



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

STÉPHANO PRAXEDES MENDONÇA

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM COLETOR DE CALHA PARABÓLICA PARA
DIFERENTES TUBOS ABSORVEDORES**

FORTALEZA
2019

STÉPHANO PRAXEDES MENDONÇA

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM COLETOR DE CALHA PARABÓLICA PARA
DIFERENTES TUBOS ABSORVEDORES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos, equipamentos e sistemas para energias renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M497a Mendonça, Stéphanos Praxedes.
Análise de desempenho de um coletor de calha parabólica para diferentes tubos absorvedores /
Stéphanos Praxedes Mendonça. – 2019.
104 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.
1. Energia solar. 2. Coletor de Calha Parabólica. 3. Tubo absorvedor. I. Título.

CDD 620.1

STÉPHANO PRAXEDES MENDONÇA

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM COLETOR DE CALHA PARABÓLICA PARA
DIFERENTES TUBOS ABSORVEDORES

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em 18/07/2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. André Valente Bueno
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Douglas Bressan Riffel
Universidade Federal de Sergipe (UFS)

A Deus.

Aos meus pais, Maria Olinan e José Antenor.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me guiar e me abençoar todos os dias.

Aos meus pais Maria Olinan e José Antenor, por sempre estarem ao meu lado nos momentos difíceis e importantes da minha vida.

Ao Professor Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha, pela excelente orientação acadêmica, paciência e ensinamentos que levarei por toda a vida.

Aos professores participantes da banca examinadora Dr. André Valente Bueno e Dr. Douglas Bressan Riffel pelo tempo cedido, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos meus amigos Rogério Feliciano e Diego Caitano, pelas reflexões, críticas, sugestões e ajuda no desenvolvimento do trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Importante não é ver o que ninguém viu, mas sim, pensar o que ninguém pensou sobre algo que todo mundo vê.” (Arthur Schopenhauer)

RESUMO

As mudanças climáticas e o aumento nos preços do petróleo estão fazendo as fontes de energias renováveis entrarem no centro do interesse público. Dentre as fontes renováveis, a energia solar é a mais abundante. Há duas técnicas para aproveitamento direto da energia solar: conversão fotovoltaica e conversão térmica. Esta última utiliza coletores de radiação solar. O uso de técnicas de concentração de energia luminosa permite que coletores solares consigam trabalhar com elevadas temperaturas. O *Parabolic Trough Collector* (PTC) ou Coletor de Calha Parabólica consiste de um absorvedor, de uma cobertura transparente concêntrica e de uma placa refletora parabólica, sendo acoplado a um mecanismo de rastreamento. No presente projeto, utilizaram-se hardware da plataforma Arduino e *Light Dependent Resistors* (LDRs) ou Resistores Dependentes de Luz para o sistema de controle e um motor de passo para o sistema de atuação. Foi realizado um aprimoramento de um PTC de pequeno porte com rastreamento intermitente automático leste-oeste e manual norte-sul, através da modificação geométrica de tubos absorvedores na parte interna à parábola refletora. Uma análise da influência de diferentes áreas transversais, com diâmetros 12,7 mm (1/2 pol), 19,05 mm (3/4 pol), 22,225 mm (7/8 pol) e 28 mm, na eficiência térmica do sistema coletor de energia solar foi desenvolvida. Os resultados mostram aumento dos valores de eficiência térmica do PTC à medida que a área de secção transversal aumenta. Os acréscimos foram de 11,49% para o tubo de 19,05 mm, 24,50% para o tubo de 22,225 mm e 28,92% para o tubo 28 mm em relação ao tubo de 12,7 mm na vazão de 64 mL/min, considerando uma radiação solar direta média de 800 W/m². Os tubos fabricados foram submetidos a testes experimentais nas vazões de 50 mL/min, 75 mL/min e 100 mL/min, e as respectivas curvas características foram traçadas. Os acréscimos na eficiência térmica foram de 10,98% para o tubo de 19,05 mm, de 18,26% para o tubo de 22,225 mm e de 8,37% para o tubo de 28 mm com um aumento em 100% da vazão volumétrica de 50 mL/min para 100 mL/min, considerando uma radiação solar direta média de 800 W/m². Comparando as curvas características desta radiação dos tubos fabricados para obtenção de uma temperatura de saída de 60 °C para fins de desinfestação de água em áreas agrícolas e termoterapia de sementes, são observados acréscimos na eficiência térmica de 0,87% para o tubo de 22,225 mm e de 9,57% para o tubo de 28 mm em relação ao tubo de 19,05 mm.

Palavras-chave: Energia solar. Coletor de Calha Parabólica. Tubo absorvedor.

ABSTRACT

Climate change and rising oil prices are making renewable energy sources the center of public interest. Among renewable energy sources, solar energy is the most abundant. There are two main techniques for the direct use of solar energy: photovoltaic conversion and thermal conversion. The latter uses solar radiation collectors. The use of light energy concentration techniques allows solar collectors to be able to work at higher temperatures. The Parabolic Trough Collector (PTC) consists of an absorber, a transparent concentric cover and a parabolic reflector plate, and is coupled to a tracking mechanism. In the present project, the hardware of the Arduino platform and Light Dependent Resistors (LDRs) were used for the control system and a step motor for the actuation system. An improvement of a small PTC with automatic intermittent east-west tracking and manual north-south tracking was performed through the geometric modification of the absorber tubes inside the reflecting parabola. An analysis of the influence of different transversal areas, with diameters of 12.7 mm (1/2 in), 19.05 mm (3/4 in), 22.225 mm (7/8 in) and 28 mm, on the solar collector's thermal efficiency was developed. The results show an increase in PTC thermal efficiency values as the transversal area increases. The increases were 11.49% for the 19.05 mm tube, 24.50% for the 22.225 mm tube and 28.92% for the 28 mm tube compared to the 12.7 mm tube in a flow rate of 64 mL/min, considering an average direct solar radiation of 800 W/m². The manufactured tubes were submitted to experimental tests at flow rates of 50 mL/min, 75 mL/min and 100 mL/min, and their characteristic curves were plotted. The performance increases were 10.98% for the 19.05 mm tube, 18.26% for the 22.225 mm tube and 8.37% for the 28 mm tube with a 100% increase in the volumetric flow rate from 50 mL/min to 100 mL/min, considering an average direct solar radiation of 800 W/m². Comparing the characteristic curves of this radiation from the manufactured tubes to obtain an outlet temperature of 60 °C for water disinfection in agricultural areas and seed thermotherapy, the increases in thermal efficiency were 0.87% for the 22.225 mm tube and 9.57% for the 28 mm tube compared to the 19.05 mm tube.

Keywords: Solar Energy. Parabolic Trough Collector. Absorber tube.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Relação entre o Sol e a Terra	36
Figura 2	– Movimentação da Terra ao redor do Sol	36
Figura 3	– Principais ângulos solares e de superfície	39
Figura 4	– Atenuação da radiação solar ao atravessar a atmosfera	41
Figura 5	– Piranômetros utilizados para medição de radiação global e difusa	45
Figura 6	– Pireliômetro acoplado a um rastreador	45
Figura 7	– Representação da transmitância, absorptância e refletância	48
Figura 8	– Reflexão: (a) especular; (b) difusa; (c) real	48
Figura 9	– Características dos revestimentos de absorvedores	49
Figura 10	– Incidência de luz em um meio transparente	51
Figura 11	– Tipos de coletores solares	53
Figura 12	– Configuração de concentradores solares: (a) refletor difuso; (b) refletor especular; (c) refletor plano; (d) refletor parabólico; (e) refletor Fresnel; (f) matriz de heliostatos	54
Figura 13	– Composição de um Coletor de Calha Parabólica	55
Figura 14	– Aspectos construtivos de um PTC: (a) ângulo de borda; (b) ângulo de aceitação	63
Figura 15	– Caminho dos raios de luz em um concentrador em forma de cone	65
Figura 16	– Arduino UNO	67
Figura 17	– <i>Light Dependent Resistor</i>	68
Figura 18	– Disposição de sensores luminosos: (a) apontados para o Sol; (b) sensores inclinados; (c) uso de um colimador	68
Figura 19	– Aspectos construtivos do PTC	69
Figura 20	– Dimensões e distância entre furos no concentrador	69
Figura 21	– Projeto do PTC	70

Figura 22 – Tubos absorvedores	71
Figura 23 – Expansor e união	71
Figura 24 – Tubo revestido por cobertura de vidro	73
Figura 25 – Sistema instalado	74
Figura 26 – Dispositivos de atuação: (a) Motor; (b) Driver	74
Figura 27 – Arduino UNO	75
Figura 28 – Disposição dos LDRs	75
Figura 29 – Dispositivo de ajuste de inclinação	76
Figura 30 – Determinação do volume de controle	76
Figura 31 – Pireliômetro instalado no LESGN	77

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Dados de elevação de temperatura	29
Gráfico 2 – Comparação de dados observados e modelados com fatores naturais	29
Gráfico 3 – Comparação de dados observados e modelados com fatores naturais e humanos	30
Gráfico 4 – Oferta nacional de energia elétrica	33
Gráfico 5 – Comparação de emissões de CO ₂ entre usinas de geração de energia	34
Gráfico 6 – Diferença de temperaturas e dados de radiação solar direta (Tubo 0)	79
Gráfico 7 – Eficiência térmica ao longo do dia (Tubo 0)	80
Gráfico 8 – Eficiência térmica em relação à radiação solar direta (Tubo 0)	81
Gráfico 9 – Diferença de temperaturas e dados de radiação solar direta (Tubo 1)	81
Gráfico 10 – Eficiência térmica ao longo do dia (Tubo 1)	82
Gráfico 11 – Eficiência térmica em relação à radiação solar direta (Tubo 1)	82
Gráfico 12 – Diferença de temperaturas e dados de radiação solar direta (Tubo 2)	83
Gráfico 13 – Eficiência térmica ao longo do dia (Tubo 2)	84
Gráfico 14 – Eficiência térmica em relação à radiação solar direta (Tubo 2)	84
Gráfico 15 – Diferença de temperaturas e dados de radiação solar direta (Tubo 3)	85
Gráfico 16 – Eficiência térmica ao longo do dia (Tubo 3)	85
Gráfico 17 – Eficiência térmica em relação à radiação solar direta (Tubo 3)	86
Gráfico 18 – Eficiência térmica do PTC com diferentes tubos absorvedores	86
Gráfico 19 – Eficiência térmica de absorção dos tubos absorvedores	87
Gráfico 20 – Perdas de energia térmica dos tubos absorvedores	87
Gráfico 21 – Energia útil transferida para o fluido com diferentes tubos absorvedores	88
Gráfico 22 – Eficiência térmica do PTC em diferentes vazões (Tubo 1)	90
Gráfico 23 – Eficiência térmica de absorção em diferentes vazões (Tubo 1)	90

Gráfico 24 – Perdas de energia térmica em diferentes vazões (Tubo 1)	90
Gráfico 25 – Energia útil transferida para o fluido em diferentes vazões (Tubo 1)	91
Gráfico 26 – Curva característica do Tubo 1	91
Gráfico 27 – Eficiência térmica do PTC em diferentes vazões (Tubo 2)	92
Gráfico 28 – Eficiência térmica de absorção em diferentes vazões (Tubo 2)	92
Gráfico 29 – Perdas de energia térmica em diferentes vazões (Tubo 2)	93
Gráfico 30 – Energia útil transferida para o fluido em diferentes vazões (Tubo 2)	93
Gráfico 31 – Curva característica do Tubo 2	93
Gráfico 32 – Eficiência térmica do PTC em diferentes vazões (Tubo 3)	94
Gráfico 33 – Eficiência térmica de absorção em diferentes vazões (Tubo 3)	94
Gráfico 34 – Perdas de energia térmica em diferentes vazões (Tubo 3)	95
Gráfico 35 – Energia útil transferida para o fluido em diferentes vazões (Tubo 3)	95
Gráfico 36 – Curva característica do Tubo 3	96
Gráfico 37 – Curvas características na radiação solar direta de 800 W/m ²	96
Gráfico 38 – Dados de radiação solar direta para dias de testes com o Tubo 3	97
Gráfico 39 – Diferença de temperatura entre entrada e saída para o Tubo 3	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tecnologias de energias renováveis	31
Tabela 2 – Influência do ângulo de altura solar na redução da radiação	42
Tabela 3 – Fatores de imperfeição que afetam a eficiência do coletor solar	60
Tabela 4 – Características do refletor	72
Tabela 5 – Características dos tubos absorvedores	72
Tabela 6 – Valores para determinação da eficiência ótica	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Alt	Altitude
eqt	Equação do tempo
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i>
LDRs	<i>Light Dependent Resistors</i>
LEDs	<i>Light Emitting Diodes</i>
LESGN	Laboratório de Energia Solar e Gás Natural
MA	Massa de ar
PTC	<i>Parabolic Trough Collector</i>
PTCs	<i>Parabolic Trough Collectors</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	21
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28
4.1	História e impacto do uso de energia	28
4.2	Soluções possíveis	30
4.2.1	<i>Emissão de CO₂</i>	34
4.3	Radiação solar	34
4.3.1	<i>Relações angulares entre o Sol e a Terra</i>	35
4.3.2	<i>Estimativa da radiação solar terrestre</i>	39
4.3.3	<i>Medição da radiação solar</i>	44
4.3.3.1	<i>Piranômetro</i>	44
4.3.3.2	<i>Pireliômetro</i>	45
4.3.4	<i>Limitações da radiação solar</i>	46
4.4	Energia Solar Térmica	47
4.4.1	<i>Propriedades radiativas e características dos materiais</i>	47
4.4.1.1	<i>Superfícies seletivas</i>	49
4.4.1.2	<i>Superfícies refletoras</i>	50
4.4.1.3	<i>Superfícies transparentes</i>	50
4.4.2	<i>Conversão térmica</i>	51
4.4.3	<i>Tipos de coletores solares</i>	52
4.4.4	<i>Concentração de energia solar</i>	53
4.4.4.1	<i>Concentradores solares com formação de imagem</i>	55
4.4.4.1.1	Performance térmica de PTCs	59
4.4.4.1.2	Características construtivas de PTCs	62
4.4.4.2	<i>Concentradores solares sem formação de imagem</i>	64
4.4.5	<i>Rastreamento</i>	65
4.4.5.1	<i>Microcontrolador Arduino</i>	67
4.4.5.2	<i>Sensor LDR</i>	67
5	MATERIAIS E MÉTODOS	69
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	79

