

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE
CCET - *Campus* de Cascavel
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura
– PPGEA
Mestrado

FERNANDO TONIAZZO

**CARACTERIZAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE
AQUECIMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO COLETOR SOLAR COM
CONCENTRADOR CÔNICO**

**CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
ABRIL - 2016**

FERNANDO TONIAZZO

**CARACTERIZAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE
AQUECIMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO COLETOR SOLAR COM
CONCENTRADOR CÔNICO**

Dissertação apresentada como avaliação parcial referente à defesa do mestrado do Curso de Pós-graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus Cascavel.

Prof. Orientador: Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

Prof. Coorientador: Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

**CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
ABRIL – 2016**

T628c

Toniazzo, Fernando

Caracterização e otimização de um sistema de aquecimento de água utilizando coletor solar com concentrador cônico .Fernando Toniazzo. Cascavel, 2016.

100 p.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira

Coorientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, 2016

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Energia na Agricultura

1. Energia solar. 2. Coletor solar cônico. 3. Aquecimento de água. I. Nogueira, Carlos Eduardo Camargo. II. Souza, Samuel Nelson Melegari de . III. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. IV. Título.

CDD 21.ed. 621.042

CIP-NBR 12899

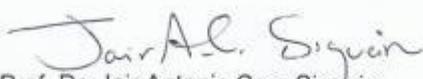
Ficha catalográfica elaborada por Helena Soterio Bejio – CRB 9ª/965

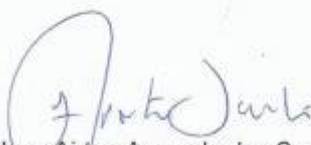
FERNANDO TONIAZZO

**“CARACTERIZAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE
AQUECIMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO COLETOR SOLAR COM
CONCENTRADOR CÔNICO.”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, **aprovada** pela seguinte Banca Examinadora:

Orientador: 
Prof. Carlos Eduardo Camargo Nogueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel


Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel


Prof. Dr. Jose Ailton Azevedo dos Santos
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/Medianeira

Cascavel, 04 de abril de 2016.

Dedico este trabalho a todos os estudantes e profissionais que contribuem para difusão do conhecimento na área de energias renováveis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES) e a Fundação Araucária pelo auxílio financeiro.

Especialmente, ao Professor Carlos Eduardo Camargo Nogueira pela orientação, apoio, incentivo, confiança e comprometimento no desenvolvido deste trabalho.

Aos professores Jair Antonio Cruz Siqueira e Samuel Nelson Melegari de Souza pela troca de informações que contribuíram para desenvolvimento do conhecimento.

Aos colegas de turma pela amizade, incentivo e apoio ao longo da trajetória do curso de Engenharia de Energia na Agricultura.

Por fim, a minha namorada Rosemeri Briskiewicz pelo apoio, paciência e toda minha família pelo incentivo e compreensão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comparação da matriz energética brasileira na geração de energia elétrica.	4
Figura 2: Movimento de rotação e translação da Terra ao redor do Sol com destaque na inclinação do eixo N-S.....	7
Figura 3: Representação da posição do Sol em relação ao plano horizontal com destaques nos ângulos de referência.....	9
Figura 4: Orientação de uma superfície inclinada em relação a horizontal.	10
Figura 5: Representação esquemática de sistemas de rastreamento solar: fixo, inclinado com eixo simples e de dois eixos.....	12
Figura 6: Ranking dos 10 países com maior capacidade instalada de coletores solares para o aquecimento de água.	14
Figura 7: Exemplo de um concentrador solar.....	17
Figura 8: Possíveis configurações de coletores concentradores.....	18
Figura 9: Coletor cilíndrico-parabólico.....	19
Figura 10: Esquema da reflexão de um concentrador de calha parabólica.....	20
Figura 11: Esquema da reflexão de luz em um concentrador de calha parabólica. ..	20
Figura 12: Exemplo de concentrador de calha parabólica de uso em usinas solares.	21
Figura 13: Concentrador de calha parabólica usado para aquecimento de ambientes.	21
Figura 14: Esquema de concentração solar em um concentrador de disco parabólico.	22
Figura 15: Concentrador solar de disco parabólico com receptor cônico.....	23
Figura 16: Concentrador de disco parabólico.....	24
Figura 17: Esquema de um coletor solar cônico.	24
Figura 18: Trajeto de raios luminosos em um concentrador cônico com ângulo de abertura de 30°	25
Figura 19: Comportamento da reflexão de luz em um concentrador cônico.	26
Figura 20: a) Trajetória da luz em um funil concentrador; b) Zoom do ponto focal. ..	27
Figura 21: Coletor solar com concentrador cônico.....	29
Figura 22: Funil concentrador solar congregado a um forno solar.	30
Figura 23: Sistema integrado de coletores solares para o aquecimento de água.	31
Figura 24: Opção de aproveitamento de calor de uma célula fotovoltaica.	32
Figura 25: a) Coletor solar de funil; b) Concentrador com vista para o absorvedor; c) Detalhe do absorvedor.	34
Figura 26: a) Vista do coletor solar em 3D; b) Simulação do sistema de aquecimento real.	35
Figura 27: Esquema do coletor solar operando com termossifão.	35
Figura 28: Vista lateral da dinâmica do concentrador e absorvedor (rotação).	36
Figura 29: a) Estrutura do coletor solar; b) Dinâmica de altitude solar do conjunto coletor/absorvedor; c) Sistema de travamento de ângulos.	37
Figura 30: Vista frontal com cotas no suporte do concentrador/absorvedor.	38
Figura 31: Vista superior da estrutura do coletor solar.....	38
Figura 32: Vista em 3D da estrutura do suporte do coletor solar.	39
Figura 33: Vista superior da dinâmica (rotação) horizontal do coletor solar (movimento azimutal).	39
Figura 34: Vista lateral da dinâmica do coletor solar (movimento angular de $\pm 30^\circ$)..	40

Figura 35: a) Vista 3D do coletor solar sem o absorvedor acoplado; b) Coletor real.	40
Figura 36: Dimensões do tronco de cone usado como concentrador solar (cm).	41
Figura 37: Esboço das dimensões do conjunto absorvedor (cm).	41
Figura 38: Placa Arduino® utilizada como datalogger.	42
Figura 39: Sensor de temperatura d'água/ambiente.	43
Figura 40: Fluxômetro utilizado para determinar a vazão mássica.	44
Figura 41: Cartão SD.	45
Figura 42: Piranômetro utilizado para medição de energia solar.	45
Figura 43: Disposição dos sensores para medição da temperatura da água.	47
Figura 44: Coletor solar operando com sistema passivo (termossifão).	48
Figura 45: Coletor solar operando com sistema ativo.	49
Figura 46: Detalhe do esquema de circulação da água no absorvedor com sistema ativo.	49
Figura 47: Bomba d'água usada no sistema ativo.	50
Figura 48: a) Lâmpada de LED de cor azul; b) Forma de foco do laser de cor verde.	52
Figura 49: Esboço dos testes óticos.	53
Figura 50: Esboço da área de refletiva pelo concentrador cônico.	55
Figura 51: Projeções da reflexão de diferentes ângulos de borda.	57
Figura 52: Simulação de feixe de luz inclinada (15°) e sua interação no absorvedor.	58
Figura 53: Interação do absorvedor com os raios solares refletidos.	59
Figura 54: Vista tridimensional da interação de raios com inclinação de 15°.	59
Figura 55: Simulação de feixe de luz perpendicular ao plano de absorção e sua interação com o absorvedor.	60
Figura 56: Feixe de luz perpendicular à área de captação do concentrador cônico.	61
Figura 57: a) Vista frontal de múltiplos feixes perpendiculares à área de captação solar; b) Vista superior da área de captação solar.	61
Figura 58: Dimensões do absorvedor e seu aspecto real.	62
Figura 59: a) Vista frontal; b) Vista 3D superior; c) Absorvedor real.	63
Figura 60: Teste ótico com luz azul sob ângulo de luz incidente igual a 0°.	64
Figura 61: Foco principal do concentrador cônico.	64
Figura 62: Teste ótico com laser de cor verde.	65
Figura 63: Foco formado pela luz com ângulo de incidência igual a 30°.	65
Figura 64: a) Vista lateral da disposição do laser (30°); b) Formação do foco do lado oposto à direção da luz.	66
Figura 65: Resultados do ensaio do Cenário 1.	67
Figura 66: Resultados do ensaio do Cenário 2.	68
Figura 67: Resultados do ensaio do Cenário 3.	70
Figura 68: Resultados do ensaio do Cenário 4.	71
Figura 69: Resultados do ensaio do Cenário 4.	72
Figura 70: Resultados do ensaio do Cenário 6.	74
Figura 71: Radiação solar acumulada para todos os Cenários.	75
Figura 72: Energia Útil em todos os cenários.	76
Figura 73: Comportamento das eficiências nos cenários com seguidor solar.	77
Figura 74: Comportamento das eficiências nos cenários com orientação solar fixa.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações da placa Arduino®.....	43
Tabela 2: Sensores de temperatura de água/ambiente	44
Tabela 3: Especificações do fluxômetro.....	44
Tabela 4: Especificações do módulo cartão SD	45
Tabela 5: Especificações do piranômetro	46
Tabela 6: Especificações da bomba d'água.....	50

TONIAZZO, Fernando. Msc., Universidade Estadual do Oeste do Paraná, março de 2016. **Caracterização e otimização de um sistema de aquecimento de água utilizando coletor solar com concentrador cônico.** Professor orientador Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo otimizar um sistema de aquecimento solar de água para uso em pequenas propriedades rurais. O sistema de aquecimento solar otimizado é baseado em um coletor com concentrador cônico. O princípio de concentração de luz em um coletor solar com concentrador cônico resume-se na captação e reflexão da radiação solar ao centro de um concentrador afunilado com faces internas refletivas. A área de concentração de energia solar é ocupada por um receptor com material de alta condutibilidade térmica, devidamente isolado por superfícies transparentes para formação do efeito estufa, onde a energia térmica é transferida para um fluido de trabalho. A caracterização do sistema se efetuou com execuções de testes a campo para relacionar as mudanças propostas em função da eficiência do sistema. A metodologia constituiu-se de amostragens de dados em diferentes cenários, os quais variaram de acordo com o sistema de aquecimento (passivo e ativo) e rastreamento solar (manual e estacionário). Os resultados demonstraram que os cenários com seguidor solar apresentaram maior eficiência do que os com orientação fixa e os sistemas de aquecimento solar operados de forma ativa foram mais eficientes do que os sistemas passivos.

PALAVRAS CHAVES: Energia solar, coletor solar cônico, aquecimento de água.

TONIAZZO, Fernando. Msc., State University of West Paraná, march 2016. **Characterization and optimization of a solar water heating system using solar collector with conical concentrator.** Teacher mentor Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

ABSTRACT

This work aims to optimize a solar water heating system for use on small farms. The solar heating system to be optimized is based on a collector with conical concentrator. The principle of concentration of light in a solar funnel collector comes down in abstraction and reflection of solar radiation to central hub with a tapered inner faces reflective. The solar energy concentration area is occupied by a receiver with high thermal conductivity material, suitably isolated by transparent surfaces for forming the greenhouse, where thermal energy is transferred to a working fluid. The characterization of the system shall take place with test runs the field to relate the proposed changes as a function of system efficiency. The method is summarized in data sampling in different scenarios, which vary according to the heating system (passive and active) and solar tracking (manual and stationary). Preliminary results show the optimization of the absorber geometry and the interaction of light in a conical concentrator. The results demonstrate that the scenarios with solar tracker have higher efficiency than with fixed orientation and solar heating systems operated actively are more efficient than passive systems.

KEY WORDS: Solar energy, solar conical collector, water heating.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Energias renováveis	3
2.2 Energia solar no Brasil	5
2.3 Geometria solar	6
2.4 Ângulos da Geometria solar	8
2.5 Aplicações da energia solar	10
2.5.1 Sistema de aquecimento solar de água	13
2.5.2 Uso de aquecimento solar na agricultura	14
2.6 Coletores concentradores	16
2.6.1 Coletor de calha parabólica	19
2.6.2 Concentrador de disco parabólico	22
2.7 Coletor solar cônico	24
2.7.1 Aplicações de concentradores cônicos e afunilados	28
3. MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1 Protótipo original do coletor solar	33
3.2 Protótipo otimizado do coletor solar	36
3.3 Instrumentação para aquisição de dados	42
3.4 Avaliação do coletor solar	46
3.4.1 Coletor solar com sistema passivo (termossifão)	46
3.4.2 Coletor solar com sistema ativo (bombeamento hidráulico)	48
3.4.3 Cenários avaliados	50
3.5 Projeções e testes óticos da reflexão da luz no concentrador	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1 Projeções da reflexão da luz - dimensionamento do absorvedor	55
4.2 Simulação da concentração da luz solar (testes óticos)	63
4.3 Ensaio do coletor solar a campo	66
4.3.1 Cenário 1 (PS)	67
4.3.2 Cenário 2 (PE)	68
4.3.3 Cenário 3 (A12S)	69
4.3.4 Cenário 4 (A12E)	71
4.3.5 Cenário 5 (A24S)	72
4.3.6 Cenário 6 (A24E)	73
4.4 Comparação dos Cenários	75
4.4.1 Radiação Solar	75
4.4.2 Energia Útil	76
4.4.3 Eficiência dos sistemas	77
CONCLUSÕES	80
REFERÊNCIAS	81
APÊNDICE	85

1. INTRODUÇÃO

A demanda mundial por energia atinge níveis elevados. O consumismo e a dependência energética estão cada vez mais atrelados com o desenvolvimento da sociedade moderna. Um dos parâmetros que influenciam nesse aumento é o crescimento exponencial da densidade demográfica, onde a necessidade energética é cada vez mais instrumento indispensável na manutenção da qualidade de vida.

Em termos gerais, o aumento da demanda energética propicia meios incentivadores de pesquisas de tecnologias alternativas, incentivando a geração de energia por fontes renováveis e aplicações mais eficientes no esforço para redução da oferta de combustíveis não renováveis. Neste contexto, de acordo com Luiz (2013) a energia solar é uma das principais fontes de energia para o desenvolvimento sustentável.

Todavia, a energia solar como fonte de energia renovável possui um enorme potencial no território brasileiro, o qual apresenta conformidade a respeito da média anual da radiação solar global, considerada relativamente alta em todo território. Índices de irradiação solar global que incidem em qualquer região do território brasileiro ultrapassam os índices de incidência solar dos países da União Europeia, onde projetos que utilizam fontes de energia solar são fortemente executados com incentivos governamentais (PEREIRA et al., 2006).

No Brasil, o consumo de energia elétrica responsável pelo aquecimento de água em residências é estimado em 25% do total consumido, o que corresponde aproximadamente 20 bilhões de kWh. Contudo, a demanda correspondente a esse consumo ocorre em horário de pico, que por sua vez poderia ser reduzido com o emprego de energia solar, somando vantagens econômicas e ambientais (PEREIRA et al., 2006).

A energia solar transformada de forma direta ou indireta em energia térmica pode ser aproveitada como alternativa a fontes convencionais de energia. Esforços para o aproveitamento dessa energia tornam mais baratos e eficientes os sistemas alternativos, tornando-os cada vez mais competitivos economicamente quando comparados com outros provenientes de fontes convencionais. O potencial brasileiro em relação a conservação de energia no aquecimento de água é bastante

significativo, onde a aplicação em larga escala de aquecedores solares pode ser uma alternativa viável e competitiva (ALDABÓ, 2002; MOURÃO, 2007).

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo otimizar um sistema de aquecimento de água com coletor solar com concentrador cônico, visando proporcionar maior eficiência energética para aplicações em pequenas propriedades rurais.

Os objetivos específicos são listados a seguir:

- i) Propor um coletor solar com concentrador cônico empregado na geração de calor para fins de aquecimento de água;
- ii) Estudar a geometria do concentrador e absorvedor para melhor aproveitamento óptico de energia;
- iii) Otimizar o protótipo a fim de aumentar a eficiência energética do sistema;
- iv) Calcular a eficiência do coletor solar em cenários com variações no posicionamento solar e fluxo de água.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Energias renováveis

As fontes utilizadas pelo homem na geração de energia podem ser segregadas em dois grandes grupos: fontes renováveis e não renováveis. Segundo Agência Municipal de Energia de Almadas (2014), as fontes não renováveis encontram-se limitadas na natureza e após sua utilização não são capazes de regenerar-se. As principais fontes de energias não renováveis são oriundas de combustíveis fósseis, tal como carvão, petróleo, etc. Entretanto, as fontes renováveis dispõem de um inestimável recurso para sua utilização, porém a quantidade de energia que é possível extrair em cada momento é limitada. Exemplos destas fontes são: energia eólica, solar, entre outras. No entanto, essas fontes de energia não emitem poluentes, sendo consideradas como energias limpas.

Todavia, o desenvolvimento e o progresso da civilização só ocorrem com o emprego de grandes quantidades de energia. Nos últimos anos, os bens e serviços consumidos são oriundos de fontes não renováveis. Segundo EPE (Empresas de Pesquisas Energéticas) em 2007, 87% da energia mundial era proveniente de combustíveis fósseis, destes, 41% eram de petróleo, 22% de carvão e 24% de gás natural. Dos restantes 13%, 7% eram energias renováveis e 6% energia nuclear. A demanda de energia global triplicou desde 1950 e o consumo atual equivale a mais 10 bilhões de toneladas de petróleo anualmente. De acordo com o conselho mundial de energia, até 2020 o consumo de energia deverá aumentar 50% (VECCHIA 2010; WALISIEWICZ, 2008).

Dados mais recentes mostram que esse quadro ainda predomina. Conforme EPE (2012), dados mundiais do consumo final de energia por fonte em 2009 mostraram que o consumo era mantido por fontes de energia não renováveis, das quais, 41,3% provinham de petróleo, 15,2% e 10,0% de gás natural e carvão mineral, respectivamente.

Em contrapartida, esse quadro é revertido no que tange a matriz energética brasileira. A participação de energias renováveis em 2011 manteve um elevado patamar, o que resultou em 44,1%, valor acima da média mundial (13,3%). Ainda, no que diz respeito à geração de energia elétrica na mesma época, a matriz brasileira mostrou-se predominantemente renovável, totalizando 88,9% referente a somatória

da geração hidrelétrica, biomassa e eólica¹, representando os valores de 81,9%, 6,6% e 0,5% respectivamente (EPE, 2012).

Segundo dados mais atualizados, a matriz elétrica brasileira predomina-se renovável totalizando 79,3% com destaque na geração hidrelétrica. A Figura 1 mostra uma comparação da matriz elétrica brasileira entre 2012 e 2013.

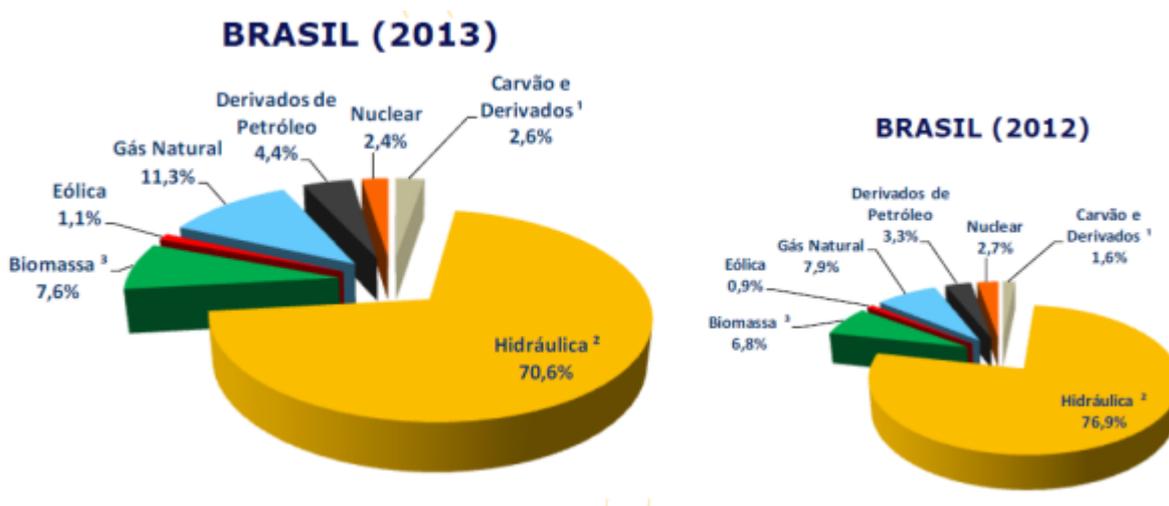


Figura 1: Comparação da matriz energética brasileira na geração de energia elétrica.
Fonte: EPE, 2014.

De acordo com a Figura 1, é notável que a parcela referente a fonte de energia hidráulica apesar de ser predominante, apresenta uma queda nos últimos anos. Uma das hipóteses pode ser o aumento do uso de outras fontes de energia que estão em fase de crescimento. No entanto, o principal fator se deve as condições hidrológicas desfavoráveis e o aumento do uso de energias térmicas, ou seja, fontes não renováveis (EPE, 2014).

O Brasil dispõe de um enorme potencial energético (mesmo não sendo possível explorá-los totalmente), das fontes mais abundantes como os recursos hídricos, sua utilização corresponde ao armazenamento de grandes volumes de água na superfície terrestre, podendo acarretar muitos danos ao patrimônio natural. Embora as hidrelétricas não gerem poluentes e suas áreas alagadas possam ser utilizadas como recreação, grandes projetos² eliminam o hábitat de espécies de animais e vegetais (algumas vezes em extinção), tanto quanto resultam na retenção

¹ Fonte renovável que obteve um aumento de 24,3% do ano de 2010 para 2011 na geração de energia elétrica no Brasil.

² O projeto três gargantas deslocou aproximadamente 1,2 milhão de pessoas e inundou tesouros nacionais de centenas de anos de idade.

de poluentes produzidos pelas cidades, redução de fluxo de nutrientes, acarretando um potencial aumento de problemas a saúde pública (BRANCO, 1993; HINRICHS et al., 2010).

Para que o setor energético nacional não seja dependente principalmente de uma fonte de energia, investimentos de caráter técnico e científico devem ser implementados. Neste quesito, a energia solar apresenta-se como uma das fontes mais promissoras.

A Terra recebe uma quantidade pequena da energia total emitida pelo Sol. Segundo Goldemberg (2010), aproximadamente 29% da energia total é diretamente refletida e reemitida ao espaço, 71% do restante são responsáveis pelas condições físicas da superfície terrestre e pelo clima. Destes, 24% correspondem ao ciclo hidrológico e 47% são absorvidos pela atmosfera, oceanos e superfície da Terra como energia térmica (determinando a temperatura do ambiente em que vivemos). Ainda, uma pequena fração desses 71%, corresponde a produção de ventos (0,2%) e realização da fotossíntese (0,02%).

Todavia, a energia solar é considerada predominante na superfície terrestre, a qual chega em quantidades generosas. É estimado que a cada minuto, a Terra recebe uma quantidade de luminosidade suficiente para atender as necessidades energéticas da civilização mundial (GOLDEMBERG, 2010; MOURÃO, 2007). Segundo Kalogirou (2009), a pequena fração do total de radiação que atinge a superfície terrestre ($1,4 \times 10^{14}$ kW), disposta cerca de 84 minutos na Terra é equivalente a demanda energética mundial em um ano.

2.2 Energia solar no Brasil

O Sol é considerado a fonte de energia principal para a vida na Terra. Sua radiação além de ser responsável pela manutenção da vida terrestre detém um enorme potencial energético mensurado como inesgotável, onde sua utilização pode ser empregada por meio de sistemas de captação e conversão em outras fontes, tais como térmica e elétrica (PINHO; GALDINO, 2014).

Uma das fontes de energia renovável mais promissoras no Brasil é a energia solar. Em sua maior parte, o território brasileiro está situado na faixa tropical e subtropical do planeta e recebe intensa radiação solar ao longo do ano. Enorme é o

potencial dessa fonte que é considerada inesgotável, e acima de tudo é disposta na superfície terrestre gratuitamente. Ao contrário dos países que possuem clima temperado, o Brasil apresenta em sua imensa área uma situação extremamente privilegiada do ponto de vista da energia solar (PEREIRA et al., 2006).

O Brasil, apesar das diferentes características climáticas, apresenta conformidade a respeito da média anual da radiação solar global, considerada relativamente alta em todo território. Índices de radiação global apresentam valores que variam de 4,25 kWh.m⁻² (litoral norte de Santa Catarina) a 6,5 kWh.m⁻² (Bahia fronteira com Piauí) (PEREIRA et al., 2006).

Todavia, os valores de irradiação solar global que incidem em qualquer região do território brasileiro (1500 - 2500 kWh.m⁻²) ultrapassam o índice de incidência solar dos países da União Europeia como Alemanha (900 – 1250 kWh.m⁻²), França (900 – 1650 kWh.m⁻²) e Espanha (1200 – 1850 kWh.m⁻²), onde projetos referentes ao aproveitamento de recursos solares são executados com fortes incentivos governamentais (PEREIRA et al., 2006).

No que diz respeito ao território brasileiro, não se observa grandes variações na duração solar do dia, pois boa parte do país está localizada relativamente perto da linha do Equador. No entanto, a maioria das atividades socioeconômicas e da população brasileira se encontra em regiões mais afastadas do Equador. A capital mais meridional do País (Porto Alegre, ~30°S), possui duração solar do dia variando de 10 horas e 13 minutos (21 de junho) a 13 horas e 47 minutos (22 de dezembro), aproximadamente (ANEEL, 2013).

2.3 Geometria solar

A disponibilidade da radiação solar na superfície terrestre depende principalmente de alguns fatores. Além das condições climáticas (nebulosidade, umidade relativa do ar, etc.), a energia total incidente varia de acordo com a latitude local e da posição do globo no tempo, levando em conta a hora do dia e dia do ano. Fato que se resume, devido a inclinação do eixo imaginário em torno do qual, a Terra gira diariamente (movimento de rotação) e ao movimento de translação que descreve a trajetória elíptica que a Terra percorre ao redor do Sol, como mostrado na Figura 2 (ANEEL, 2013).

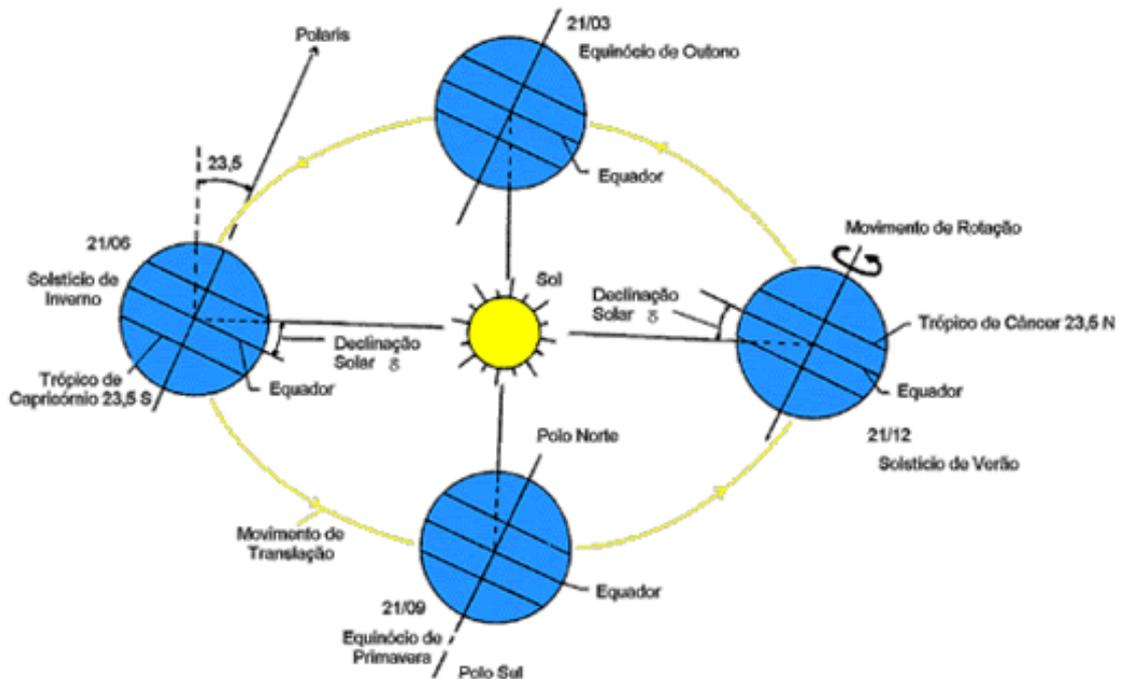


Figura 2: Movimento de rotação e translação da Terra ao redor do Sol com destaque na inclinação do eixo N-S.

Fonte: CRESESB, 2006.

Percebe-se na Figura 2, que o eixo da Terra em relação ao plano normal à elipse apresenta um ângulo de inclinação de aproximadamente $23,45^\circ$. Este ângulo é denominado como Declinação Solar (δ), e juntamente com o movimento de translação da Terra origina as estações do ano. De acordo com o movimento aparente do Sol (ao meio dia solar) ao longo do ano, percebe-se que o ângulo entre os raios solares e o plano do Equador varia de $-23,45^\circ$ a $+23,45^\circ$ nos dias 21 de dezembro e 21 de junho, respectivamente. Tais valores são positivos ao Norte e negativos ao Sul do Equador. Nos dias 21 de setembro e 21 de março os raios se alinham com o plano do Equador tornando o valor de declinação solar nulo ($\delta=0$). Ainda, em relação à Figura 2, observa-se que a variação da duração dos dias ao longo do ano para determinada localidade depende da declinação solar, ou seja, em localidades no hemisfério Sul (solstício de verão) verifica-se dias mais longos e dias mais curtos no solstício de inverno. No Equador terrestre a duração dos dias é sempre igual e nas suas proximidades a variação é pequena. (PINHO; GALDINO, 2014).

Outro parâmetro que diz respeito ao movimento de rotação da Terra é a Hora Solar (ST), a qual é a hora baseada no movimento angular aparente do Sol através do céu, onde o meio dia solar é o momento que o Sol cruza o meridiano do observador. De acordo com Duffie & Beckman (2006), a hora solar é a hora ou tempo usado em todas as relações de ângulos solares e não deve ser confundida com a hora relógio local.

O Ângulo Horário do Sol ou Hora Angular (ω) refere-se ao deslocamento angular solar Leste-Oeste do meridiano local devido a rotação da Terra em seu eixo de 15° por hora, adotando valores negativos no período matutino e positivos no vespertino (PINHO; GALDINO, 2014).

Com a utilização dos cálculos da declinação solar, hora solar e ângulo horário, pode-se estimar o posicionamento de coletores solares em função do movimento aparente do Sol ao longo do dia e do ano conforme descreve os ângulos da geometria solar.

2.4 Ângulos da Geometria solar

Considerando o movimento aparente do Sol em relação a superfície terrestre, tem-se algumas relações geométricas que são descritas através de vários ângulos, mostrados na Figura 3.

