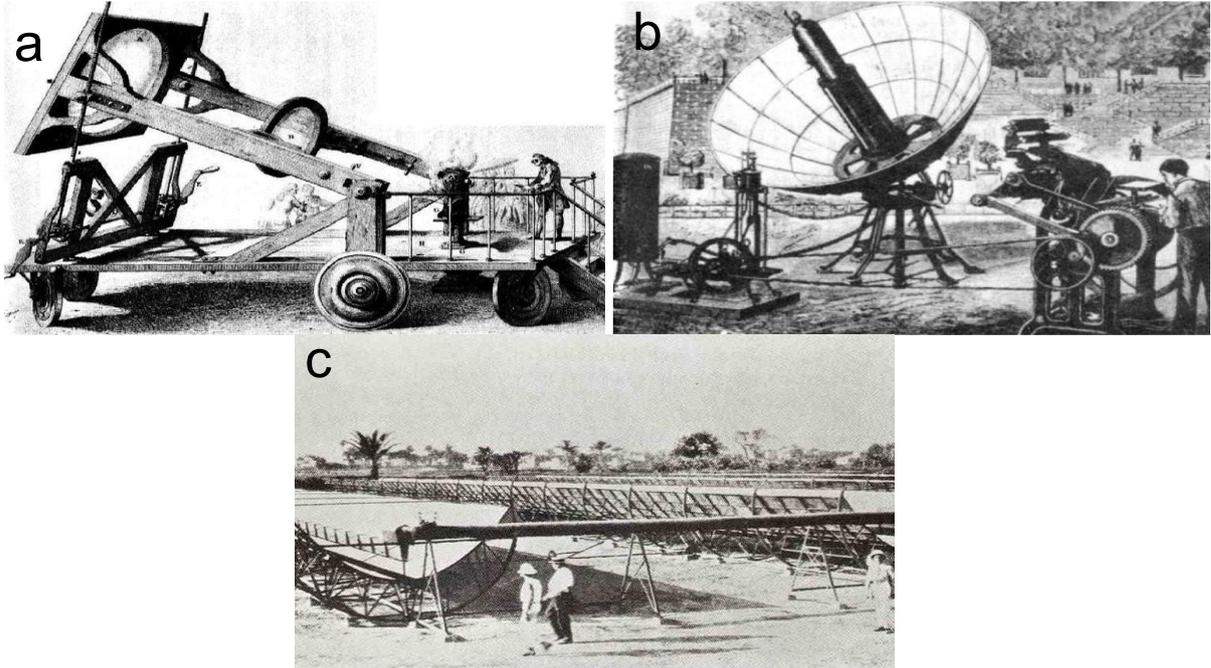
alimentar bombas para irrigação; e o projeto Secador Solar, o qual usa a energia solar para secar e conservar alimentos (VENTURA; FERNÁNDEZ; ANDRADE, 2013). Desta forma, a difusão destas tecnologias sociais pode proporcionar diversos benefícios, como redução na supressão da vegetação, segurança hídrica, melhorias na saúde, fornecimento descentralizado de energia, economia doméstica, geração de emprego, melhorias na qualidade de vida e ambiental (PHILIBERT, 2011; NETO MACEDO, 2014). Na seção seguinte é feito uma breve explanação sobre alguns tipos de tecnologias solares.

2.2 TECNOLOGIAS SOLARES

Há muito tempo a energia solar é utilizada pela humanidade para desidratar alimentos para conservá-los, para dessalinizar água, fazer fogo, na alquimia era empregada para destilar e extrair essências, e inclusive através de tecnologias para realizar trabalhos mecânicos. Embora controverso, o primeiro relato de aplicação em grande escala da energia solar teria ocorrido no período ente 287-212 A.C., onde o grego matemático Arquimedes teria incendiado navios da frota romana utilizando uma estrutura parabólica supostamente formada com os escudos dos soldados (KALOGIROU, 2009).

Pode-se notar que a compreensão da potencialidade da radiação solar não é recente. Desde o século 18 diversos protótipos foram desenvolvidos para a aplicação em larga escala da luz solar, como no caso do forno solar composto por duas lentes construído pelo francês Lavoisier em meados de 1774 (Figura 6. a), que alcançava temperaturas de 1.750°C e derretia até metais; o concentrador parabólico exposto por Augustin Mouchot na Europa na década de 1870 que movia uma máquina de impressão (Figura 6. b); e a primeira usina solar com painéis cilindro parabólicos utilizada para bombear água do Rio Nilo no Egito em 1913 projetado por Frank Shuman (Figura 6. c). Outra aplicação que começou a ser amplamente difundida a partir de 1930 foram os sistemas de aquecedores de água e ambiente (KALOGIROU, 2009).

Figura 6. a) Concentrador Solar de Lavoisier (1774); b) Máquina de imprimir exposto por Augustin Mouchot (1878); c) Usina solar para bombeamento de água projetado por Frank Shuman (1913).



Fontes: (a) e (b): KALOGIROU, 2009; (c): <http://www.solarpanel.pk/10-must-know-facts-about-solar-energy/>, 2017.

Contudo, o uso da energia solar em grandes projetos não se demonstrava economicamente viável, sobretudo quando comparado aos combustíveis fósseis, devido a ampla disponibilidade, preços baixos e facilidade de transporte deste último. Inclusive, por conta dos altos custos da aplicação fotovoltaica descoberta pelo físico Becquerel em 1839, sua utilização só se tornou viável nas primeiras expedições espaciais em meados de 1960, por falta de outra fonte disponível no espaço (KALOGIROU, 2009). Todavia, diante dos novos paradigmas socioambientais e inovações tecnológicas, os aparelhos solares têm se tornado cada vez mais difundidos e acessíveis, tanto para fins residenciais quanto industriais (ALVES, 2014).

Além dos exemplos de tecnologias sociais que fazem uso das propriedades da energia solar, atualmente existem grandes plantas solares em funcionamento para a produção de energia elétrica, como no caso dos parques heliotérmicos com calha parabólica Andasol 1 e 2 na Espanha com capacidade de 50 MW cada e a usina fotovoltaica Waldpolenz na Alemanha com potencial de 40 MW; bem como em processos industriais, por exemplo na fábrica Frito-Lay na

Califórnia (EUA) que usa concentradores calhas para fornecer água pressurizada para aquecer óleos para fritar batatas, e em projetos na Índia que utilizam concentradores parabólicos de Scheffler com propósitos de produzir vapor em fábricas do ramo têxtil e alimentício e em cozinhas comunitárias que fornecem milhares de almoço diariamente (GADHIA; GADHIA, 2006; MEKHILEF; SAIDUR; SAFARI, 2011; MALAGUETA, 2012).

A luz solar pode ser usada de modo passivo ou ativo e de forma direta ou indireta. Refere-se ao uso passivo as edificações planejadas que absorvem e transmitem luminosidade e calor a fim de aquecer e proporcionar conforto ambiental, reduzindo o consumo de outras fontes energéticas; já o uso ativo decorre do emprego de dispositivos com o objetivo de potencializar a energia térmica ou para convertê-la em eletricidade, por exemplo em sistemas de concentração solar e sistemas fotovoltaicos. Trata-se de uso direto quando a energia solar é convertida prontamente para a finalidade desejada, seja para produzir calor ou gerar eletricidade por placas fotovoltaicas; e indireta quando é preciso ocorrer mais transformações para se ter energia útil, como em usinas que usam permutador ou produzam vapor para mover geradores. (KALOGIROU, 2009; PINTO et al, 2015).

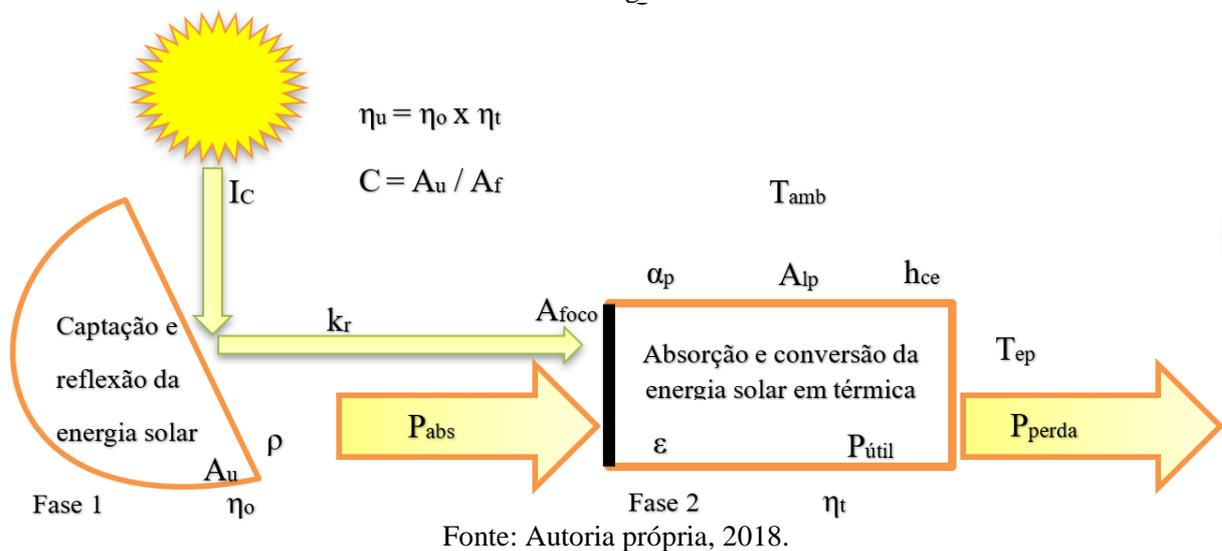
Um painel solar é constituído por um conjunto de células fotovoltaicas formado por um material semicondutor capaz de fazer fluir uma corrente elétrica enquanto há incidência de luz solar. O silício tem sido o elemento que tem alcançado melhores resultados de conversão de energia, com eficiência próxima aos 20%, sendo este um recurso abundante na Terra. Um sistema fotovoltaico pode ser autônomo ou conectado à rede de transmissão. Caso conectado, o consumidor tem a possibilidade de vender o excedente produzido para as concessionárias de energia sob a forma de créditos, que podem ser abatidos em débitos posteriores. Por outro lado, sistemas autônomos apresentam ótima opção para atender comunidades rurais por suprir eletricidade localmente descartando os altos investimentos com redes de transmissão e seus consequentes impactos ambientais (BOSO et al, 2015).

Tecnologias heliotérmicas, são aparelhos que coletam ou concentram a luz solar. Nos coletores a área de absorção é a mesma que intercepta a luz solar, consistindo em uma tecnologia apropriada quando não se necessita de temperaturas muito elevadas (até 100°C), sendo muito utilizada em aquecedores d'água e em fornos solares do tipo caixa. Por sua vez, os concentradores são formados por superfícies maiores com propriedades óticas que convergem

a luz solar para uma área menor, denominado de foco (ANEEL, 2005; KALOGIROU, 2009). Estes mecanismos são geralmente empregados em usinas termossolares, em fogões solares parabólicos, e em outras aplicações que precisam de temperaturas mais altas.

Os fatores que influenciam no rendimento de uma tecnologia de concentração solar são de origem climáticas e geográficos, por exemplo os índices solarimétricos e de temperatura ambiente, e fatores de projetos, como, fator de concentração, características óticas e térmicas dos materiais (FUNK, 2000). A Figura 7 apresenta o fluxo energético e os parâmetros envolvidos na conversão da radiação solar em energia térmica (SOUZA FILHO, 2008; MACEDO NETO, 2011; MEDEIROS JÚNIOR, 2016).

Figura 7. Fluxo energético no sistema de concentração solar e o esquema de conversão da radiação solar em energia térmica.



Onde:

$P_{\text{útil}}$ – potência térmica útil (W)

P_{abs} – potência máxima absorvida (W)

P_{perda} – energia perdida ao ambiente (W)

η_{u} – eficiência útil da conversão da radiação solar em energia térmica

η_{o} – eficiência ótica do sistema de captação de energia solar

η_{t} – eficiência de conversão térmica

C – fator de concentração

A_{u} – área útil da superfície refletora do concentrador (m^2)

A_{foco} – área do foco (m^2)

A_{ip} – área lateral da panela ou do receptor (m^2)

I_c – radiação instantânea interceptada na superfície refletora (W/m^2)

k_r – fração da radiação refletida (%)

ρ – refletividade da superfície do concentrador (%)

α_p – absorvidade do receptor (%)

T_{amb} – temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

T_{ep} – temperatura externa da panela ou recipiente ($^{\circ}\text{C}$)

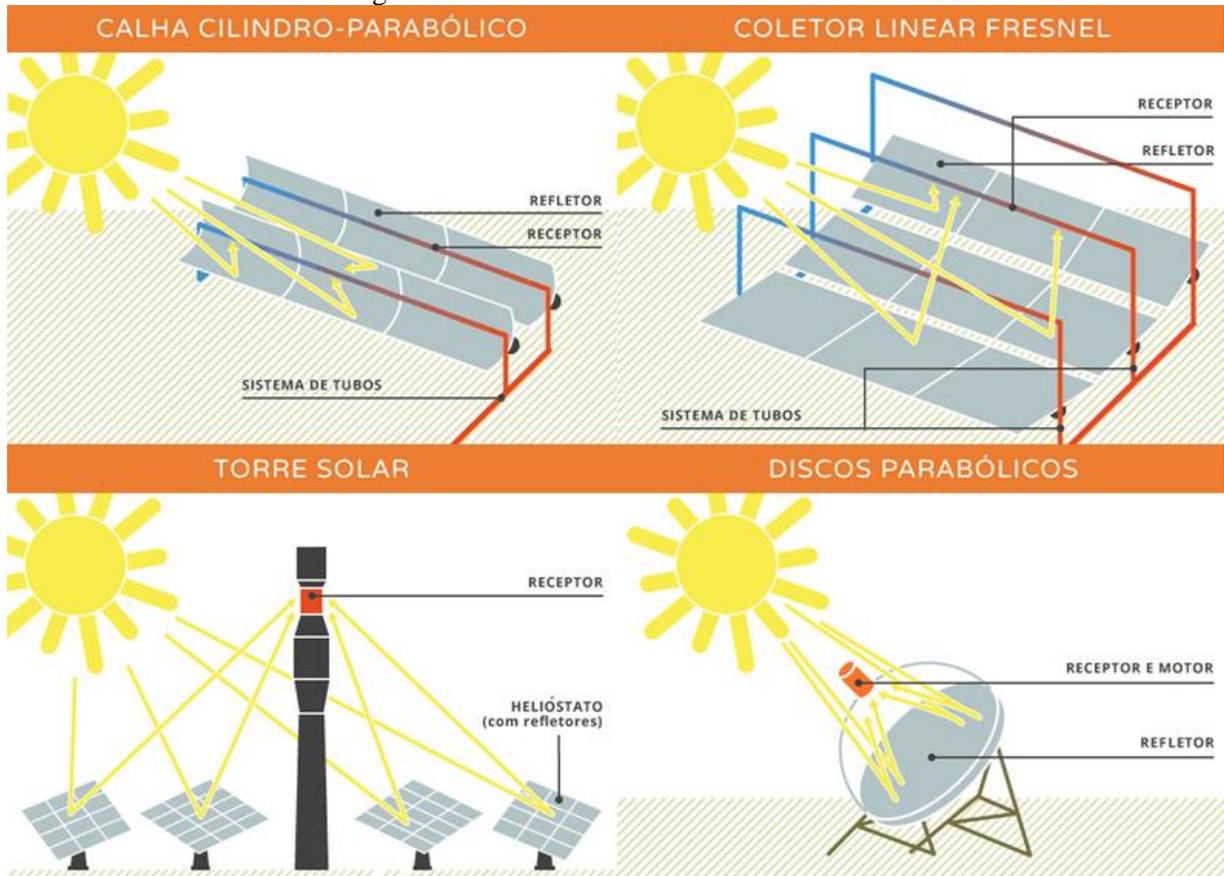
ε – emissividade do absorvedor (capacidade do corpo emitir energia infravermelha) (%)

h_{ce} – coeficiente de convecção entre a superfície do absorvedor e ar ambiente ($\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$)

A taxa de concentração (C) destes aparelhos é dada pela razão entre a superfície refletora dividida pelo foco ($C = A_{\text{refletora}}/A_{\text{foco}}$), onde quanto maior este fator, mais energia é concentrada no o ponto focal. Os concentradores solares dividem-se ainda entre os de foco linear e os de foco pontual. No primeiro, o foco situa-se sobre um tubo ao longo do concentrador contendo um fluido de trabalho, como nos casos dos concentradores parabólicos cilíndricos e dos refletores de Fresnel. Com foco pontual, existem os sistemas de torre central, em que um campo de espelhos helióstatos refletem a luz solar para um receptor central localizado no alto de uma torre, e os discos parabólicos, onde cada disco tem seu próprio ponto focal (Figura 8) (KALOGIROU, 2009).

Com exceção dos discos parabólicos, basicamente os demais sistemas heliotérmicos só são viáveis em plantas industriais ou em usinas termosolares de grande porte. Painéis parabólicos possuem a propriedade óptica de convergir a incidência sobre sua área de abertura para um ponto focal. Por conta de seu princípio geométrico a parábola é utilizada em diversos objetos do cotidiano, como em faróis de carros e antenas de telecomunicações (MACHADO, 2007). Geralmente os refletores parabólicos possuem sistemas de rastreamento solar, obtendo maiores fatores de concentração (KALOGIROU, 2009). A singularidade deste modelo, acarreta uma grande oportunidade em suprir carências energéticas em comunidades rurais, sobretudo em regiões abastadas de incidência solar, como no Nordeste brasileiro.

Figura 8. Modelos de concentradores solares.



Fonte: PORTAL Energia Heliotérmica. [20--].

Por causa de sua propriedade óptica, este tipo de concentrador possui a peculiaridade de ser modular, podendo ser construído sob diversas dimensões e matéria prima estrutural. Assim, esta tecnologia possui uma pluralidade de aplicações, como em fogões solares, sistemas térmicos e na produção de eletricidade. Estudos confirmam a possibilidade de utilizar materiais alternativos na construção dos painéis parabólicos e a sua viabilidade no processo de cocção. Por exemplo, Macedo Neto (2011) construiu um painel de 1m^2 a partir do compósito de cimento, gesso e pneu triturado, Ramos Filho (2011) montou um fogão solar com duas sucatas de antena de TV de $0,29\text{m}^2$ cada, Cerqueira e Santos (2013) cozinhou utilizando um concentrador solar parabólico de foco fixo (de Scheffler) de estrutura metálica e Medeiros Junior (2016) desenvolveu um fogão com quatro refletores de 1m^2 composto por resina ortoftálica e tecidos, capaz de cozer 4 panelas simultaneamente.

Projetos de conversão de energia térmica em eletricidade através de motor *stirling*

acoplado em grandes discos parabólicos tem sido amadurecido, existem atualmente protótipos como Eurodish e Disco Stirling pelo mundo com potências entre 15 e 50 kW cada (SOUZA FILHO, 2008; PHENG, 2014). Ao analisar o desempenho de uma planta solar composta por 15 concentradores solar de Scheffler de 16m² cada, em uma lavanderia na Índia, Bhasme e Thosar (2015) concluíram ser favorável a utilização deste tipo de tecnologia para aplicação descentralizada da energia solar. Atualmente existem mais de 100 estabelecimentos na Índia que fazem uso deste modelo de concentrador, sendo utilizados em indústrias alimentícias e em muitas cozinhas comunitárias, algumas com capacidade de preparar refeições para mais de 10.000 pessoas diariamente (GADHIA, GADHIA, 2006).

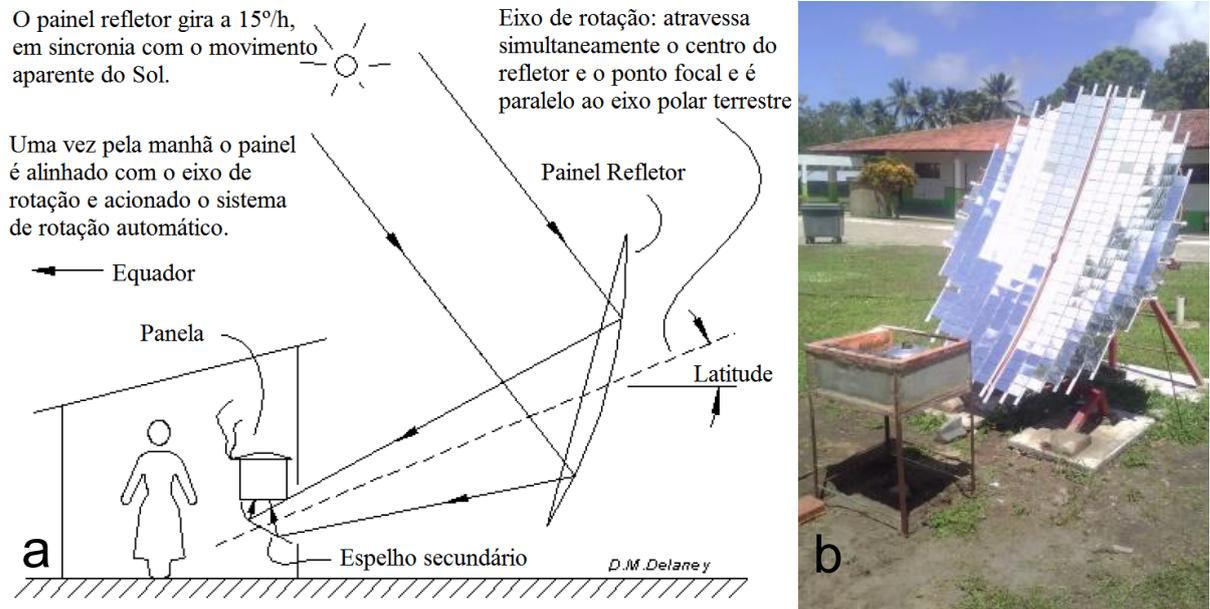
2.2.1 Concentrador solar parabólico de foco pontual fixo (Modelo de Scheffler)

Dentre modelos de concentradores parabólicos, o concentrador de Scheffler se diferencia devido a proposta de manter o foco sempre estacionado à frente do painel refletor. Esta inovação tecnológica surgiu com o propósito inicial de tornar mais cômodo o uso da energia solar no processo de cozimento de alimentos, sobretudo em comunidades rurais em países em desenvolvimento, embora também haja grande potencial para o setor industrial que demanda de médias a altas temperaturas. Abaixo, visualiza-se uma representação desta tecnologia (Figura 9.a) bem como um protótipo de 2,7 m² materializado (Figura 9.b).