6.1	Aumento de área de secção transversal em vazão de 64 mL/min	79
6.1.1	<i>Tubo de 12,7 mm</i>	79
6.1.2	<i>Tubo de 19,05 mm</i>	81
6.1.3	<i>Tubo de 22,225 mm</i>	83
6.1.4	<i>Tubo de 28 mm</i>	84
6.1.5	<i>Resultados comparativos na vazão de 64 mL/min</i>	86
6.2	Vazões de 50 mL/min, 75 mL/min e 100 mL/min	89
6.2.1	<i>Tubo de 19,05 mm</i>	89
6.2.2	<i>Tubo de 22,225 mm</i>	91
6.2.3	<i>Tubo de 28 mm</i>	94
6.2.4	<i>Resultados comparativos de eficiência térmica na radiação solar direta de 800 W/m²</i>	96
6.2.5	<i>Resultados para o tubo de 28 mm em diferentes vazões volumétricas</i>	97
7	CONCLUSÃO	99
	REFERÊNCIAS	101

1 INTRODUÇÃO

Energia é um dos principais insumos para desenvolvimento econômico de um país, sendo necessária para atividades humanas em todos os setores, como indústria, agricultura, transporte, etc. (GUPTA, 2012).

Petróleo e carvão não eram relevantes fontes energéticas até o fim do século XVIII. Queima de madeira e técnicas para uso da força eólica e hídrica atendiam a demanda. A mudança dessa realidade ocorreu a partir do século XX, em que o petróleo bruto teve sua produtividade aumentada com a popularização do tráfego rodoviário motorizado, a queima de madeira perdeu consideravelmente sua importância em nações industrializadas, e grandes estações hidrelétricas substituíram os antigos moinhos de água (QUASCHNING, 2005).

Combustíveis fósseis demandam milhares de anos para serem formados. Estes são gerados a partir da decomposição de resíduo orgânico animal e vegetal, podendo ser considerados como biomassa armazenada há milhares de anos.

Devido à grande quantidade de esses combustíveis fósseis terem sido consumidos no século XX e ao aumento da exploração dos reservatórios até os dias atuais, extrações futuras serão cada vez mais difíceis, necessitando busca por reservatórios cada vez mais profundos e, com isso, aumentando o preço de produção.

Caso a taxa de exploração não diminua, reservas de petróleo e de gás natural serão esgotadas ainda no século XXI, sendo necessário o aguardo de milhares de anos para formação de novas reservas para exploração (QUASCHNING, 2005).

Segundo Caineng *et al.* (2016), com base em dados do International Energy Agency (IEA), a indústria petrolífera terá seu pico anual de produção em torno de 2040, e a indústria de gás natural em torno de 2060, sofrendo decréscimos significativos de produção após esses períodos.

Além disso, a desigual distribuição de reservas energéticas entre vários países é um dos fatos que impulsionam o desenvolvimento tecnológico para geração de energia local, a fim de aproveitar outras fontes disponíveis e diminuir a dependência de importação energética.

Esses não são os únicos motivos para se procurar alternativas para geração de energia, pois também é necessário um futuro mais sustentável com menor índice de poluentes atmosféricos e com maior preocupação com o aquecimento global (GUPTA, 2012).

As mudanças climáticas e o aumento nos preços do petróleo estão fazendo as fontes de energias renováveis entrarem no centro do interesse público. Existe um

ressurgimento de interesse em energia nuclear, porém é duvidosa sua capacidade de atender a demanda de energia devido à limitação das reservas de urânio.

Dos recursos renováveis, que são solar, geotérmico e gravitacional, a energia solar é o mais abundante. A vida humana e quase todas as outras formas de energia são completamente dependentes do fluxo diário de energia solar. A produção de alimentos e todos os sistemas de suporte de vida na natureza são dependentes do Sol (RAJPUT, 2014).

Ao contrário dessas fontes mais convencionais de energia, a energia solar é mais homoganeamente distribuída entre os países, apesar de ser mais intensa em países intertropicais. Compensando disparidades que se originam de uma distribuição desigual de combustíveis fósseis, a energia solar leva a um melhor equilíbrio de disponibilidade energética entre as nações (PALZ, 2002).

O uso direto da energia solar para satisfazer as necessidades energéticas é vantajoso, pois o equilíbrio térmico da Terra não é perturbado, diferentemente de outras fontes convencionais de geração. Na prática, a emissividade dos geradores solares depende amplamente do material utilizado na fabricação de painéis e coletores solares. O uso de diferentes tipos de plásticos, vidros e metais específicos permitem que a emissividade não acabe alterando o equilíbrio local.

Há duas técnicas para aproveitamento direto da energia solar: conversão direta por transferência de energia radiante aos elétrons de um sólido; e conversão indireta de radiação em calor, podendo ser, posteriormente, convertida em eletricidade.

A conversão indireta é alcançada por coletores de radiação solar combinados com processos de conversão termodinâmica. O uso de técnicas de concentração de energia luminosa permite que coletores solares consigam trabalhar com uma ampla faixa de elevadas temperaturas, que são essenciais para fins de geração.

Existem inúmeras aplicações para equipamentos solares térmicos. Em baixos níveis de temperatura, o aquecimento ambiente e a produção de água quente doméstica são as aplicações mais representativas. Em níveis médios de temperatura, a refrigeração solar, a dessalinização e o calor do processo industrial são aplicações que podem explorar a energia solar. Em altos níveis de temperatura, as usinas de energia solar concentrada são aplicações que ganham mais atenção em todo o mundo. Além disso, para níveis extremamente altos de temperatura de até 1000 °C, os processos de produção de hidrogênio e reforma de metanol podem utilizar a irradiação solar (BELLOS, TZIVANIDIS; ANTONOPOULOS, 2017).

Em aplicações de baixas temperaturas, os coletores solares podem ainda ser utilizados na termoterapia de sementes como uma alternativa aos tratamentos químicos

comumente utilizados para a eliminação de patógenos de campo e de armazenamento que possam comprometer sua germinação e vigor.

Os agricultores usam principalmente tratamentos químicos, apesar dos impactos negativos sobre o meio ambiente e a saúde humana, pois as pragas reduzem o rendimento global potencial das culturas em até 40% (GHATREHSAMANI *et al.*, 2019). Métodos de controle de patógenos mais sustentáveis, como o uso de tecnologias de energia solar, permite evitar os impactos negativos dos pesticidas.

A termoterapia é um dos métodos não químicos de controle de pragas e doenças. Pode ser implementado através de diferentes métodos, como a imersão do material tratado em água quente ou solução quente, ar quente, usando água vaporizada ou solução vaporizada e com o uso de energia de microondas (BAHLOL *et al.*, 2018).

Este tipo de tratamento é baseado no conceito de que aquecer uma planta em um tempo e temperatura específicos pode matar pragas e patógenos sensíveis à temperatura com impacto mínimo no hospedeiro (GHATREHSAMANI *et al.*, 2019).]

O uso do coletor permite a sobrevivência de microrganismos benéficos termotolerantes que impedem a reinfestação pelo patógeno, o que não ocorre nos tratamentos com brometo de metila e autoclaves que esterilizam o solo, criando um “vácuo biológico” (GHINI, 2004).

Como nos tratamentos térmicos para armazenamento, os coletores solares podem ser usados na água de irrigação das plantações. Uma vez instalado no solo ou na cultura, o controle desses patógenos é geralmente difícil e requer o uso de produtos químicos que, além de custear a produção, nem sempre são eficazes e podem levar à contaminação das fontes de água. Por essa razão, métodos preventivos, capazes de eliminar ou reduzir a quantidade de propágulos na água, devem ser adotados (TANAKA *et al.*, 2003).

Instalações com *Parabolic Trough Collectors* (PTCs) ou Coletores de Calha Parabólica, Torres Solares e Coletores de Prato Parabólico podem produzir temperaturas muito elevadas do fluido de trabalho, podendo ser superiores a 1000 °C em algumas usinas. Entretanto elevadas temperaturas dependem do alto nível de insolação local (KOHL, 2008).

Usinas termossolares são importantes intermediários entre o suprimento de energia baseado em combustíveis fósseis e o futuro da economia de energia solar. Elas possuem potencial para suprir a necessidade energética mundial muito mais do que campos solares fotovoltaicos e, utilizando-se métodos de armazenamento de energia térmica, podem potencialmente entregar conforme a necessidade, ao contrário de fontes como energia eólica (PITZ-PAAL, 2008).

As usinas termossolares possuem o mesmo princípio de funcionamento de usinas termoelétricas e usinas nucleares, simplesmente substituindo a energia térmica gerada pela combustão de combustíveis fósseis e pela fissão nuclear pela concentração da energia solar.

Uma desvantagem da energia solar é a não disponibilidade durante a noite, sendo necessário armazenar energia térmica para uso nos horários sem luz do Sol ou gerar energia da forma convencional nesses horários. Outra desvantagem é a dependência de energia solar direta, que é a energia vinda exclusivamente da circunferência solar. Segundo Pitz-Paal (2008), a instalação deve ser feita em lugares de alto valor de insolação, entre as latitudes de 35° N e 35° S, para serem economicamente viáveis.

Os coletores solares podem ser fixos, ou seja, apontam para apenas uma posição geográfica, e podem ser móveis com o uso de rastreadores solares, mostrando-se uma opção interessante, uma vez que automatizam o processo de busca da posição de maior radiação.

Segundo Li, Liu e Tang (2010), resultados obtidos por cálculos numéricos baseados em procedimentos matemáticos mostram que a radiação coletada anual depende fortemente dos recursos solares locais e das estratégias de rastreamento.

O aprimoramento do coletor solar é um dos principais parâmetros no desempenho de sistemas de energia solar. Os parâmetros para o aprimoramento são a otimização da geometria do coletor, a alteração do fluido de trabalho e a troca de material do tubo absorvedor (KASAEIAN; DANESHAZARIAN; POURFAYAZ, 2017).

Novos desenvolvimentos no campo de PTCs visam à redução de custos e melhorias da tecnologia. Energia adicional seria necessária para a geração de sinais de controle. Essa energia se torna insignificante quando um microprocessador é usado (KONAR; MANDAL, 1991). No presente projeto, utilizou-se o hardware da plataforma Arduino. Este, nos últimos anos, vem se mostrando uma alternativa interessante, pois possui baixo custo e há um vasto conteúdo na internet que pode auxiliar o usuário no desenvolvimento do algoritmo de rastreamento.

O uso do esquema de rastreamento de passo em vez do rastreamento contínuo mantém os motores inativos durante a maior parte do tempo, o que ajuda a economizar energia. O rastreamento intermitente já foi alvo de diversos estudos para aumento de energia incidente, principalmente, em painéis fotovoltaicos. Nesses casos, o intervalo de rastreamento é maior, já que eles também captam energia solar difusa.

Segundo Niknia e Yaghoubi (2013), dois métodos principais podem ser usados para projetar e otimizar o desempenho de um coletor solar térmico: aumentando a temperatura do vapor de saída; e aumentando a vazão mássica do vapor de saída.

O *Parabolic Trough Collector* (PTC) ou Coletor de Calha Parabólica consiste de um absorvedor, uma cobertura transparente concêntrica e uma placa refletora parabólica. O absorvedor é fixado permanentemente no foco do concentrador parabólico. Um invólucro transparente é usado para proteger o absorvedor das perdas convectivas. O concentrador parabólico é colocado em uma estrutura rígida, e o mecanismo de rastreamento solar é posto na estrutura para acompanhar o movimento relativo do Sol pelo concentrador parabólico.