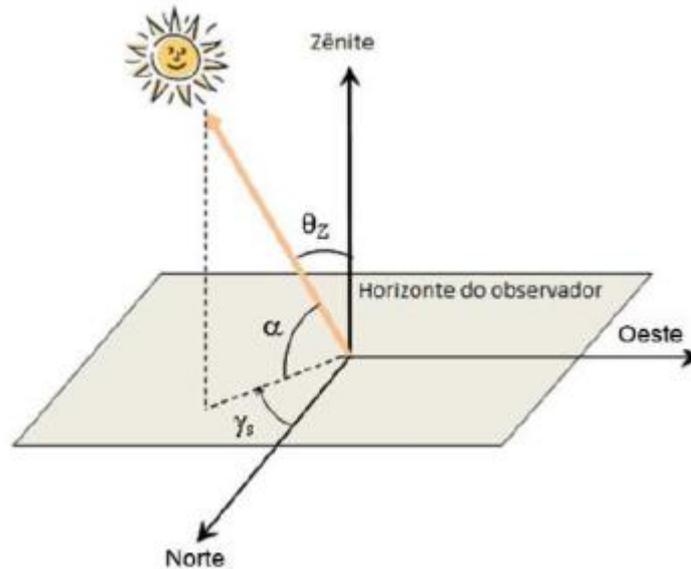


Figura 3: Representação da posição do Sol em relação ao plano horizontal com destaques nos ângulos de referência.
Fonte: Pinho & Galdino, 2014.

Na Figura 3, observam-se os ângulos α , θ_z e γ_s denominados Ângulo de Altitude Solar, Ângulo Zenital e Ângulo do Azimute Solar, respectivamente. Estes ângulos representam a trajetória solar levando em consideração o movimento aparente do Sol em relação ao horizonte de um observador. Segundo Duffie & Beckman (2006), a altitude solar (α), é designada como o ângulo entre a projeção horizontal dos raios solares e a luz solar incidente, que é o complemento do ângulo zenital ($\theta_z + \alpha = 90^\circ$). O ângulo zenital (θ_z) refere-se ao ângulo entre a vertical (Zênite) e os raios solares, o qual representa o feixe de radiação numa superfície horizontal.

Quanto ao azimute solar (γ_s), também chamado de ângulo azimutal do Sol, trata-se do ângulo entre as projeções dos raios solares na horizontal e a direção Norte-Sul (horizonte do observador). Nesse caso, o Norte geográfico é tomado como referência (0°) quando se está no hemisfério Sul, caso contrário o Sul é tomado como 0° (hemisfério Norte). Dessa forma, por convenção é adotado valores de ângulos de azimutes solares positivos quando a projeção se encontra à direita do Sul (a Leste) e negativos à esquerda, ou a Oeste ($-180^\circ \leq \gamma_s \leq 180^\circ$) (PINHO; GALDINO, 2014).

Além dos ângulos de orientação da trajetória solar, há outras referências angulares que caracterizam a posição de uma superfície (inclinada ou não) em relação ao plano horizontal, mostrados na Figura 4.

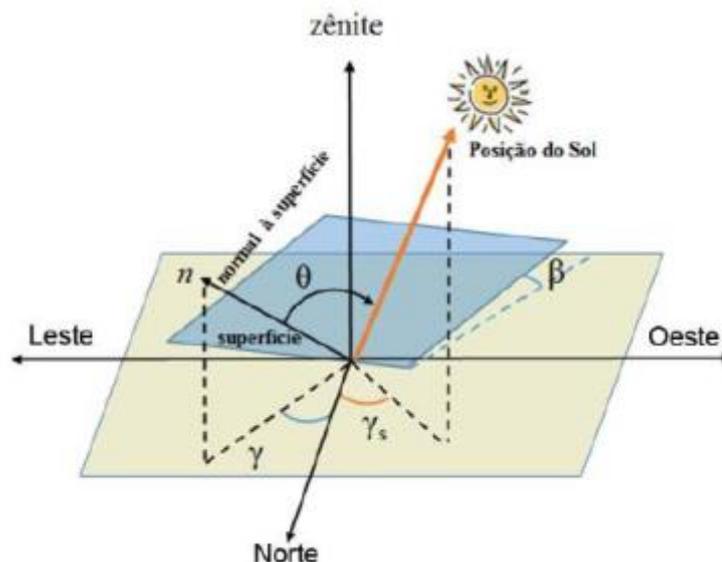


Figura 4: Orientação de uma superfície inclinada em relação a horizontal.
Fonte: Pinho; Galdino, 2014.

Os ângulos γ , β e θ representados na Figura 4 são denominados Ângulo Azimutal da Superfície, Ângulo de Inclinação da Superfície e Ângulo de Incidência, respectivamente. De acordo com Pinho e Galdino (2014), o ângulo azimutal da superfície (γ) compreende o ângulo entre a projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção Norte-Sul (consideram-se as mesmas convenções do azimute solar). Quanto ao ângulo β , o mesmo diz respeito ao ângulo entre a superfície de captação solar e a horizontal ($0^\circ < \beta < 180^\circ$). Ângulos maiores que 90° indicam que a face frontal da superfície esta voltada para baixo.

Dessa forma, o aproveitamento da radiação solar pode ser maximizado de modo a ajustar a posição dos dispositivos solares que captam a energia do Sol de acordo com a latitude local e período do ano que se requer mais energia.

Por fim, um ângulo de muita importância para otimização de posicionamento de superfícies de captação ou absorção solar é o ângulo de incidência (θ), o qual é a relação angular entre os raios solares e a normal à superfície de captação.

2.5 Aplicações da energia solar

Segundo Luiz (2013), a energia solar pode ser convertida diretamente ou indiretamente em outras formas de energia. Quanto a forma direta, a conversão de

energia solar abrange processos como: produção de pressão, calor, eletricidade, reações biológicas entre outros. No que diz respeito a forma indireta, são diversas as possibilidades de aproveitamento, das quais pode-se destacar a geração de energia hidrelétrica, produção de biomassa, energia eólica etc.

Para a conversão da energia solar em calor (energia térmica), é necessário o uso de dispositivos denominados coletores solares. Tais dispositivos são caracterizados como trocadores de calor, os quais captam a radiação solar e transferem a energia térmica para um fluido. Os fluidos mais utilizados são ar, água e óleos (KALOGIROU, 2009).

Segundo Kalogirou (2009), existem basicamente dois tipos de coletores solares, os coletores não concentradores e os concentradores. Quanto ao primeiro, a radiação solar é captada tal como incide, sem nenhuma concentração, atingindo temperaturas inferiores a 150°C. Os coletores mais usados são os planos e os de tubos evacuados. Estes são mais utilizados em setores comerciais (hotéis, restaurantes, clubes, etc.) e residências, ambos para aquecimento de água. Quanto aos coletores concentradores, a radiação solar é concentrada e posteriormente absorvida como energia térmica, atingindo temperaturas superiores a dos coletores não concentradores. Os concentradores mais difundidos são os parabólicos e os cilíndricos-parabólicos. As principais aplicações destinam-se a geração de vapor e produção indireta de energia elétrica (ANEEL, 2013; MOURÃO, 2007; WALISIEWICZ, 2008; KALOGIROU, 2009).

Os coletores solares ainda podem ser classificados quanto ao sistema de rastreamento solar. Os sistemas de rastreamento solar são comumente chamados de seguidores solares, pois monitoram o posicionamento do Sol durante sua trajetória com certo grau de precisão. Os seguidores solares podem ser usados em sistemas de geração de energia elétrica e/ou aquecimento solar por intermédio de módulos fotovoltaicos e/ou coletores solares, respectivamente. Há recentemente coletores integrados que atuam como aquecedores solares e módulos fotovoltaicos (PV/T), fornecendo calor a um fluido e ao mesmo tempo gerando energia elétrica. Tais sistemas atuam retirando e aproveitando o calor das células fotovoltaicas evitando a perda de eficiência na geração elétrica causada pelo aumento de temperatura no módulo PV (RUSTEMLI *et al.*, 2013). O mecanismo de rastreamento deve ser confiável e capaz de seguir a trajetória do Sol (RUSTEMLI; DINCADAM;

DEMIRTAS, 2010). A Figura 5 exemplifica o estado de operação dos sistemas de rastreamento.

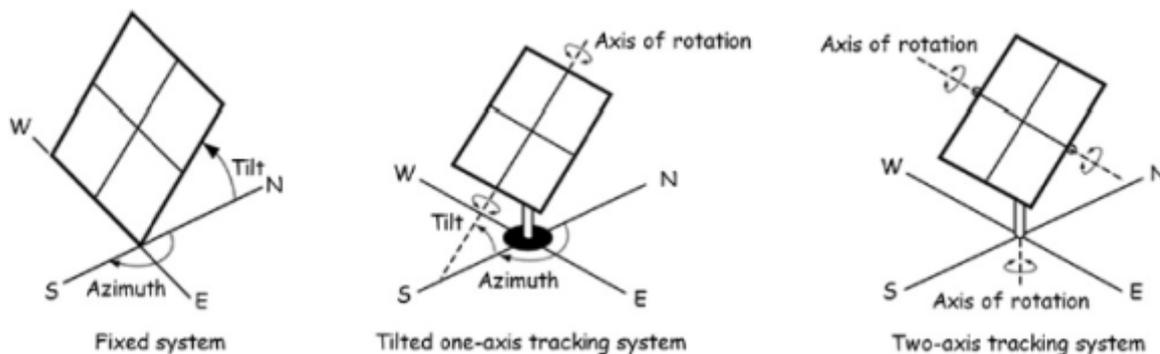


Figura 5: Representação esquemática de sistemas de rastreamento solar: fixo, inclinado com eixo simples e de dois eixos.

Fonte: SEDONA, 2014.

Na Figura 5, o sistema fixo (ou estacionário) uma vez orientado o ângulo azimutal (horizontal) e de inclinação (vertical), mantém-se nessa posição, por outro lado, os sistemas de rastreamento solar automatizados podem ser classificados amplamente como de eixo simples (seguidores azimutais) e de dois eixos. Seguidores de eixo simples tem um grau de independência de movimento, restrito apenas em um eixo de rotação (geralmente de Leste a Oeste). Os seguidores de eixo duplo têm dois eixos de rotação, sendo um de referência a Leste-Oeste (azimutal) e outro Norte-Sul (inclinação). Dentro deste escopo, ainda pode ser categorizado em três grandes grupos baseados no método de controle, dos quais são: *closed loop*, *open loop* e híbrido. De um modo geral, os sistemas *closed loop* usam fotosensores para orientação dos coletores enquanto o *open loop* é baseado em cálculos matemáticos da trajetória solar. Todavia, o sistema híbrido é a combinação de ambos os sistemas citados, *closed loop* e *open loop*. A vantagem do sistema de rastreamento que utiliza controle *open loop* comparado com o *closed loop* é que, o mesmo não depende das condições climáticas e opera independentemente de nebulosidade onde o sistema *closed loop* geralmente falha (MOUSAZADEH *et al.*, 2009; RUSTEMLI *et al.*, 2013).

2.5.1 Sistema de aquecimento solar de água

O aproveitamento da energia solar sob a forma de energia térmica é baseado no fenômeno conhecido como “efeito estufa”. Esse efeito baseia-se na propriedade de alguns materiais transmitirem radiação solar visível, porém impermear a radiação térmica ou infravermelha.

Segundo Mourão (2007), um compartimento fechado com superfícies de materiais permeáveis (ex: vidro) a luz solar (radiação solar visível e infravermelha) permitem a passagem da radiação. Essa por sua vez, é absorvida no interior do compartimento por uma superfície seletiva (absorvedora) e então reemitida para fora, porém, somente a luz visível atravessa as superfícies novamente. A parcela correspondente a radiação infravermelha permanece no interior aquecendo-o. Isto exemplifica a formação do efeito estufa em um coletor solar.

Em relação a energia solar para o aquecimento de água, há dois tipos de sistemas. Os passivos, caracterizados por não usarem uma fonte externa de energia para circulação do fluido, ou seja, essa ação é realizada por meios naturais. Estes sistemas também são conhecidos por termossifão. Logo, os ativos correspondem a circulação do fluido (aquecido pelo sol) através de um mecanismo forçado: bombas de fluxo (HINRICHS et al., 2010).

Segundo Goldemberg (2010), os sistemas de aquecimento solar de água em geral são passivos. Esses sistemas se tornaram muito populares na China, que possui a maior capacidade instalada no mundo. No caso do Brasil, o mercado é basicamente constituído por coletores planos fechados (83%) e abertos (17%), totalizando em 2008, 4,2 milhões de metros quadrados de área coletora instalada (correspondente a 3.100 MW).

No Brasil, o consumo de energia elétrica responsável pelo aquecimento de água em residências é estimado em 25% do total consumido, o que corresponde aproximadamente 20 bilhões de kWh. Contudo, a demanda correspondente a esse consumo ocorre em horário de pico, que por sua vez poderia ser reduzido com o emprego de energia solar, somando vantagens econômicas e ambientais (PEREIRA, 2006).

De acordo com o boletim da Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (2014) (REN 21), a China detém mais de 80% do mercado de aquecimento

solar no mundo, sendo o primeiro país no ranking, seguido por EUA, Alemanha, Turquia e Brasil. Apesar de estar em quinto lugar, totalizando 2,1% frente a 68% da China, o Brasil aparece no ranking dos primeiros colocados em relação a capacidade global de aquecedores solares de água. Dados entre 2012 e 2013 mostram uma expansão no mercado brasileiro, o qual apresenta custo competitivo em virtude da tendência do uso de sistemas térmicos residenciais e industriais.

A Figura 6 exemplifica os principais países com maior capacidade de coletores solares instalados para o aquecimento de água.

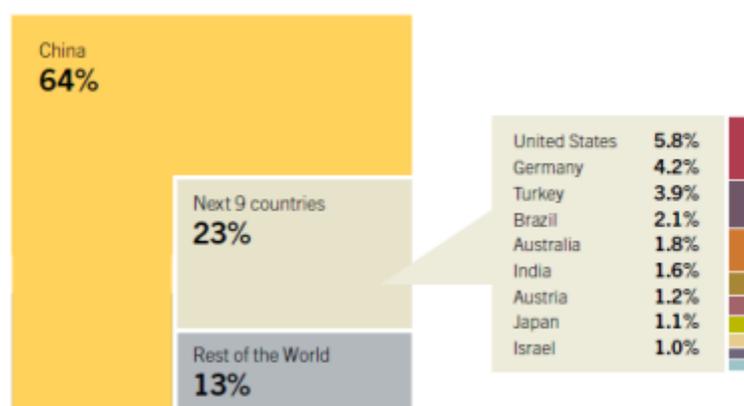


Figura 6: Ranking dos 10 países com maior capacidade instalada de coletores solares para o aquecimento de água.

Fonte: REN21 (2014).

A energia solar transformada de forma direta ou indireta em energia térmica pode ser aproveitada como alternativa a fontes convencionais de energia. Esforços para o aproveitamento dessa energia tornam mais baratos e eficientes os sistemas alternativos, tornando cada vez mais competitivos economicamente com outros provenientes de fontes convencionais. O potencial brasileiro em relação a conservação de energia no aquecimento de água é bastante significativo, onde a aplicação em larga escala de aquecedores solares pode ser uma alternativa viável e competitiva (ALDABÓ, 2002; MOURÃO, 2007).

2.5.2 Uso de aquecimento solar na agricultura

O aquecimento solar na agricultura por intermédio de coletores solares pode ter inúmeras finalidades. Se tratando de coletores sem concentração como os planos

ou evacuados, o uso no meio rural é destinado ao aquecimento de água para banho e calefação (em áreas mais frias), lavagem e esterilização de pocilgas ou criadouros e secagem de grãos. Quanto a aplicação de coletores concentradores, as aplicações são destinadas a temperatura mais elevadas como para geração de vapor e secagem de grãos (ORTIZ, 2005).

De um modo geral, as aplicações tanto em pequenas propriedades quanto em grandes agroindústrias são destinadas a geração de calor para secagem de produtos agrícolas, higienização em relação a produtos ou serviços e para o aquecimento de água residencial. Em suma, tais aplicações estão atreladas a diminuição de impactos ambientais gerados pelo uso de combustíveis fósseis tanto quanto para fins de racionalização de energia.

De acordo com Xiarchos e Vick (2011), nos EUA os sistemas de aquecimento solares são usados basicamente para aquecimento de água doméstica e aplicações comerciais. Na agropecuária, processamento de alimentos, operações de lácteos exigem quantidades substanciais de água aquecida para produção, limpeza, esterilização de equipamentos e controle ambiental.

Aplicações agrícolas onde o aquecimento de grandes quantidades de água é fornecido por fontes elétricas, tal como o aquecimento de água para piscicultura e esterilização de equipamento em operações animais, podem ser beneficiadas por um sistema de aquecimento solar. Aplicações solares para suprir a demanda de água quente em aquicultura, laticínio, estábulos dependem do volume e da temperatura de utilização (XIARCHOS; VICK, 2011).

Segundo Beardmore (2008), o aquecimento solar de água pode contribuir na maioria das necessidades anuais de água quente da indústria leiteira. Como há um aumento do preço da energia frente as quedas de valores de sistemas de aquecimentos solar, tais como os de tubo a vácuo, esforços devem ser feitos de modo a apoiar projetos agrícolas em relação a eficiência energética, porém, pouco se tem feito no setor agrícola. Todavia, com incentivos financeiros adequados, esquemas em setores lácticos tem sido sucesso em outros países como na América do Norte, Austrália e Europa.

De acordo com Stanford (2003), o aquecimento de água em fazendas de gado leiteiro representa aproximadamente 25% do consumo total de energia. Na indústria leiteira, a água aquecida é usada para lavar o sistema de ordenha, sala de

tanque e equipamentos de grande porte. A temperatura e a quantidade da água aquecida são diretamente proporcionais a quantidade de energia utilizada.

Um sistema de higienização adequado usa água aquecida para pré lavagem de ordenhas de forma eficaz com temperaturas de 37,8 a 43,3 °C. Recomenda-se que após a utilização das ordenhas, é necessário realizar a pré-lavagem com água aquecida a 40°C para evitar a secagem do leite na tubulação. Posteriormente, a lavagem deve ocorrer com água na temperatura inicial de 72°C e manter por 5 min a temperatura acima de 60°C e atingir valor superior a 45°C num tempo de 10 minutos no descarte da água (STANFORD, 2003; MACHADO, 2015). Neste contexto, pode-se aplicar o uso de aquecedores solares de água, os quais atingem facilmente as faixas de temperaturas de pré-lavagem exigidas.

Outras aplicações exemplificam o emprego da energia solar com fontes de energia auxiliares (sistemas híbridos). Em relação ao aquecimento solar de água em pequenas propriedades rurais, o uso de coletores solares sem concentração apresenta-se viável. Basso et al (2010) avaliou um sistema de aquecimento solar de água com sistema elétrico complementar, o qual atingiu temperaturas mínimas para banho. Ainda, um sistema de aquecimento solar sem concentração comparado a um chuveiro convencional, pode apresentar um retorno do capital investido em aproximadamente sete meses (MEDEIROS et al., 2013).

Por fim, são inúmeras as aplicações referentes ao emprego de sistemas de aquecimento solar no meio rural. Contudo, deve-se avaliar a necessidade de cada setor e na medida do possível racionalizar a energia adotando sistemas autossustentáveis.

2.6 Coletores concentradores

Os coletores concentradores são dispositivos que concentram a energia solar e direcionam a mesma para uma área de captação. De acordo com Kalogirou (2009), os concentradores solares possuem em geral, uma superfície refletora que direciona a radiação solar direta a um foco onde há um receptor pelo qual escoam um fluido que recebe a energia térmica transmitida.

De acordo com Duff e Beckman (2006), o uso de concentradores solares se justifica em casos que se almejam altas temperaturas com a utilização de áreas de

captação pequenas a partir das quais ocorrem as perdas térmicas. Considerando a mesma temperatura para áreas menores, têm-se menores perdas térmicas.

Em suma, o uso de coletores concentradores é mais restrito em comparação aos coletores sem concentração. Isto ocorre em função da exigência de orientação dos coletores em relação a trajetória solar. Em outras palavras, tais coletores devem seguir a trajetória do Sol de modo a manter o feixe refletido de radiação incidindo na superfície receptora.

Para simplificar a terminologia usada nesses dispositivos, algumas considerações são exemplificadas. Segundo Duff e Beckman (2006), se tratando de concentradores solares, o termo coletor solar se aplica ao conjunto completo do sistema de aquecimento (incluindo o receptor e o concentrador). Quanto ao receptor, é o elemento do sistema onde a radiação é absorvida e convertida em alguma outra forma de energia, neste também é incluído o absorvedor, a cobertura associada e o isolamento. Por fim, o concentrador (ou sistema ótico), trata-se da parte do coletor que direciona a radiação para o receptor. O concentrador também é comumente chamado de refletor. A Figura 7 mostra um concentrador solar e seus elementos.

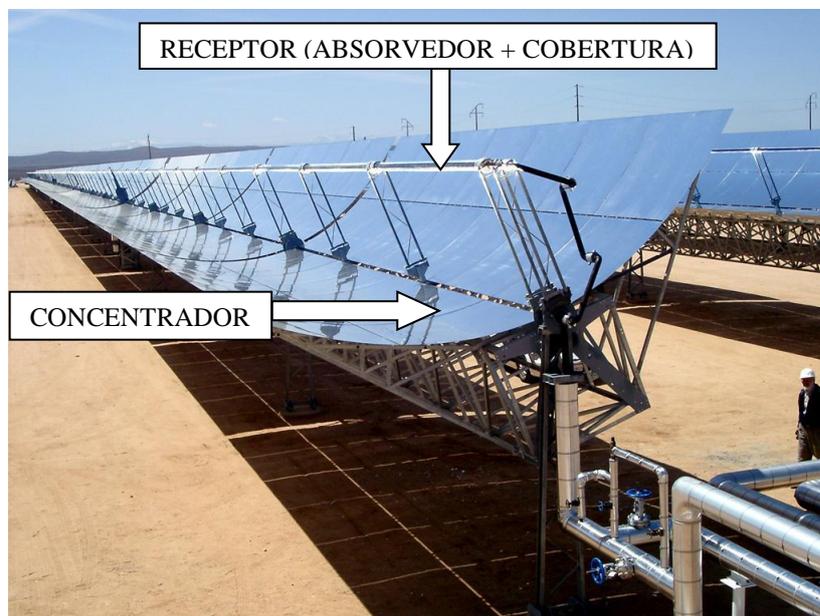


Figura 7: Exemplo de um concentrador solar.
Fonte: Renewables Power News (2009). Adaptado pelo autor.

Todavia, os concentradores podem aumentar o fluxo de radiação sobre os receptores. Eles podem ser refletores ou refratores em relação a forma de

transmissão da luz. Quanto a forma geométrica, os concentradores podem ser cilíndrico e concentrar a luz num foco linear ou circulares com foco em uma área pontual. Os receptores podem ser côncavos, planos ou convexos (DUFF; BECKMAN, 2006). A Figura 8 ilustra seis possíveis configurações.

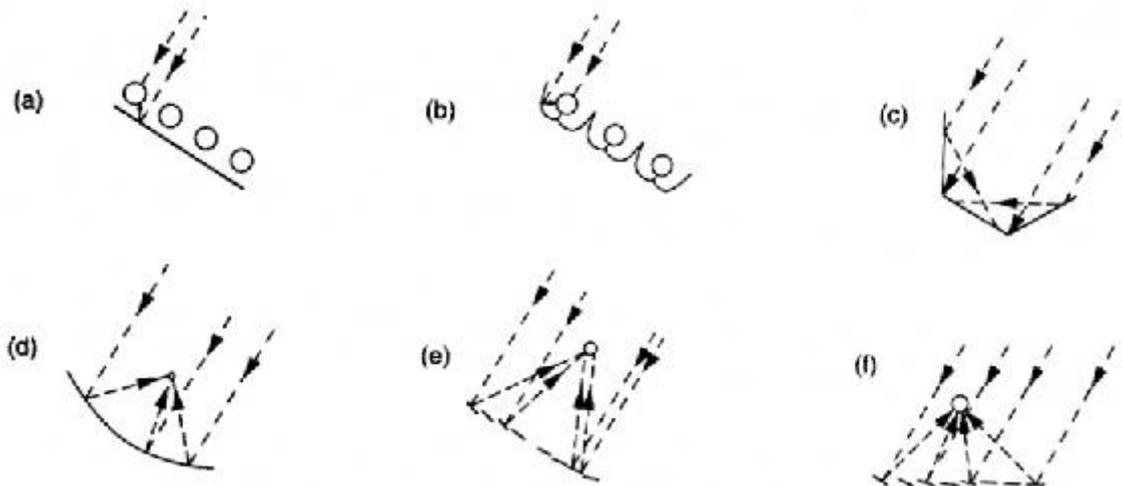


Figura 8: Possíveis configurações de coletores concentradores.
Fonte: Duff & Beckman, 2006.

Notas:

- a) Refletor difuso com absorvedor tubular;
- b) Refletor cúspide com absorvedor tubular;
- c) Refletor plano com receptor plano;
- d) Concentrador parabólico;
- e) Refletor Fresnel;
- f) Matriz de heliostato com receptor central.

Em relação a Figura 8, os coletores a) e b) são mais usados em absorvedores evacuados, onde a radiação é refletida na parte traseira do absorvedor. Sobre os coletores c), destacam-se no uso de fornos solares estacionário com concentração. Os itens d), e) e f) tem grande aplicação em usinas solares térmicas.

Embora existam várias formas de configurações, as mais comumente difundidas correspondem aos concentradores parabólicos. Trata-se da tecnologia mais madura de geração de energia térmica, atingindo temperaturas de até 400°C, tendo suas principais aplicações na geração de calor e na produção de energia elétrica (KALOGIROU, 2009).

2.6.1 Coletor de calha parabólica

Os coletores de calha parabólica, também conhecidos como cilíndrico-parabólicos, recebem essa denominação em função do formato do concentrador solar. Este por sua vez, detém o formato geométrico de uma parábola e se entende longitudinalmente formando uma calha no campo de reflexão solar. A figura 9 exemplifica um concentrador cilíndrico-parabólico.



Figura 9: Coletor cilíndrico-parabólico.
Fonte: Darkoptimism (2008).

A concentração de radiação solar nos receptores de um coletor cilíndrico-parabólico ocorre pela reflexão dos raios solares que atingem o concentrador (refletor). O concentrador por sua vez, é composto ou revestido por um material de alta reflexão, o qual reflete a radiação solar ao longo de uma linha de foco. Desta forma, o receptor é localizado ao longo do foco linear, de modo a captar a radiação térmica por intermédio de um tubo metálico de cor escura (absorvedor) e coberto por um tubo de vidro. Quando direcionado para o sol, a superfície do concentrador reflete a luz solar e concentra no receptor, onde um fluido circula internamente (KALOGIROU, 2009).

A Figura 10 apresenta um esquema de concentração da radiação solar em um concentrador de calha parabólica.

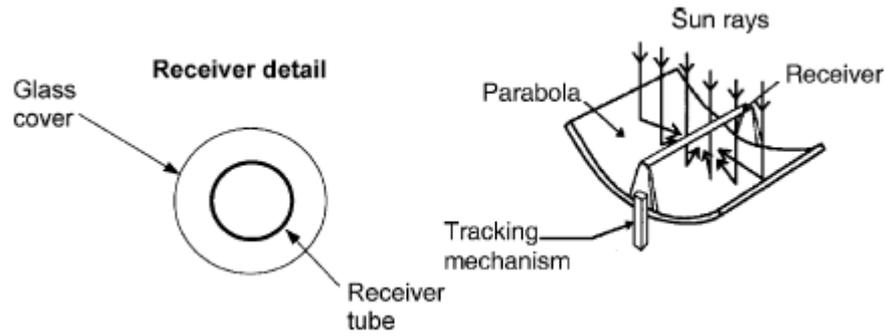


Figura 10: Esquema da reflexão de um concentrador de calha parabólica.
Fonte: Kalogirou, 2009.

Para melhor visualização do comportamento dos raios solares, alguns modelos computacionais facilitam a visualização da trajetória da reflexão de luz. Xião et al. (2014) apresenta um estudo do comportamento da radiação solar em um coletor de calha parabólica para dimensionamento de um absorvedor (Figura 11).

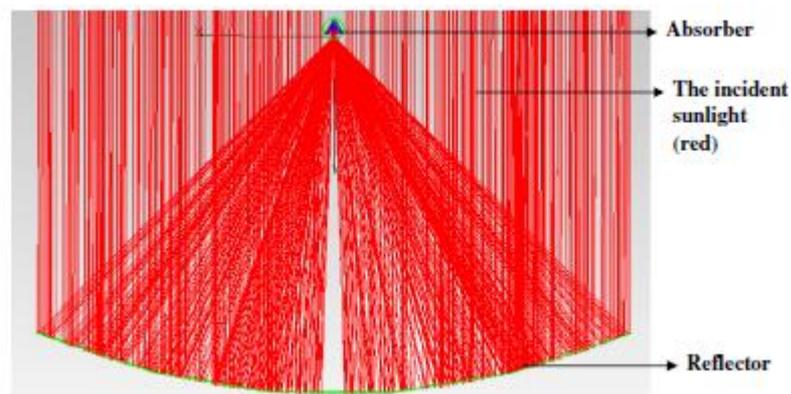


Figura 11: Esquema da reflexão de luz em um concentrador de calha parabólica.
Fonte: Xião et al., 2014.

Na Figura 11, a luz incidida no concentrador (refletor) é refletida (concentrada) em uma pequena área onde está localizado o absorvedor. No absorvedor circula um tipo de fluido que absorve a energia concentrada pelo refletor.

A manutenção do sistema ótico de coletores com concentração solar é um fator importante em relação a eficiência do sistema. Um dos parâmetros primordiais é a reflexão da luz, a qual pode ser afetada por partículas de poeira depositada na superfície do concentrador. Segundo Balghouthi et al. (2014), a alteração na eficiência térmica de um concentrador de calha parabólica em função da deposição de poeira pode chegar -30%.

Os concentradores de calha parabólica podem ser categorizados em dois grandes grupos no que diz respeito as suas aplicações. Primeiro e mais importante, destina-se a geração de vapor para uso direto e indireto em usinas solares. As temperaturas atingidas variam de 300 a 400 °C (Figura 12). Outro grupo caracteriza-se em função de temperaturas mais baixas, em torno de 100 a 250°C (Figura 13). Tais aplicações destinam-se a processos industriais e ambientes domésticos para o aquecimento de água com baixas temperaturas e altas taxas de consumo (Fernández-García et al., 2010).



Figura 12: Exemplo de concentrador de calha parabólica de uso em usinas solares.
Fonte: Fernández-García et al., 2010.



Figura 13: Concentrador de calha parabólica usado para aquecimento de ambientes.
Fonte: Balghouthi et al., 2014.

2.6.2 Concentrador de disco parabólico

O concentrador de disco parabólico detém essa denominação em função do formato do concentrador solar. Em suma, tais concentradores são de foco pontual em função da superfície de revolução criada pela parábola (DUFF; BECKMAN, 2006).