O desenho do painel baseia-se em um segmento lateral de uma parábola em revolução cortado por um plano paralelo ao zênite, correspondente ao feixe de luz, formando uma antena offset. Assim, a luz solar é convergida lateralmente ao foco, possibilitando a conveniência de se ter o foco sobre um local sombreado enquanto o aparelho funciona sob o Sol (Figura 10) (DELGADO, 2015).

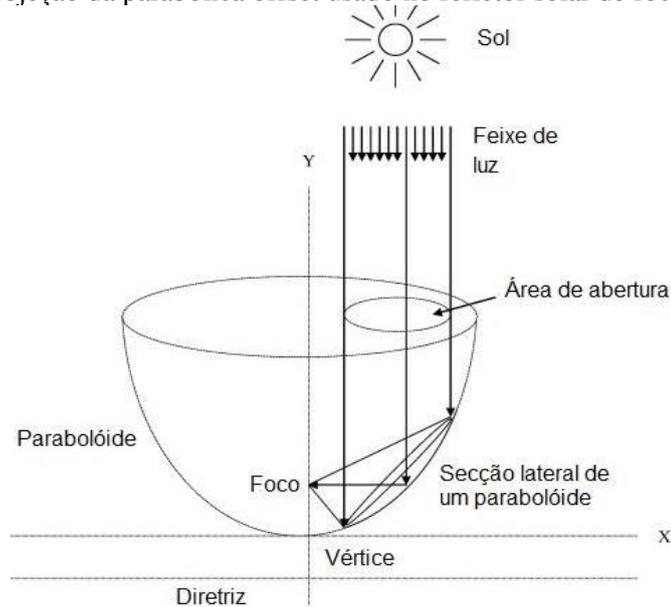
Figura 9. Representação do concentrador solar modelo de Scheffler.

a) Esquema Básico do Concentrador de Scheffler. b) Fotografia de um protótipo.



Fontes: a) adaptado de Delaney, 2009; b) Autoria própria, 2015.

Figura 10. Projeção da parabólica offset usado no refletor solar de foco pontual fixo.



Fonte: Oelher; Scheffler, 1994.

O concentrador opera sobre um eixo paralelo ao eixo polar terrestre, que percorre sobre

o centro do refletor e do ponto focal. Logo, este eixo tem inclinação igual ao ângulo de latitude local, com o propósito de anular o ângulo zenital latitudinal e interceptar a incidência solar perpendicularmente. Este prato refletor gira sobre o eixo de referência no sentido Leste-Oeste a uma velocidade de uma revolução por dia ($15^\circ/\text{h}$), acompanhando o movimento aparente do Sol, garantindo que o foco fique estático ao longo do dia. (OELHER; SCHEFFLER, 1994; SCHEFFLER, 2006).

A geometria do refletor foi desenvolvida à inclinação solar de 0° , isto é, durante os equinócios, sendo o ângulo entre o plano de abertura do painel e a superfície horizontal igual a $43,23^\circ$. Como o ângulo de incidência solar altera $\pm 23,5^\circ$ durante os solstícios, o concentrador de Scheffler conta com um mecanismo de ajuste sazonal que adequa o formato da parabólica e sua inclinação sobre o eixo de rotação com o intuito de manter o foco fixo durante todo o ano. Pode soar complicado, mas na prática este ajuste é simples, sendo realizado manualmente uma ou duas vezes por semana por meio de duas alavancas posicionadas na extremidade superior e inferior do refletor (MUNIR; HENSEL; SCHEFFLER, 2010; COVENTRY; ANDRAKA, 2017).

Neste ajuste, a inclinação do plano de abertura do painel é alterada a metade da inclinação solar, ou seja, para o solstício de verão é somado $11,75^\circ$ e para o de inverno é subtraído $11,75^\circ$ do ângulo de abertura do painel durante os equinócios. (DIB, 2009; DELGADO, 2015). Tais alterações óticas fazem com que a área útil refletora seja maior na estação de inverno do que na estação de verão. Embora haja perdas na qualidade ótica do concentrador devido imprecisões na conformação da parabólica durante os ajustes, ainda assim é possível atingir temperaturas elevadas com este modelo para diversas finalidades (OELHER; SCHEFFLER, 1994).

Estudo conduzido por Phate et al (2014) analisando o desempenho de um concentrador de Scheffler de $2,7\text{m}^2$ para ferver água, concluiu que o mesmo tinha uma potência média de 550W para uma radiação na faixa de $812\text{W}/\text{m}^2$ em um pote de 10 litros, onde 1 litro foi evaporado, acreditando ser esta uma das tecnologias mais promissoras para empregar a energia solar no preparo de alimentos em uma residência.

Com o objetivo de difundir esta tecnologia, Wolfgang Scheffler ao concebê-la pautou a possibilidade de a mesma ser fabricada em qualquer oficina e com materiais de fácil acesso em

todo o mundo, sobretudo em países em desenvolvimento. Outro fator que tem promovido a expansão e melhorias deste aparelho é o fato de o inventor não o ter protegido por patente, e, aliás, ter criado uma ONG (*Solare Bruecke*) para ampliar sua difusão pelo mundo (OELHER; SCHEFFLER, 1994).

Uma característica relevante é a versatilidade de destinação da energia concentrada pontualmente de modo estacionário. Existem diversas aplicações em fase de experimento e outras já consolidadas e em pleno uso. Exemplos de testes com avaliações positivas são os casos do uso do concentrador para torrar cacau, em casa de farinha de mandioca, extração de óleos vegetais, preparo de alimentos, padarias comunitárias, entre outras. Concentradores de Scheffler são também amplamente empregados para produção de vapor, expandindo ainda mais o leque de serventia desta tecnologia, inclusive no setor industrial (GADHIA, GADHIA, 2006; MÜLLER, 2009; DELGADO, 2015; SANTOS, 2015).

Outra opção de uso deste aparato é no tratamento térmico de água, recurso essencial à vida. A distribuição de água não é uniforme pelo globo terrestre. O semiárido brasileiro por exemplo, sofre com limitada disponibilidade de recurso hídrico, e ainda em muitos casos a água disponível não se encontra em condições adequadas para o consumo humano. Dado os altos índices de radiação solar direta no semiárido brasileiro uma alternativa sustentável é usufruí-la por meio de concentradores de Scheffler para a dessalinizar e pasteurizar a água (DAVID; SILVA; VIEIRA, 2014; JESUS et al, 2015).

2.3 PASTEURIZAÇÃO SOLAR (SOPAS)

Água é recurso indispensável para a vida e está diretamente associada à saúde. Sua importância para à humanidade está evidenciada na Resolução 64/292 de 2010 da Assembleia Geral da ONU, que versa sobre o Direito Humano à Água e ao Saneamento, que a reconhece como um direito essencial para o pleno gozo da vida e de outros direitos humanos. A água deve estar suficientemente disponível, acessível e segura, para o consumo pessoal e usos domésticos. Deste modo, precisa atender aos parâmetros quantitativos e qualitativos que garantam sua potabilidade e segurança para os usuários (ONU, 2003).

Entretanto, o acesso seguro e adequado a água não é uma realidade vivenciada em todo

o globo. Estima-se que em torno de 783 milhões de pessoas vivem sem abastecimento de água potável, estando a maioria em países em desenvolvimento (BAIN, 2014). A fragilidade no abastecimento público de água é maior em países em desenvolvimento, principalmente na zona rural, por causa da distância e dispersão das residências e por conta do fator renda financeira (REYMÃO; SABER, 2009).

São grandes os riscos de consumidores contraírem doenças infecciosas como gastroenterites, diarreias, hepatite A, cólera e outros males decorrente da ingestão de água contaminada por patógenos, como bactérias, vírus, protozoários e helmintos, que são em grande parte de origem homeotérmicos, isto é, de excretos fecais de animais de sangue quente (AMARAL et al, 2003).

Um dos indicativos da qualidade microbiológica da água é a ausência de bactérias coliformes termotolerantes, como a *Escherichia coli*. Segundo as diretrizes para a qualidade da água potável da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2011) e conforme disciplinado pela Portaria de Consolidação nº 5 de 2017 do Ministério da Saúde sobre o padrão de potabilidade, é necessária a adoção de medidas que eliminem a presença destes indicadores de contaminação fecal em sistemas de abastecimento de água para consumo humano. Sendo assim, barreiras sanitárias como filtração e desinfecção são fundamentais para assegurar a qualidade microbiológica da água potável.

A filtração baseia-se na remoção de partículas sólidas em suspensão e coloidais presentes no recurso hídrico por um meio filtrante. Este ato reduz a turbidez da água deixando os microrganismos mais expostos aos efeitos bactericidas dos desinfetantes. Por sua vez, a desinfecção tem como função a inativação dos microrganismos patogênicos contidos na água, podendo ser realizada através de agentes químicos, como por soluções cloradas, ou por agentes físicos, por meio de raios ultravioleta e pelo calor (DANIEL, 2001; BASTOS, 2007).

Habitualmente a desinfecção nos sistemas de abastecimento é realizada pela adição de cloro na água, que em casos de maior concentração associa gosto e a formação de trihalometanos, como clorofórmio, que apesar não haver comprovações de efeitos tóxicos em baixas concentrações, existe a hipótese de serem nocivos à saúde humana (ZARPELON; RODRIGUES, 2002). Conforme Silva, Alves e Portilho (2016) quase 67% dos domicílios rurais no Brasil não são abastecidos com água encanada. Por vezes, habitantes de zonas remotas

podem ter dificuldades de acesso aos agentes químicos desinfetantes, sendo adequado empregar métodos alternativos que garantam a desinfecção da água para consumo (SANTOS; GARRIDO; CORRÊA, 2009).

Diante disso, técnicas como Desinfecção Solar (*Solar Water Disinfection* – SODIS) e Pasteurização Solar (*Solar Pasteurization* – SOPAS) apontam ser soluções viáveis e sustentáveis para produzir água biologicamente segura para beber em comunidades longínquas (SILVA, 2016). A faixa latitudinal entre 15° a 35° (N e S), onde predomina-se o clima árido e semiárido, é a área mais favorável para fazer uso destes tipos de tratamentos, pois possuem maiores níveis e períodos anuais de insolação direta, seguido da faixa de latitude entre os 15°N e 15°S. Nestes perímetros situam-se a maioria dos países em desenvolvimento e localidades com deficiências hídricas (SANDEC; EAWAG, 2002).

O método SODIS consiste em expor a água com baixa turbidez em garrafas translúcidas à luz do Sol ao longo de 6 horas. A literatura recomenda que, na ocasião, o dia seja de céu limpo e que a temperatura da água chegue aos 50°C. Comumente se utiliza garrafas de vidro ou PET (Politereftalato de etileno) reaproveitadas. Na circunstância ocorrem dois efeitos desinfetantes sinérgicos, que são: a ação dos raios ultravioleta (UV-A) na inativação reprodutiva microbiana e a eliminação dos microrganismos patogênicos através do aquecimento da água pela radiação infravermelha (ondas acima de 0,7µm) (MOREIRA; PATERNIANI, 2005; OLIVEIRA; SOUZA; LUIZ, 2015; CARVAJAL, 2015).

Da radiação emitida pelo Sol, a fração de raios ultravioletas são mais energéticas e agressivas às células vivas. Parte desta luz, UV-B e UV-C (0,2 a 0,32µm), é absorvida pela camada de ozônio, enquanto apenas a UV-A (0,32 a 0,4µm) chega à superfície terrestre. Os raios UV-A são letais aos agentes patogênicos, provocando modificações genéticas e impedindo a reprodução celular. Além disso, a luz ultravioleta interage com o oxigênio dissolvido na água produzindo substâncias reativas que degradam os patógenos (SANDEC; EAWAG, 2002).

Os microrganismos patogênicos são sensíveis ao calor, de modo que a temperatura da água é um fator preponderante que influi no tempo e na eficácia de desinfecção solar. Para a efetiva aniquilação dos indicadores de contaminação não é necessário ferver a água, basta aquecê-la a temperaturas na ordem de 60°C a 75°C por um espaço de tempo, que ocorre um processo físico de desinfecção chamado pasteurização, ao qual reduz o consumo energético e é

possível ser realizado a partir da energia solar (SANDEC; EAWAG, 2002). À medida que a temperatura da água aumenta o tempo necessário para a destruição dos agentes patógenos é reduzido (CARIELO, 2011).

Neste sentido, para avaliar a eficiência da pasteurização solar para inativação de coliformes totais e *E. coli* utilizando um coletor plano com capacidade de dois litros de água por batelada, Carielo (2011) submeteu amostras do Riacho Cavouco (Recife/PE) a determinadas combinações de temperatura e tempo de exposição, que a saber foram: 55°C por 1 hora, 60°C por 45 minutos, 65°C por 30 minutos, 75°C por 15 minutos, e 85°C por 15 segundos. Ao analisar as amostras antes e depois pelo método de contagem dos indicadores por Números Mais Prováveis (NMP) o autor constatou que houve a efetiva inativação dos microrganismos em todas combinações experimentadas.

Da mesma forma, Rodrigues (2011), antes de fazer testes de SOPAS com 3 modelos de coletor solar (1 comercial e 2 alternativos de baixo custo), realizou testes em condições controladas para identificar a temperatura de inativação de coliformes totais e de *E. coli* em função da temperatura (na faixa entre 20 a 96°C, com acréscimo de 10 em 10°C) com detenção de 15 e 30 min em cada intervalo, e constatou a aniquilação de coliformes totais a 50°C e de *E. coli* aos 60°C ambos após 15 minutos de ação. O autor concluiu que apenas no aquecedor comercial houve máximas acima de 60°C e a completa inativação dos indicadores, enquanto nos outros dois não chegaram nem aos 45°C.

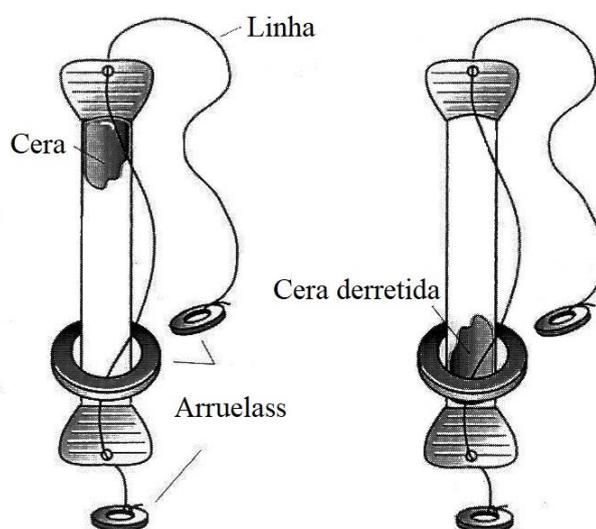
De acordo com Carielo, Tiba e Calazans (2016) o método SOPAS é mais eficiente do que o SODIS pois além de exigir menor tempo de exposição solar, nele ocorre a completa inativação dos patógenos independentemente da turbidez e pH da água, impedindo assim o recrescimento bacteriano após o tratamento. Este fato foi confirmado nos ensaios de Moreira e Paterniani (2005), onde houve 100% da inativação de *E. coli* em apenas 4 horas de exposição das garrafas pet com sistema de concentração solar, contra 98,46% após 6 horas nas garrafas sem concentrador, sendo que apenas no primeiro houve a pasteurização (com temperaturas na ordem de 70°C). Resultados similares foram encontrados por Oliveira, Souza e Luiz (2015), onde apenas nas garrafas com sistema de concentração solar houve a total inativação de coliformes termotolerantes e dentro do intervalo de quatro horas de exposição a luz do Sol.

Os trabalhos conduzidos por Rodrigues (2011), Carielo (2011), e Silva et al (2013)

constataram a total aniquilação dos indicadores de contaminação ao utilizar sistema de coletor solar plano para promover a pasteurização da água. Como visto, a técnica SOPAS pode ser realizada fazendo uso de diferentes tipos de tecnologias solares, como coletores e concentradores. A pasteurização solar é uma técnica viável e sustentável sobretudo para comunidades localizadas no semiárido brasileiro, visto a deficiência hídrica e os altos níveis de insolação na região, podendo inclusive ser uma tecnologia de barreira sanitária na convivência com o semiárido (OLIVEIRA; SOUZA; LUIZ, 2015).

Para facilitar o monitoramento do processo de pasteurização, sobretudo quando não se tem termômetros disponíveis, Ndlovu (2017) desenvolveu um Indicador de Pasteurização Solar (*Water Pasteurization Indicator – WAPI*), que é um mecanismo simples e de baixo custo no qual permite ao usuário comum saber se a água foi pasteurizada e está segura para o consumo humano. Basicamente o WAPI consiste em um tubo plástico com as pontas seladas, com uma fração de cera que se derrete a 65°C no topo superior do tubo e uma arruela que matem o WAPI na vertical e no fundo da garrafa. Na ocasião, quando a cera se derrete e escorre para o fundo do tubo indica que ocorreu o processo de pasteurização. Para melhor compreensão a Figura 11 apresenta um esboço do indicador de pasteurização solar. Este mecanismo tem se popularizado pelo continente africano, visto sua praticidade e acessibilidade (NDLOVU, 2017).

Figura 11. Esboço de um WAPI (Indicador de Pasteurização Solar).



Fonte: Ndlovu, 2017.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os materiais e métodos empregados no desenvolvimento desta pesquisa. Trata-se de um trabalho experimental que envolveu a construção e avaliação de desempenho de um protótipo de concentrador solar parabólico de foco fixo com dimensões reduzidas aos encontrados em acervo bibliográfico. Não obstante, também foi preparado um forno receptor com o intuito de reduzir as perdas de energia com o ambiente durante os ensaios experimentais de pasteurização solar da água.

3.1 CONSTRUÇÃO DO CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIXO

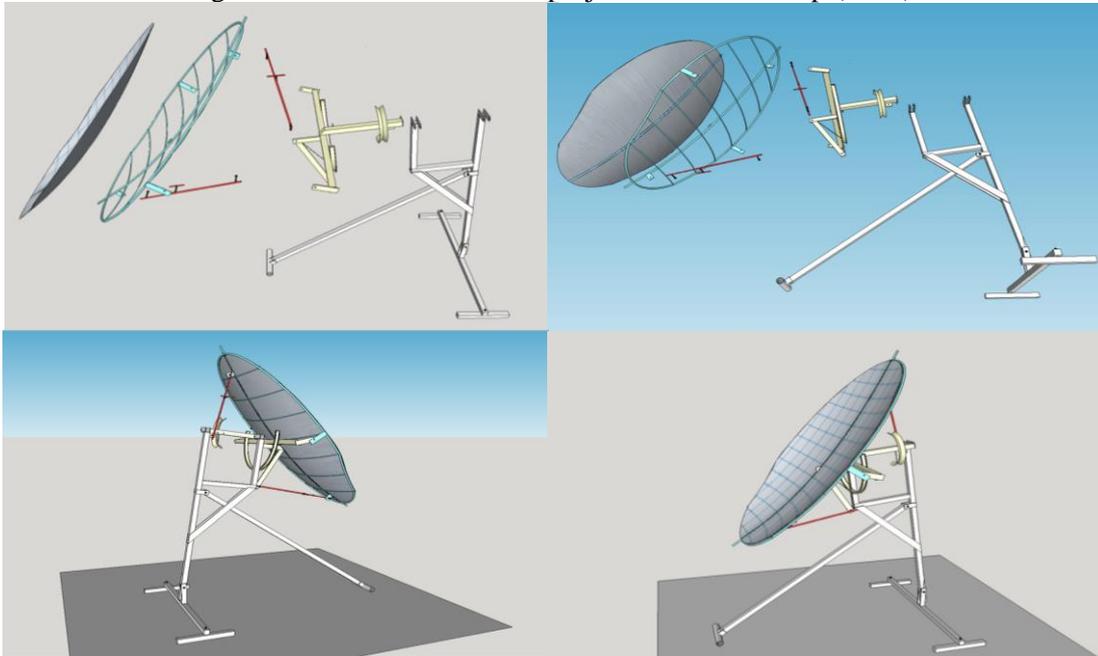
A construção do protótipo utilizado nesta pesquisa foi baseada no concentrador solar de Scheffler. Revisando a metodologia do processo construtivo de um concentrador solar de 2,7m² de área refletora descrito nas publicações de Dib (2009), Gomez e Kern (2010), Cerqueira e Santos (2013), foi realizado primeiramente a modelagem em 3D de um concentrador com as mesmas dimensões através do software de simulação 3D SketchUp (2017). Após concluído a ilustração, o modelo do concentrador foi reduzido em escala pelo próprio programa a um terço de seu tamanho, resultando em uma superfície refletora de 0,30 m² (Figura 12). A escolha deste software se deu pelo fato de ter uma versão gratuita.

Este concentrador solar é composto por um painel refletor, suporte de rotação, sistema de rotação, ajustadores sazonais e base. A estrutura do concentrador foi construída com perfis de metalon, utilizando um total de 4.978 mm de tubo quadrado (16 x 16 mm); 350 mm de tubo quadrado (20 x 20 mm); 2.140 mm de barra chata (16 x 2 mm); 6.202 mm de barra redonda (1/4"); e 160 mm de tubo redondo (3/4").

Com exceção dos fotosensores, do motor e dos termômetros, que foram comprados pela internet, todos os demais materiais do concentrador e do forno foram obtidos em uma cidade pequena do interior pernambucano chamada Palmares, que tem uma população aproximada de 62 mil habitantes. O processo construtivo foi realizado através da prestação de serviços de uma serralheria local. Esta observação é relevante pois denota a facilidade fabril deste equipamento, inclusive em municípios distantes de grandes metrópoles, uma vez que não é necessário uso de

materiais raros ou tecnologicamente sofisticados.