Os PTCs são estruturas leves, têm baixo custo e são usados para aplicações de calor de processo entre 50 °C e 400 °C. O desempenho do coletor, que depende das condições de projeto e do tipo de materiais utilizados, é significativamente afetado por fatores como a refletividade e a capacidade de absorção do receptor, o tipo e as condições operacionais do fluido de transferência de calor e o mecanismo de rastreamento (ERDOGAN; COLPAN; CAKICI, 2017).

Pesquisas têm sido focadas nas melhorias dos PTCs, a fim de aumentar sua eficiência em altos níveis de temperatura de operação. A ideia principal é baseada no aumento do coeficiente de transferência de calor no interior do absorvedor, algo que reduz a temperatura superficial do absorvedor e, conseqüentemente, as perdas térmicas. O fluxo dentro do absorvedor tubular depende do fluido de trabalho e da geometria do tubo (BELLOS *et al.*, 2016).

Segundo Jebasingh e Herbert (2016), análises de desempenho estrutural e ótico são realizadas para otimização, a fim de suportar condições ambientais em que os sistemas são instalados, e análises térmicas são realizadas para aumentar a eficiência térmica por otimização de materiais absorvedores, de superfície de deposição dos absorvedores e de fluidos de trabalho.

Este trabalho visou fazer um aprimoramento de um PTC de pequeno porte, com rastreamento intermitente automático leste-oeste e manual norte-sul, através da modificação geométrica de tubos absorvedores na região interna à parábola refletora. Análises da influência de diferentes áreas transversais do sistema absorvedor de energia solar e de diferentes vazões volumétricas na eficiência térmica do PTC foram desenvolvidas.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi analisar a eficiência térmica de um Coletor de Calha Parabólica, utilizando tubos absorvedores de diferentes áreas transversais e rastreamento intermitente de 1 minuto, utilizando a plataforma Arduino. A análise é baseada em avaliações de temperatura de entrada e saída da água nos tubos absorvedores, por meio de um datalogger, conjuntamente com a radiação solar do dia de teste experimental. Especificamente, os objetivos são:

1. Construção e instrumentação de um aparato experimental capaz de absorver energia solar, a fim de aquecer um fluido circulante;
2. Realização de testes de experimentais;
3. Coleta diária de dados experimentais das temperaturas do fluido na entrada e na saída do absorvedor e de dados de medição de radiação solar direta;
4. Desenvolvimento e análise de resultados de eficiência térmica.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao longo dos anos, estudos visando ao melhoramento da tecnologia de captação de energia solar foram desenvolvidos, buscando a redução de custos, principalmente em relação ao sistema de rastreamento, e o aumento da energia absorvida pelo fluido de circulação nos coletores.

Gaul e Rabl (1980) analisaram a influência do efeito do ângulo de incidência e das perdas finais geométricas na eficiência ótica de diferentes Coletores de Calha Parabólica comerciais. Os resultados mostraram que uma mudança do ângulo de incidência provoca diminuição da eficiência ótica e, conseqüentemente, menor energia é direcionada para as superfícies absorvedoras.

Konar e Mandal (1991) desenvolveram um microcontrolador para controle de posição automática, que pode ser utilizado no sistema de rastreamento de um painel fotovoltaico ou de um Coletor de Calha Parabólica, por meio de rastreamento intermitente ao invés de rastreamento contínuo. O uso desse tipo de rastreamento permitiu redução do gasto energético do sistema, devido à inatividade dos motores por uma maior parte do tempo. Além disso, o rastreamento foi desenvolvido com sensibilidade ao comprimento de onda do infravermelho, que possui um desvio de caminho mínimo após uma alteração do índice de refração atmosférico causada por partículas suspensas no ar, nuvens, chuva, etc.

Kalogirou e Lloyd (1992) realizaram um estudo de viabilidade para o uso de Coletores de Calha Parabólica para produção de água quente em Chipre em aplicações domésticas e hoteleiras. Os sistemas foram comparados a similares usando Coletores de Placa Plana. Os resultados mostraram que, para a produção de água em larga escala, os Coletores de Calha Parabólica são mais eficientes e econômicos. Para aplicação em uso doméstico, incluindo custos de manutenção, eles obtiveram um tempo de retorno de 7,3 anos, enquanto os Coletores de Placa Plana obtiveram 8,3 anos, porém este último, por não necessitar de manutenção, facilita sua comercialização para aplicações em baixa escala.

Ai *et al.* (2003) compararam a energia incidente em um plano utilizando rastreamento intermitente do ângulo azimute solar e do ângulo de altura solar com a energia em uma superfície horizontal na China. Os resultados para um rastreamento de três passos de um único eixo mostraram um aumento na energia de 66,5% para o ângulo azimute solar e 63,3% para o ângulo de altura solar. No caso do rastreamento de dois eixos, o aumento foi de 72%.

Tanaka *et al.* (2003) desenvolveram um sistema de aquecimento solar por meio de Coletores de Placa Plana, baseado em processo misto de aquecimento da água em circuito fechado e em transmissão de calor por convecção natural e forçada. Os resultados mostraram boa eficiência do equipamento, trabalhando na temperatura de 60 °C, tanto em rendimento de água processada como na eliminação do inóculo de fitopatógenos de importância econômica, como *Botrytis cinerea*, *Colletotrichum* spp., *Fusarium* spp., *Pythium* spp., *Verticillium dahliae* e *Rhizoctonia solani*. À exceção de *F. oxysporum* f. sp. *phaseoli*, os patógenos testados não sobreviveram ao tratamento térmico a temperaturas acima de 55 °C. A técnica mostrou-se promissora como uma opção na desinfestação da água para uso em irrigação de viveiros, casas de vegetação e diversas finalidades em pequenas ou médias propriedades agrícolas.

Kalogirou (2004) fez um levantamento dos principais tipos de coletores e aplicações solares térmicas. O autor fez uma análise dos problemas ambientais causados por fontes convencionais e os benefícios das energias renováveis. Foram apresentadas análises óticas, térmicas e termodinâmicas dos coletores solares e descritos métodos para avaliação de desempenho.

Mousazadeh *et al.* (2009) realizaram uma análise dos métodos de rastreamento solar para maximização da energia aproveitada. Para algumas aplicações o rastreamento não é essencial, mas pode incrementar de 10% a 100% na energia coletada em diferentes períodos do dia e condições geográficas. Os resultados mostraram que os mais eficientes tipos de rastreamento solar foram os de eixo polar e de azimute/elevação.

Li, Liu e Tang (2010) analisaram o desempenho ótico de um rastreamento automático leste-oeste e manual norte-sul em painéis solares na China. O ângulo de inclinação norte-sul foi ajustado quatro vezes no ano em três ângulos de inclinação fixos, permitindo que os valores de radiação coletados obtivessem uma diferença de apenas 0,7% da radiação coletada em um rastreamento de dois eixos automáticos.

Ummadisingu e Soni (2011) comparam a produção de energia entre diferentes tecnologias de Energia Solar Concentrada ou Concentrating Solar Power (CSP) e entre Energia Fotovoltaica. CSP aparece como líder na geração de energia em escala útil, devido à sua maturidade e custo relativo. Além disso, são feitas comparações entre os tipos de CSP, em que as Torres Solares apresentam a maior eficiência, juntamente com o Prato Parabólico, tendo esses também os maiores potenciais de concentração, entretanto esta última tecnologia apresenta a menor capacidade de geração de energia em relação a todas as outras. Os Coletores de Calha Parabólica possuem eficiência térmica em torno de 15%, com um nível de concentração de energia solar de 70 a 80 sóis, sendo utilizado para alcance de temperaturas de

até 550 °C, sendo a segunda tecnologia dentre as da CSP que possui o menor custo, perdendo somente para a Fresnel Linear.

Venegas-Reyes *et al.* (2012) desenvolveram o projeto, a construção e a avaliação de um Coletor de Calha Parabólica para geração de vapor de baixa entalpia e água quente em aplicações de desinfestação do solo em culturas agrícolas. Um tubo absorvedor não isolado e sem cobertura de vidro foi utilizado a fim de reduzir os custos. Foi utilizado um sistema de rastreamento de um eixo (Leste-Oeste), sendo o coletor orientado na direção Norte-Sul. O valor da eficiência ótica foi de 60%, e a temperatura de operação do coletor foi de 70 a 110 °C.

Niknia e Yaghoubi (2013) fizeram uma análise termodinâmica transiente de uma configuração adicional para uma usina solar térmica de Coletores de Calha Parabólica em Shiraz, por meio de simulação no TRNSYS, buscando aumentar a produção de energia de 250 kW para 500 kW, sem fazer alterações na configuração principal do sistema. Os resultados mostraram um aumento de geração de energia por meio do aumento do fluxo de massa, sendo possível por meio do acréscimo de 100 metros de área coletora de energia solar.

Suman, Khan e Pathak (2015) analisaram metodologias para o aprimoramento do desempenho de coletores solares de diferentes tecnologias. Os autores concluíram que a modificação na geometria da superfície absorvedora pelo uso de aletas, nervuras e ondulações resulta em um melhoramento do desempenho, não havendo padrões definidos disponíveis para a determinação exata dos tipos de modificações, resultando em melhor desempenho para uma determinada condição. Além da modificação geométrica, o uso de revestimentos seletivos solares aumenta significativamente o desempenho do coletor, porém há uma necessidade de desenvolver um método econômico de deposição na superfície do absorvedor. Os autores afirmam que o uso de nanofluidos para aumento de transferência de calor ainda é uma área emergente, pois ainda há desacordos, baseados em pesquisas desenvolvidas, nas investigações experimentais e analíticas quanto à dependência do desempenho em relação aos parâmetros de tamanho das partículas, de fração volumétrica e de valor do pH.

Bellos *et al.* (2016) realizaram um estudo por meio de simulação, buscando o aprimoramento da eficiência térmica de um Coletor de Calha Parabólica comercial IST-PTC por meio do aumento do coeficiente convectivo de transferência de calor entre o fluido de circulação e o absorvedor. Um tubo absorvedor com ondulação senoidal na área superficial interna e três diferentes fluidos foram analisados: óleo térmico, óleo térmico com nanopartículas e água pressurizada. Os resultados mostraram que a melhoria na geometria do fluido aumenta a eficiência em 4,55%, e o uso de nanopartículas aumenta em 4,25%.

Bellos, Tzivanidis e Antonopoulos (2017) realizaram uma análise de energia e de exergia para sete diferentes fluidos em um coletor parabólico comercial Eurotrough ET-150. Água, therminol VP-1, nitrato de sal fundido, sódio líquido, ar, dióxido de carbono e hélio foram os fluidos examinados. Os estudos mostraram que, para aplicações em baixas temperaturas (300 K a 550 K), água pressurizada e o therminol VP-1 são os fluidos de maior eficiência térmica. Para aplicações em altas temperaturas de 550 K a 1100 K, sódio líquido obteve a maior eficiência térmica. Temperaturas entre 1100 K e 1300 K só poderiam ser alcançadas por gases, tendo o dióxido de carbono os melhores resultados. O melhor resultado de eficiência exergética, 47.48%, foi do sódio líquido para temperatura de entrada de 800 K, seguido pelo hélio, dióxido de carbono e ar, apresentando, respectivamente, 42.21%, 42.06%, e 40.12% para temperatura de entrada próxima a 700 K.

Erdogan, Colpan e Cakici (2017) analisaram, por meio de simulação, um trocador de calor de casco e tubo em um sistema integrado de Coletores de Calha Parabólica e uma usina geotérmica baseada em ciclo orgânico Rankine. As simulações foram realizadas alterando os parâmetros estruturais no trocador de calor e os fluidos que escoam no sistema. Os resultados mostraram que o parâmetro estrutural mais significativo é o espaçamento entre os defletores e que deveriam ser selecionados, dentre os óleos térmicos analisados, Therminol VP1 ou Dowtherm A como fluido no lado dos Coletores Parabólicos e R245fa ou R600 como fluido no lado do ciclo Rankine orgânico para melhor desempenho do sistema.

Jamal-Abad, Saedodin e Aminy (2017) realizaram uma investigação experimental do efeito na eficiência térmica pela inclusão de uma espuma metálica porosa de cobre no interior de um tubo absorvedor de um Coletor de Calha Parabólica. Os resultados mostraram um acréscimo na eficiência, devido a um aumento na condutividade térmica, apesar de aumentar a queda de pressão no tubo, necessitando, dessa forma, uma maior energia de bombeamento. Além disso, observou-se que a condutividade térmica do fluido tem maior influência na condutividade térmica efetiva do absorvedor do que a do metal do qual é composto e que a eficiência do coletor solar decresce com a diminuição do fluxo de massa que o atravessa.