Segundo Kalogirou (2009), os concentradores de disco parabólico tem uma dinâmica que permite o rastreamento solar em dois eixos, sendo capaz de manter sua perpendicularidade em relação aos raios solares desde o nascer até o por do Sol. A Figura 14 apresenta um esquema da concentração solar nesses coletores.

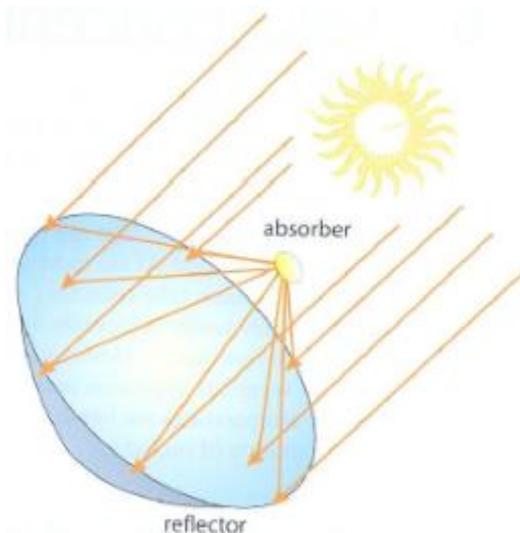


Figura 14: Esquema de concentração solar em um concentrador de disco parabólico.
Fonte: DGS, 2005.

Da mesma forma como ocorre nos concentradores de calha parabólica, nota-se na Figura 14 que ao atingir o concentrador (refletor), a radiação solar é refletida até o receptor onde é localizado o absorvedor pelo qual circula um fluido. O que distingue ambos os concentradores é a formação do foco, sendo pontual no disco parabólico enquanto no concentrador de calha parabólica apresenta-se linear. Diagramas de concentração da luz em coletores são essenciais para dimensionar o receptor/absorvedor. A Figura 15 apresenta um concentrador solar de disco parabólico com absorvedor cônico.



Figura 15: Concentrador solar de disco parabólico com receptor cônico.
Fonte: Hernández et al., 2012.

Os concentradores de disco parabólicos por possuírem concentração pontual e serem possíveis de rastreamento solar em dois eixos, são altamente eficientes, atingindo temperaturas de 100 a 1500 °C. Devido ao alcance de altas temperaturas, pode ser usado para geração de vapor e posteriormente transformado em eletricidade ou gerar energia elétrica diretamente por um gerador acoplado no receptor. Este último é mais interessante por evitar perdas térmicas (KALOGIROU, 2009).

A Figura 16 mostra um concentrador de disco parabólico para geração de energia isolada.



Figura 16: Concentrador de disco parabólico.
Fonte: Global Nevadacorp, 2015.

2.7 Coletor solar cônico

O coletor solar cônico detém tal denominação em função da geometria do concentrador solar obtido por uma superfície de revolução de um segmento cônico.

A Figura 17 apresenta uma forma básica de um concentrador cônico.

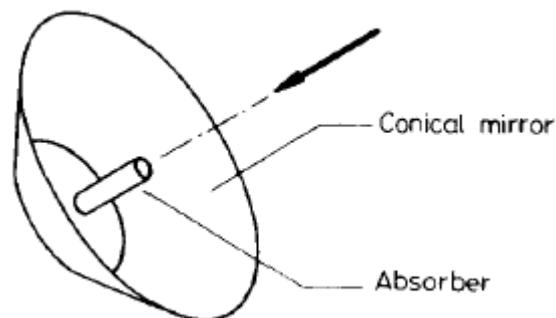


Figura 17: Esquema de um coletor solar cônico.
Fonte: El-Refaie, 1982.

Na Figura 17 são mostradas as partes principais do coletor cônico, onde nota-se o concentrador em forma de tronco de cone e o absorvedor localizado na linha de foco. Mesmo sendo pouco difundidos em relação aos coletores concentradores convencionais, pesquisas recentes mostram o potencial dos coletores solares cônicos na geração de energia térmica para aquecimento de

fluidos (XIAODI et al., 2010; KAIYAN et al., 2009; TOGRUL; PEHLIVAN, 2003; HUSSAIN; LEE, 2014).

Apesar das pesquisas sobre o coletor cônico despertarem mais interesse na atualidade, estudos teóricos sobre concentradores desse tipo são mais antigos. Cobble (1963), Wijeysondera (1977) e El-Rafaie (1982) apresentaram análises sobre o desempenho teórico de concentradores solares cônicos. Tais estudos referem-se ao dimensionamento da geometria e eficiência ótica de concentradores, receptores/absorvedores, entre outros parâmetros que caracterizam a concentração de energia solar em coletores cônicos.

Os concentradores solares cônicos, assim como os concentradores cilíndrico-parabólicos apresentam formas de focos lineares (LUIZ, 2013). A Figura 18 apresenta o trajeto de luz incidida em um concentrador cônico aplicado em um forno solar.

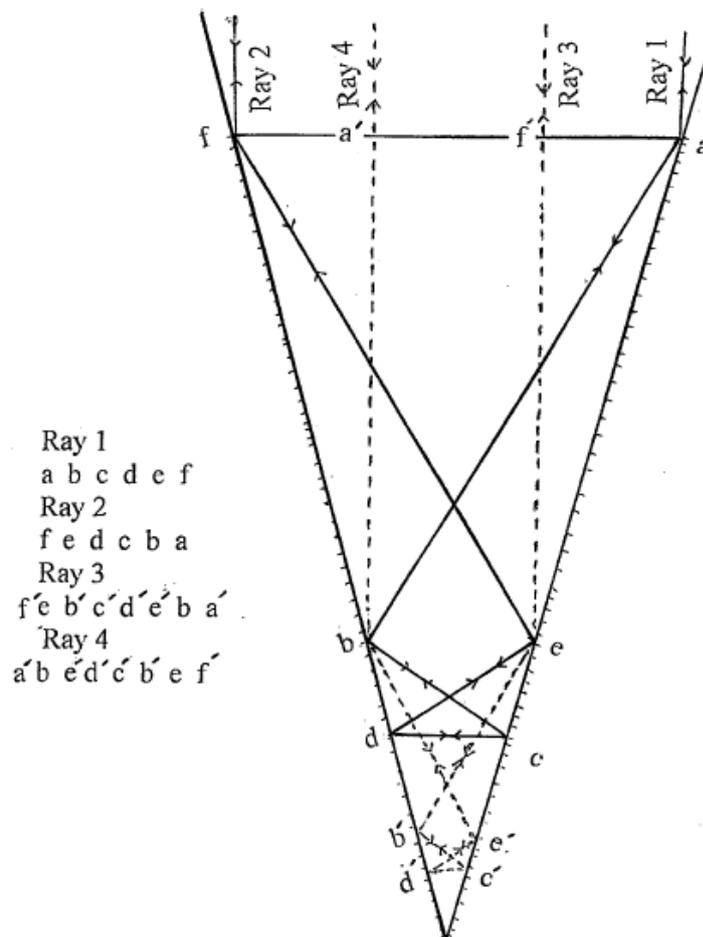


Figura 18: Trajeto de raios luminosos em um concentrador cônico com ângulo de abertura de 30°.

Fonte: Sharaf, 2002.

Na Figura 18 é demonstrada a trajetória de quatro feixes de luz no interior de um cone com superfícies internas refletivas. O comportamento da reflexão de luz neste diagrama obedece as leis da física ótica da reflexão de luz em um espelho plano. Em resumo, o ângulo do raio de luz refletido é igual ao ângulo entre o raio de luz incidente e o vetor normal a superfície refletora. Percebe-se na Figura 18, que os raios incidentes na abertura superior do cone tendem a se encontrarem em determinados pontos. A exemplo do raio de incidência 1, o mesmo é refletido nos pontos abcdef e por fim é enviado para fora do concentrador. No entanto, considerando os trajetos dos raios 1 e 2, os mesmos se encontram no ponto médio da reta cd. Neste contexto, pode-se perceber que os feixes de luz incididos ao longo do raio de abertura do cone (de fora para o centro do concentrador) tendem a se cruzar em pontos de modo a formar uma linha de foco ao longo do eixo de simetria do concentrador na direção descendente. Vale ressaltar que o comportamento da reflexão da luz no interior do concentrador cônico varia de acordo com o ângulo de abertura do cone.

A Figura 19 demonstra o comportamento de raios luminosos com ângulos de incidência variando de 0 a 15° em relação ao eixo de simetria de um concentrador cônico.

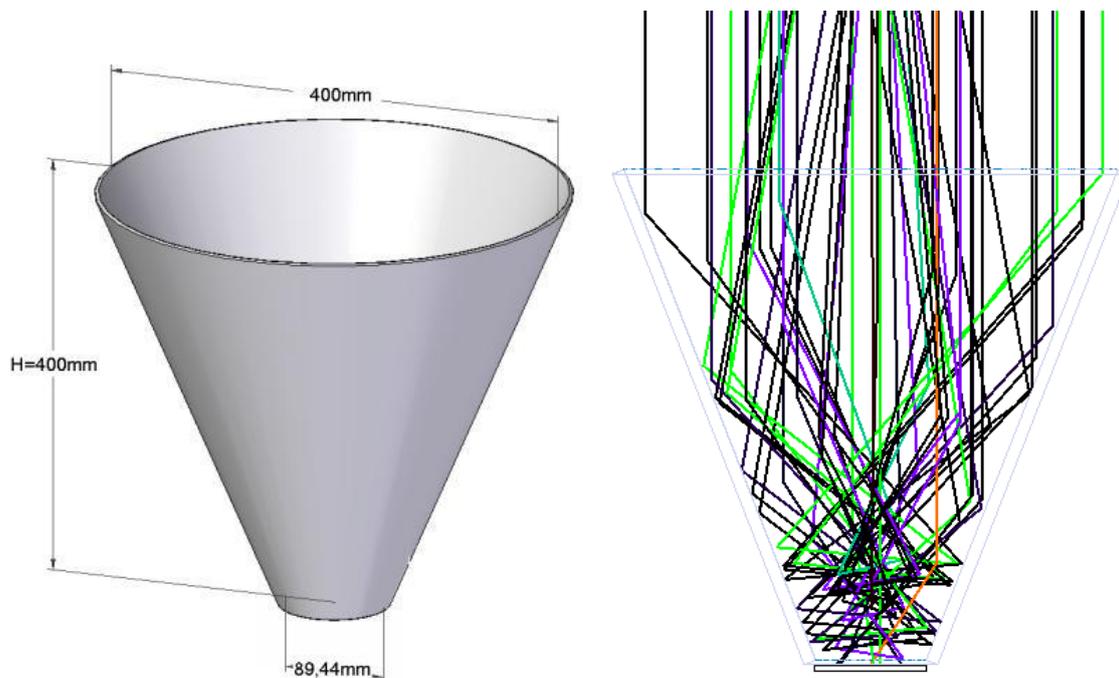


Figura 19: Comportamento da reflexão de luz em um concentrador cônico.
Fonte: Ali et al., 2012.

O concentrador cônico, tal como mostrado na Figura 19, possui a vantagem de admitir certos graus de deflexão no ângulo de incidência da luz, isso possibilita modelar o absorvedor para receber a radiação concentrada com movimentos reduzidos do seguidor solar. Segundo Ali et al. (2012), admite-se inclinações no ângulo de incidência em torno de 15° (Figura 19).

Alguns coletores com concentradores cônicos foram adaptados de modo a convergir a concentração da luz em pequenas áreas. Esses concentradores são denominados na literatura como funil concentrador de luz. Os coletores de funil são concebidos pela revolução de um segmento de parábola e seu foco é concentrado de forma semelhante aos cônicos. A Figura 20 demonstra um diagrama bidimensional do trajeto de luz em um funil concentrador de luz.

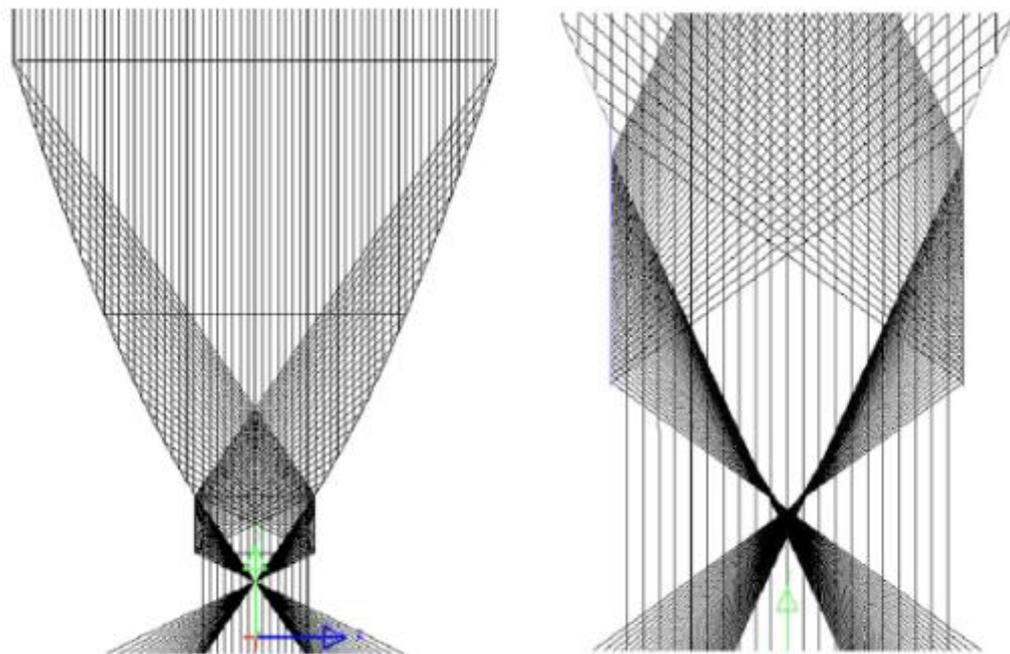


Figura 20: a) Trajetória da luz em um funil concentrador; b) Zoom do ponto focal.
Fonte: Zheng et al., 2014.

Percebe-se na Figura 20a, que uma leve curvatura numa superfície de revolução cônica pode mudar drasticamente o comportamento da reflexão da luz. Neste caso, os raios incidentes perpendiculares ao plano de captação do concentrador são refletivos primeiramente pelos segmentos de parábolas do concentrador e posteriormente refletivos secundariamente pelos planos inferiores, convergindo em um ponto na extremidade inferior do concentrador. Nota-se, que o foco se torna apenas pontual em função da segunda reflexão das laterais planas

(perfil de um cilindro), ou seja, o funil concentrador de luz detém um foco linear. Por fim, o funil concentrador de luz apenas apresentará um foco pontual em sua primeira reflexão, se o ângulo de abertura superior do concentrador for muito grande a ponto do mesmo ter a forma semelhante a uma parábola, ou seja, obter-se a forma de um disco parabólico.

2.7.1 Aplicações de concentradores cônicos e afunilados

A utilização de concentradores cônicos e afunilados possui uma ampla faixa de aplicações. Sendo um tipo de coletor com concentração de energia solar, seu uso é destinado tanto no campo de geração de energia térmica quando na geração indireta de energia elétrica.

Todavia, a principal justificativa pela aplicação de concentradores cônicos e afunilados é em função da possibilidade de atingir altas temperaturas ($>80^{\circ}\text{C}$) sem perdas significativas de eficiência. Tal consequência é exemplificada no uso de coletores sem concentração como os coletores planos e evacuados. Considerando o uso de coletores sem concentração, como os planos e os evacuados, a eficiência decresce quando a temperatura supera os 80°C (DUFF; BECKMAN, 2006; MEHMET, 2004).

No que diz respeito ao aquecimento de água, alguns estudos experimentais foram conduzidos de modo a investigar as altas temperaturas e eficiências térmicas de concentradores cônicos e afunilados. Hussain & Lee (2014) avaliaram a influência da vazão mássica num aquecedor de água com concentrador cônico dotado de seguidor solar automatizado. A Figura 21 apresenta o coletor solar cônico nos experimentos.



Figura 21: Coletor solar com concentrador cônico.
Fonte: Hussain; Lee, 2014.

Dados mostram que usando um absorvedor com cobertura a vácuo, pode-se aumentar 20% a eficiência do sistema, a qual aumenta diretamente proporcional ao aumento da vazão mássica até um valor crítico de $6 \text{ L}\cdot\text{min}^{-2}$. Acima do valor apresentado, a eficiência do sistema decresce. Ainda, altas velocidades de vazão da água diminui a estratificação térmica, que é a presença de camadas com temperaturas diferentes na massa de água. Todavia, a estratificação térmica acentuada diminui a eficiência do sistema (HUSSAIN; LEE, 2014).

Kaiyan et al. (2009) realizou experimentos integrando o uso do funil concentrador de luz com um forno solar para o aquecimento de água com objetivo de obter dados de temperatura e eficiência desse sistema peculiar. A Figura 22 apresenta o coletor concentrador congregado ao forno solar.



Figura 22: Funil concentrador solar congregado a um forno solar.
Fonte: Kaiyan et al., 2009.

A Figura 22 apresenta um coletor solar diferenciado que congrega o uso do funil concentrador de luz a um forno solar. O sistema de rastreamento solar neste experimento foi efetuado de forma manual. Os resultados apresentam temperaturas próximas a 250°C para testes a vazio e eficiência variando de 22 a 43% para concentradores dotados de 70 e 86% de refletividade respectivamente.

Outro sistema integrado de aquecimento solar foi proposto por Xiaodi et al. (2010). O experimento avaliou o aquecimento de água em um concentrador de funil (70% de refletividade) integrado com forno solar, o qual tinha como sistema auxiliar um coletor convencional de tubos evacuados. O coletor a vácuo representava um sistema de pré-aquecimento para o funil concentrador. A Figura 23 mostra a integração dos coletores solares.

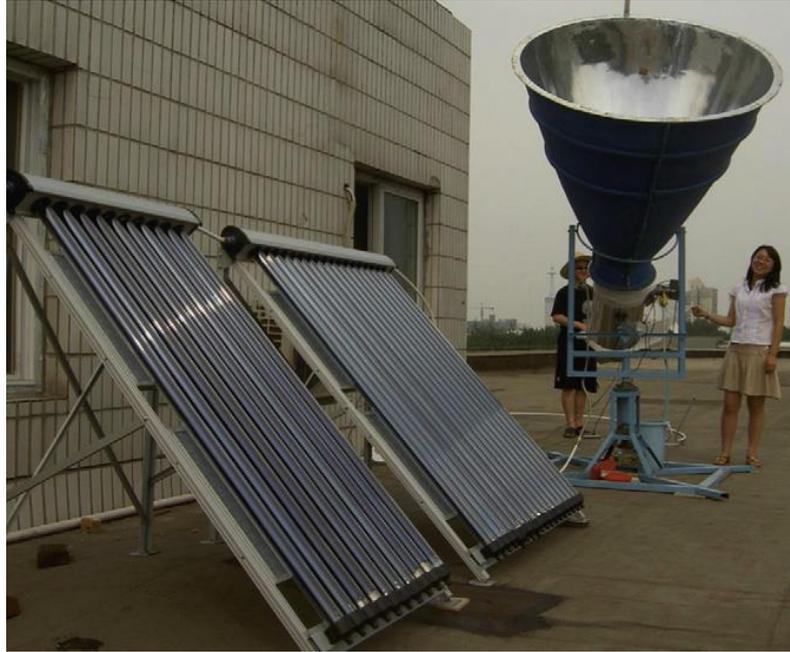


Figura 23: Sistema integrado de coletores solares para o aquecimento de água.
Fonte: Xiaodi et al., 2010.

Os resultados dos experimentos utilizando os coletores integrados (Figura 23) apresentaram temperatura máxima no interior do concentrador em torno de 210°C . Os coletores solares produziram água fervida (100°C) numa porção de $120 \text{ kg}\cdot\text{dia}^{-1}$. Após 30 minutos de incidência solar foi possível produzir água fervida em intervalos de 10 a 17 minutos na quantidade de 4 a 8 kg respectivamente. A eficiência total do sistema variou de 40,7 a 44,7% em função da ausência e do uso de material de armazenamento térmico.

Além de aplicações envolvendo aquecimento de água, o concentrador cônico pode ser usado para o aquecimento de ambientes. Experimentos realizados por Togrul; Pehlivan (2003) avaliaram a taxa de fluxo de ar em um concentrador solar cônico, os resultados apresentaram eficiência superior a 50% e variação no aumento da temperatura do ar de $37,2^{\circ}\text{C}$ para vazão de $30 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$.

Todavia, os concentradores cônicos podem ser aplicados para aquecimento de ar, água e geração de energia elétrica, tudo ao mesmo tempo. Trata-se de sistemas de híbridos que concentram a energia solar em células fotovoltaicas, onde o calor excessivo e indesejado gerado nessas células é transferido para fluidos como ar e água. Zahedi (2011) apresentou modelos matemáticos para simulação de concentração de luz em células fotovoltaicas (PV). Conclui-se que em altas

concentrações de luz, os sistemas fotovoltaicos necessitam de refrigeração ativa de água, tal como mostra o modelo na Figura 24.

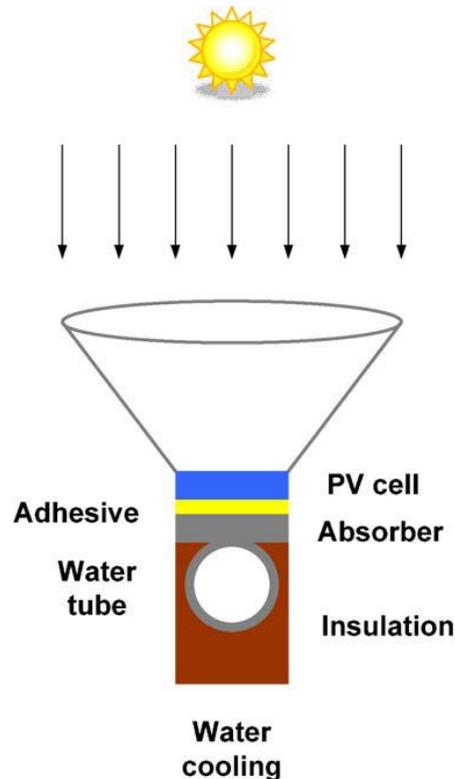


Figura 24: Opção de aproveitamento de calor de uma célula fotovoltaica.
Fonte: Zahedi, 2011.

Na Figura 24, a luz concentrada que atinge a célula fotovoltaica gera calor excessivo. O aumento de temperatura em células PV diminui a eficiência da geração de eletricidade numa taxa de $0,45\%.\text{°C}^{-1}$ (Ye et al., 2013). Em suma, o calor indesejado é transferido para um absorvedor que troca calor com a água que circula no sistema. Dessa forma, pode gerar mais energia elétrica e aproveitar a energia térmica excedente para aquecer um fluido que atua como trocador de calor.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no município de Francisco Beltrão, sudoeste do Paraná (latitude 26,05°Sul, longitude 53,04°Oeste e altitude 650m). Segundo a classificação de Koppen, a região é de clima subtropical (cfa), possui verões quentes (>22°C), invernos amenos (>-3°C), insolação anual de 2338 horas e média anual de radiação solar de 2,30 kWh.m⁻² (IAPAR, 2013).

O trabalho consistiu em otimizar as características geométricas de um coletor solar de funil, assim chamado devido às características geométricas do concentrador de luz, e obter sua eficiência para utilização em sistemas de aquecimento de água em pequenas propriedades rurais. O protótipo original, a ser otimizado, foi desenvolvido por Toniazzo & Ghizzi (2011), com objetivo de realizar o pré-aquecimento de água de caldeiras industriais. As características básicas do protótipo original, e as alterações propostas para otimização do sistema são mostradas a seguir.

3.1 Protótipo original do coletor solar

O coletor solar a ser otimizado neste trabalho é mostrado na Figura 25. As características dimensionais e estruturais são mostradas no Apêndice A.



Figura 25: a) Coletor solar de funil; b) Concentrador com vista para o absorvedor; c) Detalhe do absorvedor.

Fonte: (TONIAZZO & GHIZZI, 2011).

O concentrador solar, mostrado na Figura 25, é composto de uma folha de aço inoxidável e detém uma forma cônica, a qual tem a função de direcionar a radiação solar incidente na abertura superior para o absorvedor, que possui uma serpentina obtida pela curvatura de um duto flexível de cobre (16mm), onde circula o fluido a ser aquecido (água).

A disposição do conjunto concentrador/absorvedor é apresentada sob uma vista 3D do coletor solar de funil, com o absorvedor localizado no interior do concentrador cônico (Figura 26).

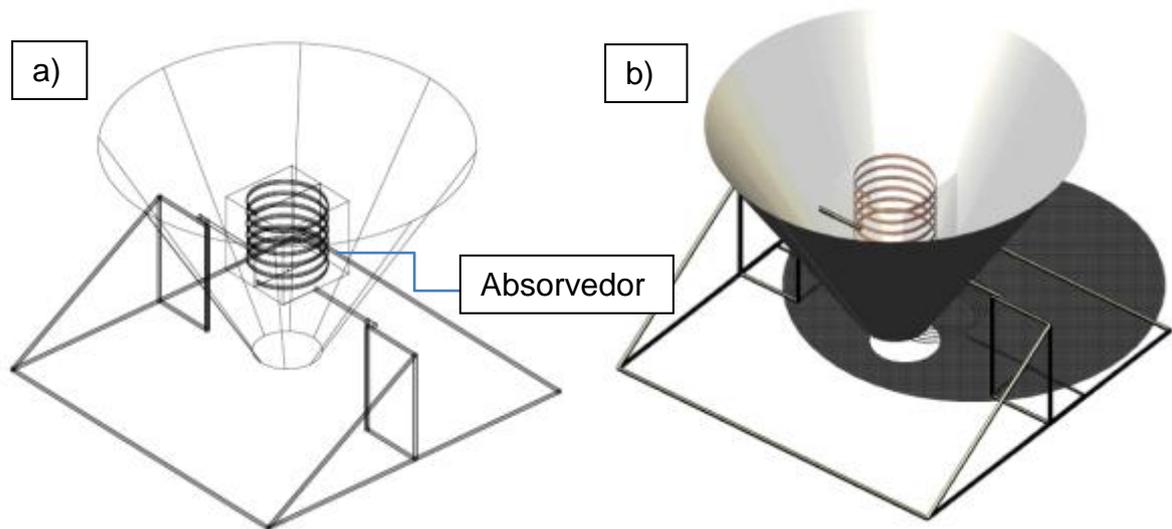


Figura 26: a) Vista do coletor solar em 3D; b) Simulação do sistema de aquecimento real.

Fonte: Acervo do autor.

A Figura 27 mostra um exemplo de aplicação do coletor solar de funil como sistema de aquecimento de água passivo, ou seja, operando por termossifão.

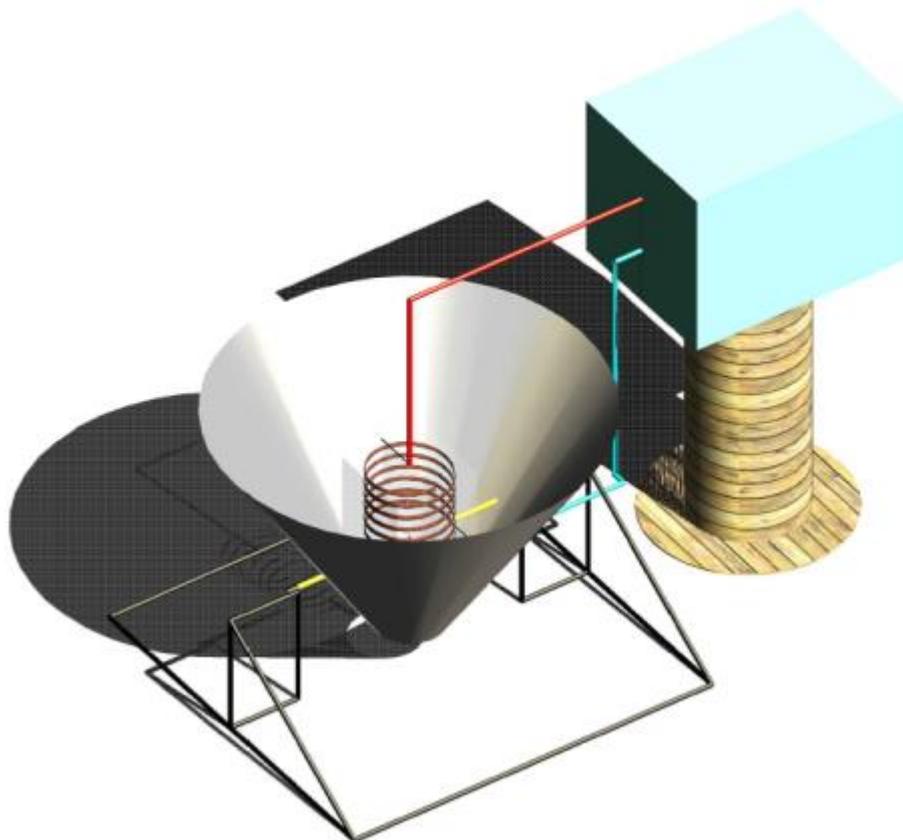


Figura 27: Esquema do coletor solar operando com termossifão.

Considerando a trajetória solar, o conjunto concentrador/absorvedor apresenta uma dinâmica para orientação solar, para ajuste do ângulo azimutal ou de inclinação solar (Figura 28).

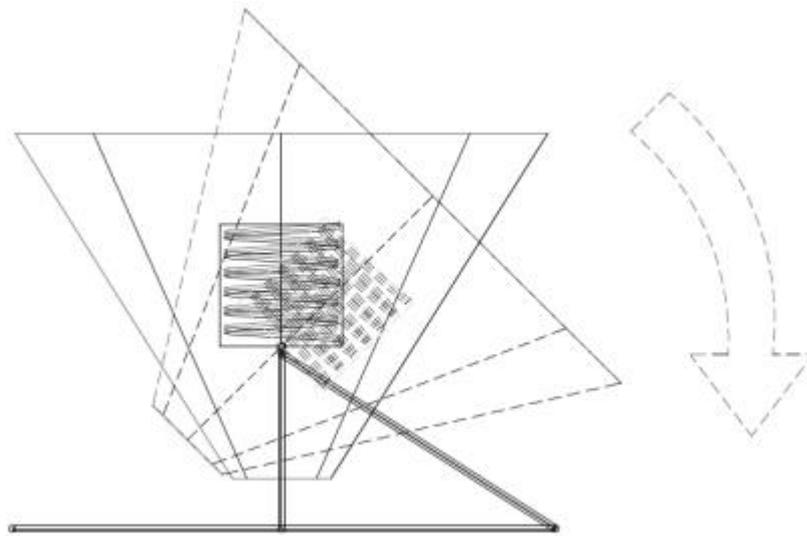


Figura 28: Vista lateral da dinâmica do concentrador e absorvedor (rotação).