Figura 12. Concentrador solar projetado em SketchUp (2017).



Fonte: Autoria própria, 2017.

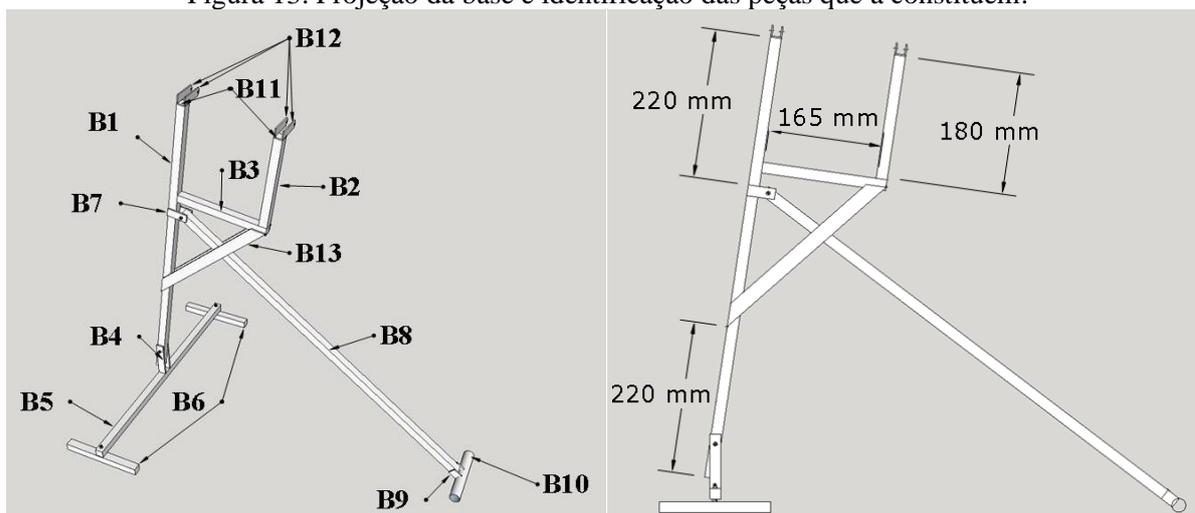
Sabendo que a declividade do eixo de rotação é igual ao ângulo de latitude do local de instalação do concentrador, a base foi reprojeta para que este ângulo fosse ajustável. Medindo com um transferidor o ângulo entre uma haste que interliga as peças B12 (onde perfaz o eixo de rotação) e um prumo, altera-se a inclinação das peças B1 e B8 até que se tenha o ângulo desejado. No Quadro 1 são relacionadas as peças que formam a base deste modelo com suas devidas dimensões e na Figura 13 é apresentado o posicionamento de cada uma delas.

Quadro 1. Peças que compõem a base do concentrador solar.

Nomenclatura	Quantidade	Perfil	Dimensões (mm)	Comprimento (mm)
B1	1	Tubo quadrado	16 x 16 x 2	652
B2	1	Tubo quadrado	16 x 16 x 2	183
B3	1	Tubo quadrado	16 x 16 x 2	180
B4	2	Barra chata	16 x 2	80
B5	1	Tubo quadrado	16 x 16 x 2	520
B6	2	Tubo quadrado	16 x 16 x 2	160
B7	2	Barra chata	16 x 2	40
B8	1	Tubo quadrado	16 x 16 x 2	735
B9	2	Barra chata	16 x 2	20
B10	1	Tubo redondo	3/4"	160
B11	2	Barra chata	16 x 2	16
B12	4	Barra chata	16 x 2	50
B13	2	Barra chata	22 x 3	305
Parafusos, porcas e arruelas	4, 10 e 10	Aço inox	3/8"	1"

Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 13. Projeção da base e identificação das peças que a constituem.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Para a construção do painel refletor, primeiramente desenhou-se um gabarito no software CorelDRAW (2014). O desenho do gabarito foi impresso em duas folhas A1 (594 x 841 cm) e colado sobre ambos os lados de um bloco de madeira compensada de 110 x 80 cm. A estrutura do painel refletor é formada pela barra central, barras transversais e pelo arco da

parabólica (Quadro 2 e Figura 14). Como o gabarito é tracejado com linhas finas, é importante salientar que os traços do arco e das barras transversais representam sua face interna, enquanto a linha da barra central representa a sua face externa. A Figura 15 mostra o gabarito delineado.

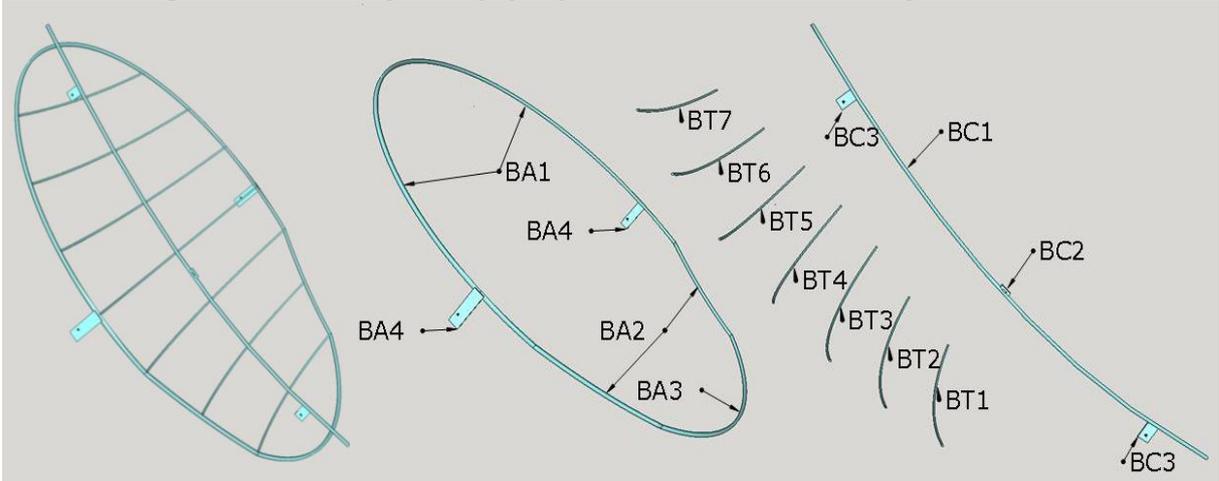
A estrutura parabólica erguida foi coberta com uma chapa de alumínio para a fixação dos espelhos. Utilizando cola silicone, fixou-se quase 450 pedaços de espelhos quadrado de 2,5 cm de 3 milímetros de espessura. Como os espelhos utilizados são planos, quanto menor suas dimensões, melhor o acompanhamento da imagem real da parábola, e conseqüentemente maior o fator de concentração, segundo a metodologia de RAMOS (2011).

Quadro 2. Peças que compõem o painel refletor do concentrador solar.

BARRA CENTRAL					
Nomenclatura	Quant.	Perfil	Dimensões (mm)	Comprimento (mm)	
BC1	1	Barra redonda	¼"	750	
BC2	1	Barra chata	16 x 2	20	
BC3	2	Barra chata	16 x 2	25	
ARCO DO REFLETOR					
Nomenclatura	Quant.	Perfil	Dimensões (mm)	Comprimento (mm)	
BA1	2	Barra redonda	¼"	695	
BA2	2	Barra redonda	¼"	205	
BA3	1	Barra redonda	¼"	300	
BA4	2	Barra chata	16 x 2	60	
BARRAS TRANSVERSAIS					
Nomenclatura	Quant.	Perfil	Dimensões	Raio (mm)	Comprimento (mm)
BT1	1	Barra redonda	¼"	643	342
BT2	1	Barra redonda	¼"	700,7	429,7
BT3	1	Barra redonda	¼"	752,3	523
BT4	1	Barra redonda	¼"	799,3	541
BT5	1	Barra redonda	¼"	842	520,3
BT6	1	Barra redonda	¼"	881,3	461,3
BT7	1	Barra redonda	¼"	917,3	334

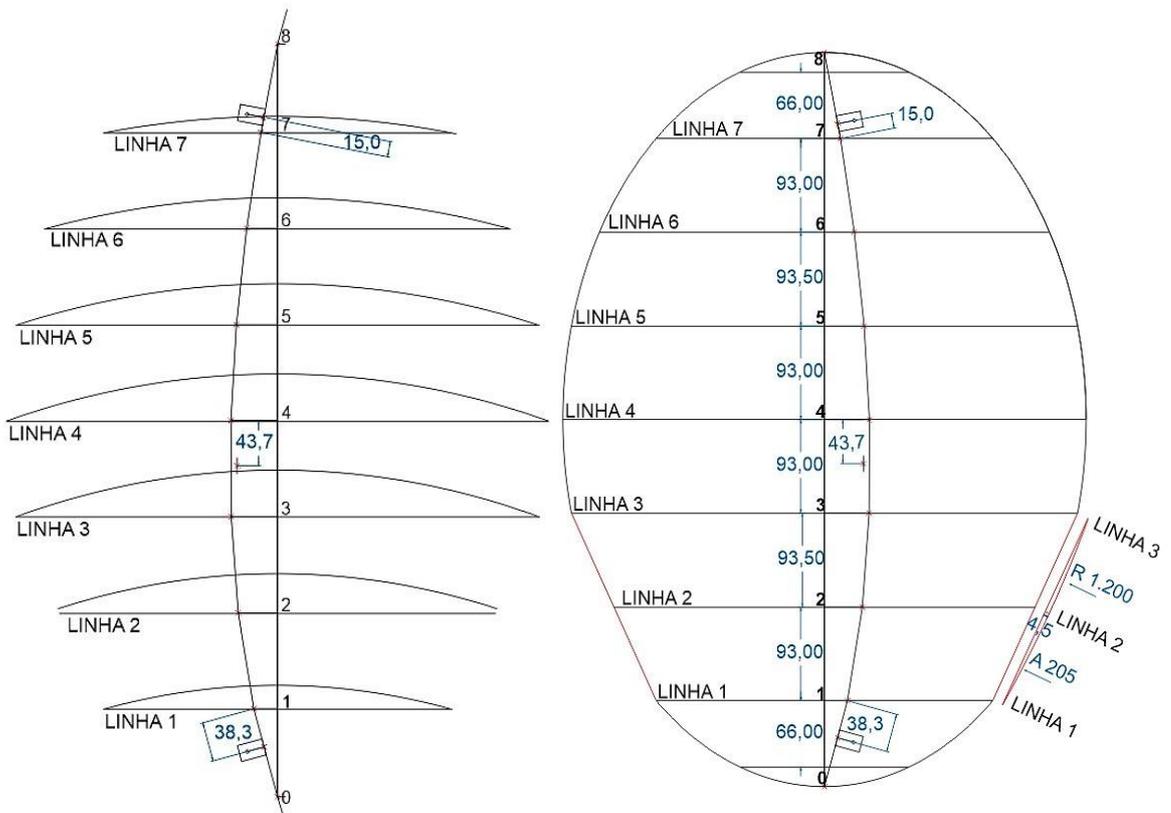
Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 14. Identificação das peças que constituem a estrutura do painel refletor.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 15. Gabarito do painel refletor.



Fonte: Autoria própria, 2017.

Os ajustadores sazonais são duas alavancas que tem a função de adequar o painel refletor

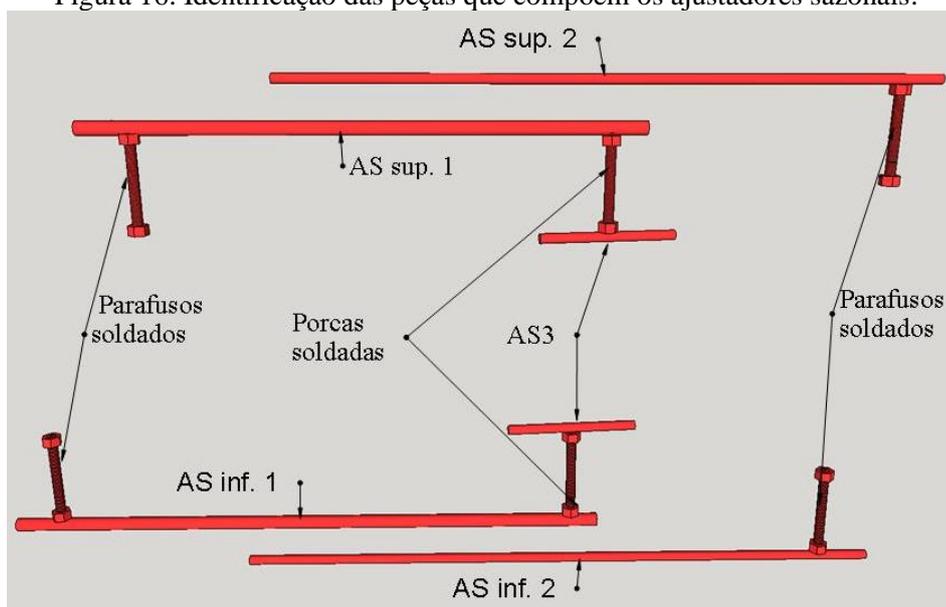
conforme a inclinação solar decorrente do movimento de translação da Terra. A operação dos ajustadores é muito simples e é feito manualmente uma vez por semana ou sempre que a imagem convergida pelos espelhos desviar do ponto focal almejado. No Quadro 3 e na Figura 16 são descritas as peças que integram os ajustadores sazonais.

Quadro 3. Peças que compõem os ajustadores sazonais do concentrador solar.

Nomenclatura	Quantidade	Perfil	Dimensões	Comprimento (mm)
AS sup. 1	1	Tubo circular	3/8"	140
AS sup. 2	1	Barra circular	1/4"	200
AS inf. 1	1	Tubo circular	3/8"	210
AS inf. 2	1	Barra circular	1/4"	250
AS3	2	Barra circular	1/4"	100
Parafuso sextavado com porca	6	Aço inox	1/8"	1"

Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 16. Identificação das peças que compõem os ajustadores sazonais.



Fonte: Autoria própria, 2017.

O suporte de rotação é um componente importante que intersecciona o painel refletor à base e aos ajustadores sazonais e que o permite girar em torno do eixo de referência para o rastreamento solar diário. Conforme as metodologias de Dib (2009), Gomez e Kern (2010) e Cerqueira e Santos (2013), para garantir a máxima precisão durante a montagem do suporte de

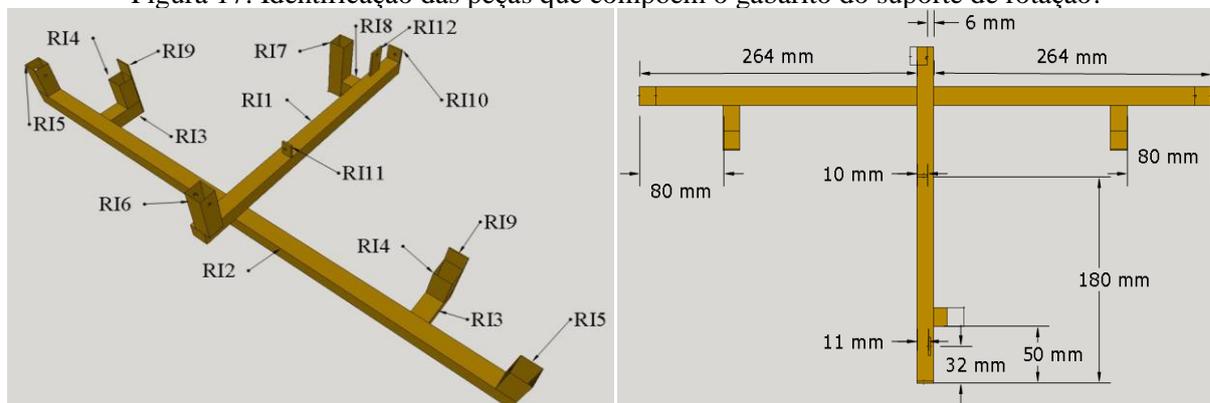
rotação e evitar efeitos da dilatação durante a soldagem, foi feito primeiramente um gabarito com as peças relacionadas no Quadro 4 e Figura 17.

Quadro 4. Peças que compõem o gabarito do suporte de rotação do concentrador solar.

Nomenclatura	Quantidade	Perfil	Dimensões (mm)	Comprimento (mm)
RI 1	1	Tubo quadrado	16 x 16 x 2	293
RI 2	1	Tubo quadrado	16 x 16 x 2	544
RI 3	2	Tubo quadrado	16 x 16 x 2	38,5
RI 4	2	Tubo quadrado	16 x 16 x 2	32
RI 5	2	Tubo quadrado	16 x 16 x 2	35
RI 6	1	Tubo quadrado	16 x 16 x 2	50
RI 7	1	Tubo quadrado	16 x 16 x 2	65
RI 8	1	Tubo quadrado	16 x 16 x 2	13
RI 9	2	Barra chata	16 x 2	65
RI 10	1	Barra chata	16 x 2	16
RI 11	1	Barra chata	16 x 2	10
RI 12	1	Barra chata	16 x 2	30

Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 17. Identificação das peças que compõem o gabarito do suporte de rotação.



Fonte: Autoria própria, 2017.

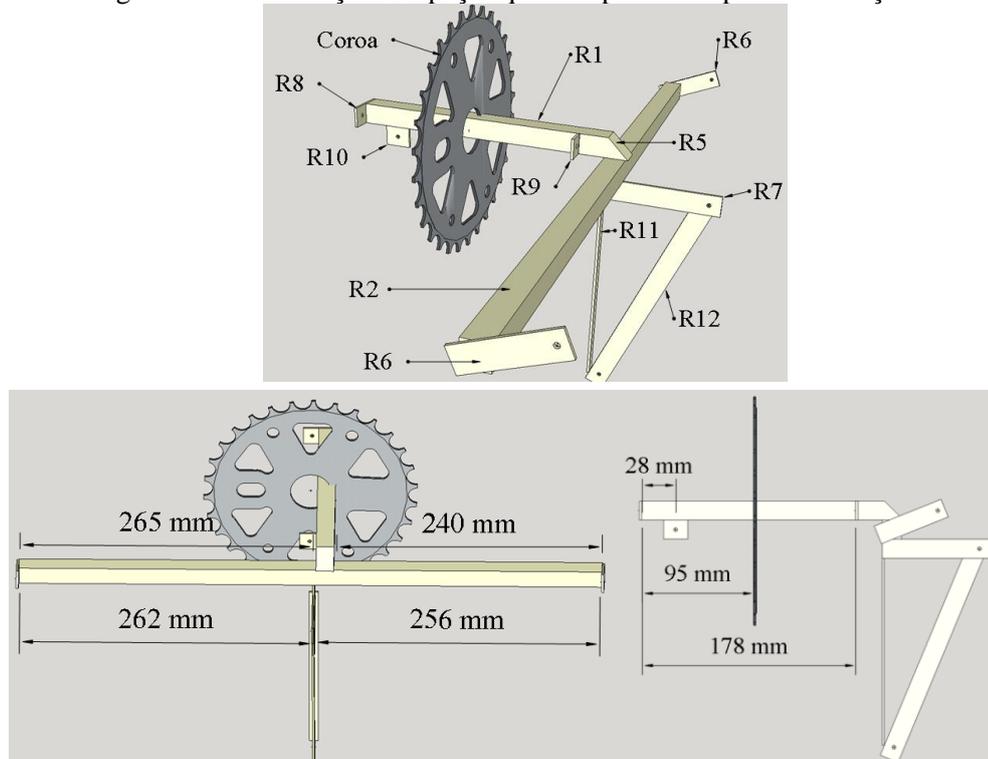
Com o gabarito pronto, iniciou-se a montagem do suporte de rotação encaixando as peças R1 e R2 e parafusando as peças R6, R7, R8, R9, R10 e R12 no gabarito, e soldando-as em seguida. O Quadro 5 e a Figura 18 apresentam as peças que constituem o suporte de rotação.

Quadro 5. Peças que compõem o suporte de rotação do concentrador solar.

Nomenclatura	Quantidade	Perfil	Dimensões	Comprimento
R1	1	Tubo quadrado	16 x 16 x 2	218
R2	1	Tubo quadrado	16 x 16 x 2	544
R5	1	Barra chata	16 x 2	25
R6	2	Barra chata	16 x 2	60
R7	1	Barra chata	16 x 2	90
R8	1	Barra chata	16 x 2	30
R9	1	Barra chata	16 x 2	15
R10	1	Barra chata	16 x 2	20
R11	1	Barra chata	16 x 2	157
R12	1	Barra chata	16 x 2	185
Coroa	1	46 dentes		

Fonte: Autoria própria, 2017.

Figura 18. Identificação das peças que compõem o suporte de rotação



Fonte: Autoria própria, 2017.