Kasaeian *et al.* (2017) realizaram testes experimentais em Coletores de Calha Parabólica, usando nanopartículas de sílica e carbono em Etileno Glicol (EG), com frações volumétricas de 0,1%, 0,2% e 0,3%, realizando uma análise de eficiência térmica e de temperatura de saída para os nanofluidos no tubo absorvedor. A temperatura de saída se mostrou crescente com o aumento da fração volumétrica das nanopartículas: 0,3% de Nanotubos de Carbono Multi-Parede (MWCNT) em EG obteve um diferença de 32,5 °C em

relação à temperatura de entrada, sendo 15,8 °C mais alto do que a temperatura de saída utilizando somente EG; 0,3% de Nanosílica em EG obteve uma diferença de 24,5 °C, sendo 7,7 °C maior do que utilizando somente EG. A eficiência térmica é aumentada adicionando as nanopartículas: 0,3% de MWCNT/EG obtiveram 72,8%; 0,3% de Nanosílica/EG obtiveram 63,6%. Em relação ao EG, 0,3% de MWCNT/EG mostrou um aumento de 30,4% de eficiência térmica, e 0,3% de Nanosílica/EG 14%.

Donga e Kumar (2019) analisaram o desempenho térmico de um Coletor de Calha Parabólica com desalinhamento do tubo absorvedor e com erro de inclinação superficial do refletor na eficiência térmica. Foram analisados dois diâmetros diferentes do tubo absorvedor, 70 mm e 80 mm. Simulações foram feitas para erro de inclinação de 0 a 3 mrad, com o desalinhamento do tubo absorvedor de até 15 mm em duas direções. Os resultados mostraram que o efeito do desalinhamento do tubo absorvedor na eficiência geral do coletor é insignificante, com erro de inclinação zero. No entanto, na presença de erro de inclinação e desalinhamento do tubo absorvedor, a eficiência geral do coletor degrada-se significativamente. A redução máxima na eficiência geral do coletor é de 11% e 7% para os diâmetros do tubo absorvedor de 70 mm e 80 mm, respectivamente.

Liu *et al.* (2019a) realizaram análises de perfil de velocidade do escoamento, desempenho térmico, resistência ao escoamento e desempenho termo-hidráulico de seis arranjos de tubos absorvedores com nervuras internas. Os resultados indicam que o *Symmetrical Anticlockwise Arrangement of Double Inclined Ribs* (SADIR) ou arranjo simétrico no sentido anti-horário das nervuras duplas inclinadas e *Symmetrical Clockwise Arrangement of Single Inclined Ribs* (SCSIR) ou arranjo simétrico no sentido horário das nervuras simples inclinadas atingem o padrão de escoamento com um par de vórtices contrarrotatórios e obtêm o melhor desempenho, com reduções no pico de temperatura e na perda de calor, atingindo até, respectivamente, 177 °C e 80,1%. O desempenho termo-hidráulico para os tubos modificados obtiveram melhores resultados para $Re < 30.000$, e eficiência térmica modificada variou entre 0,70-0,73, com aumento máximo de aproximadamente 1,9%.

Liu *et al.* (2019b) analisaram o desempenho termo-hidráulico e o termodinâmico de um receptor parabólico com inserções em tira cônica. A taxa de fluxo de massa analisada variou de 0,57 a 11,40 kg/s, com o número de Reynolds correspondente variando de 5.000 a 791.000. Quatro temperaturas de entrada de fluido (400 K, 500 K, 600 K e 650 K) foram aplicadas e verificou-se que a transferência de calor é efetivamente aumentada pelos insertos de fita cônica. A perda de calor alcançou uma redução máxima de 82,1%. Porém, um aumento considerável na perda de pressão também é causado pelas inserções, com o fator de atrito

sendo 6,17–17,44 vezes maior do que o tubo simples. O desempenho termo-hidráulico variou de 0,70 a 1,33, e a eficiência térmica é aumentada de 0,02% a 5,04%. O aumento máximo na eficiência exergética é de aproximadamente 5,7%.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta uma abordagem dos temas necessários à compreensão da construção, do funcionamento e da operação do sistema solar térmico de concentração. Inicialmente estão apresentados alguns conceitos históricos sobre o uso das fontes convencionais de energia e alguns conceitos sobre fontes de energias renováveis. Posteriormente, são apresentados conceitos fundamentais acerca da radiação solar e coletores solares.

4.1 História e impacto do uso de energia

A descoberta de carvão abundante e o avanço contínuo da tecnologia promoveram uma revolução industrial, em que máquinas a vapor, produção mecânica e transporte, usando diretamente carvão, foram desenvolvidos.

A demanda energética mundial aumentou bruscamente depois da Grande Depressão em 1929, estendendo-se pela década de 1930. No período pós-guerra, o petróleo proporcionou o crescimento e a prosperidade da indústria mundial. O gás natural, posteriormente, teve um grande crescimento e participou de uma nova fase de crescimento econômico. Grande parte da produção de carvão e gás era direcionada para geração de energia. Na década de 1960, usinas nucleares foram adicionadas às fontes convencionais de energia. Estas duas fontes não quebraram a predominância de carvão e petróleo, mas o gás natural teve um considerável crescimento e participação no setor energético (QUASCHNING, 2005; FRERIS; INFELD, 2008).

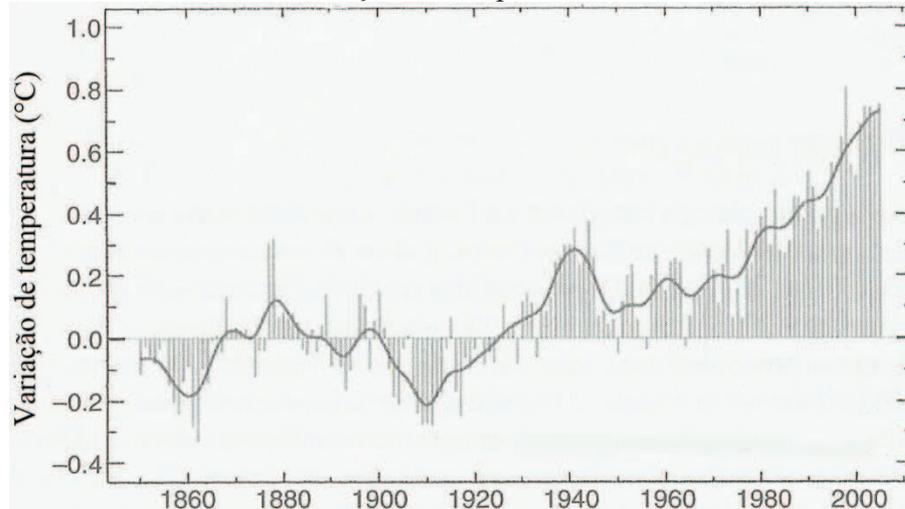
Segundo Freris e Infield (2008), ainda haveria petróleo suficiente nas reservas para atender a demanda por mais 20 anos. As reservas de gás ainda conseguiriam estar disponíveis por mais 50 anos e as de carvão por mais centenas de anos. O carvão é um combustível menos atraente por causa do alto teor de emissão de CO₂ e de material particulado para a atmosfera.

O Gráfico 1 mostra os resultados de estudos realizados sobre a alteração climática ao longo dos anos de 1850 a 2005. Os valores de variação de temperatura são em relação à média anual de temperatura entre os anos de 1860 a 1900.

De 1900 a 2005 a Terra aqueceu 0,7 °C, chegando ao nível mais quente em 12.000 anos. A maioria dos modelos climáticos indica que houve uma duplicação dos gases causadores do efeito estufa desde o período pré-industrial, e isto, provavelmente, resultará em

um aumento de 2 a 5 °C na temperatura média global, que deverá ser alcançado entre 2030 e 2060. Caso ações não sejam tomadas, em 2100 concentrações elevadas desses gases estarão presentes na atmosfera, resultando em um aumento de 3 a 10 °C (FRERIS; INFIELD, 2008).

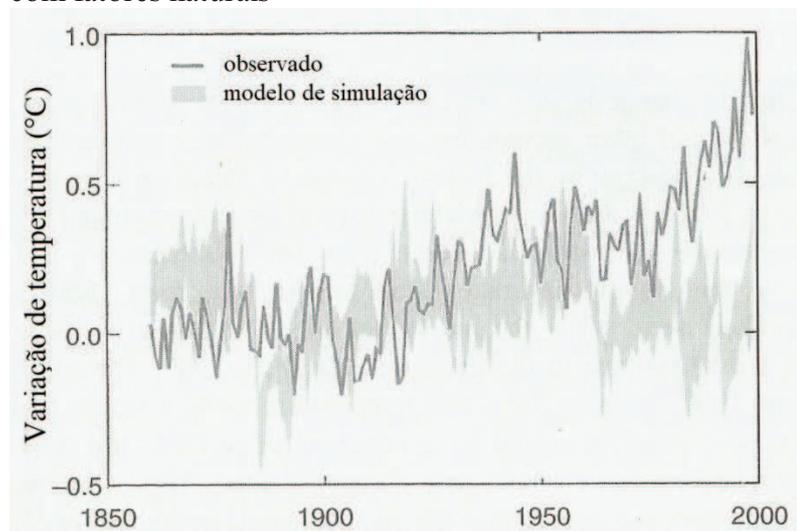
Gráfico 1 – Dados de elevação de temperatura



Fonte: adaptado de Freris e Infield (2008, p. 5).

Estudos foram realizados para analisar a influência humana no aquecimento global. No Gráfico 2, estão mostrados os modelos climáticos simulados causados por fatores naturais, como radiação solar, mudanças na profundidade ótica da atmosfera por emissões vulcânicas e interações entre atmosfera e oceanos. Pode-se perceber uma diferença grande, a partir de 1970, entre os resultados observados e os simulados.

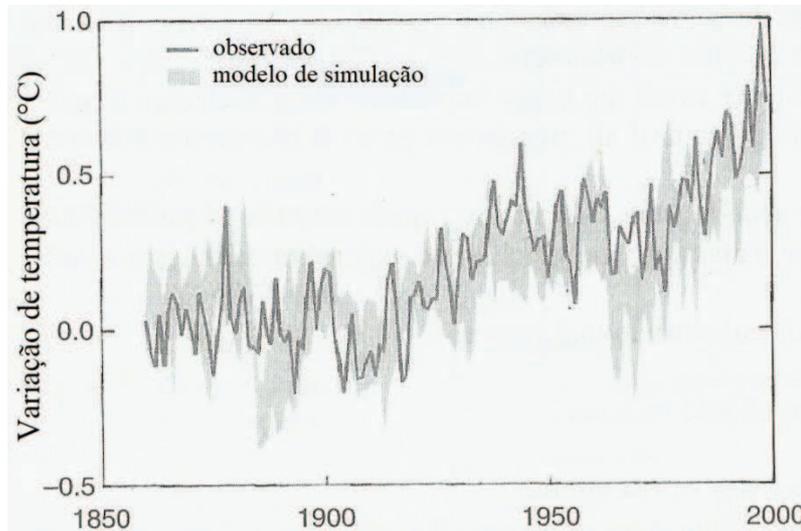
Gráfico 2 – Comparação de dados observados e modelados com fatores naturais



Fonte: adaptado de Freris e Infield (2008, p. 6).

No Gráfico 3, estão mostrados os modelos climáticos simulados incluindo a interferência humana, por meio da mudança na concentração dos gases do efeito estufa e partículas de sulfato. O modelo se aproximou bastante dos resultados observados.

Gráfico 3 – Comparação de dados observados e modelados com fatores naturais e humanos



Fonte: adaptado de Freris e Infield (2008, p. 7).

4.2 Soluções possíveis

As fontes de energia convencionais, como carvão, petróleo e urânio, não são adequadas para atender ao crescimento da demanda energética, principalmente industrial e agrícola, já que estão se esgotando e, possivelmente, estarão exauridas até o fim deste século ou até o início do próximo (RAJPUT, 2014).

Sociedades, atualmente, são dependentes da alta dos preços e do crescimento de consumo dos combustíveis fósseis para atender à demanda energética. Como não é possível romper essa dependência em um curto período de tempo, é necessária, ao longo dos anos, uma mudança gradual tendendo a uma diminuição no consumo de combustíveis mais poluentes e ao investimento em tecnologias mais eficientes e sustentáveis.

Segundo Gupta (2012), as três soluções práticas possíveis para problemas ambientais e energéticos são:

1. Tecnologias de conservação de energia. Deve-se melhorar a eficiência de geração, buscando o desenvolvimento tecnológico necessário para utilização de menos combustível sem prejudicar a geração de energia;

2. Tecnologias de energias renováveis. O seu gradual crescimento permite, aos poucos, substituir formas de geração de energia mais poluentes e menos sustentáveis;
3. Tecnologias limpas. Substituindo-se combustíveis fósseis por fontes renováveis para geração de eletricidade é uma importante estratégia para redução de emissão de CO₂ na atmosfera e para o combate à mudança do clima global.

Nas últimas décadas, o crescimento do uso de gás natural, em substituição ao carvão e ao petróleo, ajudou a limitar o crescimento das emissões de CO₂ na atmosfera (FRERIS; INFIELD, 2008).

Porém, as energias renováveis são a única opção para cobrir a demanda energética de forma sustentável. Estas são fontes inesgotáveis dentro do período de vida da humanidade. Podem ser divididas em três áreas com diferentes disponibilidades energéticas, segundo Quaschnig (2005):

- Energia solar. Disponibilidade de 3.900.000.000 PJ/ano;
- Energia gravitacional. Disponibilidade de 94.000 PJ/ano;
- Energia geotérmica. Disponibilidade de 996.000 PJ/ano.