3.2 Protótipo otimizado do coletor solar

O protótipo otimizado do coletor solar propõe algumas melhorias no sentido de proporcionar um aumento na eficiência do processo. Essas melhorias dependem de estudos mais aprofundados referentes às mudanças na geometria do absorvedor que contemplem o coletor adequadamente, mudanças nas dimensões do coletor que otimize a reflexão baseada em princípios da física ótica, aplicação dos princípios de transferência de calor que diminuam as perdas térmicas, e escolha de novos materiais empregados no sistema para proporcionar uma distribuição mais eficiente da energia térmica.

Neste contexto, algumas alterações estruturais foram realizadas para proporcionar uma dinâmica adequada à trajetória solar. A Figura 29 mostra a nova estrutura do coletor solar desenvolvido.

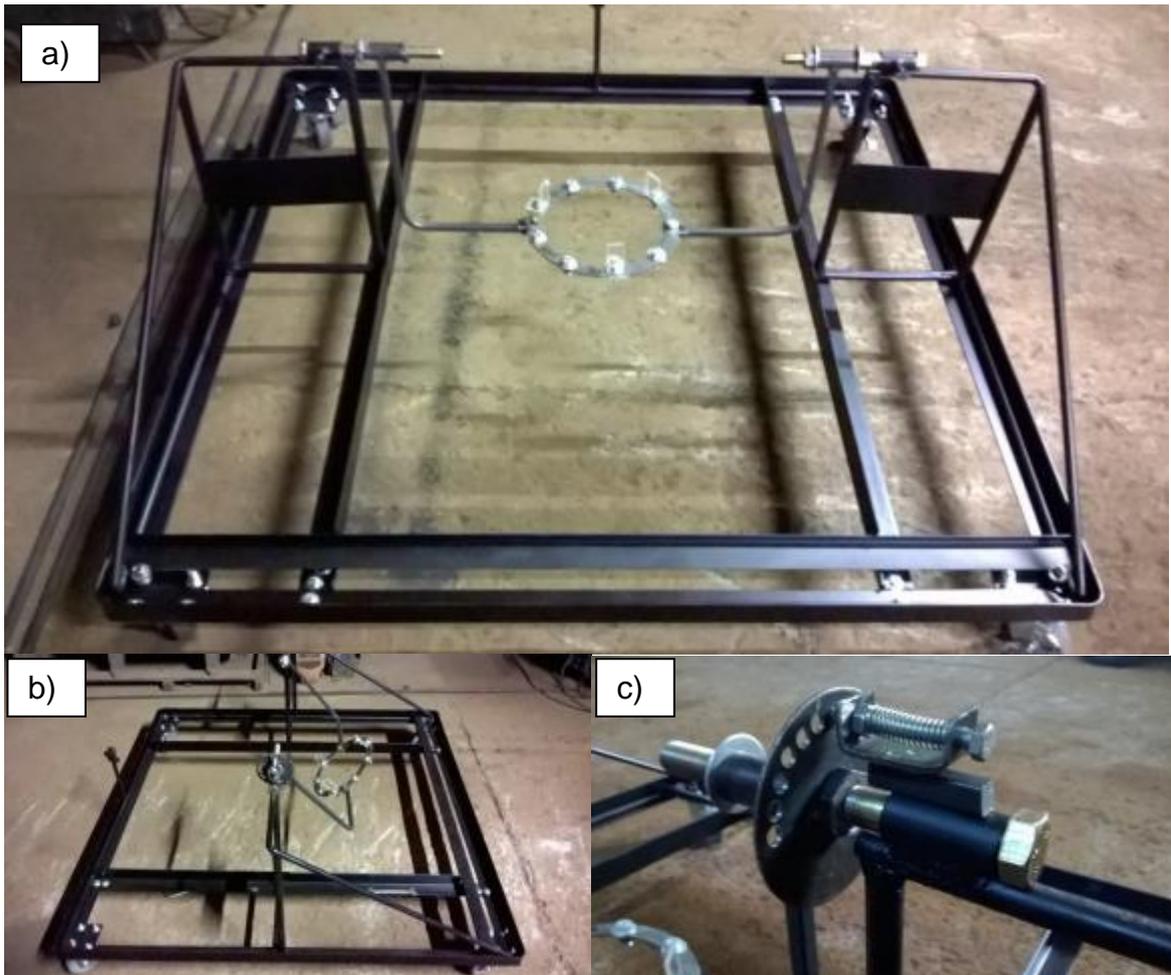


Figura 29: a) Estrutura do coletor solar; b) Dinâmica de altitude solar do conjunto coletor/absorvedor; c) Sistema de travamento de ângulos.

Nas Figuras 29a e 29b são apresentados o conjunto estrutural e a dinâmica parcial do coletor solar. Foi necessário criar um sistema de travamento para fixar diferentes inclinações do concentrador solar, as quais variam de -90° até 90° , possibilitando ajustes da altitude solar (Figura 29c). As alterações feitas na estrutura possibilitam suportar o peso do concentrador e absorvedor, suspensos por dois braços inferiores. Tais mudanças foram efetuadas a fim de evitar qualquer sombreamento no interior do concentrador solar. Outra alteração foi a instalação de rodas que permitam a movimentação do conjunto para auxiliar na orientação da trajetória solar, considerando os ângulos azimutais.

As dimensões estruturais são mostradas na Figura 30, 31 e 32, sendo as cotas mostradas em centímetros.

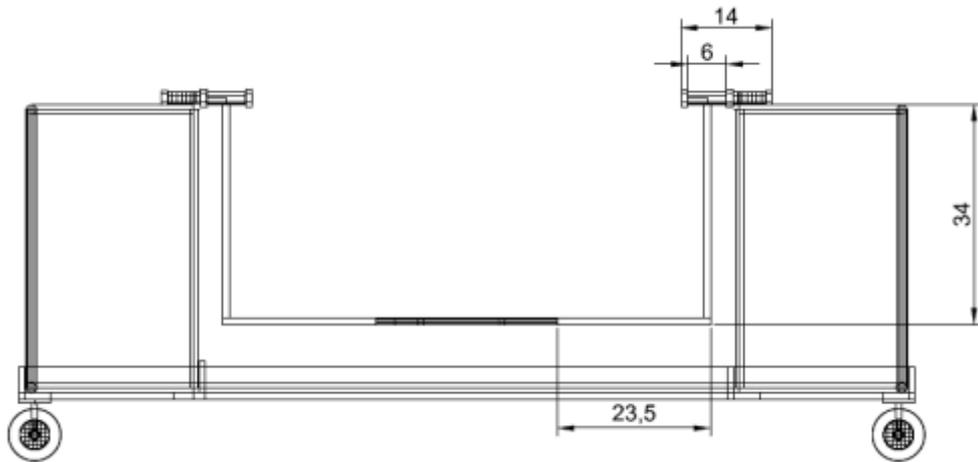


Figura 30: Vista frontal com cotas no suporte do concentrador/absorvedor.

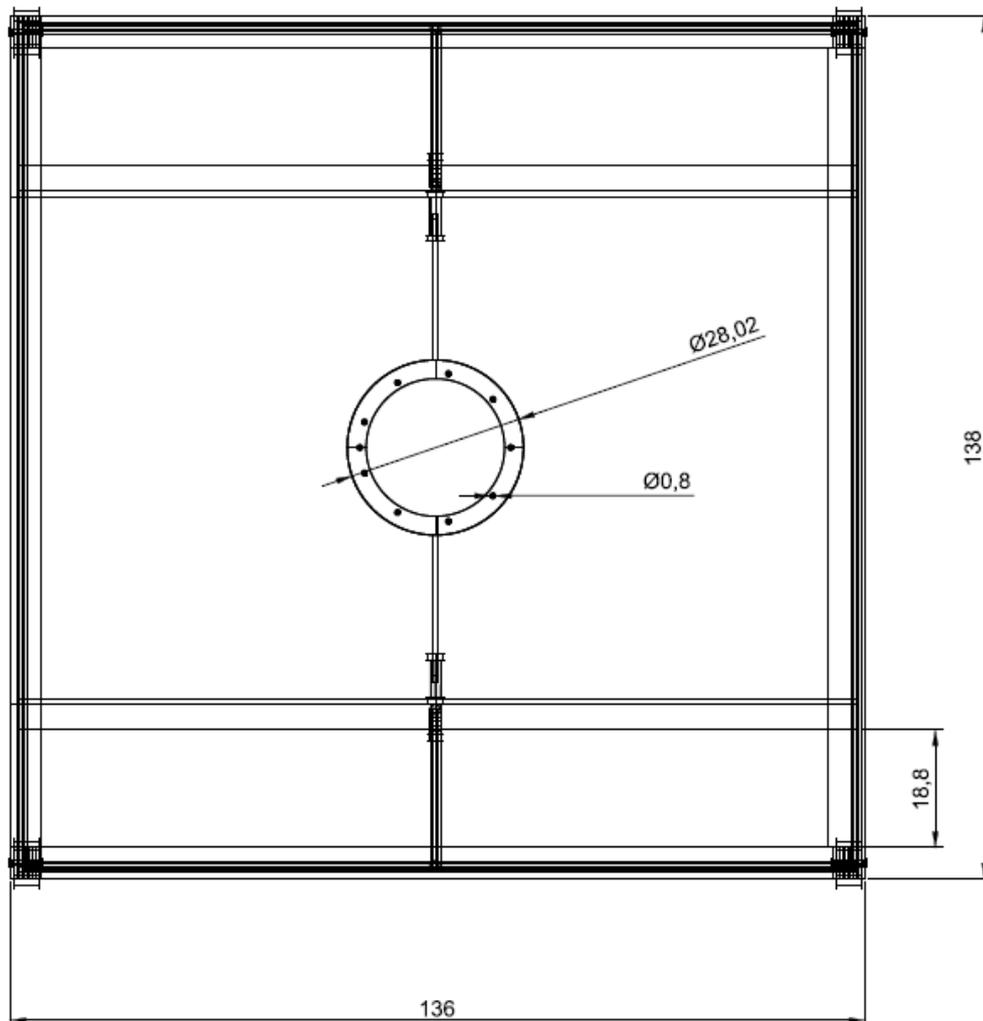


Figura 31: Vista superior da estrutura do coletor solar.

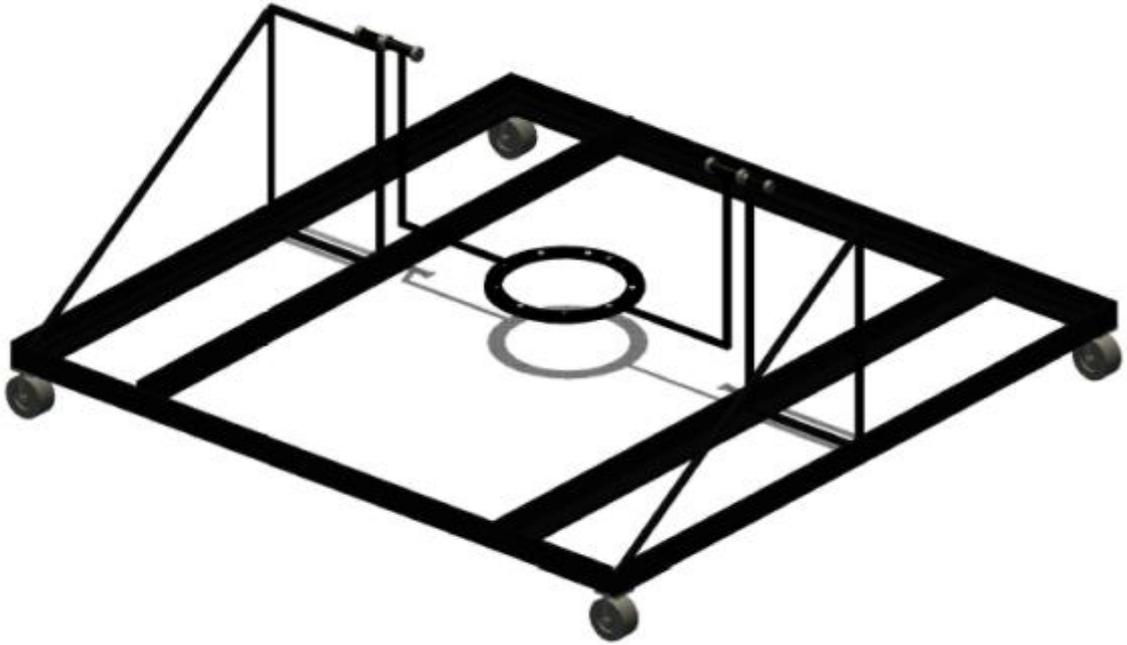


Figura 32: Vista em 3D da estrutura do suporte do coletor solar.

As mudanças efetuadas permitem que o coletor solar tenha a flexibilidade de movimento no sentido vertical (altura solar) e horizontal (azimute solar). A dinâmica azimutal do coletor solar é mostrada na Figura 33 e a orientação de altitude solar na Figura 34.

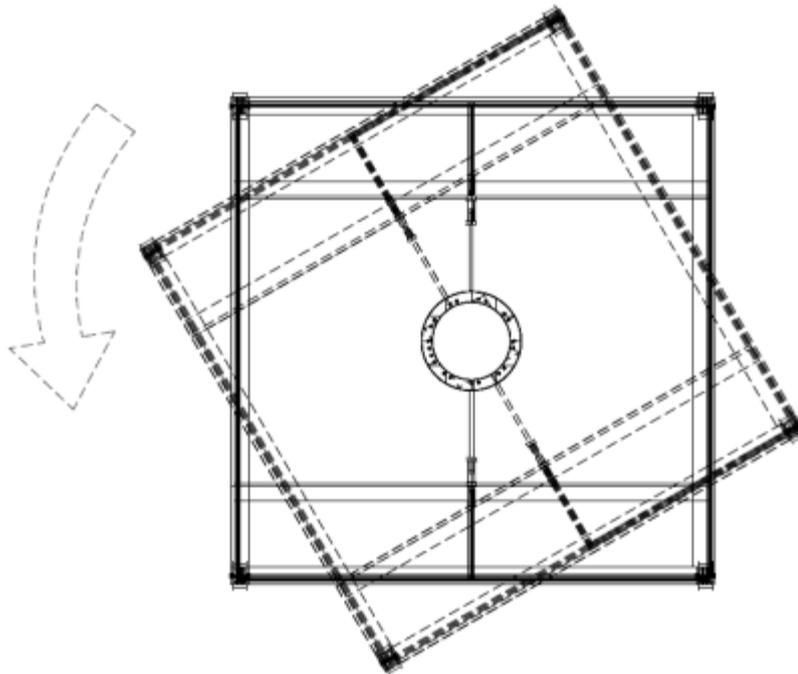


Figura 33: Vista superior da dinâmica (rotação) horizontal do coletor solar (movimento azimutal).

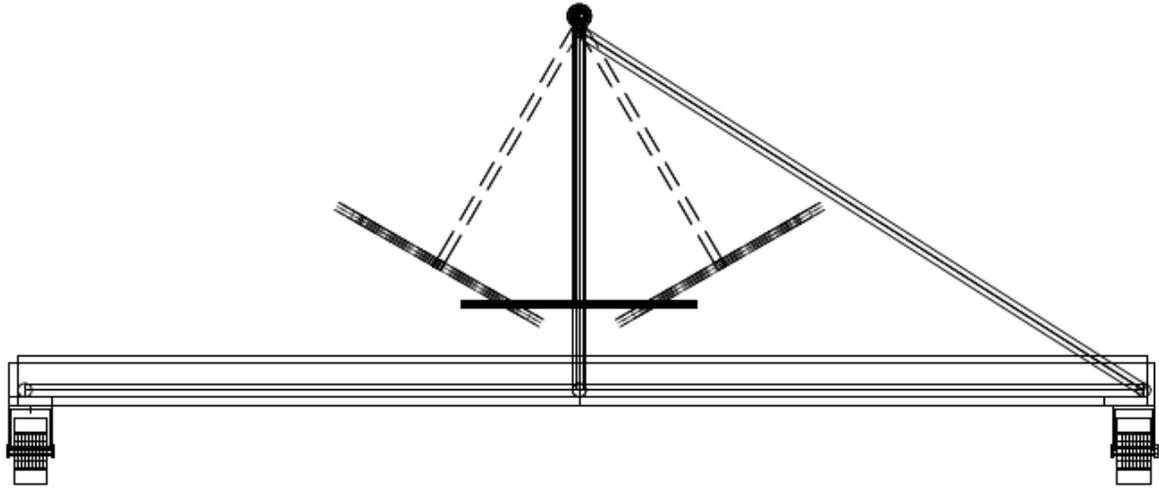


Figura 34: Vista lateral da dinâmica do coletor solar (movimento angular de $\pm 30^\circ$).

O anel fixado nos braços inferiores da estrutura atua como suporte para o conjunto concentrador/absorvedor. A Figura 35a apresenta uma simulação do coletor fixado na estrutura, enquanto a Figura 35b a disposição do sistema real.

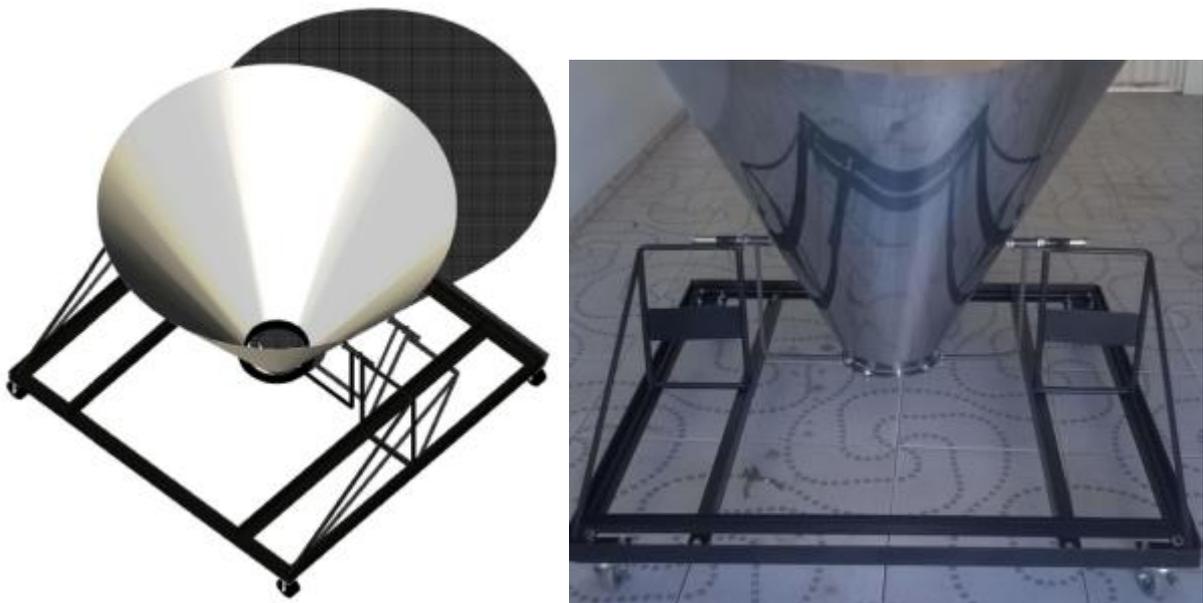


Figura 35: a) Vista 3D do coletor solar sem o absorvedor acoplado; b) Coletor real.

As ponteiros laterais contidas no concentrador original foram removidas para facilitar a formação correta de um tronco de cone. A Figura 36 apresenta as medidas do tronco de cone (concentrador), as quais foram mantidas do coletor original.

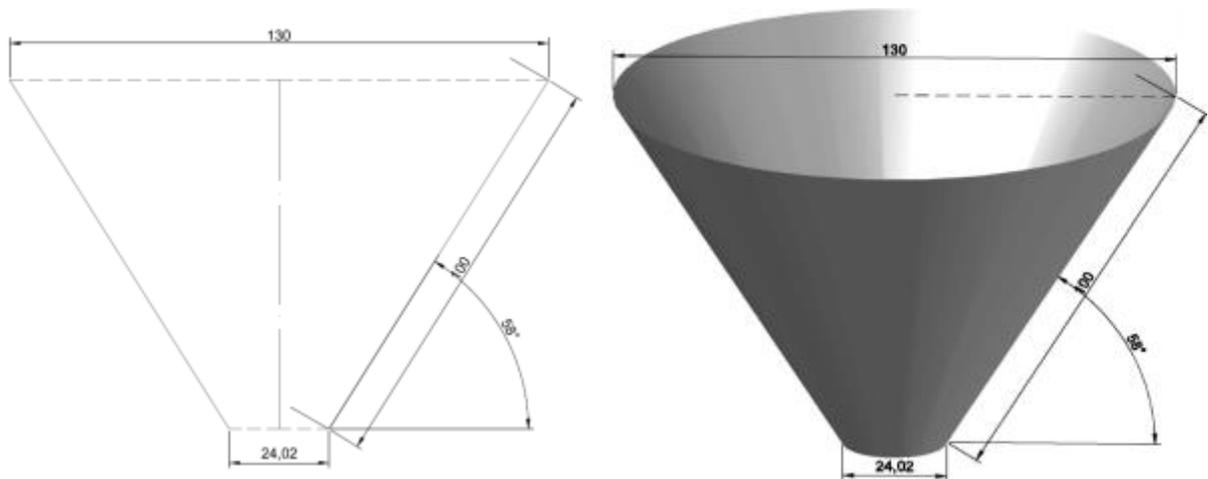


Figura 36: Dimensões do tronco de cone usado como concentrador solar (cm).

O absorvedor foi concebido pela curvatura de um tubo flexível de cobre (16 mm), sendo sua forma final semelhante a uma serpentina. A serpentina de cobre foi recoberta por uma camada de tinta preta sem brilho para aumentar o ganho de calor. A escolha do material se deu pela alta condutibilidade térmica do cobre ($\sim 400 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

A Figura 37 mostra um esboço com as principais cotas para elaboração do absorvedor.

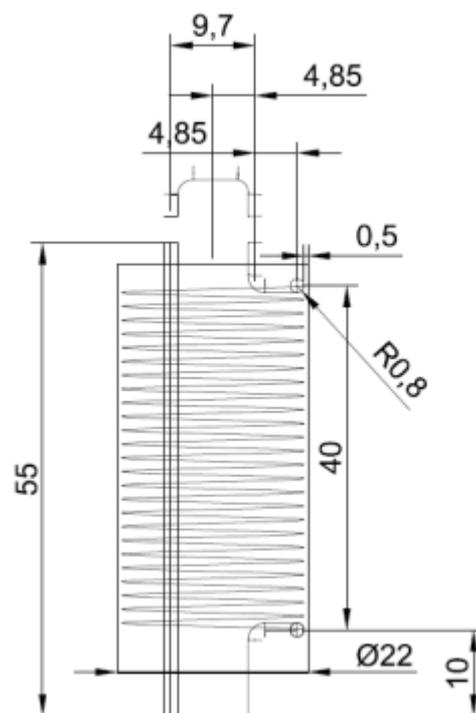


Figura 37: Esboço das dimensões do conjunto absorvedor (cm).

De maneira geral, as diferenças apresentadas entre o protótipo original e o protótipo otimizado são as seguintes:

- Estrutura reforçada para suspender o concentrador/absorvedor;
- Suporte inferior de fixação do concentrador/absorvedor para evitar sombreamento interno;
- Dinâmica do conjunto em função da altitude e azimute solar;
- Absorvedor com nova forma geométrica para melhor aproveitamento ótico;
- Remoção de ponteiras do concentrador para formação de um tronco de cone;
- Sistema de travamento de inclinação.

3.3 Instrumentação para aquisição de dados

Os dados necessários para avaliação da eficiência do coletor solar foram obtidos com o auxílio de uma placa eletrônica microprocessada (Arduino), conectada a sensores de medição de algumas variáveis do processo de aquecimento solar. A placa de coleta de dados é mostrada na Figura 38.



Figura 38: Placa Arduino® utilizada como datalogger.

As especificações da placa são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Especificações da placa Arduino®

Microcontrolador	ATmega328
Tensão operacional	5V
Tensão de entrada (recomendada)	7-12V
Tensão de entrada (limites)	6-20V
Pinos E/S digitais	14 (6 podem ser saídas PWM)
Pinos de entrada analógica	6
Corrente CC por pino E/S	40 mA
Corrente CC para o pino 3,3V	50 mA
Flash Memory	32 KB (0,5 utilizadas pelo bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Velocidade de Clock	16 MHz

Fonte: www.arduino.cc.

Os sensores acoplados no Arduino destinam-se a mensurar variáveis que possam interferir na eficiência do sistema de aquecimento, sendo elas: temperatura da água, temperatura ambiental e vazão mássica.

Para a coleta de dados de aquecimento de água e temperatura ambiente foram utilizados sensores de temperatura específicos para a placa Arduino (sensor eletrônico), representados na Figura 39.



Figura 39: Sensor de temperatura d'água/ambiente.

As especificações dos sensores são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2: Sensores de temperatura de água/ambiente

Tensão de alimentação	3,5 a 5,5V
Escala de temperatura	-55 a 125°C
Precisão	±0,5°C (-10 a 85°C)
Material	Tubo de aço inoxidável
Dimensões	Diâmetro: 6mm e comp: 30mm
Comprimento do cabo	90cm

Fonte: www.arduino.cc.

Para determinar a vazão mássica da água foi usado um sensor de fluxo de água (Figura 40). Suas especificações técnicas são determinadas na Tabela 3.



Figura 40: Fluxômetro utilizado para determinar a vazão mássica.

Tabela 3: Especificações do fluxômetro

Tensão de trabalho nominal	DC 5-24V
Corrente máxima de operação	15mA (DC 5V)
Temperatura de trabalho	≤80°C
Pressão máxima	2MPA
Precisão	0,5~30L.min ⁻¹ (±1%)
Fluxo	0,5-30L.min ⁻¹

Fonte: www.arduino.cc.

Para armazenar os dados de temperatura e de vazão mássica foi utilizado um módulo cartão SD, com memória de 8GB (Figura 41). Suas especificações técnicas são apresentadas na Tabela 4.



Figura 41: Cartão SD.
Fonte: Acervo do autor.

Tabela 4: Especificações do módulo cartão SD

Tensão de entrada	DC 3,3V / 5V
Formatos de SPI	MOSI, SCK, MISO e CS
Dimensões	5,1 x 3,1cm
Formatação	FAT16 ou FAT32

Fonte: www.arduino.cc.

Outra variável mensurada foi a irradiação solar global, mediante a utilização de um piranômetro com sensor fotovoltaico de silício de alta estabilidade. O piranômetro utilizado é mostrado na Figura 42.



Figura 42: Piranômetro utilizado para medição de energia solar.
Fonte: INSTRUTHERM, 2015.

O piranômetro possui correção de cosseno total do ângulo de incidência da radiação solar. As especificações do medidor de energia solar são mostradas na Tabela 5.

Tabela 5: Especificações do piranômetro

Marca	INSTRUTHERM
Modelo	MES-100
Escala de medição	2000 W.m ⁻²
Resolução	0,1 W.m ⁻²
Resposta espectral	400 a 1000nm
Precisão	±10 W.m ⁻²
Erro induzido de temperatura adicional	±0,38 W.m ⁻²
Taxa de amostragem	4 vezes por segundo
Temperatura e umidade de operação	0 a 50°C e 0 a 80% Rh.

Fonte: INSTRUTHERM, 2015.

3.4 Avaliação do coletor solar

A caracterização do sistema foi realizada a partir de testes em campo, onde foram coletados dados (radiação solar, fluxo de água, temperatura da água e ambiente) em diferentes cenários, que se distinguem basicamente pela dinâmica do coletor solar (fixo e com seguidor manual), e pela função dos tipos de sistemas de aquecimento utilizados (passivo e ativo).

3.4.1 Coletor solar com sistema passivo (termossifão)

A Figura 43 ilustra a disposição dos sensores instalados para medição da temperatura da água em diferentes pontos no coletor solar, operando com sistema passivo (termossifão).

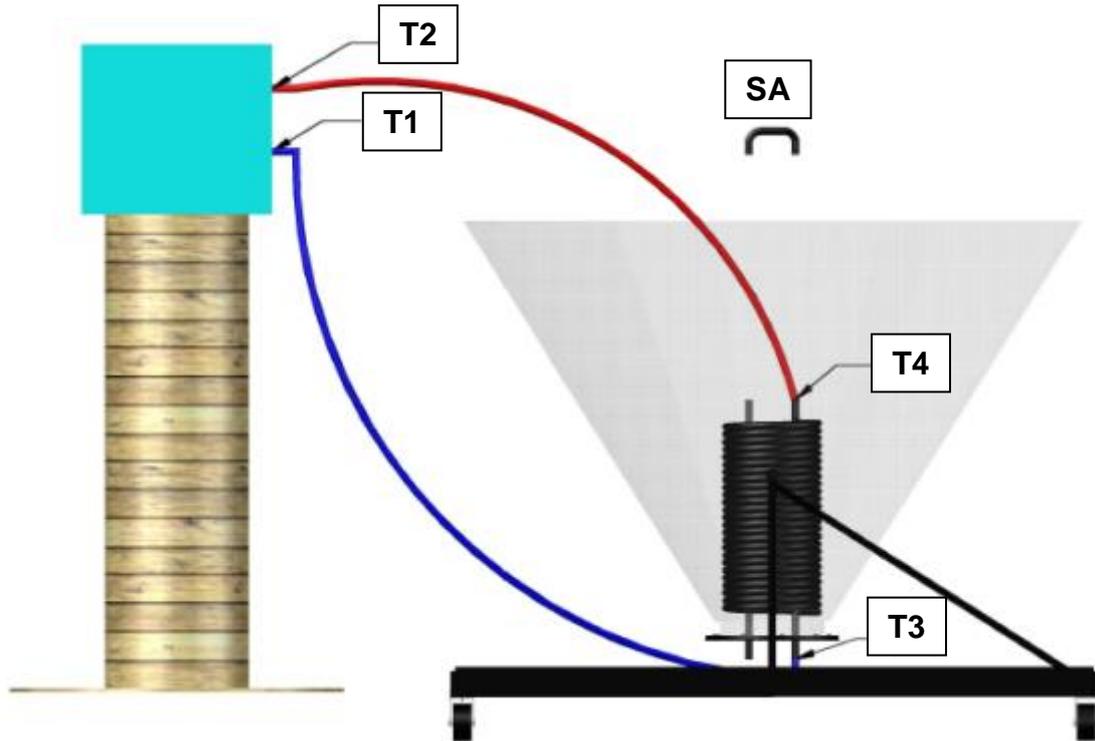


Figura 43: Disposição dos sensores para medição da temperatura da água.

Notas:

- T1: Saída da água “fria” do reservatório térmico;
- T2: Entrada da água aquecida no reservatório térmico;
- T3: Entrada da água “fria” no absorvedor;
- T4: Saída da água aquecida do absorvedor;
- SA: Junção para conexão do sistema ativo (quando for o caso).