Ao todo, a transmissão do sistema de rotação contou com um motor modelo AK360/2.2PF12R44SC, com uma roldana de cambio traseiro de bicicleta de 10 dentes na ponta

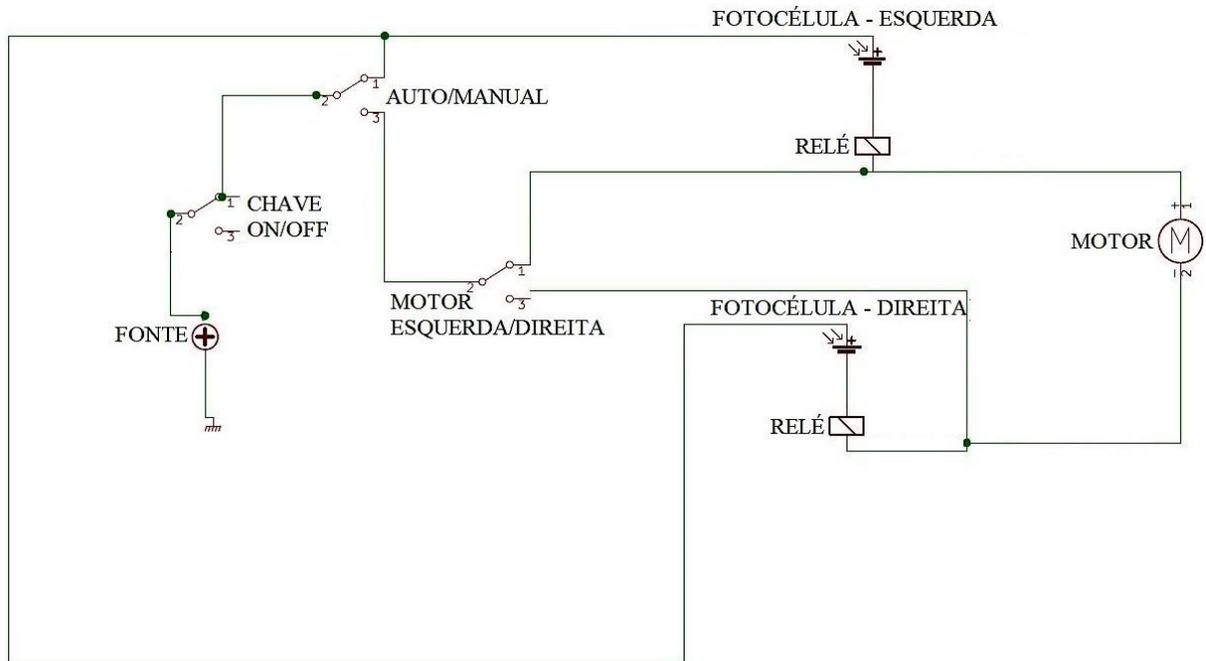
do eixo do motor, uma coroa de 46 dentes fixada no suporte de rotação e uma corrente de bicicleta transmitindo a rotação da roldana para a coroa.

O modo de tração do sistema de rotação deste protótipo ficou diferente dos revisados, tendo este uma coroa de bicicleta soldada diretamente no suporte de rotação, mais especificamente na peça R1, enquanto em outros a rotação é transmitida de uma coroa para uma corrente fixada numa peça semicircunferencial do suporte de rotação, na qual foi excluída deste protótipo. O centro da coroa é coincidente com o eixo de rotação do concentrador.

O sistema de rotação foi automatizado utilizando dois relés, dois fotosensores de 12v e um motor de corrente contínua (2W, 12V, 44RPM, 2.2 Kgf.cm). Devido condições orçamentárias, a princípio o protótipo é alimentado por uma fonte 12V, porém, há condições de alimentá-lo com células fotovoltaicas, o que será mais conveniente uma vez que o concentrador é modular e móvel, podendo ser utilizado inclusive em lugares desprovido de eletricidade.

O mecanismo de rotação possui três disjuntores, sendo uma para ligar e desligar; modo manual e automático; e parado, giro à esquerda e à direita quando no modo manual. Para o modo automático, cada fotosensor foi posicionado nas extremidades frontal da peça R2 do suporte de rotação. Quando os dois fotosensores são simultaneamente iluminados ou sombreados o motor se mantém desligado, porém quando um é exposto a luz e outro fica na sombra o motor é ligado. Desta forma, o rastreamento automático funciona da seguinte forma: enquanto os dois fotosensores receberem luz, o painel fica estático convergindo a radiação solar para o foco, porém, quando um sensor é sombreado pelo painel refletor e o outro se mantém iluminado, o motor é acionado para rastrear o Sol até que as duas fotocélulas fiquem novamente iluminadas. O diagrama elétrico do sistema de rotação é ilustrado na Figura 19.

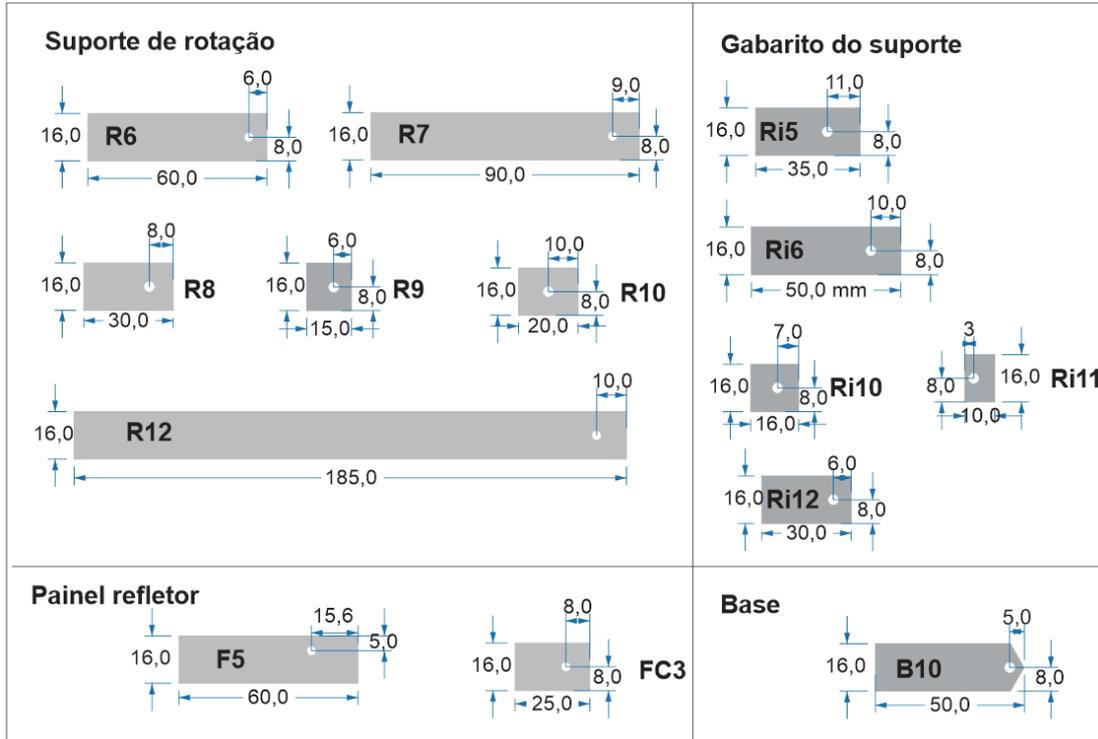
Figura 19. Diagrama elétrico do sistema de rotação.



Fonte: Autoria própria, 2017.

A base, o suporte de rotação, os ajustadores sazonais e o painel refletor são interligados entre si por meio de parafusos. Com isso, foi imprescindível imprimir um desenho com as medidas e localização dos furos nas peças para garantir a precisão durante a instalação do protótipo (Figura 20). Este detalhe da estrutura ser desmontável é importante pois facilita a mobilidade do concentrador.

Figura 20. Desenho das peças que foram furadas para passar os parafusos.



Fonte: Autoria própria, 2017.

As coordenadas geográficas de Palmares/PE são $8^{\circ} 41'$ Sul, $35^{\circ} 35'$ Oeste, assim a base do concentrador foi configurada para que a princípio o eixo de rotação do concentrador ficasse com ângulo entre 8° a 9° em relação ao plano paralelo ao eixo polar. O concentrador funciona voltado para a linha do Equador, deste modo como o local de pesquisa localiza-se no hemisfério sul, o painel refletor foi direcionado para o norte geográfico. Em todos os dias em que é feito o uso do equipamento, primeiramente visualiza-se se a luz solar está convergindo para o foco almejado, caso não, o painel é guiado manualmente para o ponto inicial e se necessário, é feito o ajuste sazonal. Localizado o foco, é acionado o disjuntor de ligar e o de modo automático.

Na Figura 21 é exibido o protótipo de concentrador disco de Scheffler de $0,30\text{m}^2$ devidamente construído.

Figura 21. Protótipo reduzido do Concentrador de Scheffler.



Fonte: Autoria própria, 2017.

3.2 CONSTRUÇÃO DO FORNO RECEPTOR

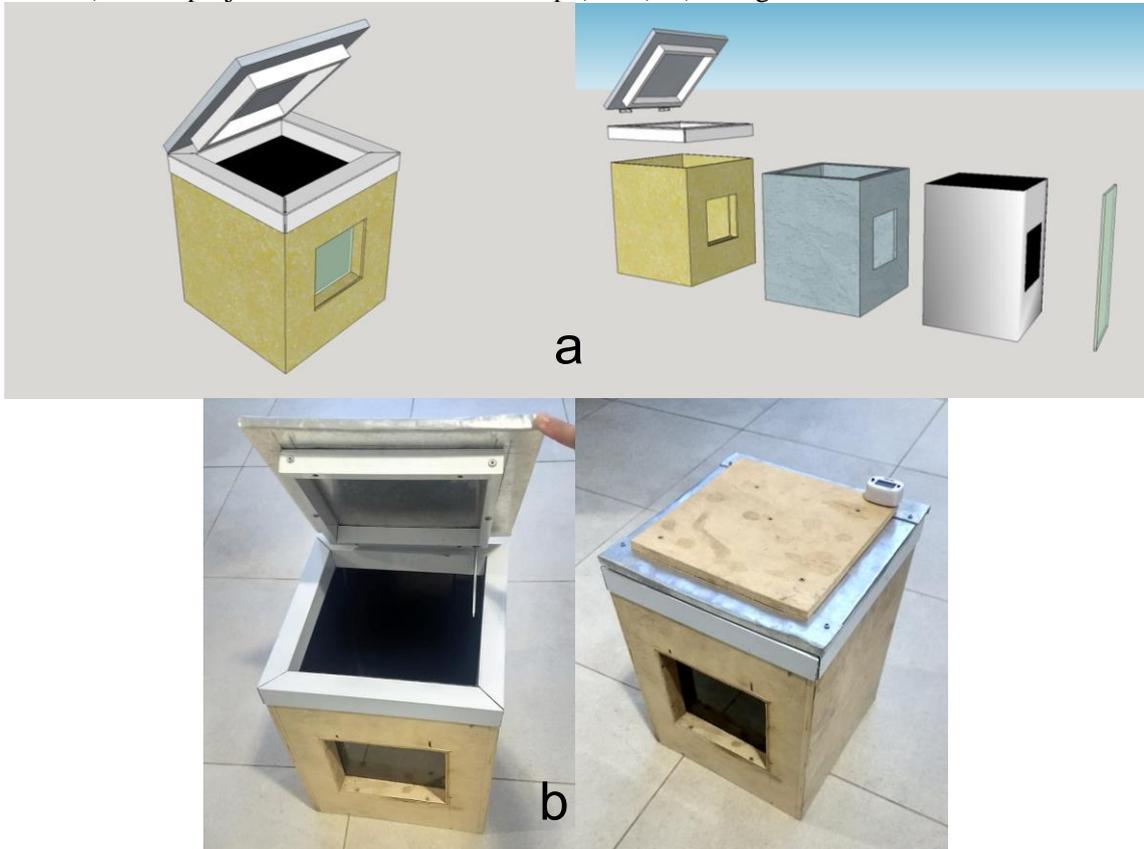
Existem perdas térmicas em sistemas termosolares por transferências de condução, convecção e radiação da energia, que conseqüentemente reduz o desempenho do dispositivo solar. Todavia, estas perdas são mais significativas pelo efeito da convecção com o ambiente. Deste modo, um receptor térmico de cavidade (forno) desempenha importante papel na redução das perdas energéticas no ponto focal do refletor, aumentando a eficiência térmica do concentrador solar (PANWARA; KAUSHIK; KOTHARI, 2012; VIKRAM; REDDY, 2015).

Este tipo de receptor possui aberturas para a entrada da luz solar pelo foco. O absorvedor em seu interior (geralmente um corpo negro) é normalmente envolvido por um isolante térmico. Além de reduzir as perdas térmicas e óticas, o mesmo possui a vantagem de ter alta absorção solar, temperaturas quase uniformes em todo seu interior, desempenhos térmicos mais constantes e baixo custo (WU et al, 2010). Considerando tais premissas, foi construído um receptor de cavidade de 18 litros para acomodar os recipientes com água durante o processo de pasteurização solar.

O receptor também foi desenhado no software SketchUp (2017) e construído em uma oficina de serralheria e marcenaria no município de Palmares – PE. O forno possui uma abertura de 15 x 15cm em uma das paredes laterais que foi tampada com um vidro temperado reaproveitado de um fogão quebrado. O receptor foi composto por três camadas, sendo o absorvedor, isolante térmico e acabamento externo. A parte interna foi montada reaproveitando uma lata de cola de 18 litros, que foi previamente higienizada, lixada e pintada com tinta preta própria para altas temperaturas. No isolamento térmico foi empregado lã de vidro, que é um material antichama, flexível, de baixo custo e de fácil aplicação. E por fim, o acabamento foi feito utilizando perfis de alumínio e compensados de madeira.

Para o monitoramento da temperatura interna do forno acoplou-se um termômetro culinário digital com haste de 12cm em uma das paredes laterais, de modo que a haste ficou acima da área de abertura do foco e sem que encostasse na parede interna do absorvedor e nem nas cargas. Segundo os dados do comerciante, este termômetro afere temperaturas entre -50 a 300°C. Para a leitura de temperatura ambiente e da carga (garrafa d'água) foi adquirido termômetros digitais com sonda de um metro que fazem medições entre -50 a 110°C, e para medições da temperatura focal utilizou-se um termômetro de infravermelho. A Figura 22 apresenta o forno projetado e concluído.

Figura 22. Forno receptor projetado em SketchUp (2017) e construído.
a) Forno projetado no software SketchUp (2017). b) Fotografia do forno construído.



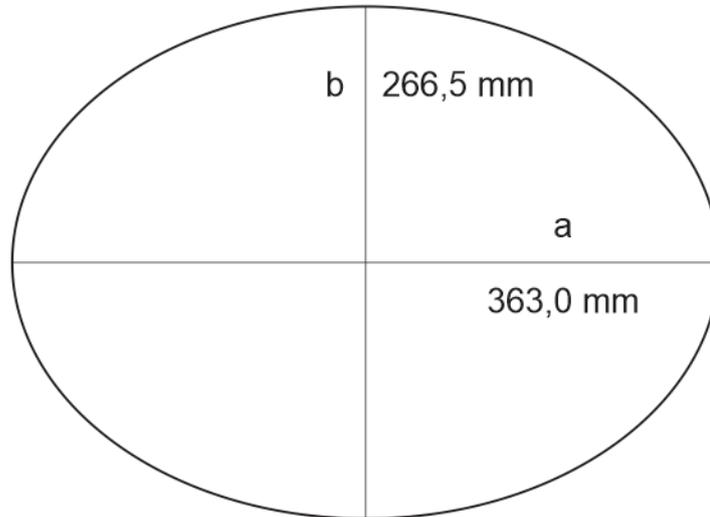
Fonte: Autoria própria, 2017.

3.3 CÁLCULOS DE DESEMPENHO DO CONCENTRADOR SOLAR

A instrumentalização definida para a identificação do desempenho térmico do protótipo construído nesta pesquisa fundamentou-se numa série de trabalhos de dissertações realizados no curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do programa de Pós-graduação na Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Os cálculos para identificar o fator de concentração, eficiência útil, ótica e térmica e a potência energética do concentrador solar são descritos a seguir (LION FILHO, 2007; RAMOS FILHO, 2011; SOUZA FILHO, 2008; MACEDO NETO, 2011; SOUZA, 2014; MEDEIROS JÚNIOR, 2016).

Para conhecer a área refletora teórica aproximada deste modelo de concentrador solar pode-se calcular a área da elipse formada pela borda do painel refletor (Figura 23 e Equação 1).

Figura 23. Imagem elíptica da borda do painel refletor.



Fonte: Autoria própria, 2018.

$$A_t = \pi \cdot a \cdot b \quad (1)$$

Onde:

A_t – área refletora teórica em m^2 (total)

π – pi

a – raio do semieixo maior

b – raio do semieixo menor

Por conta do sistema de ajuste sazonal que altera a inclinação e o formato da parábola deste modelo de acordo com o ângulo de incidência solar, é preciso calcular o fator de abertura para saber a dimensão da superfície refletora útil do painel para cada dia do ano (Equação 2). Considerando que a mudança do ângulo de incidência solar seja constante durante o ano, somasse $23,50^\circ$ para o solstício de verão e subtraísse $23,50^\circ$ para o solstício de inverno (DIB, 2009; DELGADO, 2015).

$$\text{Fator de abertura} = \cos \left(43,23^\circ \pm \frac{\text{Inclinação solar}}{2} \right) \quad (2)$$

Onde:

Inclinação solar – Valor entre $\pm 23,50^\circ$

Assim, para identificar a área útil do protótipo basta multiplicar a área teórica pelo fator de abertura do dia. Ademais, Delgado (2015) sugere considerar perdas óticas do painel devido a possíveis imprecisões e imperfeições da superfície refletora. Deste modo para definir a área útil do concentrador construído neste trabalho foi subtraído 10% da área teórica (Equação 3), uma vez que este protótipo tem dimensões reduzidas e as peças terem sido rigorosamente conferidas nos gabaritos durante o processo de construção.

$$A_u = (A_t \cdot \text{fator de abertura}) - 10\% \quad (3)$$

Onde:

A_u – área útil da superfície refletora do concentrador (m^2)

A_t – área refletora teórica (total)

Fator de abertura – $\cos (43,23^\circ \pm 11,75^\circ)$

A área do ponto focal do concentrador solar é calculada pela Equação 4.

$$A_f = \pi \cdot r^2 \quad (4)$$

Onde:

A_f – área do foco (m^2)

π – pi

r – raio da circunferência

O fator de concentração é calculado pela razão entre a área refletora útil pela área do foco (Equação 5). No caso deste modelo de concentrador, o fator de concentração é variável conforme o ângulo de incidência solar e depende das equações anteriores para determinar a área refletora.

$$C = \frac{A_u}{A_f} \quad (5)$$

Onde:

C – fator de concentração

A_u – área útil da superfície refletora do concentrador (m^2)

A_f – área do foco (m^2)

A potência útil (W) do sistema é definida pela diferença entre a energia absorvida pela energia perdida no receptor (Equação 6).

$$P_{\text{útil}} = P_{\text{abs}} - P_{\text{perda}} \quad (6)$$

Onde:

$P_{\text{útil}}$ – potência térmica útil (W)

P_{abs} – potência máxima absorvida (W)

P_{perda} – energia perdida ao ambiente (W)

A potência máxima absorvida pelo receptor pode ser encontrada pela Equação 7.

$$P_{\text{abs}} = I_c \cdot A_u \cdot k_r \cdot \rho \cdot \alpha_p \quad (7)$$

Onde:

P_{abs} – potência máxima absorvida (W)

I_c – radiação solar direta interceptada na superfície refletora (W/m^2)

A_u – área útil da superfície refletora do concentrador (m^2)

k_r – fração da radiação refletida (%)

ρ – refletividade da superfície do concentrador (%)

α_p – absorvidade do receptor (%)

Tiba et al (2000) sugere uma qualificação hierárquica quanto a origem das medidas solarimétricas, sendo dados registrados por piranômetro, dados actinográficos ou por último estimado pela relação de Angstrom. Devido à falta de instrumentos que fazem tais leituras, utilizou-se nesta pesquisa a fórmula de Angstrom para estimar a radiação solar global diária durante os ensaios (Equação 8).

$$\frac{Q_g}{Q_o} = a + b \cdot \frac{n}{N} \quad (8)$$

Onde:

Q_g – radiação solar global diária (MJ.m².dia)

Q_o – radiação solar global diária no topo da atmosfera (MJ.m².dia)

a e b – são coeficientes determinados por análises estatísticas de regressão para cada local

n – média mensal de insolação diária (h)

N – média mensal da duração astronômica do dia (fotoperíodo) (h)

Valores médios por mês e para algumas latitudes de fotoperíodo (N) e de radiação média solar global sem interferência da atmosfera (Q_o) são apresentados no trabalho de Pereira, Angelocci e Sentelhas (2000). A média de insolação diária (n) pode ser encontrado no Atlas Solarimétrico do Brasil (TIBA et al, 2000). Os coeficientes a e b dependem da latitude e das condições de transmitância atmosférica do local. Contudo em localidades em que não se tem dados disponíveis para os coeficientes a e b, a radiação solar global diária pode ser calculada pela fórmula de aproximação dado pela Equação 9 (PEREIRA; ANGELOCCI; SENDELHAS, 2000).

$$\frac{Q_g}{Q_o} = 0,29 \cdot \cos \Phi + 0,52 \cdot \frac{n}{N} \quad (9)$$

Onde:

Q_g – radiação solar global diária (MJ.m².dia)

Q_o – radiação solar global diária no topo da atmosfera (MJ.m².dia)

Φ – latitude local expressa em graus e décimos

n – média mensal de insolação diária (h)

N – média mensal da duração astronômica do dia (fotoperíodo) (h)

Para converter o resultado da equação acima de MJ.m².dia para Wh/m².dia, basta dividi-lo por 0,0036. A relação de Angstrom resulta no valor médio mensal de radiação solar global diária, contudo, em projetos de concentração solar o componente relevante é a radiação solar direta. Diante disso, neste estudo foi considerado como radiação solar direta diária 80% da radiação solar global diária estimada (LION FILHO, 2007; RAMOS FILHO, 2011; SOUZA,

2014). Por fim, o valor da radiação solar direta interceptada pelo painel refletor (I_c) usado para calcular a potência absorvida (P_{abs}) foi da razão entre a radiação solar direta diária pela média mensal de insolação diária (Equação 10).

$$I_c = \frac{\text{radiação solar direta diária}}{n} \quad (10)$$

Onde:

I_c – radiação solar direta interceptada na superfície refletora (W/m^2)
 n – média mensal de insolação diária (h)

Considerando a hipótese de serem desprezíveis as perdas radioativas do absorvedor para o ambiente, a energia perdida pelo sistema é determinada pela Equação 11.

$$P_{perda} = h_{ce} \cdot A_{lp} \cdot (T_{ep} - T_{amb}) \quad (11)$$

Onde:

P_{perda} – energia perdida ao ambiente (W)
 h_{ce} – coeficiente de convecção entre a superfície do absorvedor e ar ambiente ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
 A_{lp} – área lateral da panela ou do receptor (m^2)
 T_{ep} – temperatura externa do isolante ($^\circ C$)
 T_{amb} – temperatura ambiente ($^\circ C$)

Para calcular o valor do coeficiente de transferência térmica por convecção (h_{ce}) entre o forno e o ar ambiente foi necessário primeiramente identificar os valores dos números adimensionais de *Grashof* (Gr), *Prandtl* (Pr), *Rayleigh* (Ra) e de *Nusselt* (Nu). As Equações 12, 13, 14, 15 e 16 representam o roteiro para descobrir o coeficiente de convecção térmica (OLIVEIRA, 2014a, 2014b). O Anexo A apresenta os dados das propriedades do ar seco sob pressão normal a $30^\circ C$ que foram considerados nestas equações.