A Tabela 1 exemplifica as tecnologias renováveis que podem ser utilizadas para aproveitamento dessas três principais fontes.

Tabela 1 – Tecnologias de energias renováveis

Fontes de energia	Caminhos	Tecnologias renováveis
Sol	Aquecimento direto	Solar térmica
	Conversão direta	Solar Fotovoltaica
	Ciclo de água	Hidrelétrica
	Aquecimento da atmosfera	Conversores de vento/ondas
	Fotossíntese	Biocombustíveis
Gravitacional	-	Energia das marés
Geotérmica	-	Energia geotérmica

Fonte: elaborada pelo autor.

A energia solar pode ser aproveitada de forma direta e indireta. O aproveitamento direto é realizado por dispositivos que convertem diretamente a energia solar em energia útil, podendo ser eletricidade ou calor. O aproveitamento indireto ocorre após processos naturais converterem a energia solar em outros tipos de energia, como energia eólica, energia das ondas, biomassa, dentre outras.

Em contraste com os combustíveis fósseis, que têm como vantagem a imediata disponibilidade para geração de energia, a disponibilidade da maioria das fontes renováveis é

flutuante. Para suprimento completo da demanda por energia renovável não deve ser levado em conta somente a capacidade de geração de eletricidade e calor a partir de fontes mais sustentáveis, mas também deve ser levada em consideração a garantia de que essas fontes atenderão à demanda em todos os momentos. Como solução, são necessários grandes sistemas de armazenamento de energia, transporte global de energia ou adaptação da demanda para a disponibilidade da energia local (QUASCHNING, 2005).

As principais vantagens de se utilizar essas fontes de energia são:

- No estágio de operação não poluem a atmosfera;
- Alta disponibilidade;
- A usina de geração de energia que utiliza essas fontes não tem custos com combustível, e os custos de operação são negligenciáveis;
- Podem ser utilizadas de forma descentralizada;
- Algumas fontes podem ainda ser utilizadas tanto para geração de energia como para outras aplicações, como bombeamento de água, aquecimento e resfriamento de ambientes, dentre outras.

As principais desvantagens são:

- Baixa densidade de energia, necessitando de usinas geradoras maiores e aumentando, dessa forma, o preço de produção de energia;
- Fontes intermitentes;
- Baixa confiabilidade para alguns casos;
- Alto investimento inicial.

As usinas de energia atualmente que usam fontes de energia renováveis são consideradas mais uma adição à produção de eletricidade. Devido à sua tendência crescente, é muito provável que nos próximos anos se tornem a principal fonte de energia devido à sua dominância ecológica, desenvolvimento regional e construção de redes inteligentes que são definitivamente o futuro da energia elétrica (VEZMAR *et al.*, 2014).

A transição para um setor de eletricidade baseado em energia renovável leva a nações mais avançadas e a uma melhor qualidade de vida para seus residentes. Porém, essa transição é altamente dependente de mandatos legislativos favoráveis, condições econômicas e volatilidade de preços de fontes concorrentes.

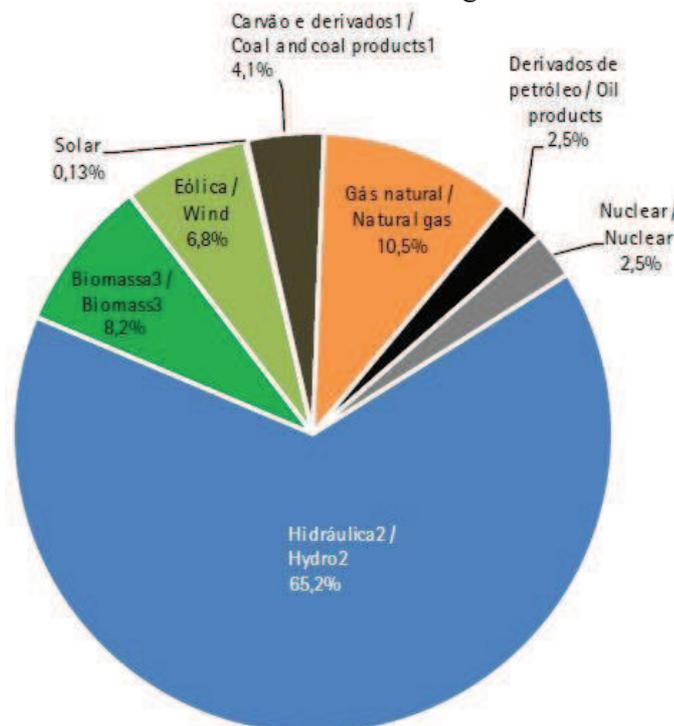
Como a energia renovável é um campo emergente, não há um quadro político definido para implementar ou regular essas tecnologias. Ações políticas como créditos fiscais, subsídios, abatimentos e assistência financeira poderiam mudar o foco para tecnologias renováveis, aumentando sua competitividade em condições de mercado contemporâneas

(VANDAELE; PORTER, 2015).

No Brasil, a matriz energética é majoritariamente atendida por energias renováveis. As hidrelétricas fornecem mais de 65% de toda a oferta interna de energia. Por um lado é um balanço positivo, no que diz respeito ao custo de geração energética e à emissão de gases poluentes, porém mudanças no padrão chuvoso das regiões onde foram construídas as usinas forçam a geração de energia por fontes emergenciais (combustíveis fósseis) e por outras fontes alternativas.

Segundo dados do Balanço Energético Nacional (2018), as usinas eólicas tiveram um crescimento de 26,5% em 2017 em relação ao ano anterior, enquanto a energia solar é praticamente representada pela tecnologia fotovoltaica, dependendo de incentivos governamentais relacionados à micro e mini geração de energia e representando somente 0,13% do fornecimento nacional, conforme mostra o Gráfico 4.

Gráfico 4 – Oferta nacional de energia elétrica



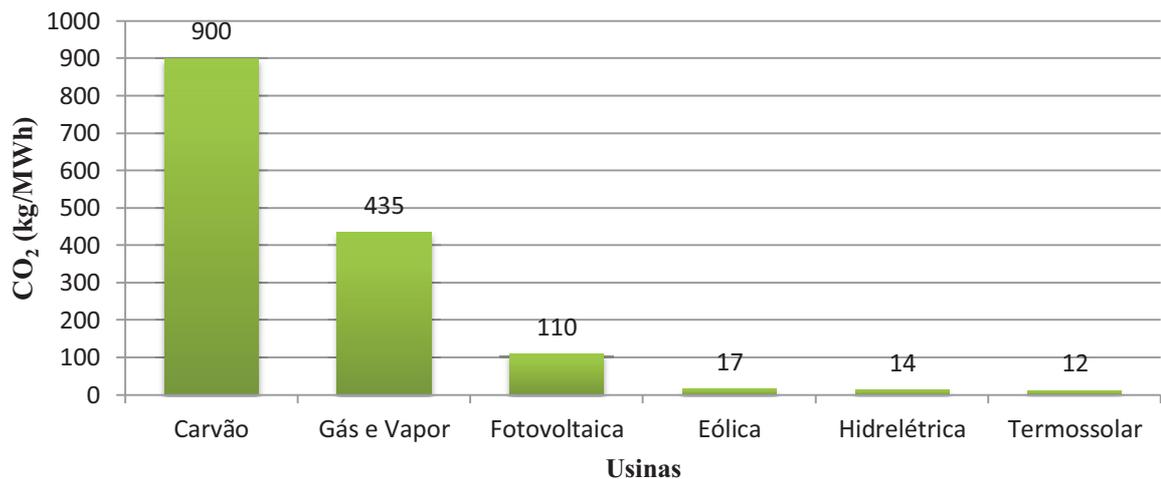
Fonte: Balanço Energético Nacional (2018, p.16).

O período de amortização para geração de energia por fontes renováveis é bastante positivo, estando entre 3 a 7 meses para usinas eólicas e termossolar, 9 a 13 meses para usinas hidrelétricas e 1,5 a 2,5 anos para coletores solares. Usinas fotovoltaicas possuem um prazo mais longo, 2 a 3 anos para usinas com painéis de células de filmes-finos e 3 a 5 anos para usinas com painéis de silício policristalino (KOHL, 2008).

4.2.1 Emissão de CO₂

As usinas termossolares reduzem as emissões de CO₂ para a atmosfera de uma maneira bem efetiva comparadas a outras usinas de geração de energia, conforme mostrado no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Comparação de emissões de CO₂ entre usinas de geração de energia



Fonte: elaborado pelo autor.

Considerando as emissões devido à fabricação dos componentes, construção, operação e desligamento da usina pela análise do ciclo de vida, tem-se uma emissão de 12 kg CO₂/MWh para usinas termossolares, enquanto esse valor é de 14 kg CO₂/MWh para usinas hidrelétricas, 17 kg CO₂/MWh para usinas eólicas, 110 kg CO₂/MWh para usinas fotovoltaicas, 435 kg CO₂/MWh para usinas com turbinas a gás e a vapor e 900 kg CO₂/MWh para usinas termelétricas a carvão (PITZ-PAAL, 2008).

A fabricação dos módulos semicondutores na energia fotovoltaica possui elevados valores de emissão, dessa forma essas usinas acabam sendo menos favoráveis nessa questão em relação às outras fontes de energias renováveis.

4.3 Radiação solar

A energia solar viaja em pequenas partículas, chamadas fótons. Convertendo cada parte delas, mesmo em uma eficiência muito baixa, ainda geraria uma alta quantidade de energia, que poderia ser aproveitada e utilizada tanto para geração de eletricidade como para outras aplicações.

A quantidade de energia que consegue alcançar a Terra, fora da atmosfera, é definida como a “constante solar”. Apesar de essa energia variar, por causa da variação da distância entre o Sol e a Terra ao longo do ano devido ao movimento de translação elíptico da Terra, geralmente adota-se a constante solar como o valor de energia na distância média.

A energia solar é uma fonte de energia inesgotável. É a mais promissora fonte limpa e renovável. Ela tem potencial para atender às projeções presentes e futuras da demanda energética sem ocasionar impactos ambientais. Segundo Kalogirou (2004), estima-se que 30 minutos de radiação solar incidente na Terra seja igual à demanda mundial de energia por um ano. Entretanto, a energia solar é de baixa densidade, e sua disponibilidade varia com o tempo e com as condições climáticas.

Devido à diminuição de energia que ocorre ao atravessar a atmosfera, o valor máximo alcançado em uma superfície na Terra ao nível do mar é em torno de 1 kW/m² (GUPTA, 2012; RAJPUT, 2014).

Alguns fatores importantes devem ser levados em consideração que justificam o uso e a ampliação da energia solar. O principal deles é almejar um meio ambiente de alta qualidade, que ofereça as mais favoráveis condições de vida para as pessoas e para os animais, sendo propício para a boa saúde e bem-estar dos habitantes, em que todas as variáveis biológicas continuem intactas e saudáveis e em que uma comunidade biótica diversificada e estável é mantida (RAJPUT, 2014).

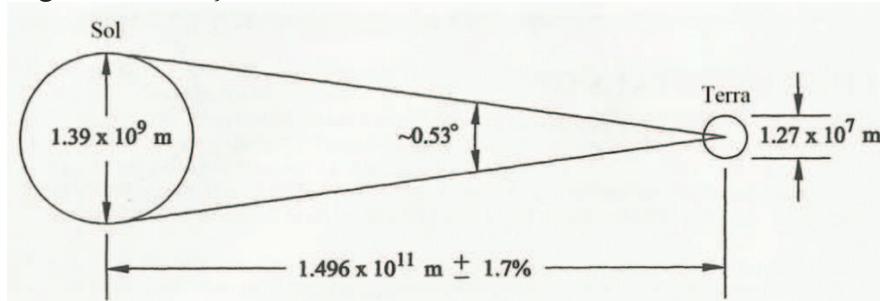
4.3.1 Relações angulares entre o Sol e a Terra

O Sol é uma esfera comprimida de $13,9 \times 10^5$ km de diâmetro de várias camadas de gases, com maior temperatura no centro. A temperatura da camada mais exterior, da qual será irradiada energia para o sistema solar, é de aproximadamente 5760 K. Sua taxa de emissão de energia é de $3,8 \times 10^{23}$ kW, sendo $1,7 \times 10^{14}$ kW interceptada pela Terra (GOSWAMI; KREITH; KREIDER, 2000).

A distância média entre o Sol e a Terra é de $1,496 \times 10^{11}$ m, possuindo uma variação de -1,7% em 21 de dezembro e +1,7% em 21 de junho. Considerando a distância média, o Sol subtende um ângulo de 32' ($\approx 0,53^\circ$). Apesar dessa variação na distância, a intensidade de radiação incidente na Terra é aproximadamente fixa. A constante solar (G_{cs}) é a energia radiante emitida pelo Sol por uma unidade de área perpendicular à direção de propagação na distância média entre o Sol e a Terra. O seu valor é de 1367 W/m² e é medido fora da atmosfera terrestre (DUFFIE; BECKMAN, 2006; GUPTA, 2012). A Figura 1 mostra a

relação angular entre o Sol e a Terra.