Nota-se na Figura 43 os pontos onde foram instalados os sensores de temperatura da água. Os sensores T2 e T4 estão dispostos de forma a coletar a temperatura da água aquecida pelo absorvedor, e mensurar a perda de calor no duto entre o absorvedor e o reservatório térmico. Do mesmo modo, os sensores T1 e T3 determinam a temperatura da água que entra no absorvedor e a perda de calor no duto inferior. O par de sensores T3 e T4 determinam a taxa de ganho de calor na passagem do fluido no absorvedor. A junção SA, é uma conexão usada apenas para ligação do sistema ativo.

A Figura 44 exemplifica o esquema de ligação do coletor solar com sistema passivo.

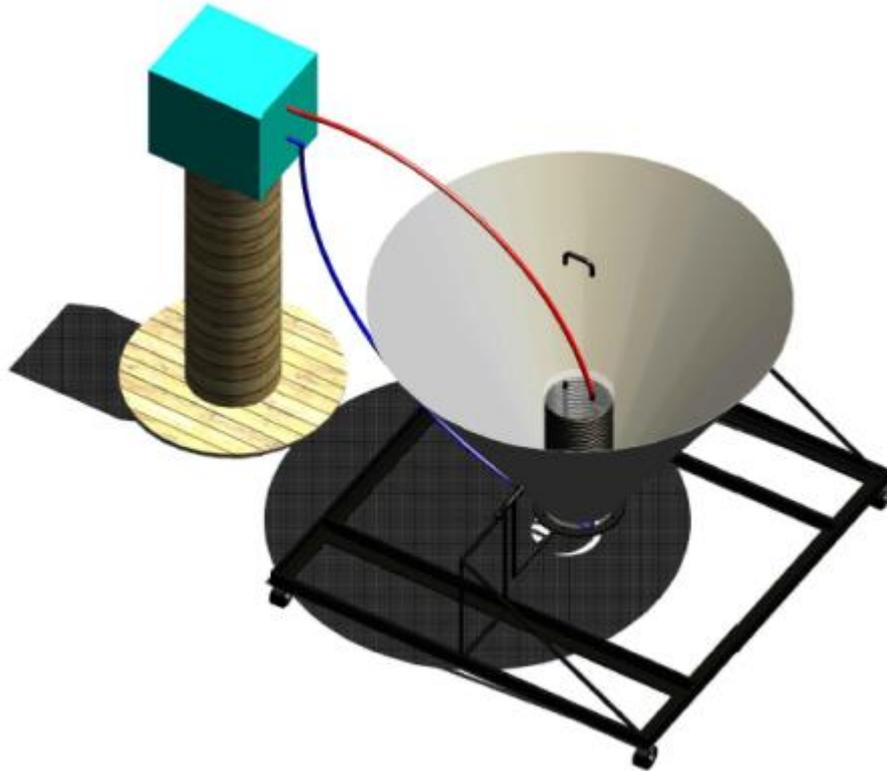


Figura 44: Coletor solar operando com sistema passivo (termossifão).

3.4.2 Coletor solar com sistema ativo (bombeamento hidráulico)

Quando a junção SA é instalada no absorvedor, opera-se o sistema com bombeamento hidráulico (ativo). Nesta configuração, evita-se o sombreamento gerado pelo duto de água superior (água aquecida pelo absorvedor) no interior do concentrador solar. Assim, no sistema ativo, o reservatório pode ser acondicionado em nível abaixo do absorvedor (diferente do termossifão), pois a circulação do fluido se efetua de forma forçada (bomba d'água).

A Figura 45 mostra o coletor com sistema ativo (bombeamento hidráulico).

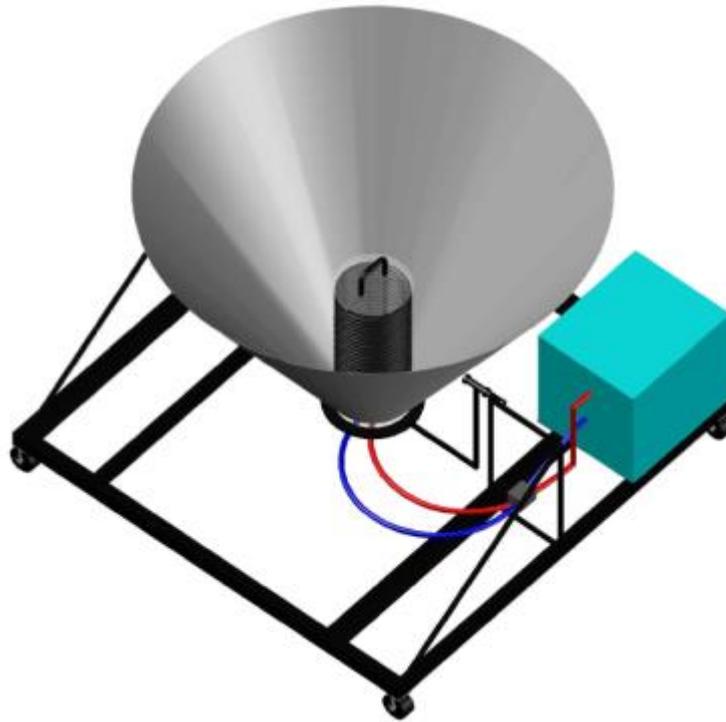


Figura 45: Coletor solar operando com sistema ativo.

A Figura 46 demonstra a trajetória do fluido impulsionado pela bomba d'água no circuito hidráulico.

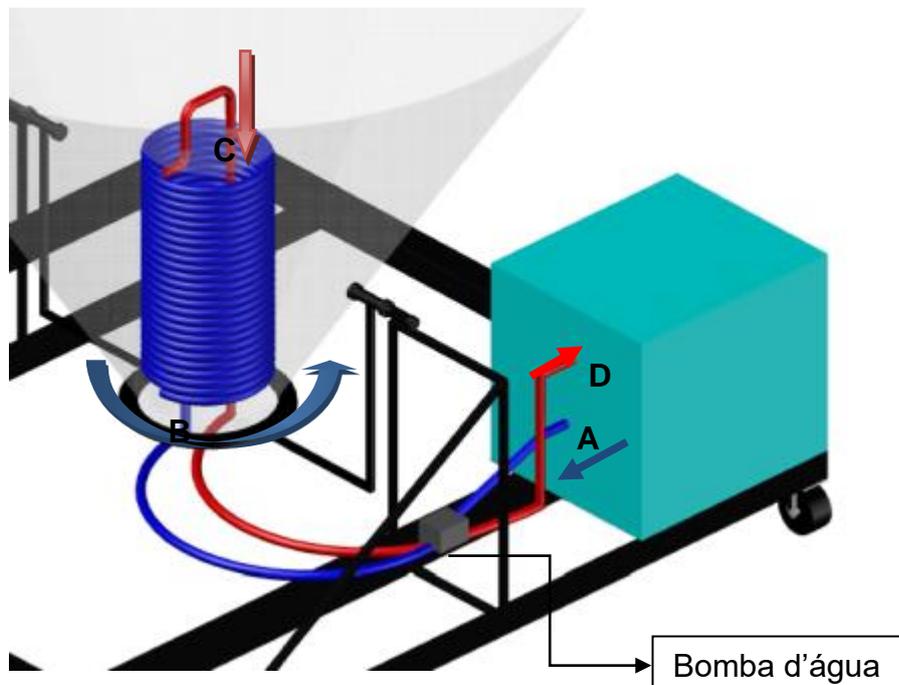


Figura 46: Detalhe do esquema de circulação da água no absorvedor com sistema ativo.

De acordo com a Figura 46, a bomba d'água impulsiona o fluido da saída inferior do reservatório térmico (A) para a parte inferior do absorvedor (B). O fluido então circula pela serpentina até atingir o ponto superior do absorvedor, e posteriormente desce no ponto C, retornando para a parte superior do reservatório térmico (D).

A bomba usada para circulação de água é mostrada na Figura 47.



Figura 47: Bomba d'água usada no sistema ativo.

As especificações da bomba d'água são mostradas na Tabela 6.

Tabela 6: Especificações da bomba d'água

Tensão	12-24V
Corrente nominal máxima	1A
Fluxo máximo	900L.h ⁻¹ (15 L.min ⁻¹)
Máxima coluna d'água	5,5 metros
Temperatura máxima de circulação d'água	100°C

Fonte: Acervo do autor.

3.4.3 Cenários avaliados

Ambos os sistemas de aquecimento (ativo e passivo) serão submetidos a diferentes cenários com variação na dinâmica do conjunto concentrador/absorvedor.

Os cenários são detalhados a seguir.

Cenário 1 – Sistema passivo de aquecimento solar de água operando com seguidor solar manual. Neste cenário, o sistema de aquecimento solar é caracterizado pela circulação de água por termossifão e a orientação do coletor ajustada manualmente de acordo com ângulos de altitude e azimute solar.

Cenário 2 – Sistema passivo de aquecimento solar de água operando com orientação solar fixa. Este cenário difere apenas do Cenário 1 em relação a orientação solar, ou seja, o coletor solar fixado em 0° para o azimute solar e a inclinação do plano de captação solar otimizado para meio dia (altitude solar).

Cenário 3 – Sistema ativo de aquecimento solar de água operando com vazão mínima e seguidor solar manual. A circulação forçada (bombeamento hidráulico) é única diferença neste cenário em relação ao Cenário 1. O valor adotado para a vazão mássica será próximo a $4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ em função da tensão elétrica (12V) de alimentação da bomba.

Cenário 4 – Sistema ativo de aquecimento solar de água operando com vazão mínima e orientação solar fixa. Idem ao Cenário 3, apenas difere em relação à orientação solar, a qual se mantém fixa.

Cenário 5 – Sistema ativo de aquecimento solar de água operando com vazão máxima e seguidor solar manual. Cenário representado pelo sistema de circulação forçada com seguidor manual. A vazão mássica adotada será próxima a $6 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ em função da tensão elétrica de alimentação da bomba (24V).

Cenário 6 – Sistema ativo de aquecimento solar de água operando com vazão máxima e orientação solar fixa. Idem ao Cenário 3, apenas apresenta diferença no valor da vazão mássica ($6 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$).

A escolha dos valores da vazão mássica (4 e $6 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$) tem como referência o sistema de aquecimento proposto por Hussain; Lee (2014).

Os dados de cada cenário foram levantado no período das 9 da manhã as 15 horas da tarde.

3.5 Projeções e testes óticos da reflexão da luz no concentrador

Para estimar a trajetória da reflexão da luz solar incidente no concentrador cônico, algumas projeções foram efetuadas com o software AUTOCAD® (versão para estudantes). Tais projeções são referências para dimensionar o absorvedor e sua localização no interior do concentrador mediante a trajetória da luz solar refletida. Foram adotados ângulos de inclinação dos raios solares de 0, 15 e 30° em relação ao eixo de simetria do concentrador cônico devido ao ângulo de abertura do cone.

Além das projeções e experimentação em campo, foram efetuados alguns testes óticos para estimar o comportamento da trajetória da luz refletida pelo concentrador e emitida no absorvedor. Os testes foram feitos com iluminação artificial, efetuada com uma lâmpada de LED de cor azulada (2W) e um laser manual de cor verde (5mW) (Figura 48).

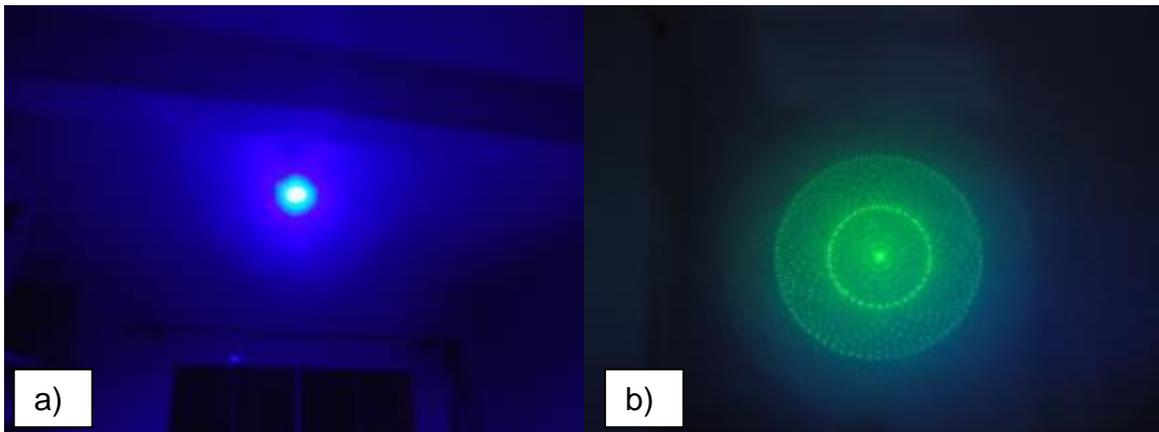


Figura 48: a) Lâmpada de LED de cor azul; b) Forma de foco do laser de cor verde.

A Figura 49 exemplifica a forma de realização dos testes óticos.

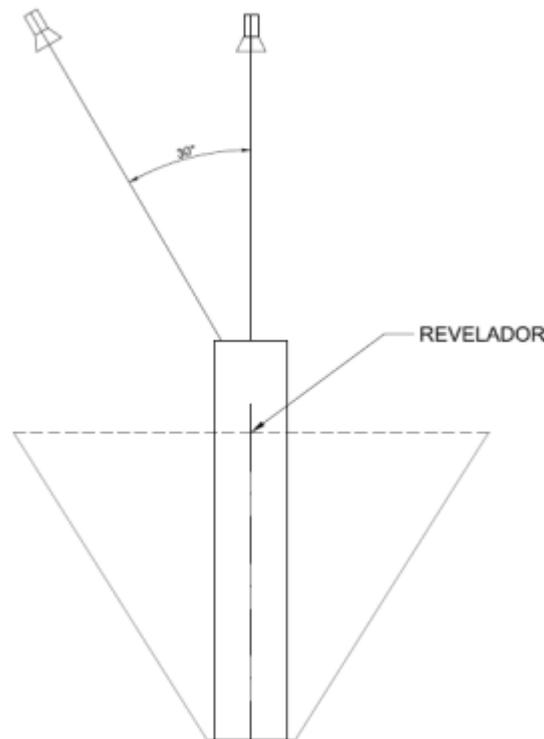


Figura 49: Esboço dos testes óticos.

Os testes óticos foram efetuados sob dois ângulos de inclinação das lâmpadas em relação ao eixo de simetria do concentrador (0 e 30°). Um cilindro branco de 200mm foi acondicionado no interior do concentrador, a fim de representar o absorvedor e atuar como revelador, para que se possa identificar os pontos de concentração da luz refletida.

3.6 Posicionamento do coletor solar na área de estudos

A eficiência de coletores concentradores está intimamente relacionada à correta orientação dos sistemas, para que a luz refletida pelo concentrador alcance o absorvedor. Em função disso, é importante saber a orientação adequada dos coletores por intermédio de cálculos da trajetória solar, bem como conhecer os ângulos da geometria solar. Para determinar os ângulos da geometria solar do local de estudos, será usada a metodologia de Duff; Beckman (2006), a qual descreve os valores de altitude e azimute solar.

3.7 Eficiência do sistema de aquecimento de água

A eficiência do sistema foi calculada por meio da razão entre a energia de saída do sistema (energia térmica) e a energia de entrada (energia solar). A Equação 1 foi usada para o cálculo da eficiência do sistema de aquecimento de água (KAIYAN et al., 2009; XIAODI et al., 2010; HUSSAIN; LEE, 2014).

$$\eta = \frac{m \cdot cp \cdot (T_o - T_i)}{A \cdot I} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

m = vazão mássica da água (kg);

cp = calor específico da água (= 0,001163 kWh.kg⁻¹.°C⁻¹);

T_o = temperatura de saída da água (°C);

T_i = temperatura de entrada da água (°C);

A = área de captação solar do concentrador (= 1,327m²);

I = energia solar total (kWh.m⁻²);

η = Eficiência (%).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Projeções da reflexão da luz - dimensionamento do absorvedor

Segundo os princípios da Física ótica e a lei da reflexão da luz, pode-se estimar a trajetória da luz solar incidente no concentrador. A Figura 50 exemplifica uma vista bidimensional da reflexão dos raios solares através da superfície interna refletora do concentrador cônico estudado.

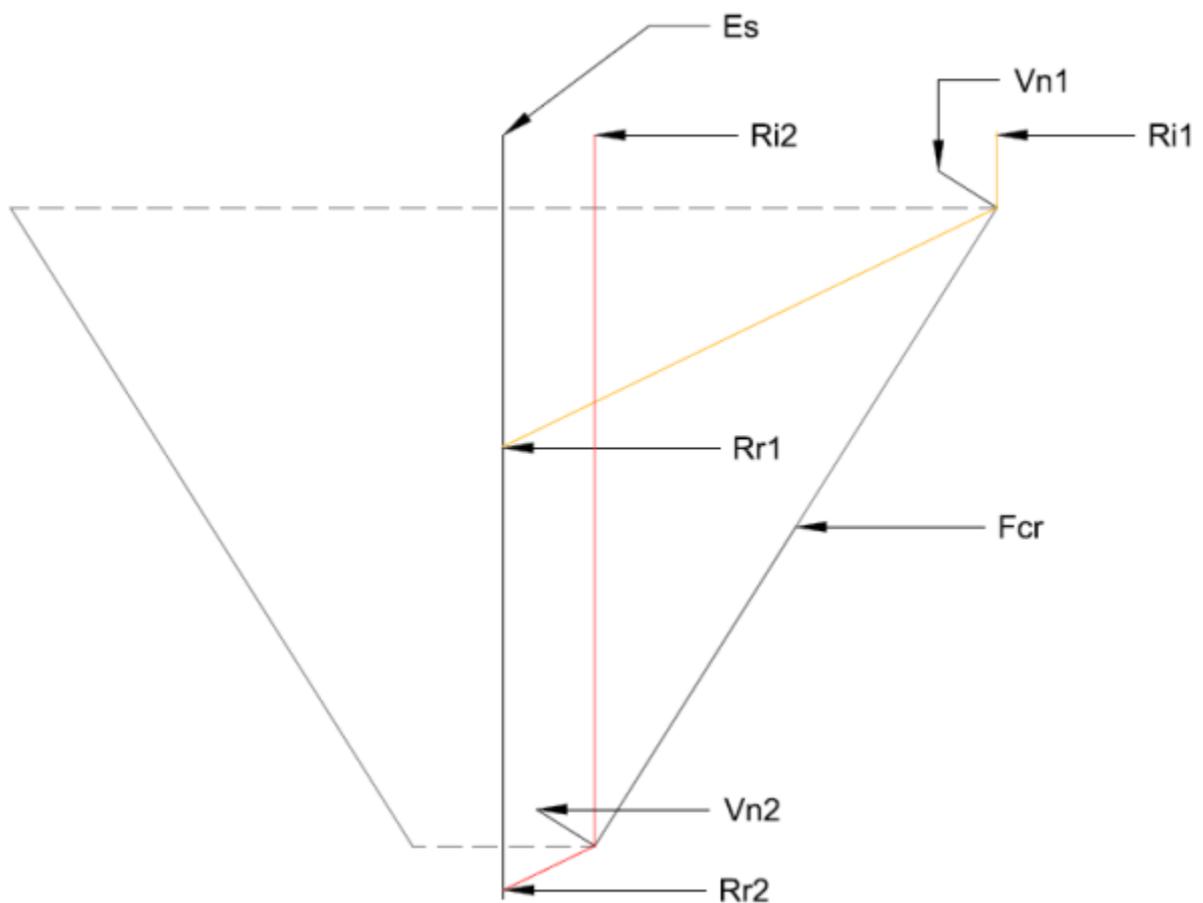


Figura 50: Esboço da área de refletiva pelo concentrador cônico.

Onde:

- Es – Eixo de simetria;
- Vn1 – Vetor normal à superfície (vetor área) do raio solar incidente 1;
- Vn2 – Vetor normal à superfície (vetor área) do raio solar incidente 2;
- Ri1 – Raio solar incidente 1;
- Ri2 – Raio solar incidente 2;
- Rr1 – Raio solar 1 refletido pelo cone;
- Rr2 – Raio solar 2 refletivo pelo cone;
- Fcr – Face interna do cone refletiva.

Nota-se, na Figura 50, a incidência de dois feixes de luz, os quais apresentam extrema importância no dimensionamento do absorvedor. Trata-se dos raios solares $Ri1$ e $Ri2$, que representam as extremidades da face refletiva interna do cone (Fcr). Esses feixes óticos delimitam a área que a luz refletida pelo concentrador atinge o absorvedor, delimitando um campo de concentração, ou seja, toda a face refletora que recebe luz é capaz apenas de refletir no limite desse campo. Essa afirmação é baseada no ângulo de borda das extremidades superior e inferior do cone. Em suma, o feixe $Ri1$ atinge a borda superior do concentrador e então é refletido pela face do concentrador, determinando o surgimento do feixe refletido $Rr1$. O ângulo do feixe $Rr1$ é igual ao ângulo entre $Ri1$ e o vetor normal à superfície refletora ($Vn1$). Essa trajetória delimita a faixa superior de reflexão do concentrador. Da mesma forma, pode-se estimar o limite da extremidade inferior analisando os termos $Ri2$, $Vn2$ e $Rr2$. A delimitação apresentada na Figura 50 vale apenas para o raio de luz com ângulo de 90° em relação à abertura do concentrador. Autores como Xiaodi et al. (2010), Sharaf (2002), também utilizaram diagramas bidimensionais para estimar a trajetória solar em concentradores semelhantes.

Em virtude da dinâmica da trajetória solar, um diagrama com três inclinações foi criado para auxiliar no dimensionamento do absorvedor. A figura 51 apresenta a simulação da deflexão da luz solar de 0 , 15 e 30° em relação ao eixo de simetria do cone.

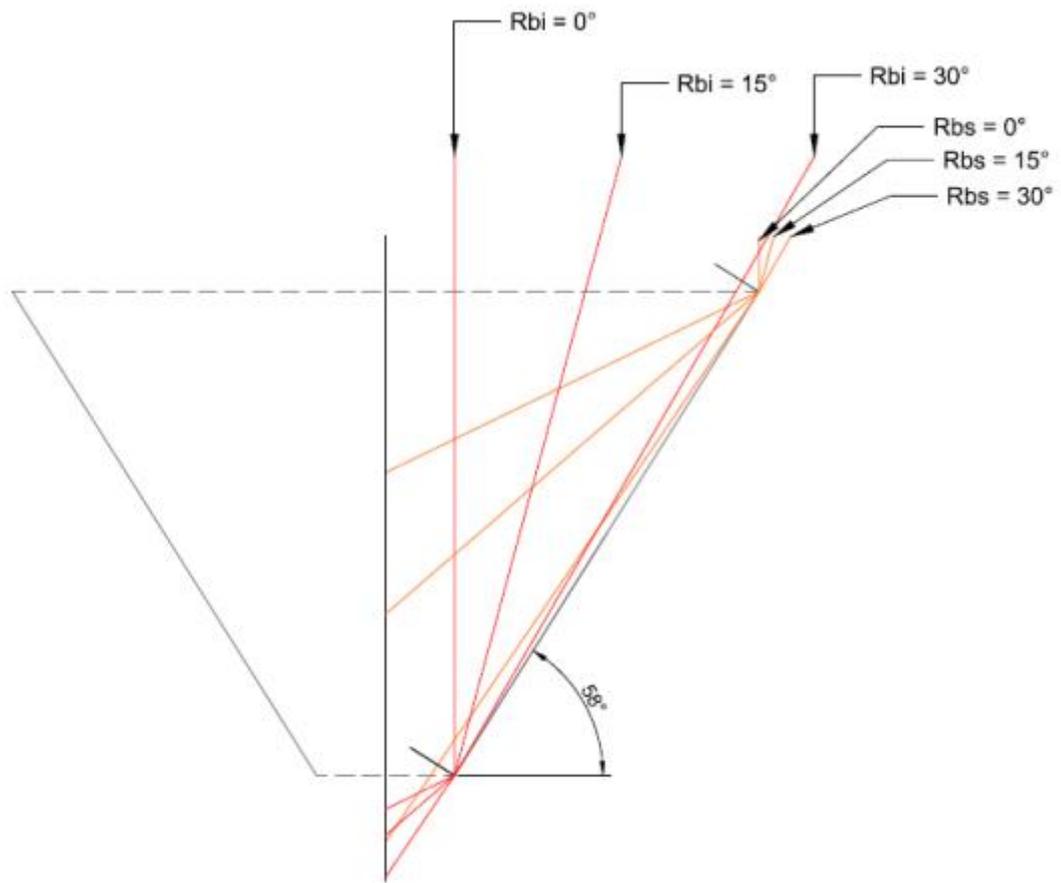


Figura 51: Projeções da reflexão de diferentes ângulos de borda.

Percebe-se, na Figura 51, a ampla mudança do ângulo de reflexão comparado ao ângulo de incidência, ou seja, mudanças discretas no ângulo de incidência da luz que atinge o concentrador causam drásticas alterações na inclinação da luz refletida no absorvedor. Em virtude dessa alteração, optou-se pela otimização da dimensão do absorvedor que contemplasse uma razão entre os ângulos 0 e 30° de incidência solar.

A Figura 52 apresenta um diagrama bidimensional para o ângulo de incidência de 15° e a interação com o absorvedor localizado nas extremidades dos ângulos de reflexão de borda.

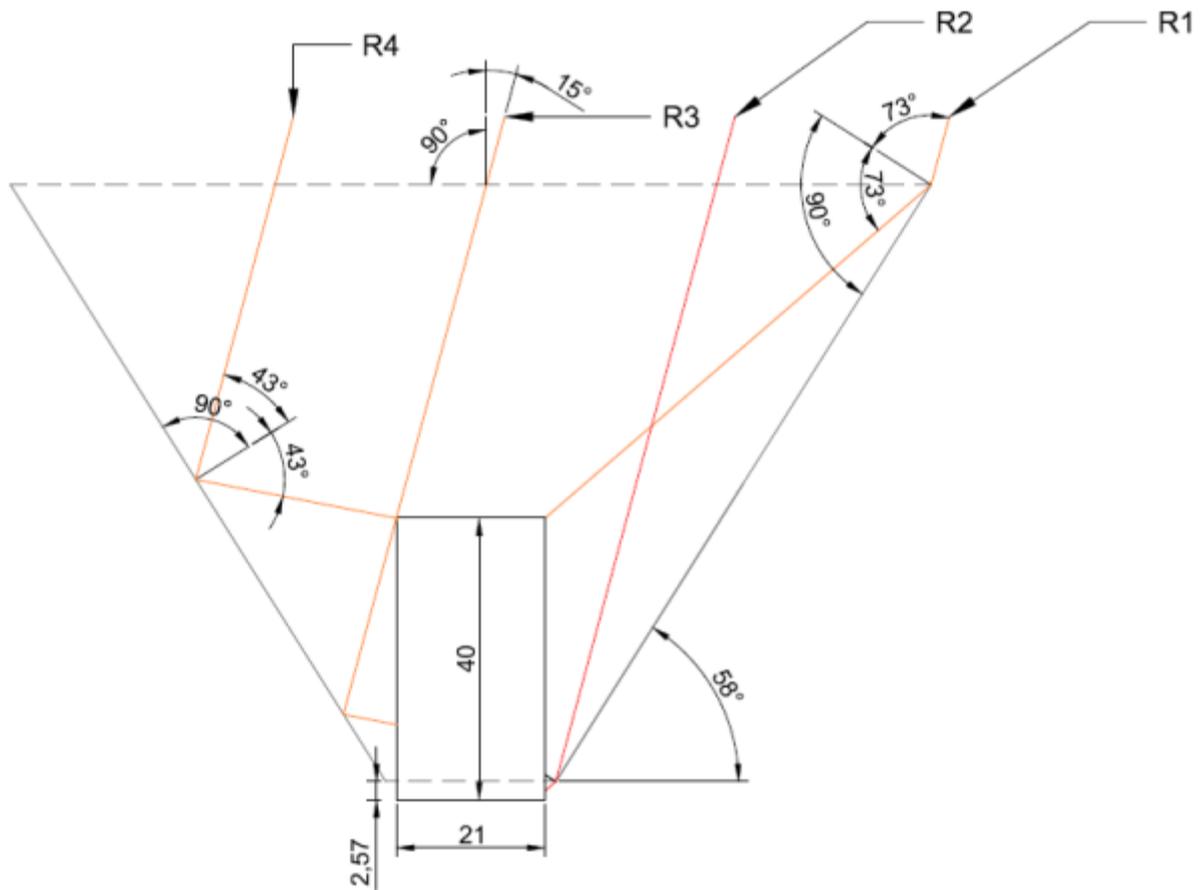


Figura 52: Simulação de feixe de luz inclinada (15°) e sua interação no absorvedor.

Na Figura 52, a altura do absorvedor é resultado da distância entre a reflexão dos raios solares R1 e R2, os quais obedecem a lei da reflexão de luz. Os feixes de luz R3 e R4 apresentam a reflexão da face esquerda do concentrador, ao passo que, em ângulos de luz incidente diferente de 0° , o diagrama torna-se assimétrico em relação à reflexão da luz. Vale ressaltar nesse caso, que alturas maiores para o absorvedor (>40 cm) implicam no sombreamento da luz que atinge a lateral esquerda do cone, ao mesmo tempo que na lateral direita o absorvedor sai do campo limite de reflexão solar. Quanto ao diâmetro do absorvedor, este é resultado da abertura da parte inferior do concentrador, sendo que o mesmo está disposto abaixo do concentrador para interceptar o feixe de luz refletido por R2.

A Figura 53 demonstra a interação da luz solar (15°) na área possível de reflexão no concentrador, omitindo a luz direta sem reflexão, para melhor visualização.

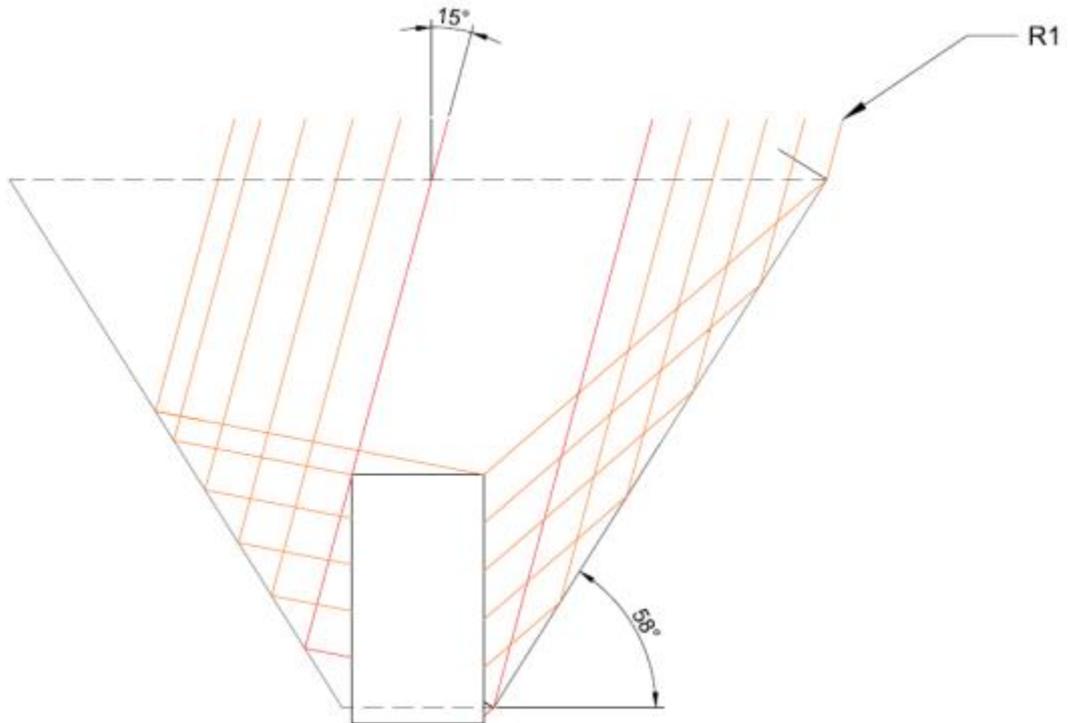


Figura 53: Interação do absorvedor com os raios solares refletidos.