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu^2} \quad (12)$$

Onde:

Gr – número de Grashof

g – aceleração da gravidade (m/s²)

β – coeficiente de expansão térmica a pressão constante do fluido (1/K)

ΔT – diferença de temperaturas característica entre a superfície e ar ambiente (K)

L - dimensão característica da superfície (m)

ν – viscosidade cinemática do fluido (m²/s)

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (13)$$

Onde:

Pr – número de Prandtl

ν – viscosidade cinemática do fluido (m²/s)

α - difusividade térmica do fluido (m²/s)

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (14)$$

Onde:

Ra – número de Rayleigh

Gr – número de Grashof

Pr – número de Prandtl

g – aceleração da gravidade (9.8 m/s²)

β – coeficiente de expansão térmica a pressão constante do fluido (1/K)

ΔT – diferença de temperaturas característica entre a superfície e ar ambiente (K)

L - dimensão característica da superfície (m)

ν – viscosidade cinemática do fluido (m²/s)

α – difusividade térmica do fluido (m²/s)

$$Nu = C (Ra)^n \quad (15)$$

Onde:

Nu – número de Nusselt

Ra – número de Rayleigh

O coeficiente (C) e o expoente (n) dependem da gama de Ra, onde C=0.59 e n=1/4 quando o escoamento é laminar (Ra<10⁹); e C=0,10 e n=1/3 quando o escoamento é turbulento (Ra>10⁹).

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (16)$$

Onde:

h – coeficiente de transferência térmica por convecção (W/(m²K))

Nu – número de Nusselt

k – condutividade térmica do fluido (W/(m·K))

L - dimensão característica da superfície (m)

A eficiência útil do ciclo de conversão da radiação solar em energia térmica pode ser compreendida pela Equação 17.

$$\eta_U = \eta_o \times \eta_t \quad (17)$$

Onde:

η_U – eficiência útil da convenção da radiação solar em energia térmica (%)

η_o – eficiência ótica do sistema de captação de energia solar (%)

η_t – eficiência de conversão térmica (%)

A eficiência ótica representa a primeira fase do ciclo de conversão de energia em um sistema de concentração solar. Desprezando as perdas térmicas de natureza convectiva e condutiva do painel refletor, a eficiência ótica pode ser calculada pela Equação 18.

$$\eta_o = k_r \cdot \rho \cdot \alpha_p \quad (18)$$

Onde:

η_o – eficiência ótica do sistema de captação de energia solar (%)

k_r – fração da radiação refletida (%)

ρ – refletividade da superfície do concentrador (%)

α_p – absorvidade do receptor (%)

A eficiência térmica do sistema é dada pela razão entre a potência útil pela potência absorvida (Equação 19).

$$\eta_t = \frac{P_u}{P_{abs}} \quad (19)$$

Onde:

η_t – eficiência de conversão térmica (%)

$P_{\text{útil}}$ – potência térmica útil (W)

P_{abs} – potência máxima absorvida (W)

3.4 ENSAIOS DE PASTEURIZAÇÃO SOLAR E DE DESEMPENHO DO PROTÓTIPO

Nesta seção estão descritos os procedimentos conduzidos para atender o propósito de avaliar a potência e eficiência térmica, ótica e útil do protótipo de concentrador solar parabólico de foco fixo de 0,30m² construído, bem como para averiguar sua utilização no processo de pasteurização solar da água.

Foram realizados dois ensaios, sendo um em Garanhuns / PE e outro em Olho D'água do Casado / AL. As escolhas dos locais para os testes foram devido a uma combinação de disponibilidade de tempo e de ponto de apoio e das condições meteorológicas estarem favoráveis nos dias dos experimentos, isto é, os dias estarem ensolarados e com poucas nuvens. Nos dois ensaios o protótipo foi devidamente direcionado para a linha do Equador e conferido a inclinação do eixo de rotação, que deve ser coincidente com o ângulo de latitude local.

O primeiro experimento foi realizado no dia 05/09/2018 no município do agreste pernambucano, Garanhuns (8°54'30.8"S e 36°29'40.0"W). Para este experimento considerou-se alguns dos protocolos de testes sugeridos por Funk (2000), que a saber são: tempo aberto, temperatura ambiente na faixa de 20° a 35°C, realização do ensaio entre 10 e 14h e leitura dos dados a cada 10 minutos. Neste foi analisado a curva de aquecimento de uma garrafa PET com 1,5 litros de água coletada em uma cisterna. A Figura 24 mostra o concentrador convergindo a energia solar para o foco durante este experimento.

Figura 24. Concentrador solar durante o experimento de 05/09/2018.



Fonte: Autoria própria, 2018.

O segundo ensaio foi realizado no município do sertão alagoano Olho D'água do Casado, mais precisamente nas coordenadas $9^{\circ}30'14.9''S$ e $37^{\circ}53'34.9''W$ no dia 02/10/2018. Nesta experiência foi analisado a curva de aquecimento de 5 litros de água coletados do Rio São Francisco condicionado em uma panela preta durante o período entre 08 e 16 horas.

Uma vez constatado os resultados do primeiro experimento, neste segundo teve como intuito aumentar a quantidade de água a ser pasteurizada em sistema de bateladas. A panela de 5 litros foi o maior recipiente encontrado que coube dentro do forno receptor, e, portanto, foi utilizado para este teste.

O período entre 08 às 16 horas corresponde ao intervalo de funcionamento deste concentrador solar, isto é, o intervalo em que o sistema de rotação possibilita que o painel refletor acompanhe o movimento aparente do Sol convergindo sua incidência para o ponto focal. Diante disso, ao crescer o volume de água, também foi aumentado a duração do experimento para que houvesse mais tempo para a água atingir temperaturas suficientes para o processo de pasteurização solar. A Figura 25 mostra a realização deste ensaio.

Figura 25. Concentrador solar durante o experimento de 02/10/2018.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Como não havia instrumentos para medir dados solarimétricos, em ambos experimentos a radiação solar global foi estimada pela fórmula de aproximação de Angstrom a partir de dados apresentados pelos trabalhos de Pereira, Angelocci e Sentelhas (2000) e Tiba et al (2000), conforme a Equação 9. A estimativa da média por hora da radiação solar direta interceptada pelo painel refletor foi de 80% da radiação solar global dividida pela média de insolação diária (Equação 10) (TIBA et al, 2000; LION FILHO, 2007; RAMOS FILHO, 2011; SOUZA, 2014).

Nos dois testes foram registrados os dados de temperatura ambiente, do interior do forno, da superfície externa do forno, do foco sobre uma placa preta e da água (superfície e fundo do recipiente) a cada 10 minutos. A temperatura interna do forno foi medida por um termômetro de haste, a do foco com um termômetro infravermelho e o demais com termômetros de sonda. Em sequência as equações foram calculadas, as informações tabuladas, e gráficos projetados para apresentação dos resultados.

A média entre a temperatura da água registrada na superfície e no fundo do recipiente foram comparados com resultados encontrados na revisão bibliográfica sobre a relação estabelecida entre o tempo de exposição a determinada temperatura da água para ocorrer o processo de pasteurização. Vale salientar que os aspectos químico-físico da água, como turbidez e pH não interferem na eficácia da desinfecção da água por pasteurização (CARIELO; TIBA et al, 2000; CALAZANS, 2016).

Deste modo, foram utilizados como referência as conclusões de Rodrigues (2011) que em experimentos em condições controladas constatou a inativação dos indicadores coliformes totais e *E. coli* a 60°C após 15 minutos; e resultados de Carielo (2011) que averiguou a desinfecção dos mesmos indicadores através do processo de pasteurização solar utilizando um coletor plano nas seguintes combinações de temperatura e tempo: 55°C por 1 hora, 60°C por 45 minutos, 65°C por 30 minutos, 75°C por 15 minutos, e 85°C por 15 segundos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A experiência em projetar um modelo de prato solar de Scheffler de $2,7\text{m}^2$ e reduzi-lo em escala para um protótipo de $0,3\text{m}^2$ e efetivamente o construir, foi importante para compreender a possibilidade de desenvolver concentradores de foco fixo de diversos tamanhos para diferentes finalidades, simplesmente seguindo as proporções de seus componentes.

Com isso, pode-se afirmar que se ampliar em escala o protótipo construído no fator de 6 vezes resultará em um concentrador com área refletora de quase 11m^2 , possuindo dimensões favoráveis para projetos industriais e em cozinhas comunitárias, como exemplo a indústria alimentícia Tapi Food na Índia que usa um sistema com 10 refletores de 10m^2 para produzir vapor (Figura 26) e a cozinha comunitária no Templo de Tirupati que prepara cerca de 30.000 refeições diariamente com 106 concentradores de 10m^2 (GADHIA, 2009).

Figura 26. Instalação dos concentradores de Scheffler na indústria Tapi Food.



Fonte: Gadhia, 2009.

Até o momento não foram encontrados relatos de construção e operação de concentradores solar de Scheffler com superfície menor que 2m^2 . Todavia, existe um campo de estudo a ser explorado, como avaliar a aplicabilidade de versões reduzidas para aquecer água e ambiente, dessalinizar, cozer, assar e esquentar alimentos, dentre outras finalidades, sobretudo como tecnologias sociais em regiões áridas. Protótipos de tamanhos reduzidos, como o

construído neste trabalho, possuem a vantagem de ser facilmente transportados, podendo serem carregados para acampamentos, comunidades remotas e em casos de calamidades, bem como servirem de mostruário para outros projetos.

Contando com a mão de obra, o custo aproximado para edificar este protótipo de concentrador solar parabólico de foco fixo foi de US\$ 125,00. O custo é relativamente baixo e tende ser menor caso seja construído mais exemplares, pois após o primeiro não é preciso adquirir novamente alguns instrumentos, como o compensado de madeira, as impressões, o gabarito do suporte de rotação e as ferramentas. No Quadro 6 é discriminado as despesas relativas a construção do protótipo, onde os materiais do dispositivo de rotação e tração estão identificados a parte.

Quadro 6. Descrição das despesas da construção do Concentrador Scheffler de 0,30m².

Itens	Quantidade	Preço US\$	Total US\$
Barra chata 7/8" x 1/8"	3 m	2,00	2,00
Barra quadrada 16 x 16mm	6 m	5,00	5,00
Barra redonda 1/4"	3 m	2,00	2,00
Chapa de alumínio	1,5m x	5,00	5,00
Cola	3 unid.	2,00	4,00
Compensado de madeira (1,1m x 0,8m)	1 unid.	4,00	4,00
Espelho	0,35m ²	13,00	13,00
Ferramentas e outros	-	5,00	5,00
Impressão do gabarito (A1)	2 unid.	1,00	2,00
Mão de obra	Serralheiro	40,00	40,00
Parafuso e porcas (diversos)	-	2,00	2,00
Tinta	1 unid.	3,00	3,00
Sistema de rotação e tração			
Caixinha de plástico	1 unid.	1,00	1,00
Coroa, corrente e roldana do cambio traseiro	1 unid.	5,00	5,00
Motor de torque 12v	1 unid.	17,00	17,00
Sensor fotoelétrico	2 unid.	5,00	10,00
Relés, fios e disjuntores	-	5,00	5,00
TOTAL			125,00

Fonte: Autoria própria, 2018.

Durante pré-testes, observou que os fotosensores eram muito sensíveis a luz, inclusive

a radiação solar difusa, de modo que mesmo na sombra os relés fotoelétricos mantinham-se acionados. Por conta disso, foi preciso envolvê-los com um pedaço de pano preto de TNT servindo como um filtro contra a luz difusa, mas de modo que passasse radiação solar direta. À medida que o trajeto aparente do Sol mudava, o concentrador projetava uma sombra sobre o sensor direito e mantinha o sensor esquerdo iluminado, fazendo com que acionasse o motor e o painel girasse sentido Leste-Oeste até que ambos os sensores ficassem novamente sob a luz. Devido ao eixo de rotação passar próximo ao centro de gravidade do refletor não é preciso muita força para o fazer girar, deste modo o motor utilizado tracionou satisfatoriamente o painel.

As medidas internas do forno são de 34 x 23 x 23 cm, totalizado um volume interno 18 litros. As dimensões externas são de 38,5 x 28,5 x 28,5 cm, totalizando uma área externa de 0,60 m². O espaço de abertura da luz solar é de 15 x 15 cm. A despesa total para a fabricação do receptor está descrita no Quadro 7.

Quadro 7. Descrição das despesas da construção do forno receptor.

Itens	Quantidade	Preço US\$	Total US\$
Cola branca	1	1,00	1,00
Lã de vidro	1m x 3m	2,00	3,00
Lata de cola	1	-	-
Mão de obra	Serralheiro e marceneiro	10,00	10,00
Perfil U de alumínio	1,5m	3,00	3,00
Tinta	1	5,00	5,00
Termômetro de sonda	4	2,00	8,00
Termômetro de haste	1	10,00	10,00
Vidro temperado	20cm x 30cm	-	-
TOTAL			40,00

Fonte: Autoria própria, 2018.

Foi observado que certos dados de aspectos técnicos foram constantes em algumas referências utilizadas na fundamentação da instrumentalização deste estudo, por exemplo, fator de refletividade da superfície refletora ($\rho = 0,9$); fração da radiação refletida ($k_r = 0,9$); a absorvidade do receptor ($\alpha_p = 0,9$); e emissividade do absorvedor ($\varepsilon = 0,9$) (LION FILHO, 2007; MACEDO NETO, 2011; RAMOS FILHO, 2011; SOUZA, 2014). Estes mesmos dados foram considerados nesta pesquisa devido à falta de instrumentos que medissem tais variáveis, bem

como pelas similaridades técnicas entre os protótipos estudados com o construído neste trabalho, como o uso de espelhos comuns no painel refletor e o receptor ser um corpo negro envolvido por isolante térmico.

Conforme a Equação 1, a área teórica do painel refletor do protótipo construído neste trabalho é de 0,30 m². Segundo a Equação 3, para encontrar a área refletora útil primeiramente subtraíu 10% da área total devido a possíveis imperfeições da superfície refletora por conta de imprecisões e efeitos da dilatação durante a soldagem das peças, totalizando assim 0,27 m², e em seguida multiplicou-se este valor pelo fator de abertura descrito na Equação 2.

Considerando ser constante a mudança da incidência solar decorrente do movimento de translação da Terra, pode-se facilmente determinar a área refletora útil deste concentrador para qualquer dia do ano. Levando em conta que o concentrador encontra-se no hemisfério sul e as datas dos equinócios e solstícios entre 1992-2020 publicado por Oliveira Filho e Saraiva (2002), o Apêndice B apresenta um quadro com o fator de abertura e a área refletora útil para todos os dias entre os outonos de 2018 a 2019.

Conforme visto na revisão bibliográfica, a superfície refletora útil desta tecnologia é maior durante o inverno e menor no verão, assim a menor área refletora útil deste protótipo foi de 0,15 m² (solstício de verão) e a maior foi de 0,23 m² (solstício de inverno). A média anual da área útil foi de 0,20 m². O Quadro 8 mostra os resultados para os solstícios, equinócios e a média anual dos dados.

Quadro 8. Fator de abertura e área refletora útil do concentrador solar de 0,30m² para algumas datas do ano de 2018.

Estações do ano (2018)	Fator de abertura	Área útil (m²)
Equinócios: Outono (20/03); Primavera (23/09)	0,73	0,20
Solstício de Inverno (21/06)	0,85	0,23
Solstício de Verão (21/12)	0,57	0,15
Média anual	0,72	0,20

Fonte: Autoria própria, 2018.

Em testes preliminares do concentrador solar averiguou que o foco possui um diâmetro próximo aos 12 cm, tendo, portanto, uma área de 0,011 m² segundo a Equação 4. Considerando que o tamanho do foco seja constante durante todo o ano, a média anual do fator de

concentração deste protótipo é igual a 18,2, variando entre 13,6 a 20,9 entre os solstícios de verão e inverno respectivamente, conforme a Equação 5. O forno receptor possui uma abertura de 15x15cm, possibilitando que feixes de luzes refletidos para proximidade do ponto focal entrem para dentro do forno. O forno por sua vez possui área externa total de 0,6m².

Conhecendo os dados de projetos, realizou-se as medições de temperatura para calcular a potência e eficiência do protótipo para cada dia de teste, e a curva de aquecimento da água submetido a pasteurização solar.

4.1 ENSAIO 1 – GARANHUNS / PE

O primeiro experimento foi realizado no dia 05/09/2018 no município de Garanhuns / PE (8°54'30.8"S e 36°29'40.0"W) com o propósito de aquecer 1500ml de água em garrafa PET dentro do intervalo de 10 e 14 horas. As condições climáticas deste dia foram favoráveis ao experimento com o céu predominantemente limpo e temperatura ambiente com pouca oscilação entre 27,5° a 30,6°C.

A partir dos dados apresentados por Tiba et al (2000) e Pereira, Angelocci e Sentelhas (2000) é possível estimar a média diária da radiação solar global durante este ensaio pela fórmula de Angstrom. Para o mês de setembro e a latitude local se tem os seguintes valores: radiação solar global diária no topo da atmosfera ($Q_0 = 36,44 \text{ MJ.m}^2.\text{dia}$); latitude local ($\Phi = 8^\circ 54' 30''$); média mensal de insolação diária ($n = 7\text{h}$); e média mensal da duração astronômica do dia ($N = 12\text{h}$).

Assim, conforme com a Equação 9, a radiação solar global diária deste dia de ensaio foi igual a 21,45MJ.m².dia, o que equivale a 5.958Wh/m².dia. Lembrando que o relevante para tecnologias de concentração é o componente radiação solar direta e que a mesma foi considerada como 80% da radiação solar global de acordo com as referências, para este ensaio a radiação solar direta diária foi igual a 4.766Wh/m².dia (LION, 2007; RAMOS FILHO, 2011; SOUZA, 2014). Não obstante, pela Equação 10 pode-se estimar que a média por hora da radiação solar direta interceptada pelo painel refletor foi de 681W/m².

O Quadro 9 relaciona os dados de projetos, como área útil do painel refletor, área do foco, fator de concentração, a refletividade e fração da radiação refletida pelo painel refletor e

absorvidade e emissividade do forno receptor; a média da leitura da temperatura ambiente e da superfície externa do forno; e os valores calculados correspondentes a potência e eficiência térmica, ótica e útil deste protótipo concentrador solar parabólico de foco fixo neste ensaio.

Quadro 9. Dados de projetos e de desempenho calculados pelo teste de 05/09/2018.

I_c – radiação média supostamente interceptada na superfície refletora (W/m^2)	681
$P_{\text{útil}}$ – potência térmica útil (W)	94,64
P_{abs} – potência máxima absorvida (W)	99,29
P_{perda} – energia perdida ao ambiente (W)	4,65
η_U – eficiência útil da convecção da radiação solar em energia térmica	0,69
η_o – eficiência ótica do sistema de captação de energia solar	0,73
η_t – eficiência de conversão térmica	0,95
h_{ce} – coeficiente de convecção ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	1,92
fator de abertura sazonal	0,75
A_{ct} – área teórica da superfície refletora do concentrador (m^2)	0,30
A_u – área útil da superfície refletora do concentrador (m^2) - (dia 05/09/2018)	0,20
A_{foco} – área do foco (m^2)	0,011
C – fator de concentração (dia 05/09/2018)	18,18
A_{lp} – área externa do receptor (m^2)	0,60
T_{amb} – média da temperatura ambiente ($^\circ C$)	29,40
T_{ep} – média da temperatura externa da panela ou recipiente ($^\circ C$)	33,44
k_r – fração da radiação refletida	0,90
ρ – refletividade da superfície do concentrador	0,90
α_p – absorvidade do receptor	0,90
ε – emissividade do absorvedor	0,90

Fonte: Autoria própria, 2018.

Visto que para este dia de teste a área útil do concentrador foi de $0,20m^2$ e o fator de concentração foi igual a 18,18 (Equação 5). A eficiência ótica calculada deste concentrador foi de 0,73, a eficiência de conversão térmica da radiação refletida pelo painel para o forno foi de 0,95, a eficiência útil de 0,69. Para este dia e a uma incidência solar estimada de $681W/m^2$, este protótipo teve uma potência absorvida de 99,29W e potência útil de 94,64W.

Durante o teste foram registradas as leituras de temperatura ambiente, a do interior do forno, da parede externa do forno, da parte superior e inferior da garrafa d'água e a sua média

e a temperatura do foco a cada 10 minutos. Tais dados estão tabulados no Quadro 10.

Quadro 10. Dados medidos durante o experimento do dia 05/09/2018 (Garanhuns / PE).