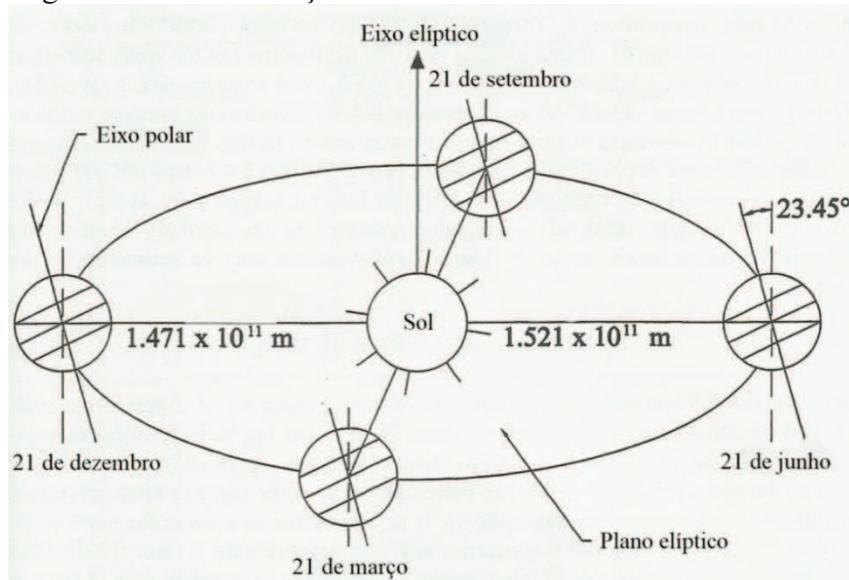
Figura 1 – Relação entre o Sol e a Terra



Fonte: adaptada de Goswami, Kreith e Kreider (2000, p. 14).

A Figura 2 mostra a movimentação anual da Terra ao redor do Sol. A menor distância é de $1,471 \times 10^{11} \text{ m}$ em 21 de dezembro, e a maior é de $1,521 \times 10^{11} \text{ m}$ em 21 de junho. Desse modo, a radiação solar incidente na superfície terrestre é maior no dia 21 em dezembro. O eixo de rotação da Terra é inclinado em $23,45^\circ$, logo isso permite que haja uma variação sazonal da radiação solar disponível.

Figura 2 – Movimentação da Terra ao redor do Sol



Fonte: adaptada de Goswami, Kreith e Kreider (2000, p. 23).

A hora solar é o tempo usado em todas as relações de ângulo solar e não coincide com o horário local. Duas correções são aplicadas. A primeira é a diferença entre a longitude do observador (L_{obs}) e a longitude do meridiano da hora padrão local (L_{loc}). A segunda é utilizando a equação do tempo (eqt), que leva em consideração perturbações na taxa de rotação da Terra que afetam o tempo que o Sol leva para cruzar o meridiano do observador. A

hora solar é calculada pela Equação 1, e a equação do tempo pela Equação 2 (DUFFIE; BECKMAN, 2006):

$$\text{Hora solar} = \text{Hora padrão} + 4 (L_{obs} - L_{loc}) + eqt \quad (1)$$

$$\begin{aligned} eqt = & 229,2 (0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B \\ & - 0,014615 \cos 2B - 0,04089 \sin 2B) \end{aligned} \quad (2)$$

O valor de B é determinado pela Equação 3, em que n é o número do dia do ano:

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (3)$$

As relações angulares entre o observador e a radiação solar direta, permitindo a localização da posição do Sol no céu, são representadas por vários ângulos.

A latitude (ϕ) é a localização angular a norte ou a sul do Equador. Por definição, valores positivos estão ao norte da linha do Equador. O ângulo varia de -90° a $+90^\circ$.

A posição do Sol é fortemente influenciada pelo ângulo entre o plano equatorial da Terra e o plano de translação, chamado de ângulo de declinação solar (δ). Por definição, valores positivos são ao norte do Equador. O ângulo varia de $-23,45^\circ$ em 21 de dezembro a $+23,45^\circ$ em 21 de junho. Essas são as latitudes dos trópicos de Capricórnio ($23,45^\circ$ S) e de Câncer ($23,45^\circ$ N).

A declinação solar pode ser calculada pela Equação 4 ou, para valores mais precisos, pela Equação 5 (DUFFIE; BECKMAN, 2006):

$$\delta = 23,45^\circ \sin \left[\frac{360^\circ (284 + n)}{365^\circ} \right] \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \delta = & \left(\frac{180}{\pi} \right) (0,006918 - 0,399912 \cos B + 0,070257 \sin B - \\ & 0,006758 \cos 2B + 0,000907 \sin 2B - 0,002697 \cos 3B + \\ & 0,00148 \sin 3B) \end{aligned} \quad (5)$$

O ângulo de inclinação de uma superfície (β) em relação à horizontal varia de 0° a 180° . Assumindo valores menores do que 90° , a sua face está direcionada para cima.

O desvio da projeção em um plano horizontal da normal de uma superfície do meridiano local é chamado de ângulo de azimute de superfície (γ). Por definição, orientação para o sul recebe valor zero, para o leste, valores negativos e, para oeste, valores positivos. A variação é de -180° a $+180^\circ$ (DUFFIE; BECKMAN, 2006; RAJPUT, 2014).

O deslocamento angular do Sol de leste a oeste do meridiano devido ao movimento de rotação da Terra é de 15° /hora e pode ser calculado pela Equação 6. Por definição, assumem-se valores negativos durante a manhã e positivos à tarde (DUFFIE; BECKMAN, 2006).

$$\omega = 15^\circ \cdot (\text{horas do meio dia solar local}) \quad (6)$$

Os dois principais ângulos para determinação da posição solar no céu são o ângulo de altura solar (α_s), que é o ângulo entre a horizontal e a linha que liga ao centro do globo solar, e o ângulo de azimute solar (γ_s), que é o deslocamento angular em relação ao sul da projeção da radiação direta em um plano horizontal. Por definição, deslocamentos a leste do sul assumem valores negativos e a oeste do sul valores positivos. Segundo Goswami, Kreith e Kreider (2000), os ângulos de altura solar e azimute solar não são ângulos fundamentais, logo eles devem ser relacionados com os ângulos de hora solar (ω), latitude (ϕ) e declinação (δ). O ângulo zênite (θ_z) é definido como o ângulo complementar ao ângulo de altura solar e é formado entre a vertical e a linha que liga ao centro do globo solar.

As Equações 7, 8 e 9 permitem calcular os ângulos de altura solar, zênite e azimute solar, respectivamente (DUFFIE; BECKMAN, 2006; RAJPUT, 2014).

$$\text{sen } \alpha_s = \text{sen } \phi \text{ sen } \delta + \text{cos } \phi \text{ cos } \delta \text{ cos } \omega \quad (7)$$

$$\theta_z = 90^\circ - \alpha_s \quad (8)$$

$$\gamma_s = \text{sin}^{-1}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\text{cos } \theta_z \text{ sen } \phi - \text{sen } \delta}{\text{sen } \theta_z \text{ cos } \phi} \right) \right| \quad (9)$$

Segundo Goswami, Kreith e Kreider (2000), o ângulo de azimute solar pode ainda ser determinado pela Equação 10.

$$\gamma_s = \text{sen}^{-1} \left(\frac{\cos \delta \text{ sen } \omega}{\cos \alpha_s} \right) \quad (10)$$

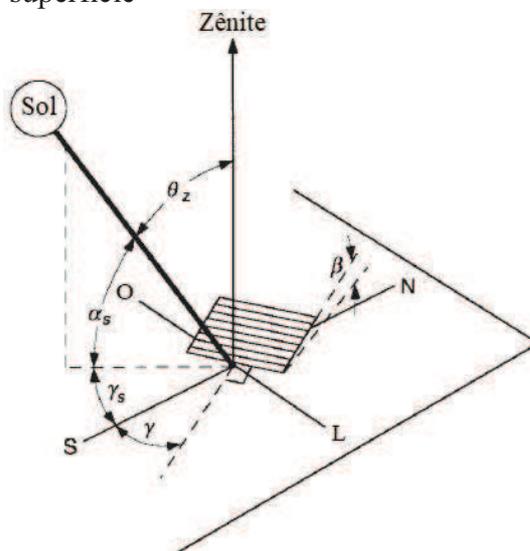
Outro ângulo importante é formado entre a radiação direta e a normal de uma superfície e é definido como ângulo de incidência (θ). Este pode ser calculado pelas Equações 11 e 12 (DUFFIE; BECKMAN, 2006).

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \text{sen } \delta \text{ sen } \phi \cos \beta - \text{sen } \delta \cos \phi \text{ sen } \beta \cos \gamma \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \text{ sen } \phi \text{ sen } \beta \cos \gamma \cos \omega \\ & + \cos \delta \text{ sen } \beta \text{ sen } \gamma \text{ sen } \omega \end{aligned} \quad (11)$$

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \text{sen } \theta_z \text{ sen } \beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (12)$$

A Figura 3 mostra a representação de alguns ângulos descritos nesta seção em uma visão espacial.

Figura 3 – Principais ângulos solares e de superfície



Fonte: adaptada de Duffie e Beckman (2006, p. 13).

4.3.2 Estimativa da radiação solar terrestre

A variação da radiação solar extraterrestre pode ser calculada pelas Equações 13 e 14. A Equação 13 permite uma precisão suficiente para a maioria das aplicações de engenharia (DUFFIE; BECKMAN, 2006). Para um cálculo mais preciso, utiliza-se a Equação

14 (SPENCER, 1971).

$$G_{o,n} = \begin{cases} G_{cs} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) & (13) \\ G_{cs} \left(1,000110 + 0,034221 \cos B + 0,001280 \sin B \right. \\ \quad \left. + 0,000719 \cos 2B + 0,000077 \sin 2B \right) & (14) \end{cases}$$

Nestas, $G_{o,n}$ é a radiação extraterrestre incidente em um plano normal à radiação no dia n do ano.

Para o cálculo em um plano não normal à radiação, utiliza-se a Equação 15 ou a Equação 16 (DUFFIE; BECKMAN, 2006). Dessa forma, é possível o cálculo da radiação solar extraterrestre durante o nascer-do-sol e o pôr-do-sol em uma localidade específica.

$$G_o = G_{cs} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \cos \theta_z \quad (15)$$

$$G_o = G_{cs} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta) \quad (16)$$

A radiação percebida por uma superfície na Terra possui valores menores do que a constante solar. Isso se deve por parte da radiação que atravessa a atmosfera ser refletida para o espaço, parte ser absorvida pelo ar e por vapor de água, e outra parte ser espalhada pelas moléculas de ar, vapor de água, aerossóis e material particulado.

A latitude pode dar somente uma grosseira indicação da irradiação anual, pois fatores locais têm maior impacto na energia que alcança a superfície. Como exemplo, Estocolmo, na Suécia, possui irradiação anual semelhante a Berlim, na Alemanha, apesar de estar em uma latitude 7° maior, e Londres, na Inglaterra, mesmo estando ao sul de Berlim, possui irradiação significativamente menor (QUASCHNING, 2005).

A radiação solar que atinge uma superfície varia dependendo da localização geográfica e também localmente, pela influência de poluentes na atmosfera local. Existe, além disso, a variação anual, devido ao movimento de translação da Terra, e a variação horária, devido ao movimento de rotação. A passagem de nuvens pode ocasionar significantes e rápidas reduções na radiação solar, trazendo variações a cada hora, minuto ou até mesmo segundo (FRERIS; INFIELD, 2008).

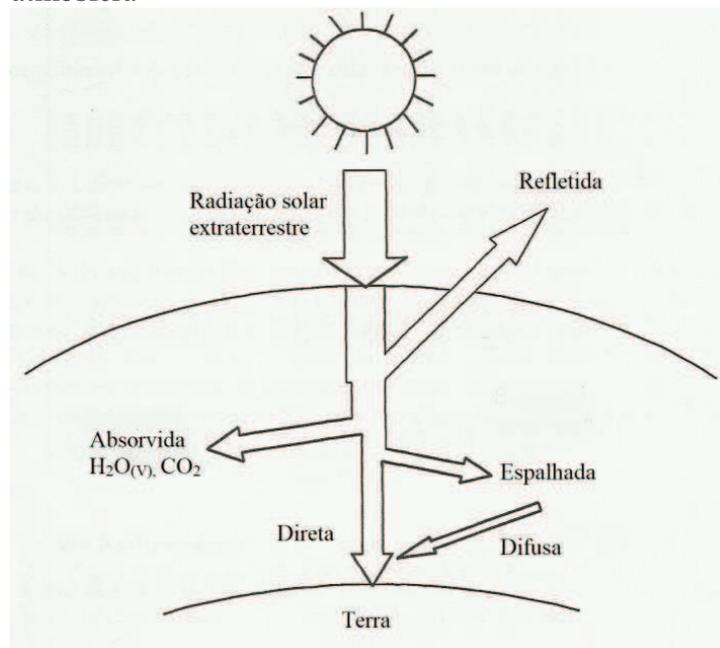
A radiação solar terrestre é classificada em radiação direta (G_{dir}), difusa (G_{dif}) e

global (G_g). A direta é a responsável por causar sombras pelo fato de ser direcional, vinda da circunferência solar, a difusa não tem direção definida, já que é formada pelo espalhamento em todas as direções dos raios solares na atmosfera, e a global é a soma dos dois tipos de radiação, conforme a Equação 17 (DUFFIE; BECKMAN, 2006; GUPTA, 2012):

$$G_g = G_{dir} + G_{dif} \quad (17)$$

A fração de energia direta em relação à total ou global varia conforme a localidade e conforme as condições atmosféricas e climáticas. Essa fração varia entre 0,64 e 0,88. (RAJPUT, 2014). A Figura 4 mostra o caminho traçado pela radiação solar.