Para melhor ilustrar essa interação, a Figura 54 mostra uma visão tridimensional.

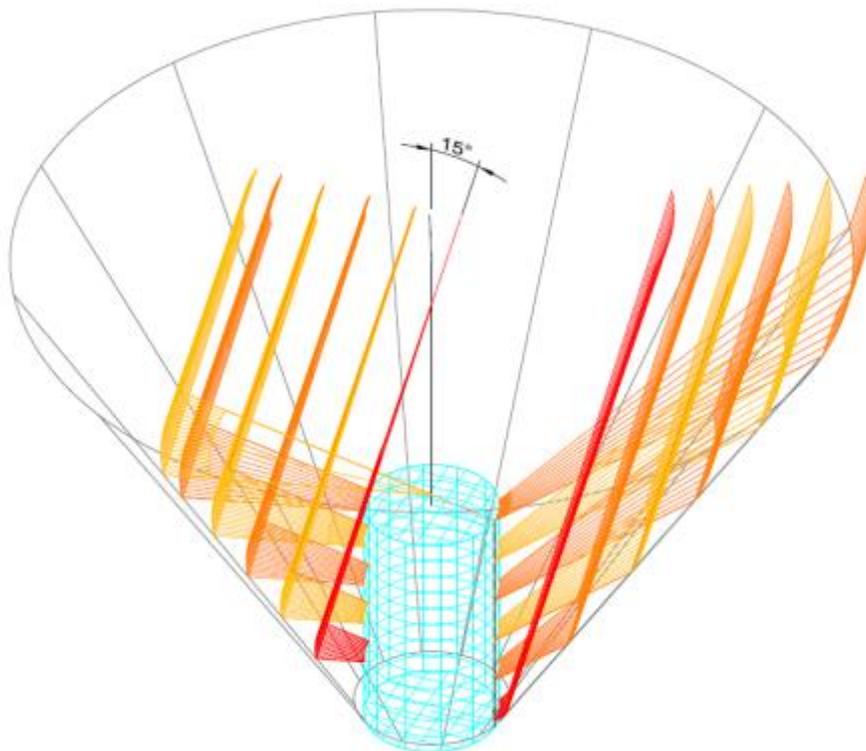


Figura 54: Vista tridimensional da interação de raios com inclinação de 15° .

Em condições ideais de captação da luz solar, quando o ângulo de incidência em relação ao plano de captação do concentrador é igual a 90° tem-se uma distribuição simétrica da luz solar refletida no absorvedor. A Figura 55 apresenta um diagrama bidimensional para este caso.

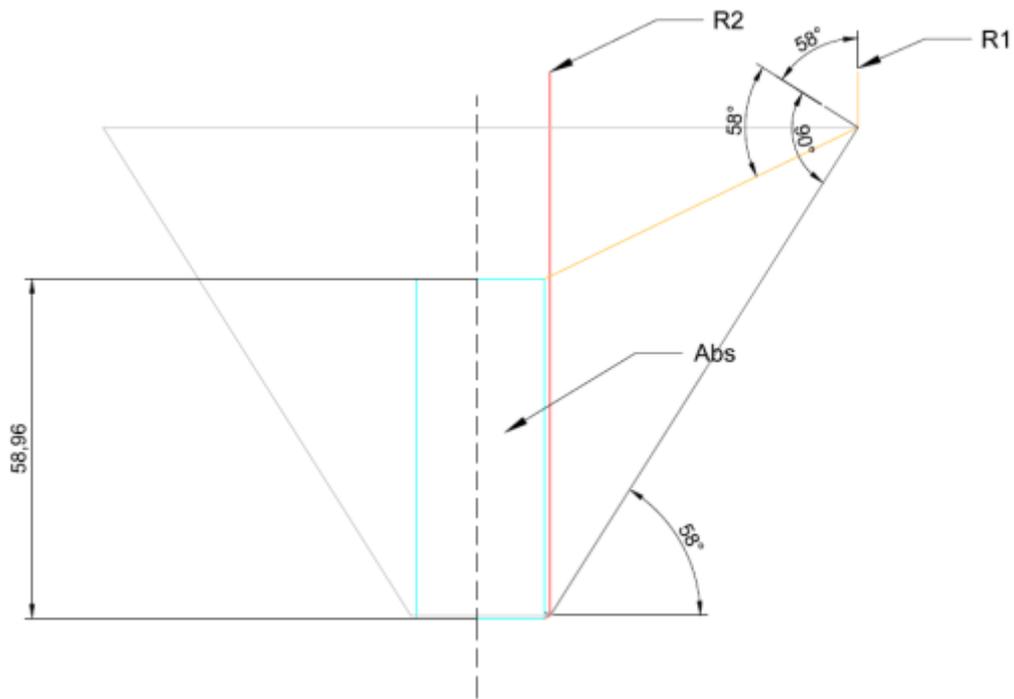


Figura 55: Simulação de feixe de luz perpendicular ao plano de absorção e sua interação com o absorvedor.

Considerando o ângulo ideal de captação de luz solar (Figura 55), estima-se a altura do absorvedor novamente pela distância do campo de concentração, representado pela reflexão dos raios R1 e R2. A Figura 56 ilustra os limites do campo de concentração da luz refletida.

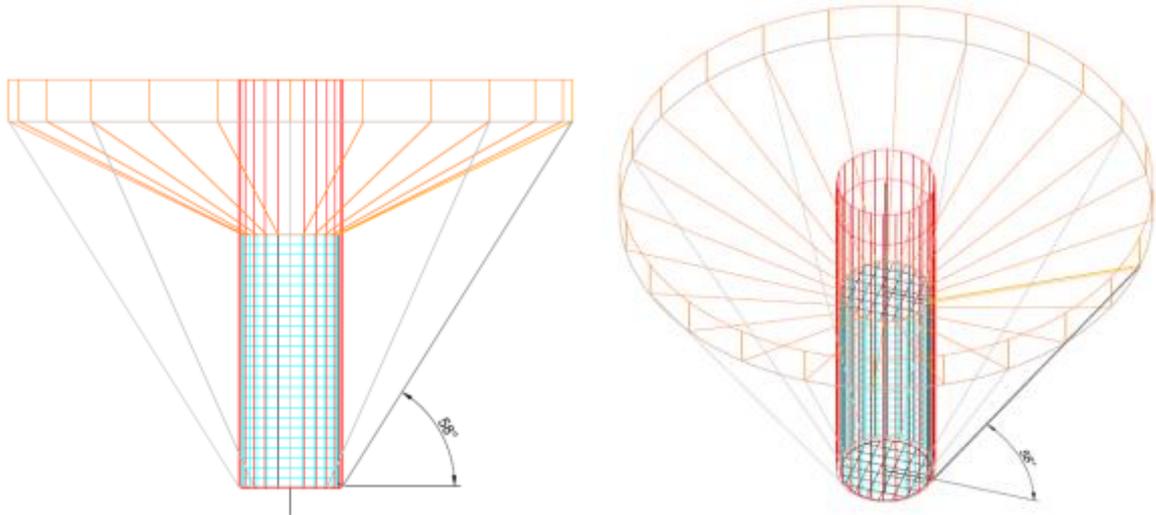


Figura 56: Feixe de luz perpendicular à área de captação do concentrador cônico.

A Figura 57 exemplifica a distribuição simétrica de vários feixes de luz incididos e refletidos pelo concentrador, e interceptado pelo absorvedor.

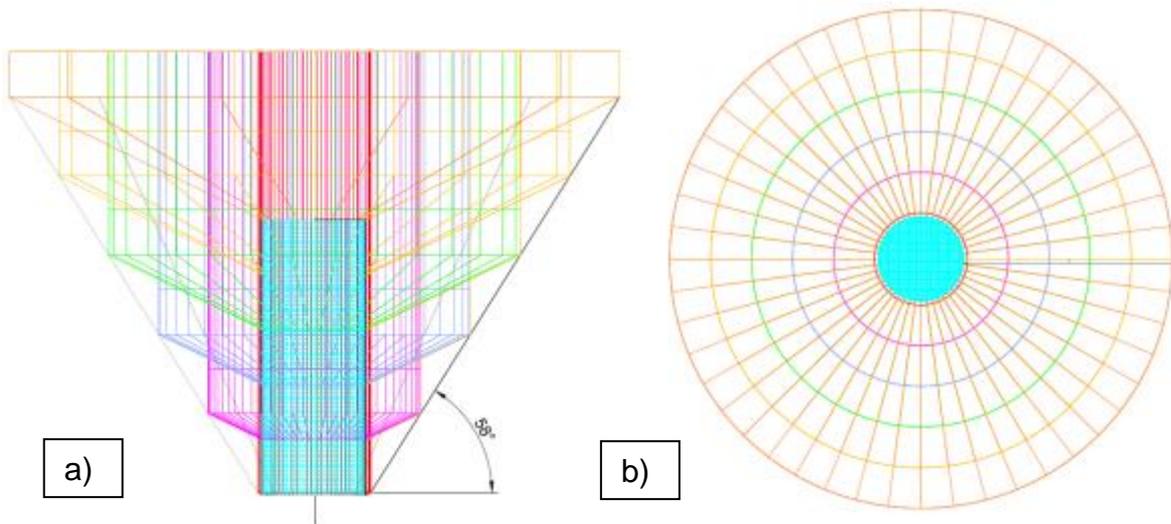


Figura 57: a) Vista frontal de múltiplos feixes perpendiculares à área de captação solar; b) Vista superior da área de captação solar.

Fica evidente, na Figura 57, que em condições ideais de captação de luz, a interceptação de energia solar pelo absorvedor é superior à captação em ângulos de deflexão de luz maiores que 0° . Ainda, percebe-se de forma íntegra que ambas as laterais do concentrador contribuem para a reflexão da luz no absorvedor. No entanto, qualquer deflexão no ângulo de incidência da luz acarretará no

sombreamento de uma das faces, decorrente da altura do absorvedor (ex: ângulo de incidência igual a 15°).

Em suma, o que se percebe são focos lineares em função da conicidade do concentrador, fato que se assemelha ao foco proveniente de concentradores cilíndricos. Tais focos lineares são percebidos com mais clareza nos testes óticos mostrados no item 4.2.

Dessa forma, considerando a simulação dos feixes de luz (0 e 15°), estipulou-se a altura do absorvedor igual a 40 cm. Tal escolha foi concebida baseada nas questões técnicas e econômicas para a fabricação do absorvedor. A Figura 58 apresenta uma simulação do absorvedor em sua forma de serpentina (cobre).

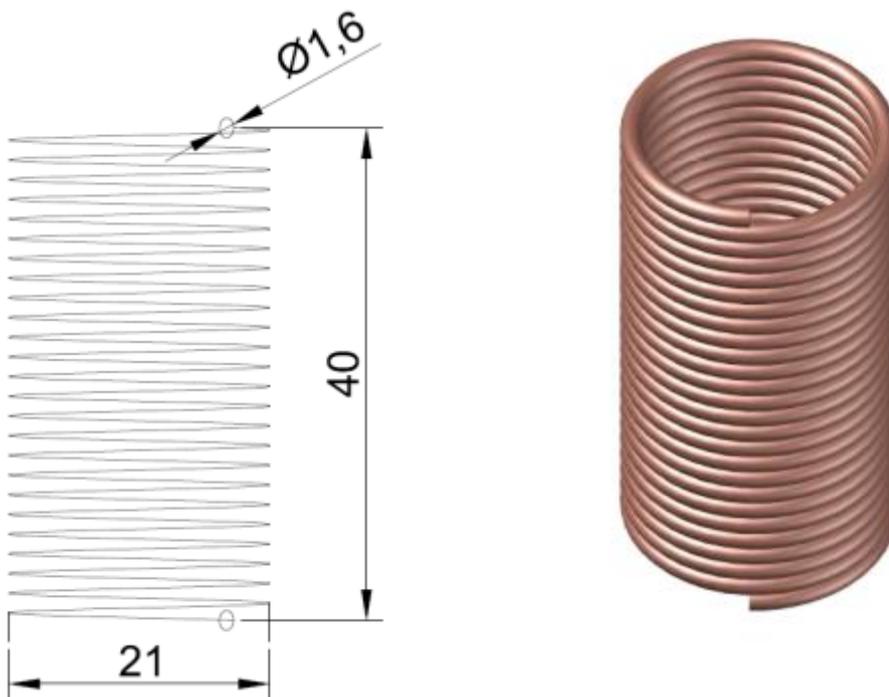


Figura 58: Dimensões do absorvedor e seu aspecto real.

Para evitar as perdas de energia térmica por convecção, o absorvedor foi envolto por uma superfície transparente, a qual auxilia na formação do efeito estufa no interior do absorvedor. A Figura 59 mostra o conjunto montado.



Figura 59: a) Vista frontal; b) Vista 3D superior; c) Absorvedor real.

4.2 Simulação da concentração da luz solar (testes óticos)

Alguns testes óticos foram realizados em uma câmara escura a fim de prever o comportamento da concentração de luz refletida pelo concentrador de forma prática. A Figura 60 apresenta as formas de focos criados pelo concentrador cônico com auxílio de um revelador que simula o absorvedor. A inclinação da lâmpada (LED azul) é de 0° em relação ao eixo de simetria do concentrador.

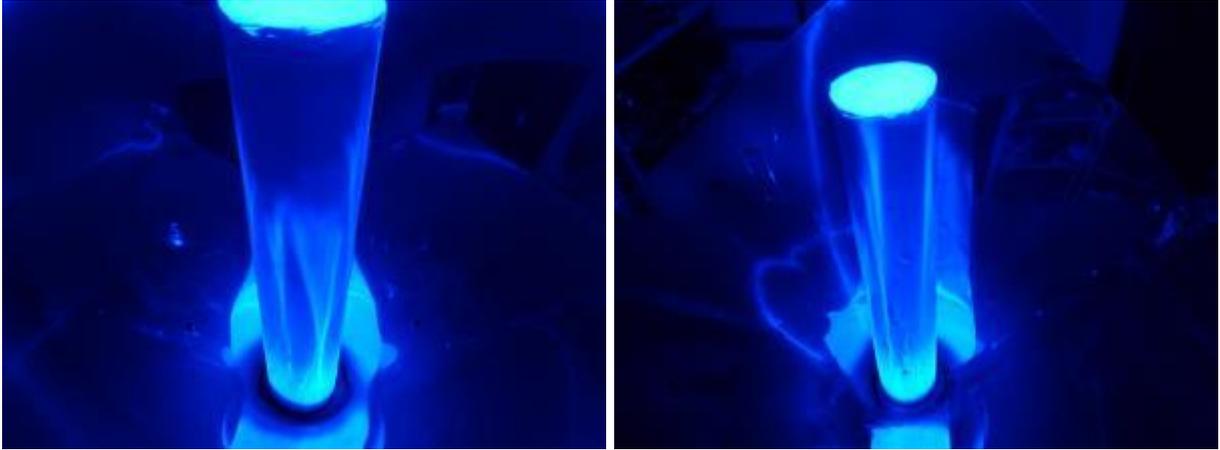


Figura 60: Teste ótico com luz azul sob ângulo de luz incidente igual a 0° .

Nota-se, na Figura 60, a formação de focos lineares em função do formato cônico do concentrador. Essa formação linear também ocorre em concentradores solares cilíndricos parabólicos, em função da curvatura do concentrador. Todavia, além da formação de foco linear, percebe-se que, em virtude da conicidade do concentrador, a maior concentração de luz ocorre próxima à abertura inferior do concentrador. Tais considerações reforçam as estimativas feitas pelas projeções ilustradas no item anterior. A Figura 61 apresenta o foco principal do concentrador sem a interação do absorvedor.

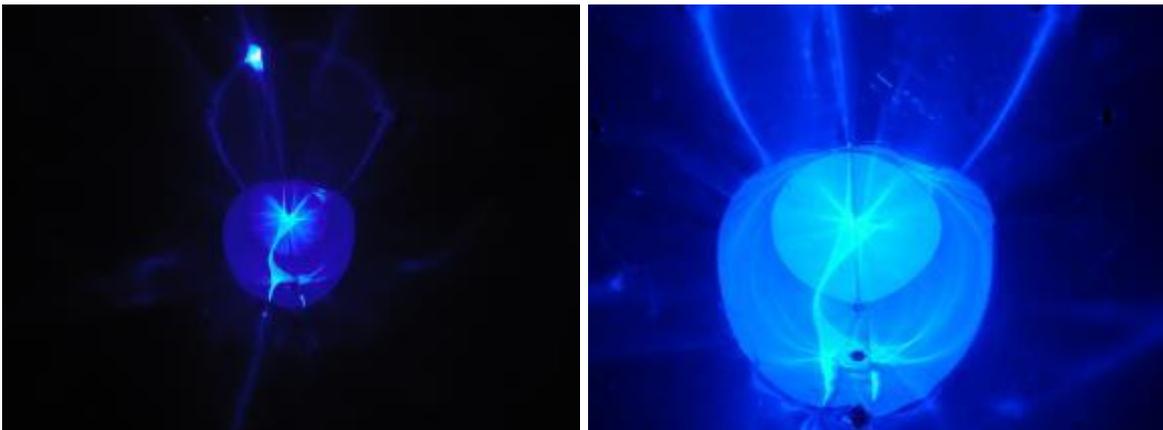


Figura 61: Foco principal do concentrador cônico.

Para melhor exemplificar a concentração da luz no interior do concentrador, a Figura 62 apresenta um teste ótico realizado com laser, apresentando formação de imagem focal com mesmo ângulo de inclinação da Figura 61.

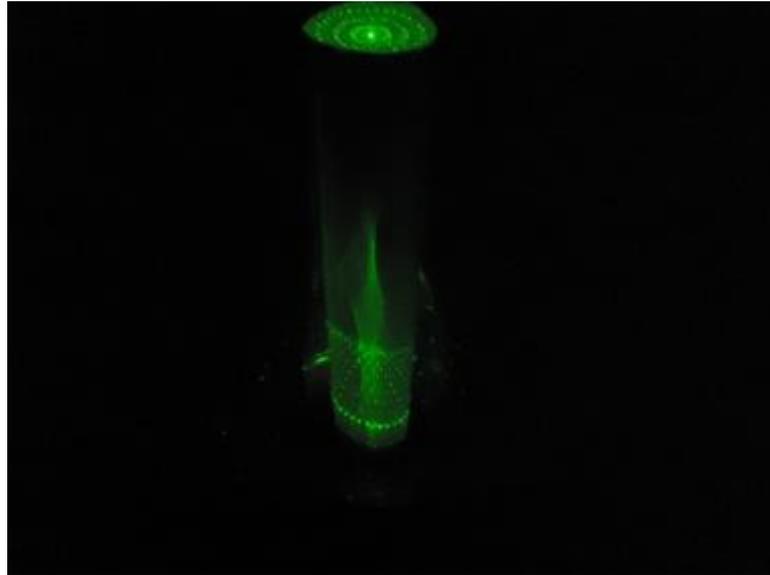


Figura 62: Teste óptico com laser de cor verde.

Pode-se perceber no topo do revelador (Figura 62), a imagem formada pelo laser localizada no ponto central da área superior. Essa imagem é estendida num raio igual ao raio de abertura superior do concentrador. Todavia, nota-se, além do traço vertical formado pelo foco linear, a repetição da imagem formada pelo laser ao longo da lateral na parte inferior do revelador. Isto demonstra a alta concentração da luz percebida nos testes com a luz azul.

Outros testes foram realizados com a inclinação da luz igual a 30° . A Figura 63 apresenta a reflexão da luz com a lâmpada azul.



Figura 63: Foco formado pela luz com ângulo de incidência igual a 30° .

O foco em formato de X, apresentado na Figura 63, é criado em virtude da inclinação da luz e o sombreamento do absorvedor (revelador). Este foco é formado na área oposta à direção de incidência do feixe de luz. Essa consideração não pôde ser prevista anteriormente, pois as projeções estimadas estavam limitadas a um simples diagrama bidimensional. A Figura 64 apresenta a formação do foco sob o laser de cor verde.

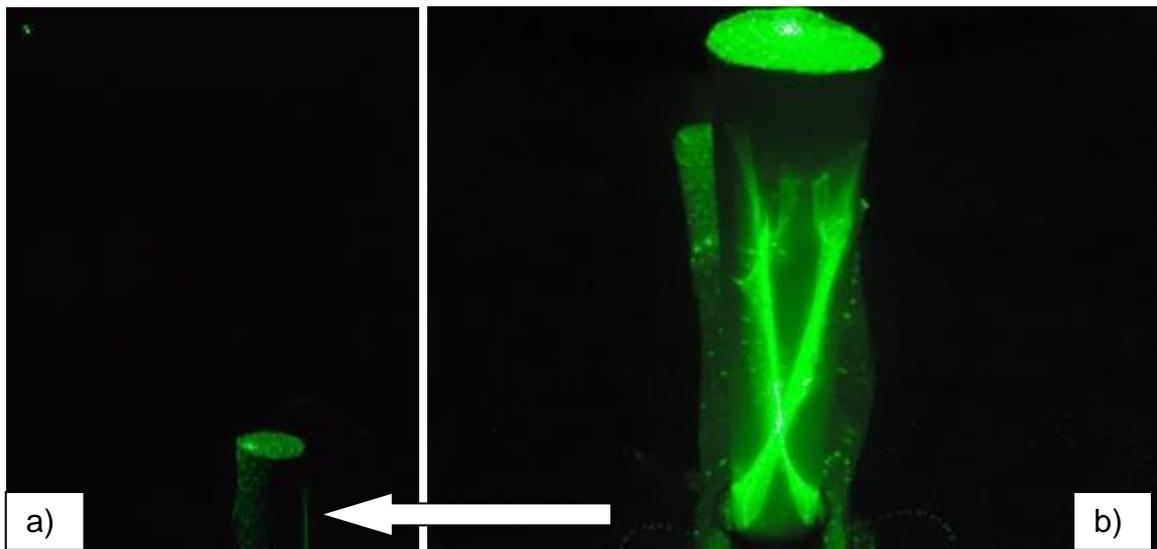


Figura 64: a) Vista lateral da disposição do laser (30°); b) Formação do foco do lado oposto à direção da luz.

Os testes óticos proporcionaram uma estimativa para obtenção de uma margem de folga entre os ajustes dos valores angulares dos azimutes solares nos testes a campo.

4.3 Ensaio do coletor solar a campo

A avaliação do coletor solar foi realizada experimentalmente considerando os cenários propostos. Os dados levantados em campo foram relativos a temperatura da água (quatro pontos), vazão mássica e a radiação solar, os quais foram coletados num período de seis horas (09:00 – 15:00 horas).

4.3.1 Cenário 1 (PS)

O cenário 1 é caracterizado pelo sistema de aquecimento passivo com seguidor solar manual, onde os dados foram levantados no dia 18 de setembro de 2015 (Apêndice C). A Figura 65 apresenta o resultado do ensaio do Cenário 1.

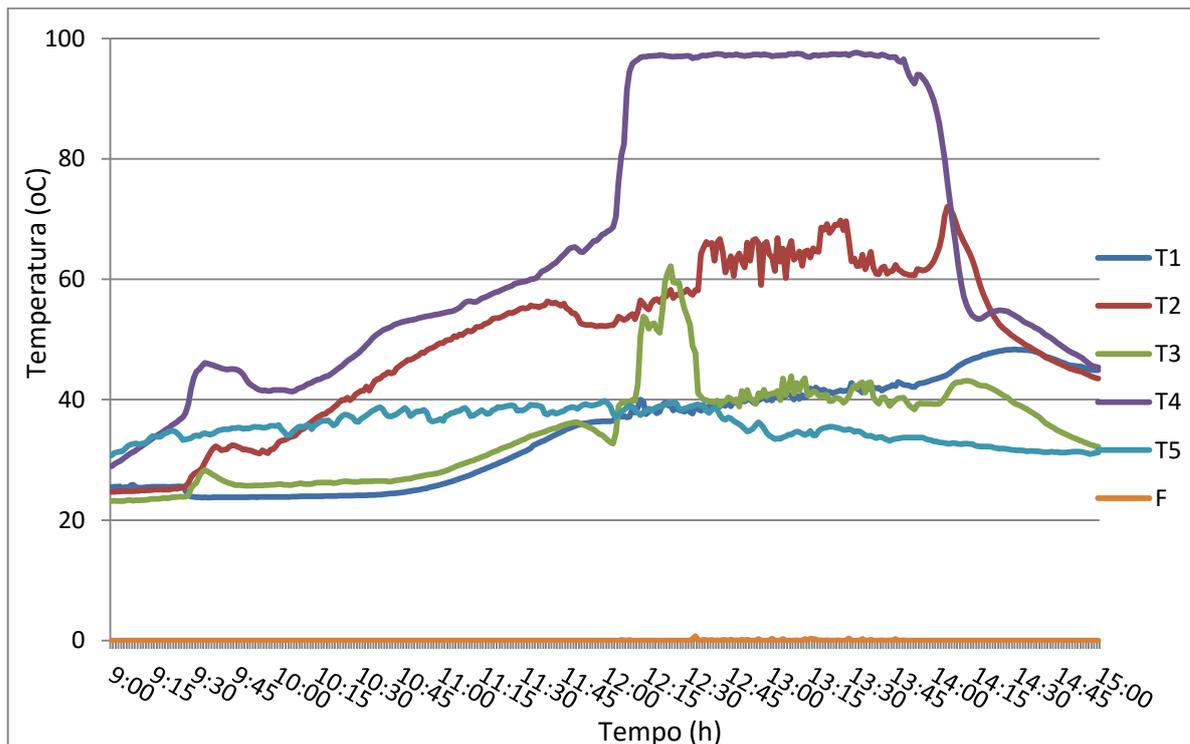


Figura 65: Resultados do ensaio do Cenário 1.

Onde:

- T1 – Temperatura inferior do reservatório térmico;
- T2 – Temperatura superior do reservatório térmico;
- T3 – Temperatura inferior do absorvedor;
- T4 – Temperatura superior do absorvedor;
- T5 – Temperatura ambiente;
- F – Fluxo de água.

Nota-se na Figura 65, que os valores de temperatura da água foram maiores em T4, o qual apresentou a partir das 12:00 horas valores de aproximadamente 98°C. A alta temperatura neste ponto se deve ao fato do sensor estar localizado na parte superior do absorvedor, local onde é refletida a radiação solar incidente na área de captação do concentrador solar cônico. Ainda em relação ao T4, percebe-se uma variação brusca na temperatura neste mesmo período, tal variação coincide

com valores incipientes de vazão mássica, que apesar de pequenos ($<1\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$) demonstram um pequeno fluxo de água no sistema passivo.

Em relação aos demais sensores, é notável um aumento gradativo na temperatura com pequenas variações, exceto pelo sensor T3 que apresenta um salto juntamente com o sensor T4 devido aos pequenos picos de valores no fluxo de água. Levando em consideração o ponto de captação de água quente (T2), o valor médio máximo foi de 65°C .

4.3.2 Cenário 2 (PE)

O cenário 2 é caracterizado pelo sistema de aquecimento passivo com orientação solar fixa, sendo ensaiado no dia 21 de novembro de 2015. A Figura 66 apresenta o resultado do ensaio.

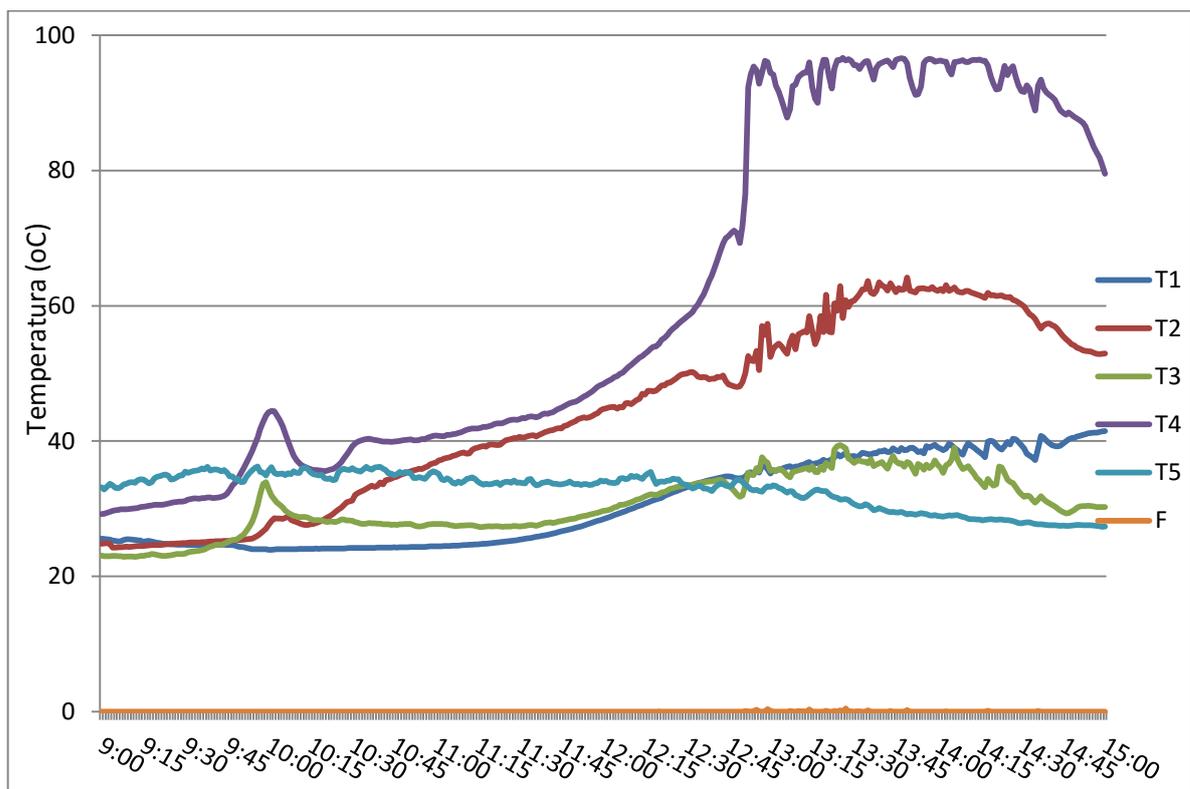


Figura 66: Resultados do ensaio do Cenário 2.