HORA	T. ambiente (°C)	T. parede externa do forno (°C)	T. interior do forno (°C)	T. superfície da água (°C)	T. fundo da água (°C)	T. média da água (°C)	T. foco (°C)
10:00	29,5	30,1	40,1	27,0	27,0	27,0	136,0
10:10	27,5	29,4	54,1	33,8	31,7	32,8	114,6
10:20	27,5	29,8	58,0	38,4	35,6	37,0	173,1
10:30	27,8	29,4	60,0	42,4	39,5	41,0	146,2
10:40	28,5	33,0	61,7	46,9	44,1	45,5	122,7
10:50	29,5	35,0	63,8	50,7	46,9	48,8	148,7
11:00	29,2	33,2	66,7	54,8	50,3	52,6	165,0
11:10	28,5	31,9	65,4	57,8	53,4	55,6	188,6
11:20	28,5	32,5	66,7	60,7	56,8	58,8	137,8
11:30	28,9	32,9	73,4	63,2	57,1	60,2	161,2
11:40	28,9	33,4	73,9	65,7	58,9	62,3	154,5
11:50	29,1	33,1	74,8	68,2	61,8	65,0	212,3
12:00	29,8	33,8	76,9	69,6	62,5	66,1	192,3
12:10	29,5	34,5	64,8	71,4	64,5	68,0	156,1
12:20	29,9	35,4	66,1	75,3	65,4	70,4	128,8
12:30	29,8	34,5	68,5	77,9	65,6	71,8	125,8
12:40	29,9	34,3	71,3	79,9	64,5	72,2	121,5
12:50	30,4	35,4	76,7	79,8	65,1	72,5	109,0
13:00	30,5	35,7	78,2	79,8	65,8	72,8	125,3
13:10	30,3	35,5	70,8	81,6	64,5	73,1	168,4
13:20	30,1	34,4	74,3	85,6	64,3	75,0	157,8
13:30	30,4	34,4	78,3	87,0	63,6	75,3	167,3
13:40	30,3	34,7	79,1	89,2	61,2	75,2	151,9
13:50	30,6	35,4	80,6	89,2	61,3	75,3	173,3
14:00	30,2	34,3	80,7	89,2	61,3	75,3	134,8
média	29,3	33,3					150,6

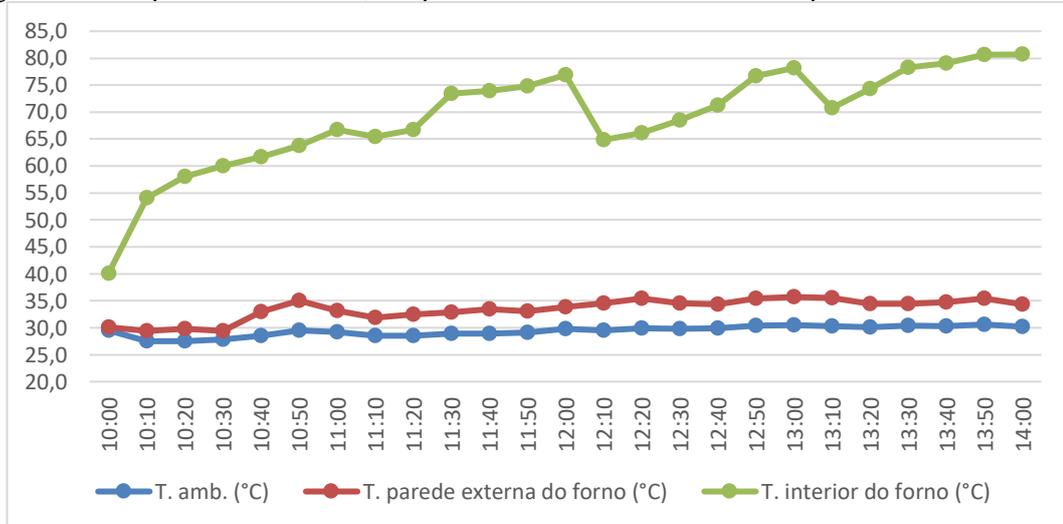
Fonte: Autoria própria, 2018.

Às 12 e 13 horas a tampa do forno receptor foi aberto acidentalmente, deixando o ar quente escapar e fazendo com que a temperatura interna do forno abaixasse nas leituras

seguintes. Ainda assim a temperatura interna do forno chegou aos 80,7°C até o final do experimento. Contudo, este fato não interferiu para calcular a potência e eficiência do protótipo, pois tais dados não são utilizados nas equações.

Na Figura 27 é apresentado um gráfico com a leitura da temperatura ambiente, a do interior do forno e da superfície externa do forno em função do tempo. A diferença entre a média da temperatura da superfície do forno pela do ambiente é um fator que influencia na equação que determina a potência térmica perdida, a potência útil, e a eficiência térmica e útil do sistema.

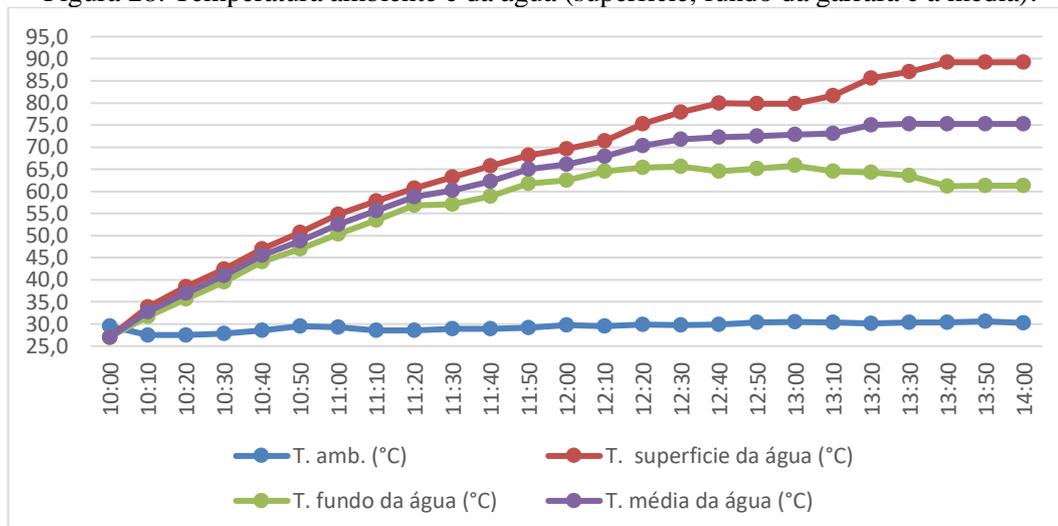
Figura 27. Temperatura ambiente, temperatura interior do forno e da superfície externa do forno.



Fonte: Autoria própria, 2018.

A Figura 28 apresenta os dados de temperatura ambiente e da água (parte superior, inferior e a média entre eles) a cada 10 minutos. A temperatura da água é mais elevada na superfície do que no fundo porque ao aquecer, a água torna-se menos densa e sobe empurrando a água fria (mais densa) para o fundo, formando assim uma corrente de convecção.

Figura 28. Temperatura ambiente e da água (superfície, fundo da garrafa e a média).



Fonte: Autoria própria, 2018.

Os valores da média entre a temperatura da superfície e do fundo da garrafa foram comparados com combinações de temperatura e tempo para ocorrer a desinfecção dos indicadores coliformes totais e *E. coli* da água pelo processo de pasteurização definidos em outros trabalhos (CARIELO, 2011; RDRIGUES, 2011). Assim, o Quadro 11 relaciona os dados deste experimento com os resultados das referências bibliográficas e apresenta o momento em que provavelmente ocorreu a pasteurização solar.

Quadro 11. Combinação de temperatura e tempo para ocorrer a desinfecção da água por pasteurização.

Carielo (2011)	Horário em que a água atinge a temperatura de referência	Horário teórico que ocorreu a pasteurização solar
55°C por 1 hora	55°C às 11:10h	12:10h
60°C por 45 minutos	60°C às 11:30h	12:15h
65°C por 30 minutos	65°C às 11:50h	12:20h
75°C por 15 minutos	75°C às 13:20h	13:35h
85°C por 15 segundos	-	-
Rodrigues (2011)	Horário em que a água atinge a temperatura de referência	Horário teórico que ocorreu a pasteurização solar
60°C por 15 minutos	60°C às 11:30h	11:45h

Fonte: Autoria própria, 2018.

Foi constatado que a temperatura média da água alcançou 55°C às 11:10h, 60°C às

11:30h, 65°C às 11:50h e 75°C às 13:20h. Assim, considerando os resultados de Carielo (2011), poderia supor que a água teria sido desinfetada por pasteurização solar às 12:10h, isto é, após 1 hora a 55°C. Por sua vez, considerando os resultados de Rodrigues (2011) os indicadores coliformes totais e *E. coli* teriam sido eliminados às 11:45h, isto é, após 15 minutos a 60°C.

Pelos dados observa-se que 1,5 litros de água alcançaram temperaturas suficientes para a realização da pasteurização solar entre o intervalo de 10 às 14 horas. Diante disso, foi realizado um segundo experimento com um volume de água maior e duração do ensaio mais longo, para haver mais tempo para que este volume maior atingisse temperaturas suficientes para a pasteurização solar.

4.2 ENSAIO 2 – OLHO D'ÁGUA DO CASADO

O segundo experimento foi realizado no dia 02/10/2018 no município de Olho D'água do Casado / AL (9°30'14.9"S e 37°53'34.9"W) com o propósito de aquecer 5000ml de água em uma panela preta dentro do intervalo de 08 e 16 horas. O objetivo foi avaliar a possibilidade em aumentar a produção de água desinfetada por pasteurização solar em sistema de batelada com este protótipo de concentrador solar. Embora o forno receptor ser de 18 litros, a caldeira de 5 litros foi o maior recipiente encontrado no comércio que coube no interior do forno. O sistema de rotação deste protótipo possibilita que o concentrador segue e converge a radiação do Sol dentro do período de 08 às 16 horas, e, portanto, o ensaio foi realizado neste intervalo.

As condições climáticas neste dia de ensaio foram diferentes do dia 05/09/2018, onde teve a passagem de algumas nuvens densas obstruindo a passagem da radiação solar direta sobre o concentrador, principalmente durante a manhã. Para estimar a radiação solar global para o mês de outubro e à latitude local se tem os seguintes valores: radiação solar global diária no topo da atmosfera ($Q_0 = 38,49 \text{ MJ.m}^2.\text{dia}$); latitude local ($\Phi = 9^\circ30'14''$); média mensal de insolação diária ($n = 8\text{h}$); e média mensal da duração astronômica do dia ($N = 12,2\text{h}$) (TIBA et al, 2000; PEREIRA, ANGELOCCI, SENTELHAS, 2000).

Segundo a Equação 9, a radiação solar global diária deste dia de ensaio foi igual a $24,17 \text{ MJ.m}^2.\text{dia}$, o que equivale a $6.714 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$. Considerando que 80% é da incidência solar é direta, a radiação solar direta diária estimada para este dia de testes foi de $5.371 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$

(LION, 2007; RAMOS FILHO, 2011; SOUZA, 2014). Pela Equação 10, pode-se estimar que a média por hora da radiação solar direta refletida pelo concentrador foi de 671 W/m^2 .

O Quadro 12 apresenta os dados de projetos, como área útil do painel refletor, área do foco, fator de concentração, a refletividade e fração da radiação refletida pelo painel refletor e absorvidade e emissividade do forno receptor; a média da leitura da temperatura ambiente e da superfície externa do forno; e os valores calculados correspondentes a potência e eficiência térmica, ótica e útil deste protótipo concentrador solar parabólico de foco fixo neste ensaio.

Quadro 12. Dados de projetos e de desempenho calculados pelo teste de 02/10/2018.

I_c – radiação instantânea interceptada na superfície refletora (W/m^2)	671
$P_{\text{útil}}$ – potência térmica útil (W)	89,01
P_{abs} – potência máxima absorvida (W)	92,94
P_{perda} – energia perdida ao ambiente (W)	3,93
η_U – eficiência útil da conversão da radiação solar em energia térmica	0,70
η_o – eficiência ótica do sistema de captação de energia solar	0,73
η_t – eficiência de conversão térmica	0,96
h_{cc} – coeficiente de convecção ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)	1,86
fator de concentração sazonal	0,71
A_{ct} – área teórica da superfície refletora do concentrador (m^2)	0,30
A_u – área útil da superfície refletora do concentrador (m^2) – (02/10/2018)	0,19
A_{foco} – área do foco (m^2)	0,011
C – fator de concentração (média anual)	17,27
A_{lp} – área lateral da panela ou do receptor (m^2)	0,60
T_{amb} – temperatura ambiente ($^\circ\text{C}$)	32,59
T_{ep} – temperatura externa da panela ou recipiente ($^\circ\text{C}$)	36,09
k_r – fração da radiação refletida	0,90
ρ – refletividade da superfície do concentrador	0,90
α_p – absorvidade do receptor	0,90
ε – emissividade do absorvedor	0,90

Fonte: Autoria própria, 2018.

Para esta data a área útil do painel refletor foi de $0,19 \text{ m}^2$ e o do foco de $0,011 \text{ m}^2$, tendo, portanto, um fator de concentração igual a 17,27. A área útil e o fator de concentração neste dia foram menores que a do experimento anterior porque esta data está mais próxima ao solstício de verão. A eficiência ótica é um dado de projeto que se mantém constante no valor de 0,73.

Para este ensaio, a eficiência de conversão da energia absorvida para útil foi de 0,96. A uma incidência solar direta estima de 671W/m²/h, o painel refletor convergiu uma potência de 92,94W para o forno. Como as perdas energéticas calculas foram de 3,93W, o protótipo teve como potência útil de 89,01W.

O Quadro 13 exhibe as leituras de temperatura ambiente, da parede externa do forno, do interior do forno, da parte superior e inferior da panela com água e a sua média e a temperatura do foco registradas a cada 10 minutos.

Quadro 13. Dados medidos durante o experimento do dia 02/10/2018 (Olho D'água do Casado / AL).

HORA	T. ambiente (°C)	T. parede externa do forno (°C)	T. interior do forno (°C)	T. superfície da água (°C)	T. fundo da água (°C)	T. média da água (°C)	T. foco (°C)
08:00	25,9	29,9	29,9	28,5	28,5	28,5	90,0
08:10	25,7	28,2	34,6	31,1	28,7	29,9	100,3
08:20	28,3	29,4	36,1	33,5	29,2	31,35	102,0
08:30	28,3	28,3	36,5	35,2	29,9	32,55	90,0
08:40	28,7	29,6	35,2	35,5	30,6	33,05	35,0
08:50	29,2	30,1	34,8	35,6	31,5	33,55	80,0
09:00	29,4	30,6	35,1	36,2	32,2	34,2	90,0
09:10	30,6	31,2	35,2	36,5	33	34,75	35,0
09:20	30,5	32,2	39	36,9	33,6	35,25	43,0
09:30	33	33,6	39,7	38,1	34,3	36,2	109,0
09:40	31,4	31,8	40,3	39,8	35,1	37,45	53,0
09:50	32,9	33,5	40	40,8	36,1	38,45	96,7
10:00	31,8	32,2	40	41,9	37,1	39,5	43,0
10:10	33,5	35,1	40,8	42,2	38,0	40,1	140,6
10:20	33,5	33,8	44,3	43,8	38,8	41,3	143,0
10:30	34,8	37,3	45,5	45,8	39,8	42,8	40,0
10:40	32,1	33,5	42,0	45,9	39,9	42,9	40,2
10:50	32,7	34,1	42,4	46,5	41,7	44,1	30,3
11:00	32,5	34,9	43,3	47,0	42,5	44,75	48,0
11:10	32,7	35,6	44,8	49,1	43,5	46,3	154,5
11:20	33,5	36,1	47,3	50,8	44,4	47,6	172,8
11:30	32,4	36,1	47,7	52,3	45,6	48,95	143,6
11:40	33,5	38,0	48,3	54,3	47,0	50,65	30,0

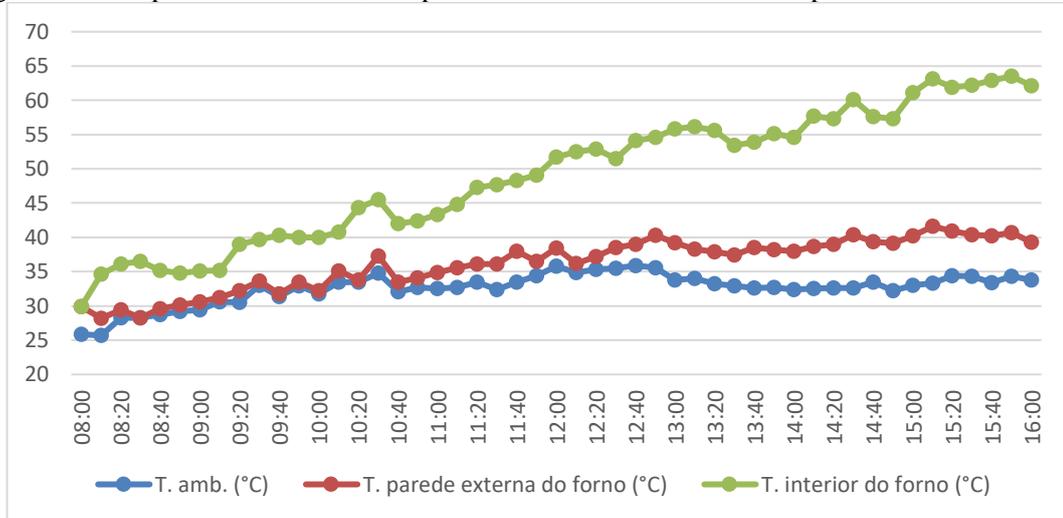
Continuação

HORA	T. ambiente (°C)	T. parede externa do forno (°C)	T. interior do forno (°C)	T. superfície da água (°C)	T. fundo da água (°C)	T. média da água (°C)	T. foco (°C)
11:50	34,4	36,5	49,1	55,2	48,4	51,8	176,8
12:00	35,8	38,4	51,7	56,9	49,8	53,35	150,9
12:10	34,9	36,2	52,5	58,2	51,4	54,8	109,8
12:20	35,3	37,2	52,9	59,2	52,9	56,05	182,0
12:30	35,5	38,5	51,5	60,1	54,3	57,2	170,0
12:40	35,9	39,0	54,1	61,0	55,5	58,25	172,0
12:50	35,6	40,3	54,6	62,1	56,8	59,45	178,8
13:00	33,8	39,2	55,8	63,1	58,1	60,6	184,3
13:10	34,0	38,3	56,1	64,9	59,3	62,1	190,0
13:20	33,2	37,9	55,6	66,2	60,5	63,35	179,7
13:30	32,9	37,4	53,4	67,1	62,1	64,6	199,0
13:40	32,6	38,5	53,9	67,9	63,3	65,6	182,4
13:50	32,7	38,2	55,1	68,5	64,1	66,3	174,1
14:00	32,4	38,0	54,6	69,2	65,1	67,15	191,8
14:10	32,5	38,7	57,7	70,1	66,2	68,15	185
14:20	32,6	39,0	57,3	70,8	67,0	68,9	192,1
14:30	32,6	40,4	60,1	71,2	68,0	69,6	125,6
14:40	32,5	39,4	57,6	72,1	68,8	70,45	97,2
14:50	32,2	39,1	57,3	72,8	69,7	71,25	200
15:00	33,0	40,2	61,1	72,8	70,5	71,65	168,2
15:10	33,3	41,6	63,1	73,3	71,2	72,25	189,3
15:20	34,4	40,9	61,9	73,9	72,0	72,95	189,1
15:30	34,3	40,4	62,2	74,3	72,8	73,55	196
15:40	33,4	40,2	62,9	73,9	73,2	73,55	181
15:50	34,3	40,7	63,5	74,1	73,8	73,95	158,5
16:00	33,8	39,3	62,1	74,4	74,4	74,4	160
Média	32,5	35,9					130,5

Fonte: Autoria própria, 2018.

Na Figura 29 estão relacionadas a temperatura ambiente, a da superfície externa do forno e a do interior do forno. Vale salientar que a diferença entre a temperatura da superfície do forno pela do ambiente é um aspecto que influencia na potência térmica perdida, e consequentemente na potência útil, e na eficiência térmica e útil do dispositivo.

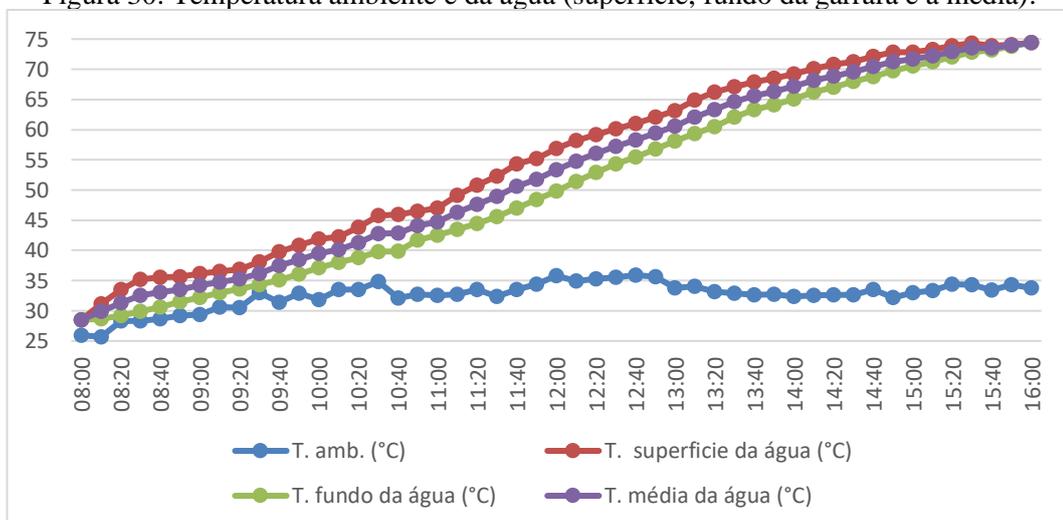
Figura 29. Temperatura ambiente, temperatura interior do forno e da superfície externa do forno.



Fonte: Autoria própria, 2018.

A Figura 30 apresenta o gráfico da temperatura ambiente e da água (parte superior, inferior e a média entre eles) em função do tempo. Conforme já visto, a diferença entre a temperatura da superfície e do fundo da panela se dá devido a diferença de densidade entre a água quente (menos densa) e a água fria (mais densa), contudo com as transferências térmicas por convecção a temperatura da água tende a entrar em equilíbrio.

Figura 30. Temperatura ambiente e da água (superfície, fundo da garrafa e a média).



Fonte: Autoria própria, 2018.