Figura 4 – Atenuação da radiação solar ao atravessar a atmosfera



Fonte: adaptada de Goswami, Kreith e Kreider (2000, p. 43).

O espalhamento da radiação que passa pela atmosfera é causado pela interação entre a radiação e as moléculas de ar, água e poeira presentes. O nível do espalhamento depende da quantidade dessas moléculas e do tamanho delas em relação ao comprimento de onda da energia radiante.

Moléculas pequenas em relação ao comprimento de onda, como as moléculas de ar, são responsáveis pelo espalhamento definido como espalhamento de Rayleigh, que possui pequeno efeito na transmitância atmosférica (DUFFIE; BECKMAN, 2006; QUASCHNING, 2005).

Moléculas maiores, como moléculas de água e poeira, provocam um maior efeito sobre a transmitância. A intensidade desse efeito varia localmente. Regiões mais poluentes, geralmente, possuem mais partículas suspensas no ar que causam esse tipo de espalhamento, chamado de espalhamento de Mie (DUFFIE; BECKMAN, 2006; QUASCHNING, 2005).

A absorção que ocorre da radiação na atmosfera é devido à larga camada de ozônio no espectro ultravioleta e ao vapor de água e dióxido de carbono no espectro infravermelho (DUFFIE; BECKMAN, 2006).

À medida que o Sol muda de posição em relação a uma superfície na Terra, o valor da radiação também é alterado, pois, quanto maior for o ângulo de altura solar, menor irá ser a quantidade de massa de ar (MA) que será atravessada pelos raios solares até chegar à superfície. Por isso, ao meio dia solar, em que o ângulo de altura solar é 90° , a intensidade de radiação é mais elevada do que em outros horários ao longo do dia. Esse fato é representado pela Equação 18 (QUASCHNING, 2005).

$$MA = \frac{1}{\text{sen } \alpha_s} \quad (18)$$

Schulze (1970) representou as influências na absorção e nos espalhamentos de Rayleigh e de Mie, devido à mudança do ângulo de altura solar e, conseqüentemente, da massa de ar, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Influência do ângulo de altura solar na redução da radiação

Altura solar (α_s)	Massa de ar (MA)	Absorção (%)	Espalhamento de Rayleigh (%)	Espalhamento de Mie (%)	Redução total (%)
90°	1,00	8,7	9,4	0 – 25,6	17,3 – 38,5
60°	1,15	9,2	10,5	0,7 – 29,5	19,4 – 42,8
30°	2,00	11,2	16,3	4,1 – 44,9	28,8 – 59,1
10°	5,76	16,2	31,9	15,4 – 74,3	51,8 – 85,4
5°	11,5	19,5	42,5	24,6 – 86,5	65,1 – 93,8

Fonte: Schulze (1970).

Os efeitos do espalhamento atmosférico e absorção da radiação solar são variáveis com o tempo, com as condições atmosféricas e a mudança da massa de ar. Considerando como padrão um dia ensolarado, pode-se estimar o valor da radiação solar direta incidente em uma superfície na Terra.

É necessário, primeiramente, o cálculo da transmitância atmosférica para radiação

direta (τ_{dir}), que depende da altitude e do ângulo zênite, pela Equação 19 (HOTTEL, 1976).

$$\tau_{dir} = a_0 + a_1 e^{\left(\frac{-k}{\cos \theta_z}\right)} \quad (19)$$

As constantes a_0 , a_1 e k para uma atmosfera padrão com 23 km de visibilidade são encontradas a partir de a_0^* , a_1^* e k^* pelas Equações 20, 21 e 22. A altitude local (Alt) é dada em km.

$$a_0^* = 0,4237 - 0,00821 (6 - Alt)^2 \quad (20)$$

$$a_1^* = 0,5055 + 0,00595 (6,5 - Alt)^2 \quad (21)$$

$$k^* = 0,2711 + 0,01858 (2,5 - Alt)^2 \quad (22)$$

São aplicados fatores de correção para a_0^* , a_1^* e k^* para diferentes tipos de clima. Dessa forma, os valores de a_0 , a_1 , e k são os retornados pelas Equações 23, 24 e 25.

$$a_0 = a_0^* \cdot r_0 \quad (23)$$

$$a_1 = a_1^* \cdot r_1 \quad (24)$$

$$k = k^* \cdot r_k \quad (25)$$

Hottel (1976) mostra valores de $r_0 = 0,95$, $r_1 = 0,979$ e $r_k = 1,024$ para regiões tropicais ao nível do mar.

Como a transmitância (τ_{dir}), é a razão da radiação direta normal à superfície ($G_{dir,n}$) pela radiação extraterrestre normal ($G_{o,n}$), Equação 26, a radiação direta de céu limpo pode ser estimada pela Equação 27 (DUFFIE; BECKMAN, 2006).

$$\tau_{dir} = \frac{G_{dir,n}}{G_{o,n}} \quad (26)$$

$$G_{dir,n} = \tau_{dir} \cdot G_{o,n} \quad (27)$$

4.3.3 Medição da radiação solar

Medições da radiação solar são importantes na maioria das aplicações em engenharia, principalmente para aplicações de fonte solar térmica, que inclui valores de radiação solar global, direta e difusa. Existem dois instrumentos básicos para medição da radiação solar: Piranômetro e Pireliômetro.

4.3.3.1 Piranômetro

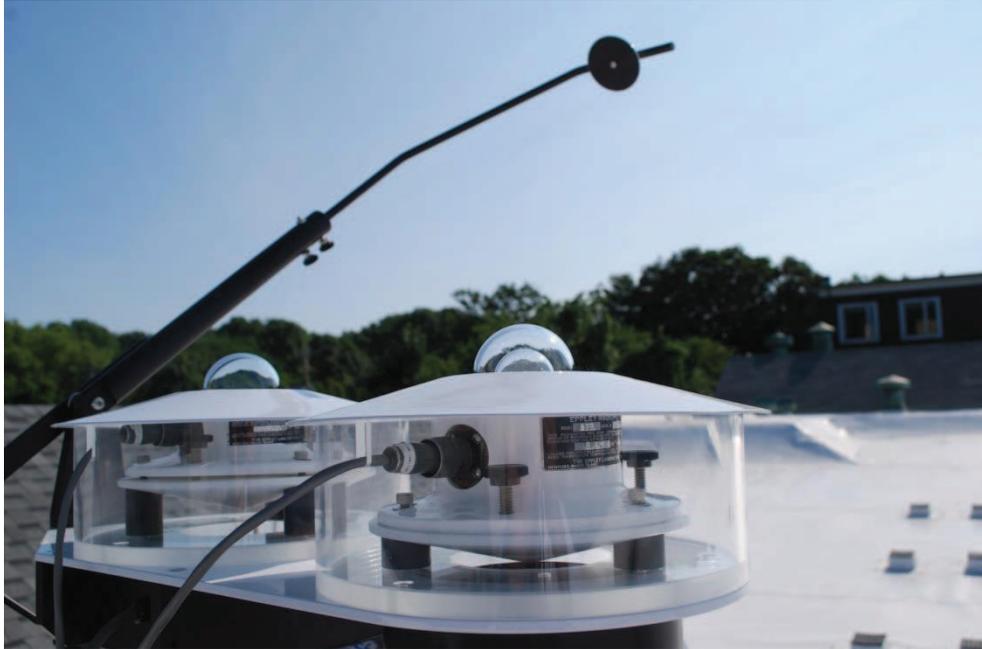
O piranômetro é um instrumento de medição de toda a radiação que incide em sua superfície, radiação solar global ou total. O princípio de funcionamento é a exposição de uma superfície sensível à incidência de radiação direta, difusa e refletida pelas redondezas.

A faixa de comprimento de onda medida é de 0,3 μm a 3 μm . A maioria é constituído por termopilhas. A superfície receptora possui de dois anéis de prata concêntricos, sendo o anel interior negro e o exterior branco. A diferença de temperatura entre eles é medida por termopares. O conjunto é hermeticamente fechado por um hemisfério de vidro (PALZ, 2002; RAJPUT, 2014).

Um piranômetro pode ser usado para medir a radiação solar difusa, utilizando um anel ou um disco de sombreamento para bloquear a incidência de radiação solar direta no sensor. Caso se utilize um anel, a posição é ajustada periodicamente à medida que varia o ângulo de declinação solar; caso se utilize um disco, a posição é corrigida por um rastreador automático. A Figura 5 mostra dois piranômetros; um sombreado por um disco e outro não.

Piranômetros são sempre calibrados utilizando pireliômetros. Um método de calibração é a partir de dados de leitura de um dia ensolarado. São postos em funcionamento um piranômetro para medição de radiação global e outro com anel de sombreamento para medição de radiação difusa, além das medições realizadas pelo pireliômetro. A constante de calibração é a razão da diferença dos valores lidos entre os piranômetros não sombreado e sombreado pela radiação solar direta lida pela pireliômetro, multiplicada pela constante de calibração do pireliômetro e por $\cos \theta_z$ (DUFFIE; BECKMAN, 2006).

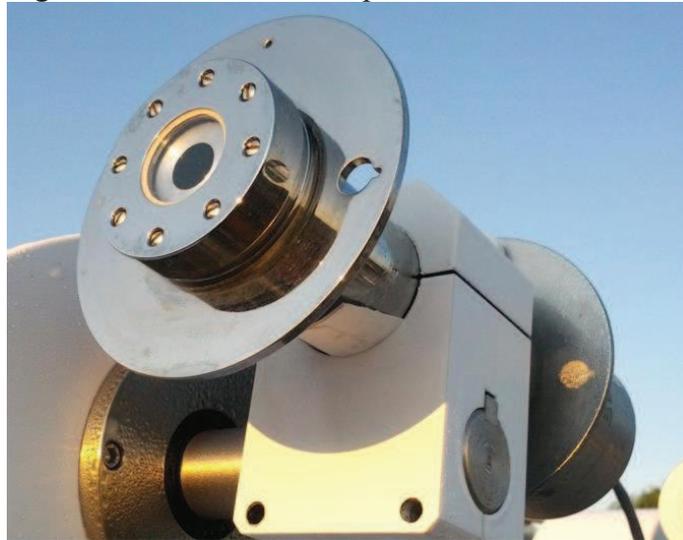
Figura 5 – Piranômetros utilizados para medição de radiação global e difusa.



Fonte: The Eppley Laboratory inc (2019).

4.3.3.2 Pireliômetro

Figura 6 – Pireliômetro acoplado a um rastreador



Fonte: The Eppley Laboratory inc (2019).

O pireliômetro (Figura 6) é responsável por medir a radiação solar direta. Possui uma abertura colimada e uma superfície receptora que deve ser mantida normal aos raios solares. Basicamente, é posto um sensor na base de um longo tubo. Essa geometria restringe a vista do céu do sensor para um ângulo de 5° , dessa forma medindo a radiação solar direta e uma pequena parte de radiação difusa com esse ângulo de visão. Segundo Goswami, Kreith e

Kreider (2000), isso é um problema ao se usar esses valores para sistemas de torres centrais, que utilizam somente radiação solar direta, porém esse não é um problema significativo para PTCs, que, geralmente, possuem um campo de visão da ordem de 5°.

É necessário possuir um sistema de rastreamento acoplado para se obterem valores corretos de medição. Esse rastreamento pode ser feito em dois eixos, um para acompanhar a variação do ângulo de altura solar e outro do ângulo azimute solar, utilizando dois motores, ou pode ser feito com rastreamento automático em um eixo, acompanhando o ângulo de altura solar com um motor e realizando um ajuste manual do ângulo de declinação solar periodicamente.

4.3.4 Limitações da radiação solar

O primeiro problema encontrado em projetos de engenharia solar é devido à baixa densidade de fluxo de energia, logo são necessárias grandes áreas coletoras para geração de energia em grande escala, tornando o preço da entrega de energia mais elevado.

Em dias sem nuvens com Sol a pino, 10 m² de superfície teoricamente poderia gerar energia a 10% de eficiência a uma taxa de 1 kW. Na prática essa quantidade é ainda menor. De 25% a 50% da energia solar é perdida por espalhamento e absorção ao atravessar a atmosfera. Mesmo em um dia sem nuvens e em um local sem poluição, essa percentagem fica em torno de 30%. Cerca de 20% da radiação solar incidente em um plano horizontal é de radiação difusa, podendo essa percentagem ser maior em regiões mais nubladas e com maior teor de poluição (GOSWAMI; KREITH; KREIDER, 2000).