Observa-se na Figura 66, que o sensor T4 apresentou valores maiores de temperatura em relação aos demais, valores que se aproximaram da temperatura de

ebulição da água ($\sim 97^{\circ}\text{C}$). Percebe-se ainda, que a partir das 12:30 houve um abrupto aumento na temperatura de T4, que coincidiu com o surgimento de fluxo de água, ainda que pequeno, já que o sistema estava operando com termossifão. Nota-se neste mesmo período, que ao mesmo tempo em que eram registrados pequenos picos de temperatura em T2, ocorria pequenos decaimentos na temperatura em T4, fato que se resume nas pequenas variações de fluxo de água no sistema.

De um modo geral, houve um aumento gradativo na temperatura da água com valores significativos a partir do meio dia, ou seja, período no qual o concentrador estava orientado a receber maior fluxo de radiação levando em consideração seu plano de captação perpendicular a direção do fluxo dos raios solares. Todavia, é notável a ocorrência de estratificação térmica marcada pela diferença de temperatura entre o ponto de consumo (T2) e a parte inferior do reservatório térmico (T1), fato que se apresenta comumente em sistemas de aquecimento passivo ou tecnicamente chamado de termossifão.

4.3.3 Cenário 3 (A12S)

O cenário 3 caracteriza-se pelo sistema de aquecimento ativo com seguidor solar e bombeamento contínuo ($4\text{L}\cdot\text{m}^{-1}$). O experimento foi realizado no dia 17 de dezembro de 2015. A Figura 67 apresenta o resultado do ensaio.

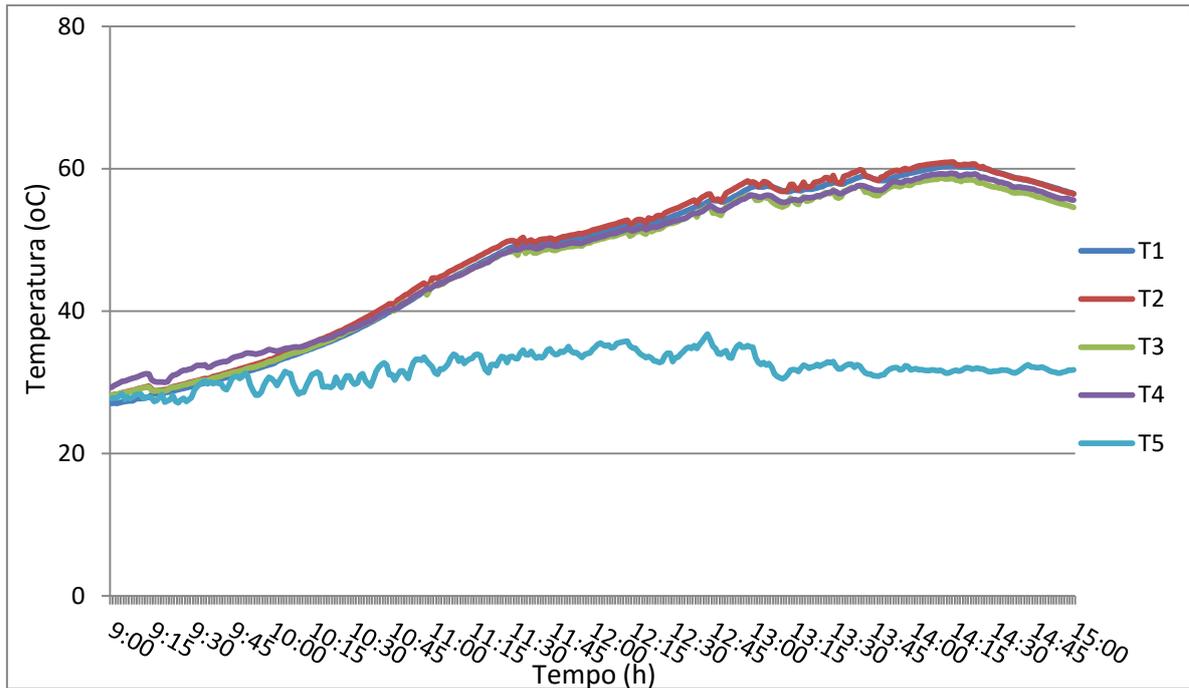


Figura 67: Resultados do ensaio do Cenário 3

Nota-se na Figura 67, pequenas diferenças nos valores de temperatura da água entre os quatro sensores, condição que caracteriza o sistema de aquecimento ativo. Em outras palavras, conforme há entrada de radiação no absorvedor, a água aquecida é bombeada para o reservatório térmico constantemente, dessa forma, o sistema troca calor continuamente, tendendo a manter um equilíbrio térmico entre o absorvedor e o reservatório térmico. No entanto, há certa diferença marcada pela superioridade da temperatura atingida pelo sensor T2, o qual se localiza na parte superior do reservatório (apesar do sistema operar de forma ativa e com baixa vazão) e sofre influência da relação de densidade e temperatura.

Por fim, é evidente neste processo de aquecimento a ausência de estratificação térmica, fato que se explica devido a manutenção da vazão de água ocasionada pelo bombeamento constante.

4.3.4 Cenário 4 (A12E)

A Figura 68 mostra o resultado do ensaio referente ao Cenário 4, o qual se refere ao sistema de aquecimento ativo com orientação solar fixa e bombeamento contínuo de água ($4\text{L}\cdot\text{m}^{-1}$). O ensaio foi realizado no dia 8 de dezembro de 2015.

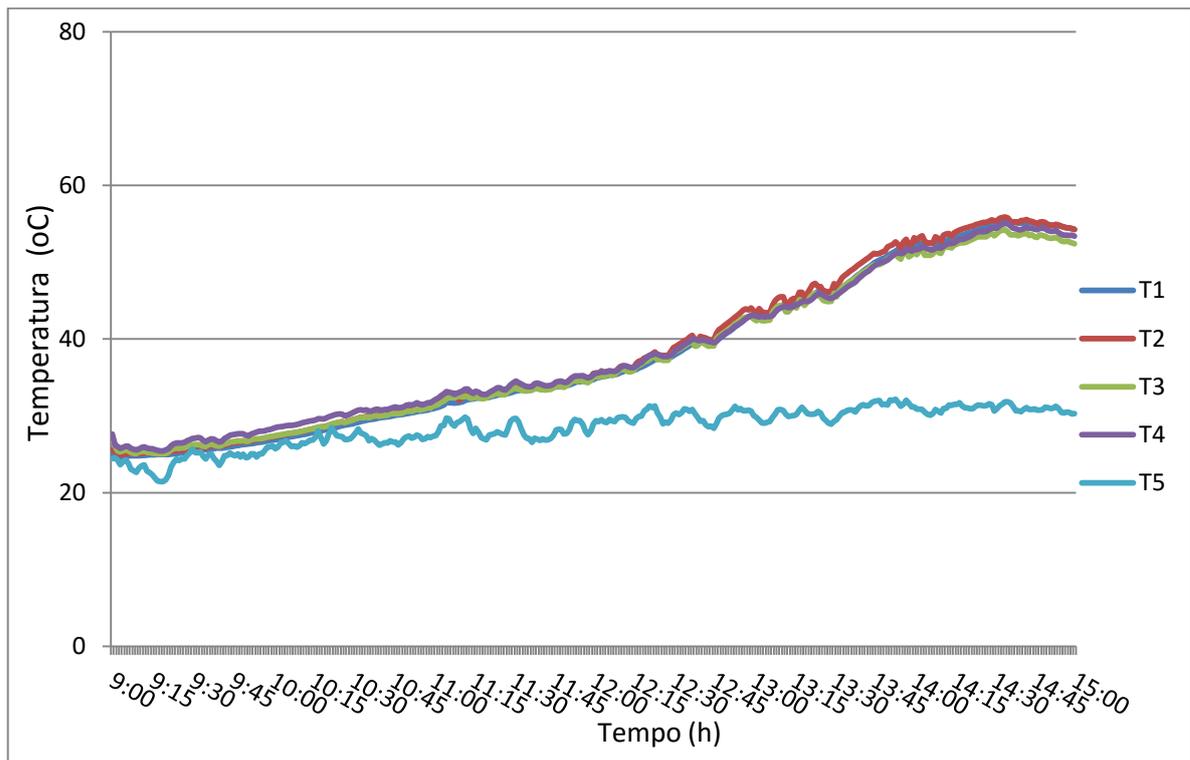


Figura 68: Resultados do ensaio do Cenário 4.

Na Figura 68, é notável a proximidade dos valores registrados das temperaturas de todos os sensores, exceto os valores de temperatura ambiente (T5). Todavia, percebe-se que a temperatura da água foi aumentando gradativamente conforme o aumento da energia solar incidente no concentrador. Entretanto, a proximidade dos valores apresentados ocorre devido ao sistema de aquecimento operar de forma ativa, ou seja, com bombeamento de água contínuo. Desta forma, conforme há entrada de energia no absorvedor, o calor é transferido para o fluido (água), o qual circula continuamente pelo circuito hidráulico, trocando energia térmica entre o absorvedor e o reservatório térmico, apresentando pouca variação dos valores de temperatura medida pelos sensores.

Ainda em relação a Figura 68, observa-se que apesar da proximidade dos valores dos sensores de temperatura da água, na primeira metade do ensaio há um pequeno destaque no sensor T4, por apresentar maiores valores de temperatura do que os demais. Entretanto, na segunda metade do ensaio, os valores de temperatura do sensor T2 superam tal consideração, talvez em função da presença de isolamento térmico no reservatório. Da mesma forma que ocorre no Cenário 3, há uma diminuição considerável na estratificação térmica devido ao sistema operar de forma ativa.

4.3.5 Cenário 5 (A24S)

O cenário 5 caracteriza-se pelo aquecimento solar ativo com seguidor solar e vazão mássica de água de $6\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$. O ensaio foi realizado no dia 16 de janeiro de 2016. A Figura 69 apresenta o resultado do ensaio.

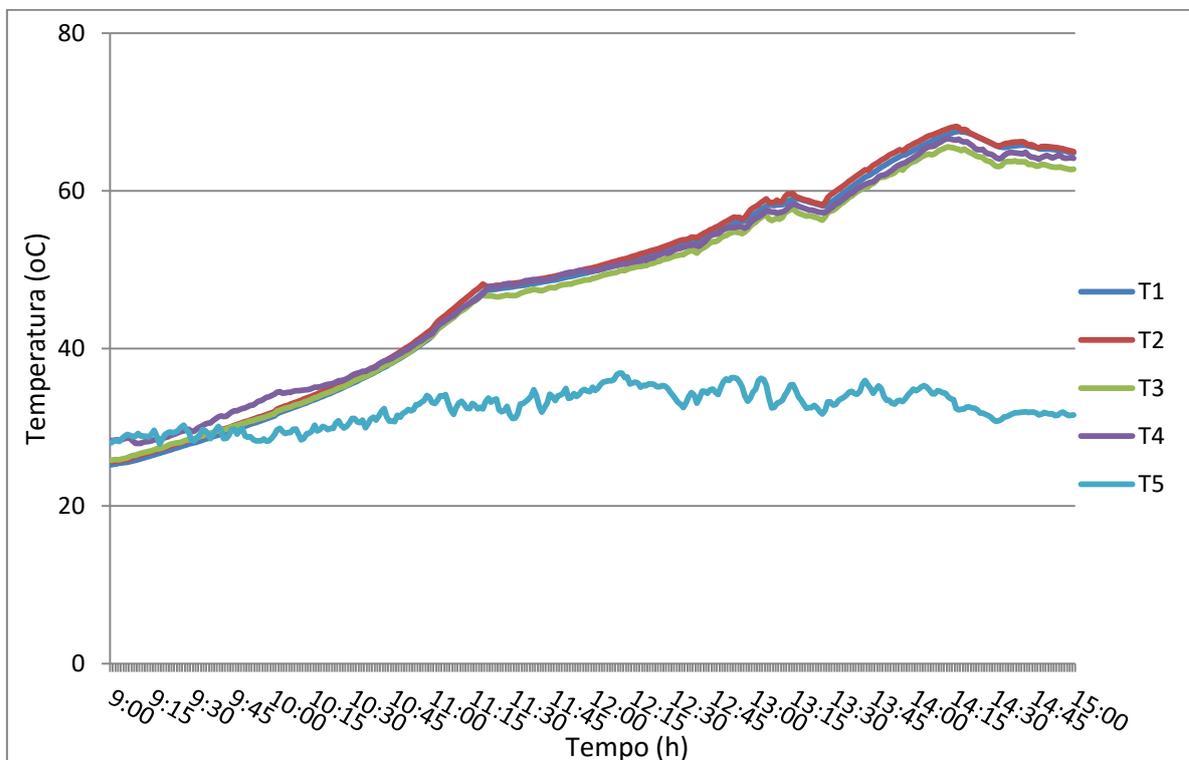


Figura 69: Resultados do ensaio do Cenário 4.

De acordo com a Figura 69, observa-se na distribuição dos valores de temperatura da água um comportamento semelhante ao apresentado no cenário 3. Entretanto, neste cenário ficam mais evidentes os picos de temperatura ascendentes ao longo do ensaio (11:15, 13:15 e 14:15). Tais picos de temperaturas marcam os intervalos onde houve variação no ângulo azimutal do coletor, onde cada pico mostra o ápice de reflexão solar naquele horário. Apesar da radiação solar não ser constante no período de ensaio, percebe-se pela variação dos valores de temperatura ambiente (T_5), uma tendência crescente, a qual teve uma pequena queda na última hora de ensaio. Tal consideração exemplifica que as quedas depois de cada pico não ocorreram devido a sombreamento por nuvens e sim pela mudança na posição azimutal do coletor proporcionando maior reflexão no absorvedor.

4.3.6 Cenário 6 (A24E)

O Cenário 6 caracteriza-se como um sistema de aquecimento ativo, e difere apenas do Cenário 4 por operar com vazão mássica superior, com valor de fluxo de água de aproximadamente $6\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$. A Figura 70 apresenta o resultado do ensaio realizado no dia 22 de dezembro de 2015.

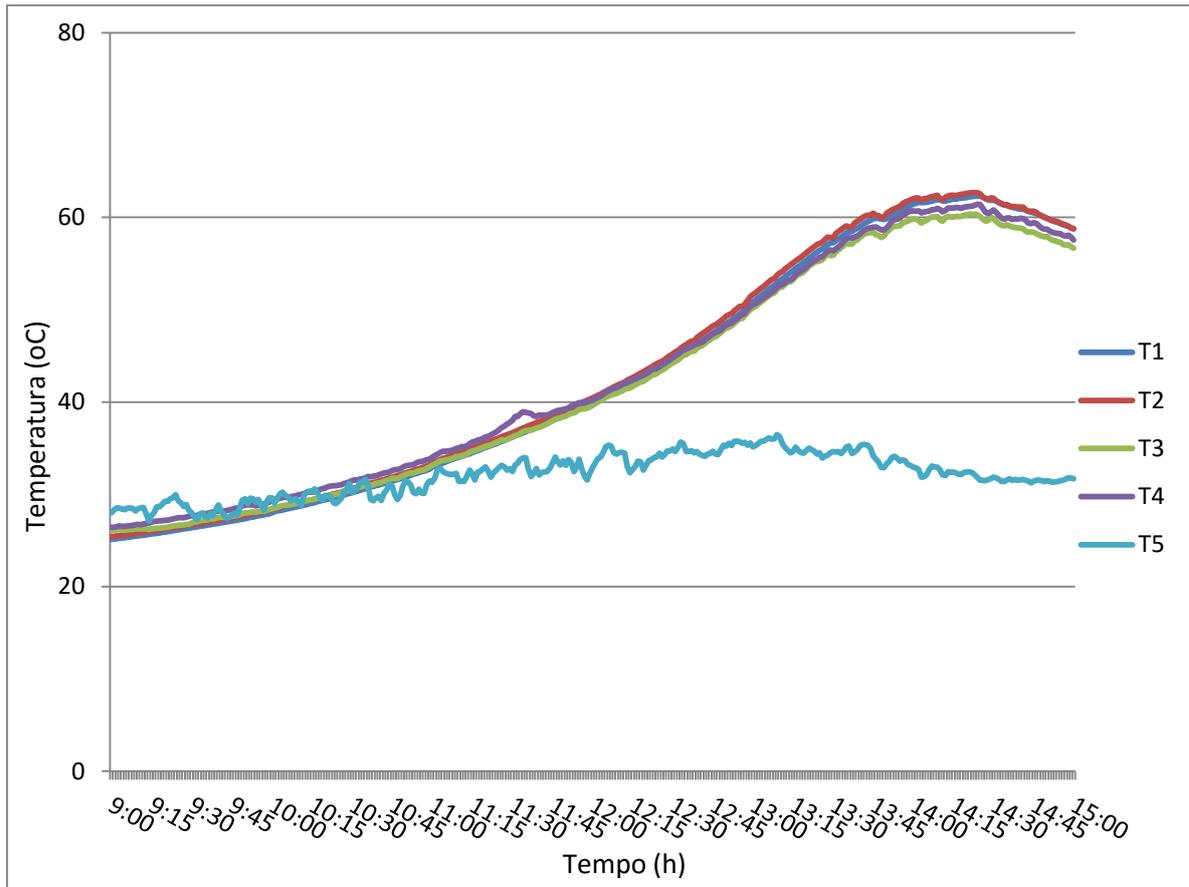


Figura 70: Resultados do ensaio do Cenário 6.

A partir dos resultados mostrados na Figura 70, observa-se certa semelhança quanto à distribuição dos dados apresentados no Cenário 4. De um modo geral, os valores de temperatura do Cenário 6 apresentam continuidade com poucas variações desde o início até o término do ensaio. De modo semelhante ao destacado no Cenário 4, primeiramente os valores de maior temperatura da água são ressaltados pelo sensor T4 e posteriormente supridos pela superioridade do sensor T2. Todavia, vale ressaltar que os valores de temperatura atingidos por T2 são significativos, atingindo números acima de 60°C, da mesma forma como acontece com todos os demais sensores na última hora do ensaio.

4.4 Comparação dos Cenários

4.4.1 Radiação Solar

Ao longo de todos os ensaios realizados, a radiação solar foi o fator principal que influenciou diretamente no ganho de energia térmica da água nos sistemas de aquecimento solar. A Figura 71 apresenta os valores de radiação solar acumulada para todos os cenários avaliados.

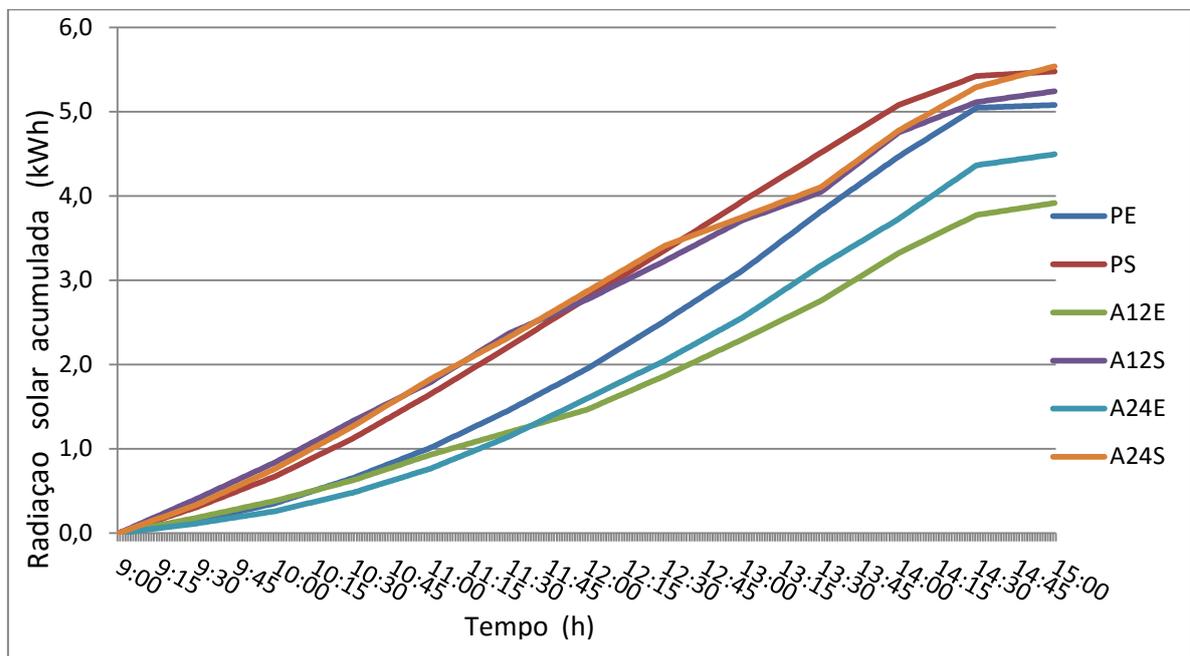


Figura 71: Radiação solar acumulada para todos os Cenários.

Na Figura 71, nota-se que os valores de radiação solar incidente no coletor solar apresentam-se próximos aos índices de radiação global previstos para o território brasileiro, os quais variam de 4,25 – 6,5 kWh.m⁻² (PEREIRA et al., 2006). Dentro deste contexto, observa-se que os maiores índices de energia solar foram obtidos nos sistemas com seguidor solar (PS, A12S e A24S), apresentando maior valor no Cenário 5 (A24S). Como os ensaios foram realizados em dias predominantemente ensolarados e num período de três meses, houve pouca influência da sazonalidade no decorrer dos ensaios.

Todavia, é notável na Figura 71 que os índices de radiação solar acumulada foram menores nos cenários com orientação solar fixa ou estacionária (PE, A12E e A24E). Isto se deve ao fato do concentrador solar estar orientado em uma posição

otimizada para receber radiação em um período específico do dia, ou seja, apenas no período com maior índice de radiação solar (meio dia). Dessa forma, a radiação solar é melhor aproveitada nos períodos que coincidem a orientação do concentrador solar com a posição dos ângulos solares.

4.4.2 Energia Útil

A Energia Útil considerada nos ensaios de aquecimento de água é referente ao calor aproveitado pelo fluido. Em outras palavras, é a energia térmica aproveitada pela água proveniente da radiação solar incidente no concentrador. A Figura 72 apresenta o comportamento da Energia Útil para todos os cenários.

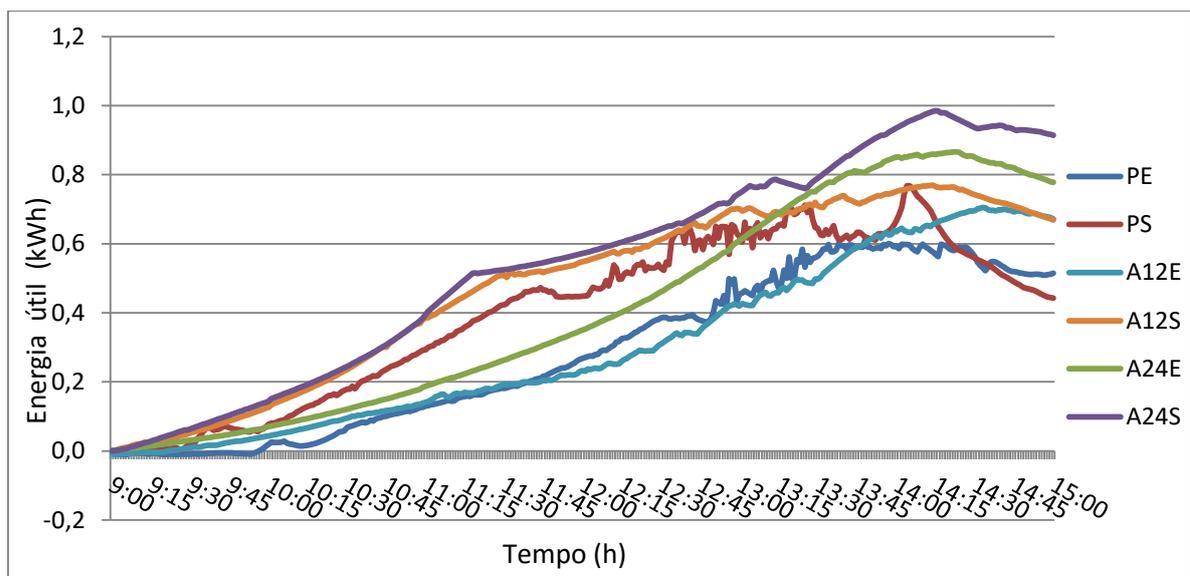


Figura 72: Energia Útil em todos os cenários.

De acordo com a Figura 72, considerando o comportamento do ganho de energia térmica ao longo do período ensaiado, observa-se que mesmo alguns cenários apresentando valores maiores ao final dos ensaios, os sistemas com seguidor solar apresentaram na maior parte do tempo superioridade no aproveitamento energético em relação aos sistemas estacionários. Dentro deste escopo, pode-se perceber que o sistema A24S>A12S>PS no quesito ganho de energia térmica. Quanto aos sistemas estacionários, o sistema com maior ganho de

calor foi o sistema A24E, ao passo que os demais (A12E e PE) tiveram um ganho de energia semelhante.

Conforme apresentado na Figura 72, pode-se perceber que em relação ao sistema de aquecimento, os cenários ativos (bombeamento de água) apresentaram valores de Energia Útil maiores do que os sistemas passivos (operados com termossifão). De um modo geral, esta relação se mostrou evidente tanto nos sistemas com seguidor solar quanto nos estacionários, com exceção do sistema A12E e PE que apresentaram ganhos de energia com índices semelhantes.

4.4.3 Eficiência dos sistemas

As eficiências dos sistemas (obtidas pela Equação 1) foram separadas em dois grupos, eficiências dos sistemas com seguidor solar e sistemas com orientação solar estacionária. A Figura 73 apresenta o comportamento das eficiências nos sistemas com seguidor solar.

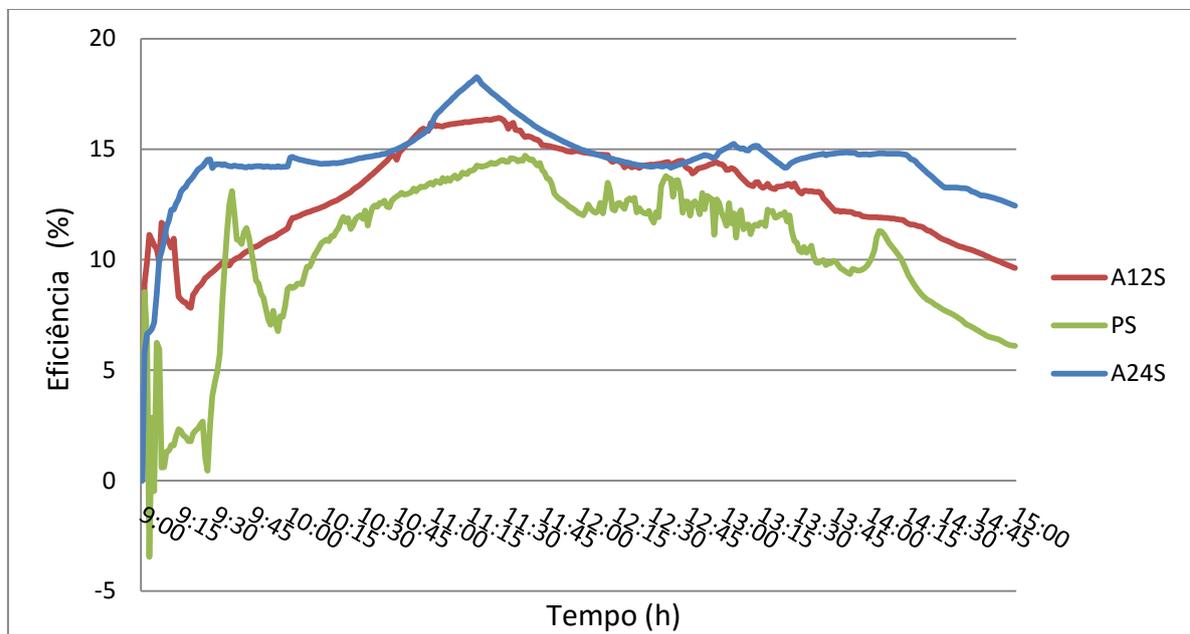


Figura 73: Comportamento das eficiências nos cenários com seguidor solar.

De acordo com a Figura 73, é notável que os cenários compostos por sistemas de aquecimento solar ativo são mais eficientes do que os sistemas

passivos. Outro fator importante, é que em sistemas de aquecimento ativo a estratificação térmica é reduzida drasticamente a ponto de ser praticamente nula. Dessa forma, conforme constatado por Hussain e Lee (2014) em um coletor solar cônico, a vazão mássica é diretamente proporcional a eficiência do sistema até um valor crítico ($6 \text{ L}\cdot\text{min}^{-2}$) e ainda é inversamente proporcional a estratificação térmica. Ainda, em relação a Figura 73, destaca-se que o sistema com maior valor de vazão mássica apresenta maior eficiência, ou seja, a eficiência no sistema $A24S > A12S > PS$. Os valores médios de eficiência foram 14,53; 12,93 e 10,42% e apresentaram eficiência máxima de 18,26; 16,41 e 14,70% respectivamente para os sistemas A24S, A12S e PS.

Apesar dos valores de eficiência média apresentados serem relativamente baixos, em um experimento usando um coletor solar com concentrador cônico, sob sistema ativo e seguidor solar para aquecimento de água, Kaiyan (2009) obteve um valor médio de eficiência próximo de 22%. Todavia, os valores de eficiência aqui discutidos provém de experimentos de sistemas com fins de pesquisa, os quais não foram fabricados com precisos processos industriais.

A Figura 74 apresenta o resultado das eficiências para os sistemas ensaiados com orientação solar fixa.