Embora neste dia ter havido algumas nuvens no céu, a temperatura média da água subiu de 28,5°C (inicial) a 74,4°C até o final do ensaio, tendo um acréscimo médio de 1°C a cada 10 minutos. A temperatura média da água entre a superfície e o fundo da panela foram relacionadas com os resultados de Carielo (2011) e Rodrigues (2011) para identificar o momento em que teoricamente houve a inativação de indicadores de contaminação microbiológica da água (Quadro 14).

Quadro 14. Combinação de temperatura e tempo para ocorrer a desinfecção da água por pasteurização.

Carielo (2011)	Horário em que a água atinge a temperatura de referência	Horário teórico que ocorreu a pasteurização solar
55°C por 1 hora	55°C às 12:20h	13:20h
60°C por 45 minutos	60°C às 13:00h	13:45h
65°C por 30 minutos	65°C às 13:40h	14:10h
75°C por 15 minutos	-	-
85°C por 15 segundos	-	-
Rodrigues (2011)	Horário em que a água atinge a temperatura de referência	Horário teórico que ocorreu a pasteurização solar
60°C por 15 minutos	60°C às 11:30h	13:15h

Fonte: Autoria própria, 2018.

Foi constatado que a temperatura média da água foi de 55°C às 12:20h, de 60°C às 13:00h e de 65°C às 13:40h. Considerando os resultados de Carielo (2011), poderia supor que a água estaria desinfetada às 13:20h, isto é, a mais de 55°C por 1 hora; e levando em conta os de Rodrigues (2011) a água estaria tratada às 13:15h, isto é, após 15 minutos a 60°C. Assim, com uma diferença de apenas 5 minutos, conforme as informações de ambos os autores, os 5 litros de água submetidos neste experimento alcançaram temperaturas a tempo de exposição suficientes para ocorrer a desinfecção por pasteurização solar.

5 CONCLUSÕES

O uso de tecnologias que fazem uso de recursos renováveis como forma de mitigação ao aquecimento global tornou-se promissor, neste prisma, a energia solar se destaca em virtude de sua abundância e versatilidade, podendo ser usufruída desde em projetos de grande magnitude à pequenas aplicações domésticas e comerciais.

Existem atualmente diversos tipos de tecnologias que aproveitam as propriedades da luz do Sol para produzir direta ou indiretamente eletricidade, calor ou trabalho, como as células fotovoltaicas, coletores solares e diversos modelos de concentradores solares. A difusão de tecnologias sociais que fazem uso do recurso solar pode contribuir com a saúde, inclusão social, preservação ambiental e geração de renda, promovendo assim o desenvolvimento sustentável.

Visto a dificuldade de abastecimento de água potável em comunidades rurais, a deficiência hídrica vivida no semiárido brasileiro e ao mesmo tempo a abundância do recurso solar nesta região, o método de desinfecção por pasteurização solar é uma alternativa viável e sustentável que pode assegurar a qualidade biológica da água de beber. Este processo pode ser realizado utilizando diferentes tipos de tecnologias termossolares, como por exemplo pelo concentrador solar parabólico de foco fixo.

O disco de Scheffler é um modelo de concentrador solar parabólico de foco pontual já consagrado mundialmente. Seu diferencial em manter o ponto focal estacionário sob uma sombra durante todo seu funcionamento e a possibilidade de erguê-lo em diferentes dimensões abre um leque de possibilidades para usá-lo desde a fins industriais a residenciais. Além disso, tendo em vista de se tratar de uma engenharia livre de patente, é oportuno sua destinação como tecnologia social para suprir necessidades como para cozer, aquecer, desinfetar e dessalinizar água.

A construção do protótipo demonstrou ser relativamente simples e de baixo custo, podendo ser facilmente reproduzido em pequenas cidades de países em desenvolvimento conforme previsto pelo inventor da tecnologia. O fato do concentrador poder ser redimensionado em escalas simplifica o dimensionamento das peças de protótipo de diferentes tamanhos. O domínio técnico sobre esta tecnologia é oportuno para sua reprodução para fins comerciais e para outros projetos.

Apesar da sensibilidade dos fotosensores e de suas susceptibilidades quanto a períodos nublado, o sistema de rastreamento solar funcionou como esperado, mantendo o painel refletor constantemente voltado para o Sol e convergindo a luz para o foco fixo. O intervalo aproximado de funcionamento do sistema de rotação foi de 08 às 16 horas, acompanhando assim o Sol por 8 horas, inclusive, durante o horário mais próximo ao meio dia em que é o momento em que o Sol está mais próximo ao zênite e possui menor efeito cosseno diário, tendo assim maior intensidade de radiação solar sobre uma unidade de superfície.

Conforme já visto, a inclinação e o formato da superfície refletora são ajustáveis conforme a mudança da inclinação solar por conta do movimento de translação da Terra, aonde o painel refletor fica com área menor durante o solstício de verão e maior no de inverno. Este mecanismo é o que possibilita que o foco permaneça fixo durante todo o ano e com área (A_{foco}) de $0,011\text{m}^2$. Diante disso, para este protótipo de concentrador parabólico com área teórica de (A_{ct}) $0,30\text{m}^2$ se tem as seguintes variações entre os solstícios: fator de abertura da parabólica entre 0,57 à 0,85; área refletora útil ($A_{\text{ú}}$) entre $0,15\text{m}^2$ à $0,23\text{m}^2$; e do fator de concentração (C) entre 13,6 à 20,9.

A eficiência ótica (η_o) do sistema de captação de energia solar é um dado de projeto que está relacionado as características de refletividade e emissividade dos materiais utilizados, desta forma a eficiência ótica é possui um valor constante de 0,73. De acordo com os dois ensaios realizados pode-se constatar que a média da eficiência de conversão térmica (η_t) da energia solar absorvida em energia útil foi de 0,955, deste modo, a potência perdida (P_{perda}) no processo de conversão da energia solar em térmica foi de quase 5% da energia absorvida (P_{abs}). Diante disso, pode-se concluir que o forno receptor desempenhou importante papel para reduzir as perdas térmicas do sistema.

Considerando os dados das referências bibliográficas sobre combinações de tempo e temperatura para ocorrer a desinfecção dos coliformes totais e *E. coli* presentes na água pelo método de pasteurização solar, pode-se concluir que o protótipo de concentrador solar de $0,30\text{m}^2$ construído neste trabalho foi capaz de aquecer as amostras de água (1,5 e 5 litros) a temperaturas suficientes para eliminar os indicadores de contaminação microbiológica. Demonstrando assim ter potencial no tratamento microbiológico em sistemas de solução alternativas individuais, sobretudo na região do semiárido.

6 RECOMENDAÇÕES

Nos próximos estudos sugere-se fazer análises da qualidade microbiológica da água antes e após cada experimento para confirmar por meio da contagem dos indicadores de contaminação microbiológica a efetiva descontaminação da água pelo processo de pasteurização utilizando este protótipo de concentrador solar parabólico de foco fixo. Recomenda-se também projetar um receptor capaz de realizar a pasteurização solar em processo de produção contínua.

Sugere-se que seja feito testes para ver a possibilidade de utilizar o concentrador solar e o forno construído nesta pesquisa para assar pães e bolos e cozer alimentos. Ademais, recomenda-se estudar a outras aplicações da energia térmica concentrada no foco, como para produzir eletricidade através de pastilhas Peltier, água quente ou vapor usando um receptor em forma de serpentina.

É aconselhável fazer a leitura de radiação solar direta durante novos experimentos para definir mais precisamente a potência e eficiência do protótipo de concentrador solar parabólico de foco fixo de $0,30\text{m}^2$ construído. Para monitoramento da temperatura ambiente, do interior e da superfície externa do forno, das amostras de água e dos dados de irradiância solar direta, sugere-se que seja montado um sistema embarcado para o registro e armazenamento destas informações, pois assim facilitará os procedimentos de monitoramento e cálculo de potência e eficiência do concentrador, assim como seria possível estabelecer um banco de dados que poderia servir de referência para simulações de uso do aparelho.

Proponha-se também realizar um trabalho de extensionismo estudando os impactos sociais desta tecnologia em comunidades rurais do semiárido, identificando sua aplicabilidade para desinfetar águas armazenadas em cisternas e aferindo seu potencial como tecnologia para a convivência do homem com o semiárido.

REFERÊNCIAS

ALVES, J. E. D. **Energia Renovável com Baixa Emissão de Carbono**. Cadernos Adenauer XV. Rio de Janeiro, n. 3, p. 11-28, 2014.

AMAN, M. M. *et al.* **A review of safety, health and environmental (SHE) issues of solar energy system**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [S.l.]: v. 41, p. 1190-1204, 2015.

AMARAL, L. A. do; *et al.* **Água de consumo humano como fator de risco à saúde em propriedades rurais**. Revista de Saúde Pública. Jaboticabal (SP): v. 37, p. 510-514, 2003.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Energia solar. *In: Atlas de energia elétrica do Brasil*. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2005. cap. 3. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/download.htm>. Acesso em: 10 jun. 2016.

ARAÚJO, S. M. S. de. **A região semiárida do Nordeste do Brasil: Questões Ambientais e Possibilidades de uso Sustentável dos Recursos**. RIOS Eletrônica – Revista da Faculdade Sete de Setembro. ano 5, n.5 (Dez. 2011) Paulo Afonso, BA: FASETE, 2011.

BAIN, R. *et al.* **Fecal contamination of drinking-water in low-and middle-income countries: A systematic review and meta-analysis**. PLoS Med, University of East Anglia, United Kingdom, v. 11, n. 5, p. e1001644, 2014.

BASTOS, F. P. **Tratamento de água de chuva através de filtração lenta e desinfecção UV**. 2007. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós- Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, 2007.

BERMANN, C. **Crise ambiental e as energias renováveis**. Ciência e Cultura, [S.l.]: v. 60, n. 3, p. 20-29, 2008.

BEZERRA, F. D.; SANTOS, L. S. dos. **Energia Solar no Nordeste**. Caderno Setorial Etene, [S.l.]: ano 1, n. 1, setembro, p.26-40, set. 2016.

BHASME, S.; THOSAR, A. G. **Performance Analysis of Scheffler Reflector used for Solar Dry Cleaning**. IJAIR, [S.l.]: v. 4, n. 4, p. 640-644, 2015.

BOSO, A. C. M. R.; GABRIEL, C. P. C.; GABRIEL FILHO, L. R. A. **Análise de custos dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid no brasil**. Revista Científica ANAP Brasil, [S.l.]: v. 8, n. 12, 2015.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Nova Delimitação do Semiárido Brasileiro. Secretaria de Políticas de Desenvolvimento Regional do Ministério da Integração**

Nacional. Brasília, DF, 2005. Disponível em: http://www.integracao.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=0aa2b9b5-aa4d-4b55-a6e1-82faf0762763&groupId=24915. Acesso em: 13 dez. 2017.

BRASIL. Ministério da Saúde. Anexo XX: Do Controle e da Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano e seu Padrão de Potabilidade. *In: Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017*. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Diário Oficial da União, Brasília, DF, nº 190, 03 dez. 2017. Disponível em: ftp://ftp.saude.sp.gov.br/ftpsessp/bibliote/informe_eletronico/2017/iels.out.17/Iels194/U_PRC-MS-GM-5_280917.pdf. Acesso em: 13 dez. 2018.

CARIELO, G. da. **Desenvolvimento de um sistema para descontaminação microbiológica da água por pasteurização solar**. 2011.108 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

CARIELO, G.; TIBA, C.; CALAZANS, G. **Desenvolvimento de um sistema para descontaminação Microbiológica da água por pasteurização solar**. Revista Brasileira de Energia Solar, [S.l.]: v. 4, n. 2, 2016.

CARVAJAL, R. A. R. **Desinfecção solar da água**: avaliação da técnica “SODIS” aplicada a águas de chuva, poço e manancial superficial, nas condições climáticas de verão na região de Porto Alegre, RS. 2015. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2015.

CERQUEIRA, T. B.; SANTOS, J. dos. **Construção e aplicação de um concentrador solar parabólico de foco fixo para cocção**. 2013. 102 f. TCC (Graduação) - Curso de Gestão Ambiental, Instituto Federal de Alagoas - IFAL, Marechal Deodoro/ AL, 2013.

CONVENÇÃO QUADRO SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Acordo de Paris**. Paris, 2016.

CORELDRAW. Version X7. [S.l.]: Corel Corporation, 2014. Disponível em: <https://www.coreldraw.com/br/?link=wm>. Acesso em: 12 maio 2017.

COVENTRY, J.; ANDRAKA, C. **Dish systems for CSP**. [S.l.]: Solar Energy, v. 152, p. 140-170, 2017.

DANIEL, L. A. (Coord.). **Métodos Alternativos de Desinfecção da Água**. São Carlos-SP: Rede Cooperativa de Pesquisas, Programa de Pesquisas em Saneamento Básico – Prosab, 1ª edição, São Carlos, 2001.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G. de; CASTRO NETO, P. **Radiação solar**. Lavras, MG: UFLA, [20--]. Disponível em:

http://deg.ufla.br/site/_adm/upload/file/Agrometeorologia/5%20-%20RADIACAO%20SOLA R.pdf. Acesso em: 25 nov. 2017.

DAVID, G. R.; SILVA, J.P.S.; VIEIRA, L.G.M. **Estudo e desenvolvimento de adimensional para análise de dados de evaporação da água utilizando energia solar**. Blucher Chemical Engineering Proceedings, [São Paulo], v. 1, n. 1, p. 390-395, 2014.

DELANEY, D. **Notes on Scheffler Community Kitchens**. [S.l. : s.n.], 2009. Disponível em: <http://davidmdelaney.com/scheffler-precis/scheffler-precis.html>. Acesso em: 10 abr. 2016.

DELGADO, F. E. **Desarrollo de un prototipo de tostador de granos de cacao de 6 Kg/hora que funcione con energía solar concentrada**. 2015. 105 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima - Peru, 2015.

DIAS, C. T. C. *et al.* **Energia solar no brasil**. Interscientia, João Pessoa, v. 5, n. 1, p.153-165, 2017.

DIB, E. A. **Projeto e Construção de um Concentrador Solar de Foco Fixo utilizado para o aquecimento de um forno**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Tiradentes. Aracaju, 2009.

DIENSTIMANN, G. **Energia solar: uma comparação de tecnologias**. 2009. 92 f. Projeto de Diplomação (Graduação) – Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/ RS, 2009.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. New York: Wiley, 4ª ed., 2013.

BARROSO, L. A. N.; GUERREIRO, A. G. (Coord.). **Sistemas Isolados: Energia Solar Para Suprimento De Sistemas Isolados Do Amazonas**. Brasília, DF, Empresa de Pesquisa Energética 2016.

FUNK, Paul A. **Evaluating the international standard procedure for testing solar cookers and reporting performance**. Solar Energy, [S.l.] v. 68, n. 1, p. 1-7, 2000.

GADHIA, D.; GADHIA, S. **Parabolic solar concentrators for cooking, food processing and other applications**. Gadhia Solar Energy Systems Pvt. Ltd, Índia, 2006.

GADHIA, D. **Parabolic solar concentrators for cooking and food processing**. *In*: International Solar Food Processing Conference. [S.l.: s.n.] 2009.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energias renováveis: um futuro sustentável**. Revista USP, São Paulo, n. 72, p. 6-15, 2007.

GOMEZ, Manu; KERN, Maren. Construction Manual 2.7m² Scheffler: Reflector Solar Cooker. [S.l.: s.n.], 2010. Disponível em: <http://www.solare-bruecke.org/Bauanleitungen/2-7-qm-manual-juli-2010.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2016.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Sinopse do censo demográfico 2010**. Rio de Janeiro, 2011.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

JESUS, G. O. *et al.* **Destilação de água por energia solar**. Cadernos de prospecção, Salvador, v. 8, n. 3, p. 469-477, jul./set. 2015.

JESUS, V. M. B. de; COSTA, A. B. Tecnologia social: breve referencial teórico e experiências ilustrativas. *In*: COSTA, A. B. (Org.). **Tecnologia social e políticas públicas**. São Paulo: Instituto Pólis; Brasília: Fundação Banco do Brasil, 2013. p. 17-32.

KALOGIROU, S. A. **Solar Energy Engineering: Processes and Systems**. Elsevier Academic Press, Oxford, 1^o ed., 2009.

KEMERICH, P. D. da C. *et al.* **Paradigmas da energia solar no Brasil e no mundo**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, Santa Maria, v.20, n. 1, jan.-abr. 2016.

KREITH, F. **Princípios da transmissão de calor**. Tradução da 3. Ed. americana [por] Eitaro Yamane, Otávio de Mattos Silveiras, Virgílio Rodrigues Lopes de Oliveira. São Paulo; Edgar D Blücher, 1977.

LION FILHO, C. A. P. de Q. **Construção e análise de desempenho de um fogão solar à concentração utilizando dois focos para cozimento direto**. 2007. 92 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

LOBO, M. A. A.; et al. **Avaliação econômica de tecnologias sociais aplicadas à promoção de saúde: abastecimento de água por sistema Sodis em comunidades ribeirinhas da Amazônia**. Ciência & Saúde Coletiva, Rio de Janeiro, v. 18, n. 7, 2013.

MACEDO NETO, M. C. de. **Análise de desempenho de um fogão solar com parábola fabricada em material compósito**. 2011. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

MACHADO, F. D.; *et al.* **Conceitos Básicos para Discutir Gestão Ambiental**. II Encontro Nacional de Geoprocessamento, Meio Ambiente e Saneamento, Teresina/PI, 2012.

MACHADO, M. T. G. **Parábolas – as curvas preciosas**. Londrina: Universidade Estadual de Londrina Uel, 2007.

MALAGUETA, D. C. **Geração heliotérmica: princípios e tecnologias**. Rio de Janeiro: Equipe Cresesb/cepel, 2012. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_heliotermica_2012.pdf. Acesso em: 12 maio 2016

MEDEIROS JÚNIOR, A. P. de. **Fabricação e estudo de um fogão solar multifocal para cocção de alimentos**. 2016. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MEKHILEF, S.; SAIDUR, R.; SAFARI, A. **A review on solar energy use in industries**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S.l.]: v. 15, n. 4, p. 1777-1790, 2011.

MILONE, A. de C. A astronomia no dia-a-dia. *In: MILONE, A. de C. et al. Introdução à astronomia e astrofísica*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003. p. 1.1-1.56.

MOREIRA, M. J.; PATERNIANI, J. E. S. **Uso de garrafas PET e energia solar na desinfecção de águas em comunidades rurais**. *Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia*, Espírito Santo do Pinhal, v. 2, n. 1, p. 060-069, jan/dez 2005.

MÜLLER, C. **Solar community bakeries on the Argentinean Altiplano**. *In: International Solar Food Processing Conference*, Spain, 2009.

MULLICK, S. C.; KANDPAL, T. C.; KUMAR, S. **Thermal test procedure for a paraboloid concentrator solar cooker**. *Solar Energy*, USA, v. 46, n. 3, p. 139-144, 1991.

MUNIR, A.; HENSEL, O.; SCHEFFLER, W. **Design principle and calculations of a Scheffler fixed focus concentrator for medium temperature applications**. *Solar Energy*, [S.l.]: v. 84, n. 8, p. 1490-1502, 2010.

NDLOVU, M. **Design, manufacturing and testing of a compact WAPI maker for Tanzania, Kenya and Uganda**. 2017. 67 f. Thesis (Doctorate) - Master of Science, Department of Mechanical Engineering, California State University, Sacramento, 2017.

NETO MACEDO, M.C. *et al.* **Aplicação de materiais alternativos para o uso da energia solar**. *HOLOS*, Rio Grande do Norte, v. 30, n. 4, p. 212, 2014.

OELHER, U.; SCHEFFLER, W. **The use of indigenous materials for solar conversion**. *Solar energy materials and solar cells*, [S.l.], v. 33, n. 3, p. 379-387, 1994.

OLIVEIRA FILHO, K. de S.; SARAIVA, M. de F. O. **Estações do Ano: Tabela de Equinócios, Solstícios, Periélio e Afélio 1992-2020.** [S.l. : s.n.], 2002. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/estacoes.html>. Acesso em: 05 fev. 2018.

OLIVEIRA, C. S. de; SOUZA, N. C.; LUIZ, M. R. **Avaliação da eficiência do método SODIS com e sem o uso de concentrador solar para desinfecção de água da cisterna localizada na zona rural de Alagoa Nova–PB.** XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Blucher Chemical Engineering Proceedings, [S.l.]: Volume 1, 2015.

OLIVEIRA, P. J. **Transmissão de Calor – Convecção Natural.** Departamento Engenharia Electromecânica, UBI, [Portugal], agosto de 2014a.

OLIVEIRA, P. J. **Transmissão de Calor – Convecção Forçada.** Departamento Engenharia Electromecânica, UBI, [Portugal], dezembro 2014b.

PANWAR, N. L.; KAUSHIK, S. C.; KOTHARI, S. **State of the art of solar cooking: An overview.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, [S.l.]: v. 16, n. 6, p. 3776-3785, 2012.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia Agrícola.** 3. ed. Piracicaba: Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Departamento de Ciências Exatas, 2000.

PHATE, M. R. *et al.* **Experimental Analysis of 2.7 m² Scheffler Reflector and Formulation of a Model.** International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), [S.l.]: Volume, v. 12, 2014.

PHENG, L. G., *et al.* **A review of Parabolic Dish-Stirling Engine System based on concentrating solar power.** TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control), [S.l.]: v. 12, n. 4, p. 1142-1152, 2014.

PHILIBERT, C. Solar Energy Perspectives, Renewable Energy Technologies. International Energy Agency, Paris, 2011.

PINTO, C. *et al.* **Energia Solar: Projeto FEUP.** [S. l.]: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014/2015. Disponível em: https://paginas.fe.up.pt/~projfeup/submit_14_15/uploads/relat_1MIEEC03_1.pdf. Acesso em: 01 dez. 2017.

PORTAL Energia Heliotérmica. [S.l. : s.n.], [20--]. Disponível em: <http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/energia-heliotermica/como-funciona>. Acesso em 12 set de 2016.