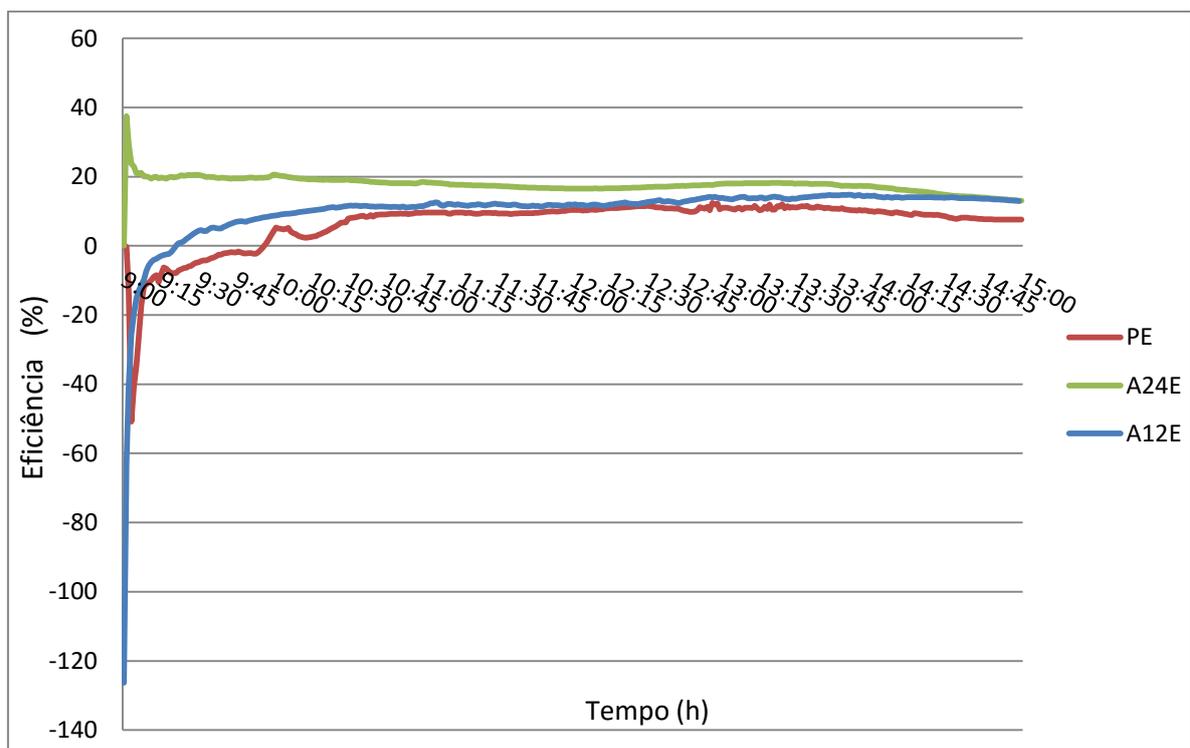


Figura 74: Comportamento das eficiências nos cenários com orientação solar fixa.

Segundo observado na Figura 74, a hierarquia das eficiências nos sistemas com orientação solar fixa segue a mesma tendência dos sistemas com seguidor solar. Em outras palavras, os sistemas que apresentam valores maiores de vazão mássica foram mais eficientes. Vale ressaltar que a eficiência nos sistemas com orientação fixa apresentaram menores variações ao longo do tempo, comparado com os sistemas operados com seguidor solar. Os valores médios de eficiência apresentados na Figura 74 foram 17,69; 10,05 e 6,59% e apresentaram eficiência máxima de 37,54; 14,82 e 12,38% respectivamente para os sistemas A24E, A12E e PE.

Todavia, no que diz respeito a eficiência de todos os cenários ensaiados, verifica-se que os sistemas com seguidor solar apresentaram valores maiores de eficiência média e máxima em relação aos sistemas com orientação fixa, com exceção do sistema A24S.

Sabendo-se que a eficiência é uma relação entre energia útil e radiação solar acumulada, percebe-se, nas Figuras 71 e 72, que a radiação solar aproveitada pelo sistema A24S é maior que a aproveitada pelo sistema A24E. No entanto, os ganhos de energia útil, embora apresentem a mesma tendência ($A24S > A24E$), não são tão expressivos quanto a radiação solar aproveitada.

As perdas de calor que ocorrem nos sistemas de aquecimento avaliados, responsáveis pelas baixas eficiências, são decorrentes da falta de isolamento térmico adequado no reservatório e nas tubulações.

Por fim, uma tabela resumo é apresentada na Tabela B.1 (Apêndice B) mostrando os valores de energia útil, radiação solar e eficiência para todos os cenários a cada 30 minutos.

CONCLUSÕES

O coletor solar proposto neste trabalho mostrou-se tecnicamente viável para o aquecimento de água, atingindo temperaturas consideráveis para uso em pequenas propriedades rurais e principalmente para uso residencial. Em termos gerais, considerando as variáveis analisadas e os resultados obtidos conclui-se que:

- i) A geometria do conjunto concentrador e absorvedor foi efetiva apresentando ganhos de energia térmica para o fluido mesmo em período onde o plano de captação do concentrador não esteja perpendicular a direção do fluxo dos raios solares incidentes;
- ii) Sistemas de aquecimento solar de água operados com seguidor solar apresentam maior eficiência em relação aos sistemas estacionários;
- iii) Sistemas de aquecimento solar ativos são mais eficientes do que os sistemas passivos operados por termossifão;
- iv) Pode-se aumentar eficiência dos sistemas de aquecimento solar ativo elevando-se a vazão mássica até um valor crítico;
- v) Coletores concentradores cônicos estacionários, apesar de apresentarem baixa eficiência são efetivos para aquecimento de água atingindo temperaturas acima de 60°C.

Recomenda-se para trabalhos futuros:

- i) Avaliar a eficiência de um coletor solar cônico com seguidor solar automatizado;
- ii) Estudar a geometria do concentrador cônico para outros ângulos;
- iii) Analisar o comportamento da eficiência térmica para uma ampla faixa de fluxos de água;
- iv) Simulação do comportamento ótico de concentradores solares estacionários com softwares pertinentes.

REFERÊNCIAS

AGENEAL - Agência Municipal de Energia de Almadas. Disponível em: <<http://www.ageneal.pt/content01.asp?BTreeID=00/01&treeID=00/01&newsID=8>>. Acesso em: 5 de jul. 2014.

ALDABÓ, R. **Energia solar**. São Paulo: Artliber, 2002. 155 p.

ALI, I. M. S.; O'DONOVAN, T. S.; MALLICK, T. K; REDDY, K. S. **Optical performance of circular and elliptical 3-d estatic solar concentrator**. American Solar Energy Society Conference, 2012. Disponível em: <https://ases.conference-services.net/resources/252/2859/pdf/SOLAR2012_0388_full%20paper.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2015.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Energia solar**. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf)>. Acesso em: 5 de jul. 2014.

BALGHOUTHY, M.; ALI, A. B. H.; TRABELSI, S. E.; GUIZANI, A. Optical and termal evaluations of a medium temperature parabolic trough solar collector used in a cooling installation. **Conversion and Management**, v. 86, p.1134-1146. 2014.

BASSO, L. H.; SOUZA, S. N. M.; SIQUEIRA, J. A. C.; NOGUEIRA, C. E. C.; SANTOS, R. E. Análise de um sistema de aquecimento de água para residências rurais, utilizando energia solar. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n.1, p.14-21. 2010.

BEARDMORE, J. (Coord.). **Solar Water Heating and dairy farming** – potencial in the peak distriickt national park. Disponível em: <<http://www.t4sustainability.co.uk/downloads/DairySolar0062LoRes.pdf>>. Acesso em: 15 de jun. 2015.

BRANCO, M. S. **Energia e meio ambiente**. 15ª ed. São Paulo: Moderna, 1993. 96 p.

COBBLE, M. H. Analysis of a conical solar concentrator. **Solar energy**, v. 7, n.2, p. 75-78. 1963.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Energia Solar: Princípios e Aplicações**; CEPEL, 2006, 26 p.

DARKOPTIMISM. **Concentrating Solar Thermal Power (CSP)**. Disponível em: <<http://www.darkoptimism.org/2008/05/19/concentrating-solar-thermal-power-csp/>>. Acesso em: 5 de jun. 2015.

DGS, 2005. **Planning and installing solar termal systems**: a guide for installers, architects, and engineers. Deutsche Gesellschaft für Sinnenenergie (German Solar Energy Society), James & James Ltd, UK and USA.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 3^a ed. Hoboken: Wiley, 2006. p. 908.

EL-REFAIE, M. F. Theoretical analysis of the performance of a conical solar concentrator. **Applied Energy**, v. 12, p. 37-51. 1982.

EPE - Empresas de Pesquisa Energética. **BEN - Balanço Energético Nacional: Relatório final 2012**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf. Acesso em: 4 de jul. 2014.

_____. **BEN - Balanço Energético Nacional 2014: relatório síntese**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioSintese2014.aspx>>. Acesso em: 04 de jun. 2015.

FERNÁNDEZ-GÁRCIA, A.; ZARZA, E.; VALENZUELA, L.; PÉREZ, M. Parabolic-trough solar collectors and their applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 1695-1721. 2010.

GLOBAL NEVADACORP. **Global NevadaCorp – Las Vegas Corporate Headquarters**. Disponível em: < <http://globalnvcorp.com/divisions/energy/solar>>. Acesso em: 05 de jun. 2015.

GOLDEMBERG, J. **Energia e desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Blucher, 2010. 94 p. v.4: Série sustentabilidade.

HERNÁNDEZ, N.; RIVEROS-ROSAS, D.; VENEGAS, E.; DORANTES, R. J.; ROJAS-MORÍN, A.; JARAMILO, O. A.; ARANCIBIA-BULNES, A. ESTRADA, C. A. Conical receiver for a paraboloidal concentrator with large rim angle. **Sciverse ScienceDirect**, v. 86, p. 1053-1062. 2012.

HINRICHS, A. R.; KLEINBACH, M.; REIS, Lineu Belico dos. **Energia e meio ambiente**. 4. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010. 708 p.

HUSSAIN, M. I.; LEE, G. H. Thermal performance evaluation of a conical solar water heater integrated with a thermal storage system. **Energy Conversion and Management**, v. 87, p. 267-273. 2014.

IAPAR - Instituto agrônômico do Paraná. Disponível em: <http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Francisco_Beltrao.htm>. Acesso em: 9 de jul. 2014.

INSTRUTHERM. Equipamentos de medição Ltda. Disponível em: < <http://www.instrutherm.com.br/>>. Acesso em: 5 de jun. 2015.

KAIYAN, H.; HOGFEI, Z.; TAO, T.; XIAODI, X. Experimental investigation of high temperature congregating energy solar stove with sun light funnel. **Energy Conversion and Management**, v. 50, p. 3051-3055. 2009.

KALOGIROU, S. **Solar energy engineering: processes and systems**. San Diego: Elsevier, 2009. p. 756.

LUIZ, A. M. **Energia solar e preservação do meio ambiente**. São Paulo: LF editorial, 2013. 255 p.

MACHADO, P. F. **Controle sanitário de ordenha**. Disponível em: <http://www.megaagro.com.br/lecheria/art_control_sanit.asp>. Acesso em: 5 de jun. 2015.

MEDEIROS, M.; NOGUEIRA, C. E. C.; SIQUEIRA, J. A. C.; LAWDER, H.; SOUZA, S. N. M.; FRACARO, G. P. M. Optimizing a mixed water heating system (solar and eletrick) for rural áreas. **Revista Acta Scientiarum**, v. 35, n.1, p. 69-74. 2013.

MEHMET, E. Thermal performance of a solar cooker integrated vacuum-tube collector with heat pipes containing different refrigerants. **Solar Energy**, v. 76, p. 751-757. 2004.

MOUSAZADEH, H.; KEYHANI, A.; JAVADI, A.; MOBILI, H.; ABRINIA, K.; SHARIFI, A. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13(8), p. 1800–1818. 2009.

MOURÃO, R. R. F. **Sol e energia no terceiro milênio**. São Paulo: Scipione, 2007. 114 p.

ORTIZ, L. S. (Coord.). **Energias renováveis sustentáveis: uso e gestão participativa no meio rural**. Porto Alegre: Núcleo Amigos da Terra, 2005. 68 p.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RUTHER, R. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. 60 p.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. CEPEL, 2014. 530 p.

REN21 – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. **Renewable 2014: Global status report**. Paris: REN21 Secretariat, 2014. 216p.

RENEWABLE POWER NEWS 2009. **DII GmbH, a radical emerge and initiative for sustainable solar energy**. Disponível em: <<http://renewablepowernews.com/archives/422/>>. Acesso em: 10 de jul. 2014.

RUSTEMLI, S.; DINCER, F.; UNAL, E.; KARAASLAN, M.; SABAH, C. The analysis on sun tracking and cooling systems for fotovoltaic panels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 598-603. 2013.

RUSTEMLI, S.; DINCADAM, F.; DEMIRTAS, M. Performance comparison of the sun tracking system and fixed system in the application of heating and lighting. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 35, p. 171–183. 2010.

SEDONA. Types of mounting-systems. Disponível em: <<http://sedonasolartechnology.com/types-of-mounting-systems/>>. Acesso em: 9 de abr. 2015.

SHARAF, E. A new design for an economical, highly efficient, conical solar cooker. **Renewable Energy**, v. 27, p. 599-619. 2002.

STANFORD, S. **Heating water on dairy farms**. University of wisconsin extension, Madison, 2003. 4 p.

TOGRUL, I. T.; PEHLIVAN, D. The performance of a solar air heater with conical concentrator under forced convection. **Internationa Journal of Thermal Science**, v. 42, p. 571-581. 2003.

TONIAZZO, F.; GHIZZI, M. C. **O emprego do coletor solar de funil como sistema de pré aquecimento de água de caldeiras industriais**. Pato Branco, 2011. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Tecnologia em manutenção industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011).

VECCHIA, R. O. **O meio ambiente e as energias renováveis: instrumentos de liderança visionária para a sociedade sustentável**. Barueri: Manole, 2010. 334 p.

WIJEYSUNDERA, N. E. Effect of angular misorientation on the performance of conical, spherical and parabolic solar concentrator. **Solar Energy**, v. 19, p. 583-588. 1977.

WALISIEWICZ, M. **Energia alternativa: solar, eólica, hidrelétrica e de biocombustíveis**. São Paulo: Publifolha, 2008. 72 p.

XIÃO, X.; ZHANG, P.; SHAO, D. D.; LI, M. Experimental and numerical heat transfer analysis of a V-cavity absorber for linear parabolic trough solar collector. **Energy Conversion and Management**, v. 86, p.49-59. 2014.

XIAODI, X.; HONGFEI, Z.; KAIYAN, H.; ZHILI, C.; TAO, T.; GUO, X. Experimental study on a new solar boiling water system with holistic track solar funnel concentrator. **Energy**, v. 35, p. 692-697. 2010.

XIARCHOS, I. M.; VICK, B. **Solar energy use in U.S. agriculture: overview and policy issues**. Washington: U.S. department of agriculture (USDA), 2011. 94 p.

YE, Z.; NOBRE, A., REINDL, T., LUTHER, J., REISE, C. On PV module temperatures in tropical regions. **Solar Energy**, v. 88, p. 80-87. 2013.

ZAHEDI, A. Review of modeling details in relation to low-concentration solar concentrating photovoltaic. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 1609-1614. 2011.

ZHENG, H.; WU, G.; TAO, T.; SU, Y.; DAI, J. Combination of a light funnel concentrator with a deflector for oriented sunlight transmission. **Energy Conversion and Management**, v. 88, p. 785-793. 2014.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Dimensões estruturais e geométricas do coletor solar de funil (cm)

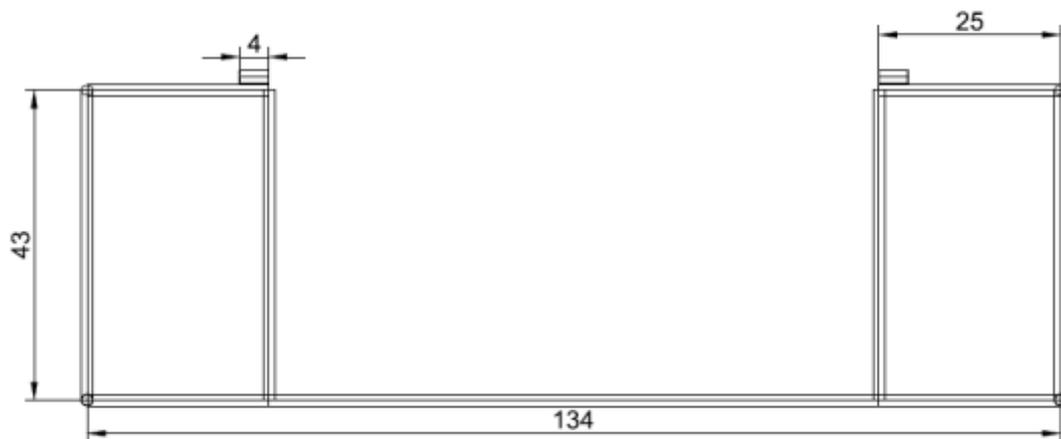


Figura A.1 – Vista frontal da estrutura de suporte do coletor solar (cm).
Fonte: Acervo do autor.

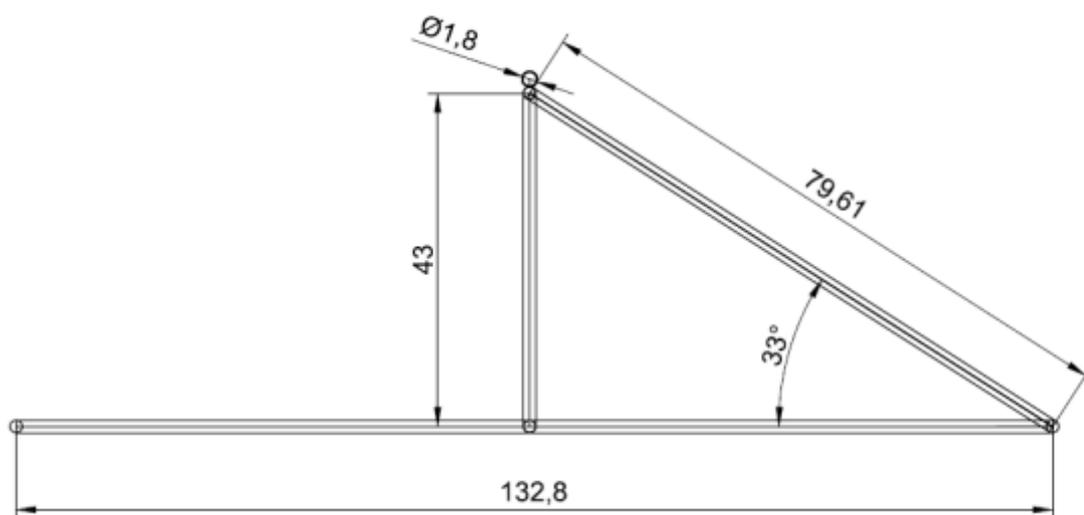


Figura A.2 – Vista lateral da estrutura de suporte do coletor solar.
Fonte: Acervo do autor.

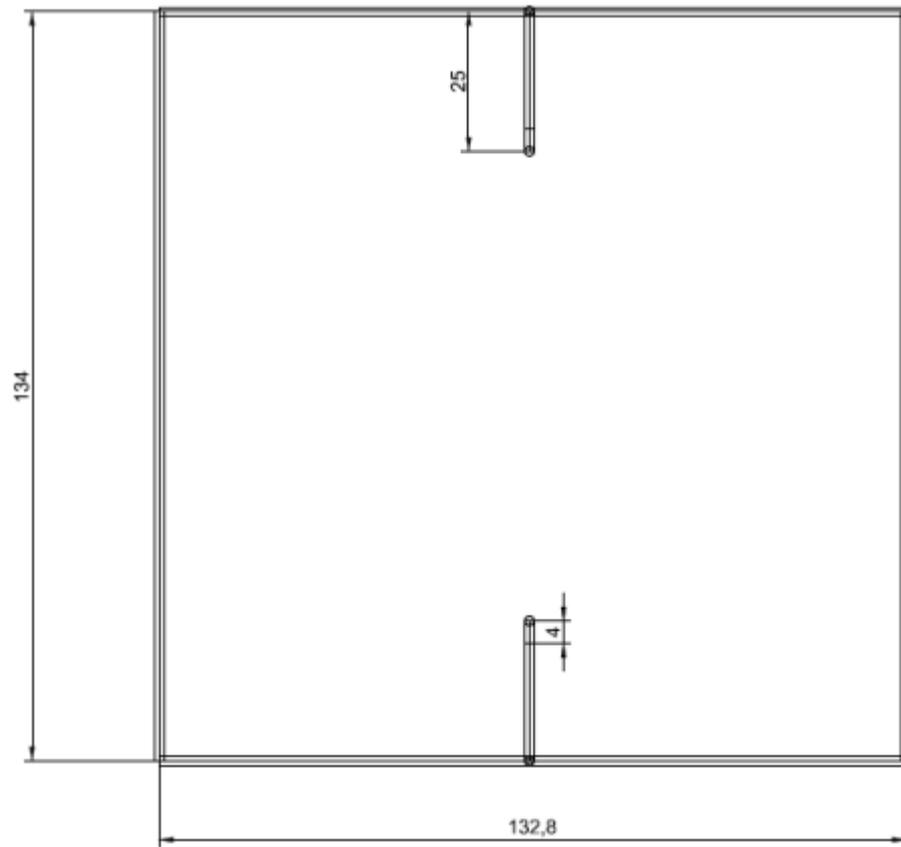


Figura A.3 – Vista superior da estrutura de suporte do coletor solar.
Fonte: Acervo do autor.

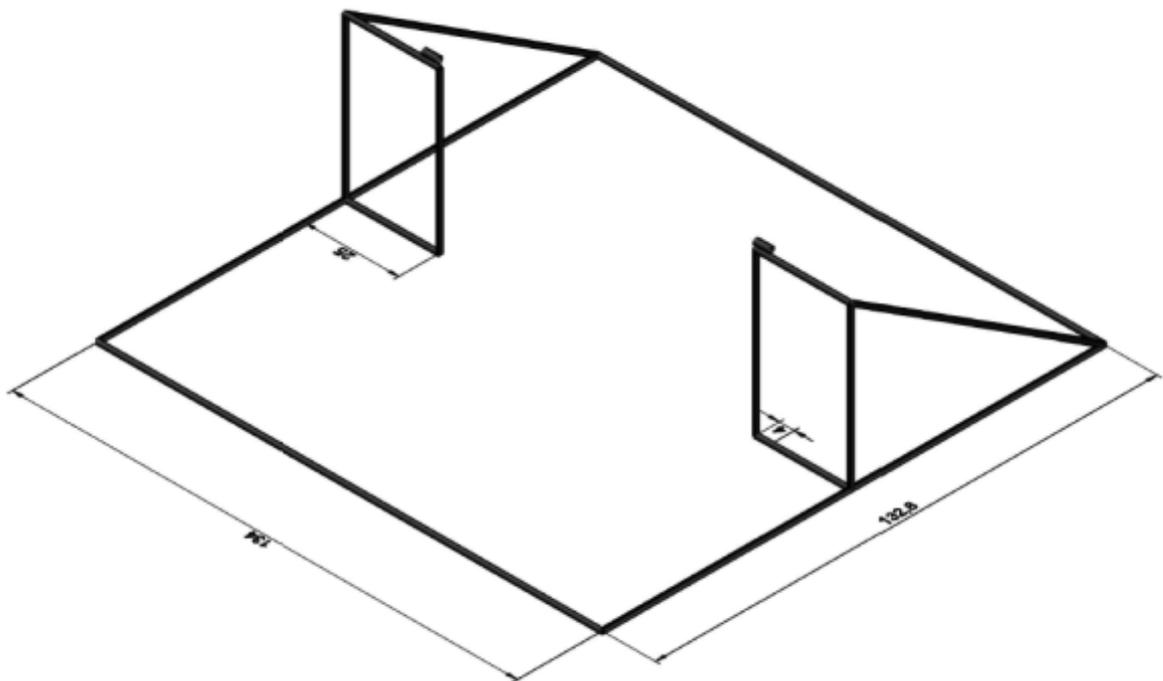


Figura A.4 – Vista 3D da estrutura de suporte do coletor solar.
Fonte: Acervo do autor.

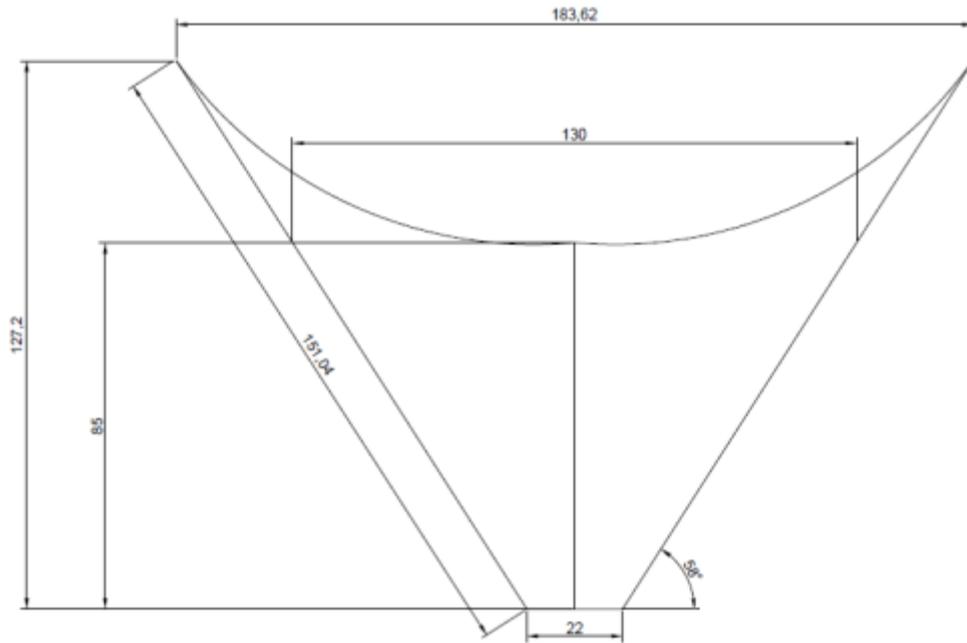


Figura A.5 – Dimensões de cone usado como concentrador solar.
Fonte: Acervo do autor.

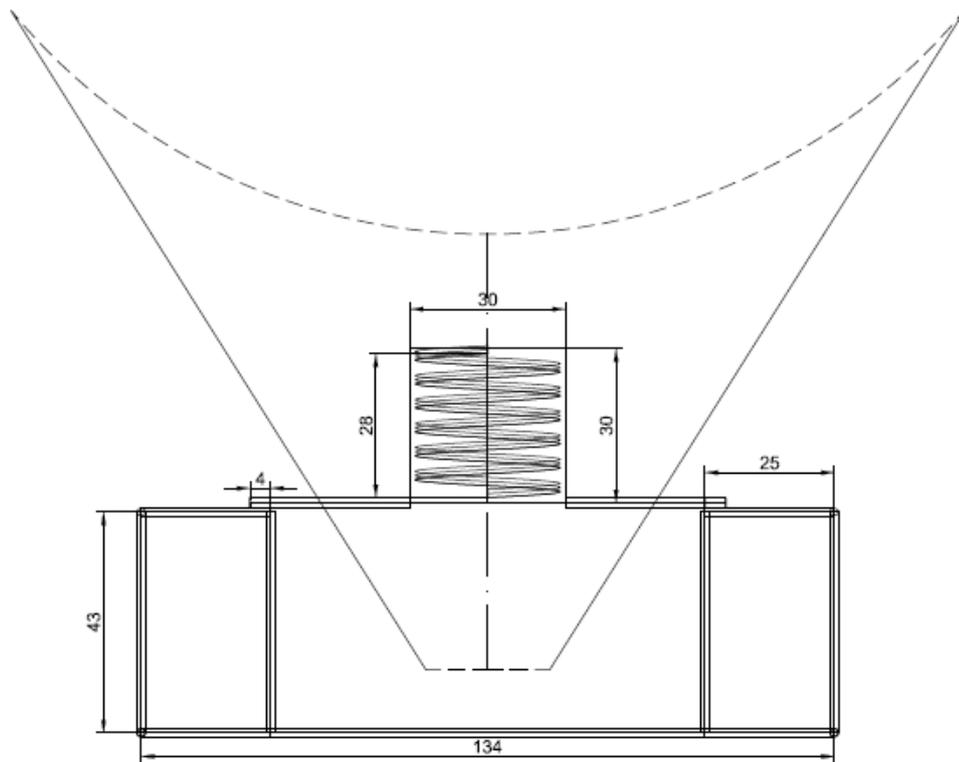


Figura A.6 – Coletor solar de funil com cotas do absorvedor.
Fonte: Acervo do autor.

APÊNDICE B – Tabelas resumo

Tabela B.1 – Valores de Energia Útil, Radiação Solar Acumulada e Eficiência nos sistemas com seguidor solar.

Hora	Cenário 1			Cenário 3			Cenário 5		
	Q (kWh)	R (kWh)	η (%)	Q (kWh)	R (kWh)	η (%)	Q (kWh)	R (kWh)	η (%)
09:30	0,018	0,308	4,47	0,051	0,407	9,54	0,063	0,336	14,30
10:00	0,077	0,671	8,68	0,126	0,837	11,41	0,143	0,761	14,22
10:30	0,178	1,122	12,01	0,235	1,327	13,39	0,245	1,265	14,60
11:00	0,293	1,650	13,39	0,385	1,793	16,19	0,395	1,829	16,29
11:30	0,423	2,211	14,43	0,508	2,368	16,19	0,524	2,321	17,04
12:00	0,447	2,786	12,11	0,547	2,769	14,91	0,571	2,865	15,04
12:30	0,529	3,355	11,89	0,612	3,228	14,30	0,642	3,410	14,21
13:00	0,620	3,930	11,88	0,701	3,712	14,24	0,746	3,751	14,99
13:30	0,644	4,510	10,77	0,709	4,404	13,23	0,789	4,103	14,51
14:00	0,666	5,078	8,89	0,751	4,752	11,92	0,935	4,776	14,75
14:30	0,558	5,423	7,76	0,741	5,113	10,93	0,936	5,292	13,33
15:00	0,442	5,478	6,09	0,669	5,242	9,62	0,914	5,538	12,44
Média			10,42			12,93			14,53
Máx			14,70			16,41			18,26

Tabela B.2 – Valores de Energia Útil, Radiação Solar Acumulada e Eficiência nos sistemas com orientação solar fixa.

Hora	Cenário 2			Cenário 4			Cenário 6		
	Q (kWh)	R (kWh)	η (%)	Q (kWh)	R (kWh)	η (%)	Q (kWh)	R (kWh)	η (%)
09:30	-0,009	0,143	-4,78	0,009	0,181	4,00	0,031	0,114	20,51
10:00	0,019	0,352	4,20	0,043	0,381	8,59	0,070	0,258	20,61
10:30	0,067	0,652	7,85	0,095	0,624	11,47	0,121	0,478	19,11
11:00	0,129	1,013	9,66	0,141	0,930	11,47	0,187	0,765	18,44
11:30	0,181	1,455	9,39	0,193	1,196	12,21	0,263	1,144	17,33
12:00	0,267	1,947	10,36	0,232	1,463	11,98	0,349	1,595	16,53
12:30	0,384	2,516	11,53	0,309	1,864	12,52	0,460	2,046	16,97
13:00	0,453	3,116	10,97	0,419	2,299	13,75	0,609	2,557	17,95
13:30	0,563	3,912	11,15	0,497	2,753	13,62	0,758	3,171	18,02
14:00	0,592	4,467	10,00	0,634	3,322	14,40	0,850	3,726	17,20
14:30	0,562	5,046	8,40	0,695	3,774	13,89	0,850	4,364	14,68
15:00	0,514	5,079	7,63	0,672	3,916	12,94	0,777	4,494	13,04
Média			6,59			10,05			17,69
Máx			12,38			14,82			37,54

APÊNDICE C – Coletor solar com sistema passivo



Figura C.1 – Coletor solar com sistema passivo.