PROPRIEDADES do ar seco sob pressão normal. Apostilas. Engenharia Industrial, Notas de estudo de Engenharia Industrial. Universidade Federal de Alagoas (UFAL), [Alagoas] [200--].

Disponível em: <https://www.doccity.com/pt/propriedades-do-ar-seco-sob-pessao-normal-apostilas-engenharia-industrial/346757/>. Acesso em: 05 out. 2018.

PUROHIT, I.; PUROHIT, P. **Instrumentation error analysis of a paraboloid concentrator type solar cooker**. Energy for Sustainable Development, [S.l.]:v. 13, n. 4, p. 255-264, 2009.

QUADRADO, J. C. **Dossier: Medição da radiação solar**. [S.l. : s.n], 2008. Disponível em: http://energiasrenovaveis.com/DetalheNoticias.asp?ID_conteudo=102&ID_area=15. Acesso em: 25 nov. 2017.

RADIAÇÃO Solar Balanço de Energia. [S.l.: s. n.], Slide show, [20--]. 39 slides. Disponível em: slideplayer.com.br/slide/284304/. Acesso em: 15 mar. 2017

RAMALHO, M. F. de J. L. **A fragilidade ambiental do Nordeste brasileiro: o clima semiárido e as imprevisões das grandes estiagens**. Sociedade e Território, Natal, v. 25, nº 2, EDIÇÃO ESPECIAL, p. 104-115, jul./dez. 2013.

RAMOS FILHO, R. E. B. **Análise de desempenho de um fogão solar construído a partir de sucatas de antena de TV**. 2011. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

REYMÃO, A. E.; SABER, B. A. **Acesso à água tratada e insuficiência de renda: Duas dimensões do problema da pobreza no Nordeste brasileiro sob a óptica dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio**. Revibec: revista de la Red Iberoamericana de Economía Ecológica, [S.l.]: v. 12, p. 001-15, 2009.

RODRIGUES, D. G. **Desinfecção da água por pasteurização solar (SOPAS) em comunidades rurais**. 2011. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2011.

SANDEC, Water & Sanitation in Developing Countries; EAWAG, Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology. **Desinfecção solar da água: guia de aplicações do SODIS**. Dübendorf, 2002. Disponível em: http://www.sodis.ch/methode/anwendung/ausbildungsmaterial/dokumente_material/manual_p.pdf. Acesso em: 05 fev. 2017.

SANTOS, J. G. dos; GARRIDO, M. M.; CORRÊA, R. A. **Desinfecção solar da água: a influência da temperatura da água para a segurança no tratamento domiciliar**. 7º Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Água de Chuva, Caruaru - PE, 2009.

SANTOS, P.H. C. **Construção de um sistema de aquecimento híbrido solar/gás para forno de casa de farinha**. 2015. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Processos,

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos - Pep, Universidade Tiradentes – Unit, Aracaju, 2015.

SCHEFFLER, W. **Introduction to the revolutionary design of Scheffler reflectors.** *In:* Solar Cookers and Food Processing International Conference, Granada, Spain, 2006.

SEIXAS, A. S.; *et al.* **As tecnologias sociais como instrumento para o desenvolvimento nacional.** Revista GEINTEC-Gestão, Inovação e Tecnologias, São Cristóvão/SE, v. 5, n. 4, p. 2678-2688, 2015.

SERRANO, M. I. R. **Concentrating Solar Thermal Technologies.** *In:* Concentrating Solar Thermal Technologies. Springer International Publishing, [S.l.]: 2017. p. 11-24.

SILVA, E. B. da; ALVES, C. S.; PORTILHO, J. C dos S. **Diagnóstico participativo de saneamento básico na comunidade rural do baixo Rio Araguari, Município de Ferreira Gomes-Amapá, Brasil.** Biota Amazônia (Biote Amazonie, Biota Amazonia, Amazonian Biota), Macapá, v. 6, n. 2, p. 17-23, 2016.

SILVA, G. C. da. **Pasteurizador solar para descontaminação microbiológica da água.** 2016. 113 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE, 2016.

SILVA, T. D. C. *et al.* **Descontaminação bacteriológica da água através de um pasteurizador solar.** Resumos Expandidos do I CONICBIO / II CONABIO / VI SIMCBIO (v.2), Universidade Católica de Pernambuco - Recife - PE - Brasil, 2013.

SKETCHUP. Version Make. [S.l.]: Trimble Inc, 2017. Disponível em: <https://www.sketchup.com/pt-BR>. Acesso em: 10 maio 2017.

SolarGIS © 2016 Solargis. [S.l.]: Disponível em: <http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI#B>. Acesso em: 08 jun 2016.

SOUZA FILHO, J. R. de. **Projeto, construção e levantamento de desempenho de um concentrador solar cilindro parabólico com mecanismo automático de rastreamento solar.** 2008. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

SOUZA, L.G.M. *et al.* **Fogão solar com parábola reciclável de antena.** VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande – PB, 2010.

SOUZA, R. F. de. **Viabilidade de uso de um fogão solar para cocção de alimentos com parábola refletora fabricada em compósito que utiliza fibras de Carnaúba e resina Ortoftálica.** 2014. 78 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

THIRUGNANASAMBANDAM, M.; INIYAN, S.; GOIC, R. **A review of solar thermal technologies. Renewable and sustainable energy reviews**, [S.l.]: v. 14, n. 1, p. 312-322, 2010.

THOMÉ, R. **Manual de Direito Ambiental**. 5. ed.. Salvador: Editora JusPodvim, 2015.

TIBA, C. *et al* (Coord.). **Atlas Solarimétrico do Brasil**: banco de dados solarimétricos. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000.

UNO, United Nations Organization. Economic and Social Council. **Substantive issues arising in the implementation of the international covenant on economic, social and cultural rights**. Geneva, January 2003.

UNO, United Nations Organization. General Assembly. **A/RES/64/292**. The human right to water and sanitation. [S.l.]: July 2010.

VENTURA, A. C.; FERNÁNDEZ, L.; ANDRADE, J. C. S. **Tecnologias sociais para enfrentamento às mudanças climáticas no semiárido**: caracterização e contribuições. *Revista Econômica do Nordeste*, Fortaleza, v. 44, n. especial, p. 213-238, jun. 2013.

VICHI, F. M.; MANSOR, M. T. C. **Energia, meio ambiente e economia**: o Brasil no contexto mundial. *Química Nova*, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 757-767, 2009.

VIKRAM, T. S.; REDDY, K. S. **Investigation of convective and radiative heat losses from modified cavity based solar dish steam generator using ANN**. *International Journal of Thermal Sciences*, [S.l.]: v. 87, p. 19-30, 2015.

WHO, World Health Organization. **Guidelines for drinking-water quality**. [S.l.]: Fourth Edition, 2011.

WU, S. Y. *et al*. **Convection heat loss from cavity receiver in parabolic dish solar thermal power system**: A review. *Solar Energy*, [S.l.]: v. 84, n. 8, p. 1342-1355, 2010.

ZARPELON, A.; RODRIGUES, E. M. **Os Trihalometanos na água de consumo humano**. *Revista Sanare*, Curitiba, v.17, n.17, 2002.

APÊNDICE A – Fator de abertura e área refletora útil do concentrador solar de Scheffler de 0,30m² para cada dia do ano.

Datas de equinócios e solstícios apresentados por Oliveira Filho e Saraiva (2002) para o período de 20/03/2018 a 20/03/2019, supondo que a mudança da inclinação solar seja constante, a tabela apresenta o fator de abertura e a área útil do painel refletor de 0,30m² para cada dia do ano. Subtraiu-se 10% da área refletora total antes de calcular a área útil do concentrador, referente a possíveis imperfeições do painel.

OUTONO			INVERNO			PRIMAVERA			VERÃO		
Dia	F. abert.	A. útil (m ²)	Dia	F. abert.	A. útil (m ²)	Dia	F. abert.	A. útil (m ²)	Dia	F. abert.	A. útil (m ²)
20/mar	0,73	0,2	21/jun	0,85	0,23	23/set	0,73	0,2	21/dez	0,57	0,15
21/mar	0,73	0,2	22/jun	0,85	0,23	24/set	0,73	0,2	22/dez	0,58	0,16
22/mar	0,73	0,2	23/jun	0,85	0,23	25/set	0,73	0,2	23/dez	0,58	0,16
23/mar	0,73	0,2	24/jun	0,85	0,23	26/set	0,72	0,2	24/dez	0,58	0,16
24/mar	0,73	0,2	25/jun	0,85	0,23	27/set	0,72	0,2	25/dez	0,58	0,16
25/mar	0,74	0,2	26/jun	0,85	0,23	28/set	0,72	0,19	26/dez	0,58	0,16
26/mar	0,74	0,2	27/jun	0,85	0,23	29/set	0,72	0,19	27/dez	0,59	0,16
27/mar	0,74	0,2	28/jun	0,84	0,23	30/set	0,72	0,19	28/dez	0,59	0,16
28/mar	0,74	0,2	29/jun	0,84	0,23	01/out	0,72	0,19	29/dez	0,59	0,16
29/mar	0,74	0,2	30/jun	0,84	0,23	02/out	0,71	0,19	30/dez	0,59	0,16
30/mar	0,74	0,2	01/jul	0,84	0,23	03/out	0,71	0,19	31/dez	0,59	0,16
31/mar	0,75	0,2	02/jul	0,84	0,23	04/out	0,71	0,19	01/jan	0,59	0,16
01/abr	0,75	0,2	03/jul	0,84	0,23	05/out	0,71	0,19	02/jan	0,6	0,16
02/abr	0,75	0,2	04/jul	0,84	0,23	06/out	0,71	0,19	03/jan	0,6	0,16
03/abr	0,75	0,2	05/jul	0,84	0,23	07/out	0,71	0,19	04/jan	0,6	0,16
04/abr	0,75	0,2	06/jul	0,84	0,23	08/out	0,7	0,19	05/jan	0,6	0,16
05/abr	0,75	0,2	07/jul	0,83	0,23	09/out	0,7	0,19	06/jan	0,6	0,16
06/abr	0,75	0,2	08/jul	0,83	0,22	10/out	0,7	0,19	07/jan	0,61	0,16
07/abr	0,76	0,2	09/jul	0,83	0,22	11/out	0,7	0,19	08/jan	0,61	0,16
08/abr	0,76	0,2	10/jul	0,83	0,22	12/out	0,7	0,19	09/jan	0,61	0,16
09/abr	0,76	0,2	11/jul	0,83	0,22	13/out	0,7	0,19	10/jan	0,61	0,16
10/abr	0,76	0,21	12/jul	0,83	0,22	14/out	0,69	0,19	11/jan	0,61	0,17
11/abr	0,76	0,21	13/jul	0,83	0,22	15/out	0,69	0,19	12/jan	0,61	0,17
12/abr	0,76	0,21	14/jul	0,83	0,22	16/out	0,69	0,19	13/jan	0,62	0,17
13/abr	0,76	0,21	15/jul	0,82	0,22	17/out	0,69	0,19	14/jan	0,62	0,17
14/abr	0,77	0,21	16/jul	0,82	0,22	18/out	0,69	0,19	15/jan	0,62	0,17

continuação

OUTONO			INVERNO			PRIMAVERA			VERÃO		
Dia	F. abert.	A. útil (m ²)	Dia	F. abert.	A. útil (m ²)	Dia	F. abert.	A. útil (m ²)	Dia	F. abert.	A. útil (m ²)
15/abr	0,77	0,21	17/jul	0,82	0,22	19/out	0,69	0,19	16/jan	0,62	0,17
16/abr	0,77	0,21	18/jul	0,82	0,22	20/out	0,68	0,18	17/jan	0,62	0,17
17/abr	0,77	0,21	19/jul	0,82	0,22	21/out	0,68	0,18	18/jan	0,63	0,17
18/abr	0,77	0,21	20/jul	0,82	0,22	22/out	0,68	0,18	19/jan	0,63	0,17
19/abr	0,77	0,21	21/jul	0,82	0,22	23/out	0,68	0,18	20/jan	0,63	0,17
20/abr	0,77	0,21	22/jul	0,82	0,22	24/out	0,68	0,18	21/jan	0,63	0,17
21/abr	0,78	0,21	23/jul	0,81	0,22	25/out	0,68	0,18	22/jan	0,63	0,17
22/abr	0,78	0,21	24/jul	0,81	0,22	26/out	0,67	0,18	23/jan	0,63	0,17
23/abr	0,78	0,21	25/jul	0,81	0,22	27/out	0,67	0,18	24/jan	0,64	0,17
24/abr	0,78	0,21	26/jul	0,81	0,22	28/out	0,67	0,18	25/jan	0,64	0,17
25/abr	0,78	0,21	27/jul	0,81	0,22	29/out	0,67	0,18	26/jan	0,64	0,17
26/abr	0,78	0,21	28/jul	0,81	0,22	30/out	0,67	0,18	27/jan	0,64	0,17
27/abr	0,78	0,21	29/jul	0,81	0,22	31/out	0,67	0,18	28/jan	0,64	0,17
28/abr	0,78	0,21	30/jul	0,81	0,22	01/nov	0,66	0,18	29/jan	0,65	0,17
29/abr	0,79	0,21	31/jul	0,8	0,22	02/nov	0,66	0,18	30/jan	0,65	0,17
30/abr	0,79	0,21	01/ago	0,8	0,22	03/nov	0,66	0,18	31/jan	0,65	0,18
01/mai	0,79	0,21	02/ago	0,8	0,22	04/nov	0,66	0,18	01/fev	0,65	0,18
02/mai	0,79	0,21	03/ago	0,8	0,22	05/nov	0,66	0,18	02/fev	0,65	0,18
03/mai	0,79	0,21	04/ago	0,8	0,22	06/nov	0,66	0,18	03/fev	0,65	0,18
04/mai	0,79	0,21	05/ago	0,8	0,22	07/nov	0,65	0,18	04/fev	0,66	0,18
05/mai	0,79	0,21	06/ago	0,8	0,21	08/nov	0,65	0,18	05/fev	0,66	0,18
06/mai	0,8	0,21	07/ago	0,79	0,21	09/nov	0,65	0,18	06/fev	0,66	0,18
07/mai	0,8	0,22	08/ago	0,79	0,21	10/nov	0,65	0,18	07/fev	0,66	0,18
08/mai	0,8	0,22	09/ago	0,79	0,21	11/nov	0,65	0,17	08/fev	0,66	0,18
09/mai	0,8	0,22	10/ago	0,79	0,21	12/nov	0,65	0,17	09/fev	0,66	0,18
10/mai	0,8	0,22	11/ago	0,79	0,21	13/nov	0,64	0,17	10/fev	0,67	0,18
11/mai	0,8	0,22	12/ago	0,79	0,21	14/nov	0,64	0,17	11/fev	0,67	0,18
12/mai	0,8	0,22	13/ago	0,79	0,21	15/nov	0,64	0,17	12/fev	0,67	0,18
13/mai	0,8	0,22	14/ago	0,79	0,21	16/nov	0,64	0,17	13/fev	0,67	0,18
14/mai	0,81	0,22	15/ago	0,78	0,21	17/nov	0,64	0,17	14/fev	0,67	0,18
15/mai	0,81	0,22	16/ago	0,78	0,21	18/nov	0,63	0,17	15/fev	0,67	0,18
16/mai	0,81	0,22	17/ago	0,78	0,21	19/nov	0,63	0,17	16/fev	0,68	0,18
17/mai	0,81	0,22	18/ago	0,78	0,21	20/nov	0,63	0,17	17/fev	0,68	0,18
18/mai	0,81	0,22	19/ago	0,78	0,21	21/nov	0,63	0,17	18/fev	0,68	0,18
19/mai	0,81	0,22	20/ago	0,78	0,21	22/nov	0,63	0,17	19/fev	0,68	0,18
20/mai	0,81	0,22	21/ago	0,78	0,21	23/nov	0,63	0,17	20/fev	0,68	0,18
21/mai	0,82	0,22	22/ago	0,77	0,21	24/nov	0,62	0,17	21/fev	0,68	0,18

conclusão											
OUTONO			INVERNO			PRIMAVERA			VERÃO		
Dia	F. abert.	A. útil (m ²)	Dia	F. abert.	A. útil (m ²)	Dia	F. abert.	A. útil (m ²)	Dia	F. abert.	A. útil (m ²)
22/mai	0,82	0,22	23/ago	0,77	0,21	25/nov	0,62	0,17	22/fev	0,69	0,19
23/mai	0,82	0,22	24/ago	0,77	0,21	26/nov	0,62	0,17	23/fev	0,69	0,19
24/mai	0,82	0,22	25/ago	0,77	0,21	27/nov	0,62	0,17	24/fev	0,69	0,19
25/mai	0,82	0,22	26/ago	0,77	0,21	28/nov	0,62	0,17	25/fev	0,69	0,19
26/mai	0,82	0,22	27/ago	0,77	0,21	29/nov	0,61	0,17	26/fev	0,69	0,19
27/mai	0,82	0,22	28/ago	0,77	0,21	30/nov	0,61	0,17	27/fev	0,69	0,19
28/mai	0,82	0,22	29/ago	0,76	0,21	01/dez	0,61	0,16	28/fev	0,7	0,19
29/mai	0,83	0,22	30/ago	0,76	0,21	02/dez	0,61	0,16	01/mar	0,7	0,19
30/mai	0,83	0,22	31/ago	0,76	0,21	03/dez	0,61	0,16	02/mar	0,7	0,19
31/mai	0,83	0,22	01/set	0,76	0,21	04/dez	0,61	0,16	03/mar	0,7	0,19
01/jun	0,83	0,22	02/set	0,76	0,2	05/dez	0,6	0,16	04/mar	0,7	0,19
02/jun	0,83	0,22	03/set	0,76	0,2	06/dez	0,6	0,16	05/mar	0,7	0,19
03/jun	0,83	0,22	04/set	0,76	0,2	07/dez	0,6	0,16	06/mar	0,71	0,19
04/jun	0,83	0,22	05/set	0,75	0,2	08/dez	0,6	0,16	07/mar	0,71	0,19
05/jun	0,83	0,23	06/set	0,75	0,2	09/dez	0,6	0,16	08/mar	0,71	0,19
06/jun	0,84	0,23	07/set	0,75	0,2	10/dez	0,59	0,16	09/mar	0,71	0,19
07/jun	0,84	0,23	08/set	0,75	0,2	11/dez	0,59	0,16	10/mar	0,71	0,19
08/jun	0,84	0,23	09/set	0,75	0,2	12/dez	0,59	0,16	11/mar	0,71	0,19
09/jun	0,84	0,23	10/set	0,75	0,2	13/dez	0,59	0,16	12/mar	0,72	0,19
10/jun	0,84	0,23	11/set	0,75	0,2	14/dez	0,59	0,16	13/mar	0,72	0,19
11/jun	0,84	0,23	12/set	0,74	0,2	15/dez	0,59	0,16	14/mar	0,72	0,19
12/jun	0,84	0,23	13/set	0,74	0,2	16/dez	0,58	0,16	15/mar	0,72	0,19
13/jun	0,84	0,23	14/set	0,74	0,2	17/dez	0,58	0,16	16/mar	0,72	0,2
14/jun	0,84	0,23	15/set	0,74	0,2	18/dez	0,58	0,16	17/mar	0,72	0,2
15/jun	0,85	0,23	16/set	0,74	0,2	19/dez	0,58	0,16	18/mar	0,73	0,2
16/jun	0,85	0,23	17/set	0,74	0,2	20/dez	0,58	0,16	19/mar	0,73	0,2
17/jun	0,85	0,23	18/set	0,74	0,2						
18/jun	0,85	0,23	19/set	0,73	0,2						
19/jun	0,85	0,23	20/set	0,73	0,2						
20/jun	0,85	0,23	21/set	0,73	0,2						
			22/set	0,73	0,2						

ANEXO A – Propriedades do ar seco sob pressão normal

Temperatura °C	Calor específico c_p kJ/(kg K)	Coefficiente de expansão $10^{-3} 1/K$	Condutividade térmica W/((m K)	Massa específica a kg/m ³	Número de Prandtl	Viscosidade absoluta 10^{-6} Pa s	Viscosidade cinemática 10^{-6} m ² /s
-150	-	8,21	0,0116	2,793	0,76	8,60	3,08
-100	-	5,82	0,0160	1,980	0,74	11,78	5,95
-50	1,006	4,51	0,0204	1,534	0,72	14,64	9,55
0	1,006	3,67	0,0243	1,293	0,71	17,23	13,32
10	1,006	3,53	0,0248	1,247	0,71	17,72	14,21
20	1,006	3,43	0,0257	1,205	0,71	18,20	15,11
30	1,006	3,30	0,0263	1,165	0,71	18,68	16,04
40	1,007	3,20	0,0271	1,127	0,71	19,15	16,97
50	1,007	3,09	0,0278	1,093	0,71	19,61	17,95
60	1,008	3,00	0,0285	1,059	0,71	20,06	18,93
70	1,009	2,91	0,0292	1,029	0,71	20,51	19,94
80	1,010	2,83	0,0299	1,000	0,71	20,95	20,94
90	1,010	2,75	0,0306	0,972	0,71	21,38	22,00
100	1,011	2,68	0,0314	0,946	0,70	21,81	23,06
110	1,012	2,61	0,0320	0,921	0,70	22,23	24,14
120	1,013	2,55	0,0328	0,898	0,70	22,65	25,23
140	1,013	2,43	0,0343	0,854	0,69	23,53	27,55
160	1,017	2,32	0,0358	0,815	0,69	24,33	29,85
180	1,022	2,21	0,0372	0,779	0,69	25,15	32,29
200	1,026	2,11	0,0386	0,746	0,68	25,83	34,63
250	1,034	1,91	0,0421	0,675	0,68	27,79	41,17
300	1,047	1,75	0,0454	0,616	0,68	29,48	47,85
350	1,055	1,61	0,0485	0,566	0,68	31,16	55,05
400	1,068	1,49	0,0515	0,524	0,68	32,77	62,53

Fonte: PROPRIEDADES do ar seco sob pressão normal, [200--].