A energia solar total incidente na Terra é constituída de energia solar direta e difusa. A maioria dos coletores solares pode converter somente a energia solar direta de forma eficiente. A intensidade dessa energia depende diretamente da quantidade de nuvens e da posição do Sol ao longo do dia.

A segunda limitação é que a maioria das áreas com maior nível de insolação está presente em locais remotos, dessa forma necessitando de investimento em meios de transmissão da energia gerada. As localizações dos países industrializados não favorecem o melhor aproveitamento da energia solar como em países em desenvolvimento, que se localizam, em grande parte, em regiões intertropicais e mais próximas à linha do Equador.

A terceira limitação é a variação diária e sazonal na radiação solar, devido aos movimentos de rotação e translação da Terra, causando problemas envolvendo o armazenamento e distribuição desse tipo de fonte de energia.

4.4 Energia Solar Térmica

Sistemas de geração de energia solar térmica usam concentradores solares para alcançar altas temperaturas de fluidos que irão conduzir motores térmicos com aceitáveis eficiências de conversão. Duas principais tecnologias são utilizadas em usinas termossolares:

- Coletores de Calha Parabólica (PTCs);
- Torres solares.

Ambas usam exclusivamente radiação solar direta, logo, em períodos nublados, chuvosos e noturnos, em que a maior parte da energia é difusa ou ausente, no caso de período noturno, essas tecnologias não produzem. Assim, podem ser combinadas com geração de energia por combustíveis fósseis ou por outras fontes, nesses períodos, ou apresentarem um sistema de armazenamento de energia térmica, a fim de atender à demanda energética por um período de 24 horas.

Usinas de PTCs foram as primeiras termossolares a operar comercialmente. Elas possuem várias fileiras desses concentradores para aquecer o máximo de fluido possível. Esse fluido é aquecido e transportado para um ponto central por redes de tubos projetados para minimizar as perdas térmicas. O calor do fluido é utilizado para gerar vapor que impulsiona uma turbina (QUASCHNING, 2005; GUPTA, 2012).

Essas usinas possuem outras vantagens em relação à geração fotovoltaica, além da possibilidade de gerar energia em períodos nublados e noturnos devido ao armazenamento térmico. Essas vantagens são a eficiência e o custo de energia por unidade de área. A conversão do calor em eletricidade não só corresponde a uma eficiência de 42% contra 15% dos sistemas fotovoltaicos, mas também, para produzir a mesma energia, a instalação de coletores solares requer um local quatro vezes menor do que no caso da fotovoltaica, produzindo, para o mesmo custo por unidade de área, energia a um preço quatro vezes menor (UMMADISINGU; SONI, 2011).

4.4.1 Propriedades radiativas e características dos materiais

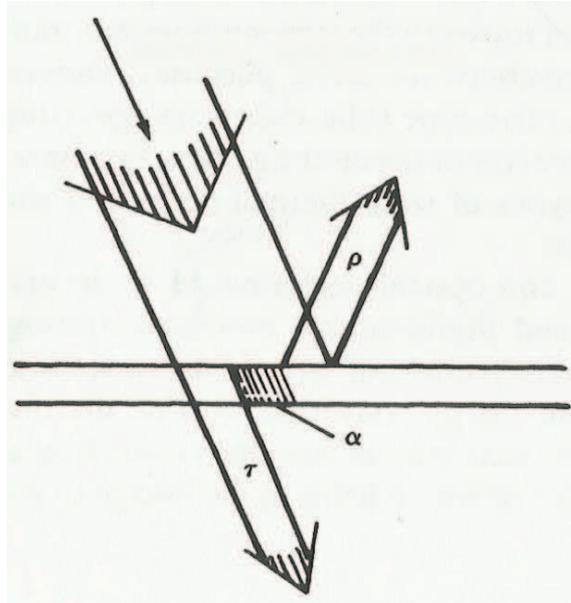
Quando um objeto recebe energia radiante, parte dessa energia é refletida, parte é absorvida e parte é transmitida. Dependendo do ângulo de incidência e da natureza dos materiais, essas parcelas possuem valores diferentes. Com exceção do que ocorre em células fotovoltaicas, a energia absorvida é rapidamente convertida em calor (RAJPUT, 2014).

A fração da energia que é refletida pelo material é chamada de refletância (ρ); a

fração que é absorvida é chamada de absorptância (α); e a fração transmitida é chamada de transmitância (τ). De acordo com a primeira lei da termodinâmica, a soma desses componentes deve corresponder a uma unidade, conforme mostra a Equação 28. Esses componentes estão representados pela Figura 7.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (28)$$

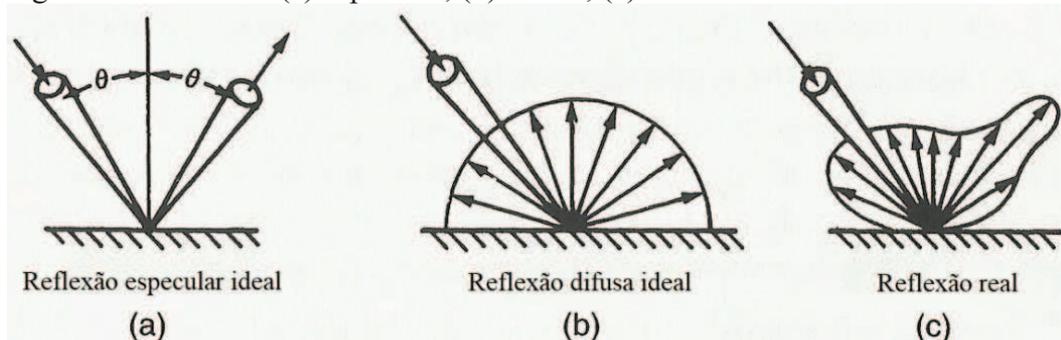
Figura 7 – Representação da transmitância, absorptância e refletância



Fonte: Goswami, Kreith e Kreider (2000, p. 82).

A reflexão da radiação solar pode ser especular, quando o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência, ou difusa, quando, ao atingir a superfície, a radiação é espalhada em diferentes direções. A Figura 8 mostra as características dos tipos de reflexão.

Figura 8 – Reflexão: (a) especular; (b) difusa; (c) real



Fonte: adaptada de Goswami, Kreith e Kreider (2000, p. 83).

Na aplicação de materiais refletores em concentradores de energia solar, é necessário que a superfície seja altamente polida, a fim de ser uma superfície refletora especular para o direcionamento eficaz dos raios solares.

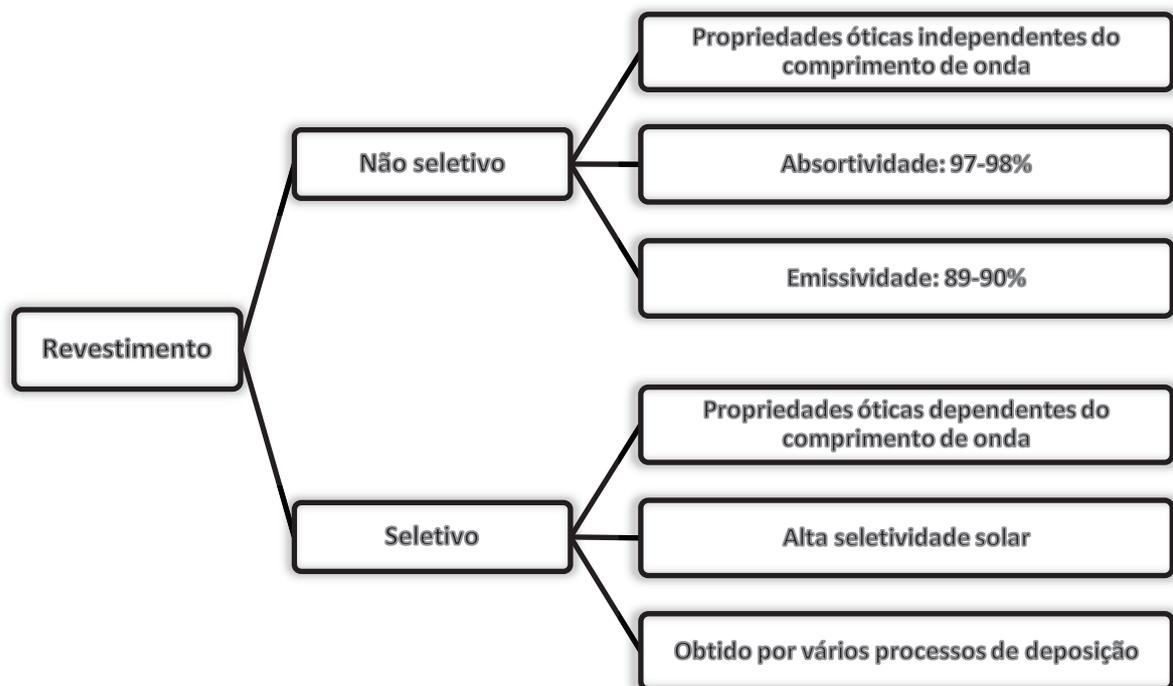
Uma propriedade radiativa importante, além da absorptância, é a emissividade (ε), que é a taxa de emissão de radiação de uma superfície real sobre a emissão de uma superfície negra ideal.

Todas as propriedades dos materiais (α , ρ , τ e ε) podem ser funções de comprimentos de onda e direção. Essas relações são usadas, geralmente, em projetos de dispositivos e sistemas solares. Por exemplo, geralmente usam-se superfícies seletivas e vidros na fabricação de coletores solares (GOSWAMI; KREITH; KREIDER, 2000).

4.4.1.1 Superfícies seletivas

Uma maneira eficiente de maximizar o aproveitamento da radiação solar é aplicar revestimentos de alguns materiais específicos na superfície do absorvedor. Os revestimentos são amplamente classificados como revestimentos não-seletivos e revestimentos seletivos solares, como mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Características dos revestimentos de absorvedores



Fonte: adaptada de Suman, Khan e Pathak (2015).

Refletividade, absorptividade, emissividade e transmitância de revestimentos não seletivos são espectralmente uniformes, o que implica que as características óticas de tais revestimentos são independentes do comprimento de onda ao longo de um determinado intervalo deste. Estes revestimentos têm baixa seletividade solar e também são termicamente instáveis a uma temperatura elevada (SUMAN; KHAN; PATHAK, 2015).

Um dos exemplos de revestimentos não seletivos é a tinta preta comum aplicada sobre a superfície dos absorvedores. Aumenta a absorptividade e a emissividade. Na aplicação solar térmica, um revestimento deve ter uma alta absorptividade, mas uma baixa emissividade, de modo que retenha a energia térmica absorvida.

As superfícies seletivas combinam altos valores de absorptância para a radiação solar e baixos valores de emissividade para a faixa de temperatura que se irá trabalhar com a superfície. Segundo Goswami, Kreith e Kreider (2000), isso é possível pelo fato de que 98% da energia vinda da radiação solar possui comprimentos de onda abaixo de 3 μm , enquanto que 99% da radiação emitida por superfícies negras e cinzas a 400 K possui comprimentos de onda superiores a 3 μm .

4.4.1.2 Superfícies refletoras

Concentradores solares necessitam de superfícies refletoras de alta refletância especular ou dispositivos refratores com alta transmitância no espectro solar. Essas superfícies refletoras geralmente são metais altamente polidos ou revestimento metálico em um substrato adequado. Para essas superfícies, revestimentos reflexivos devem sempre ser postos sobre o substrato, como cromagem sobre cobre ou alumínio polido. No caso de substratos transparentes, a deposição pode ser feita tanto por cima como por baixo. Em substratos de vidro, por exemplo, o revestimento é feito atrás do substrato, portanto a radiação passa pelo substrato duas vezes. Nesse caso, a transmitância deve ser levada em consideração.

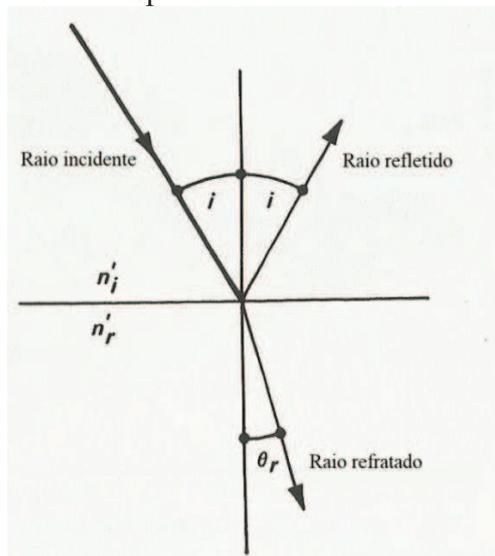
4.4.1.3 Superfícies transparentes

Segundo Goswami, Kreith e Kreider (2000), a transmissão ótica é caracterizada por duas propriedades físicas, ambas dependentes do comprimento de onda: refração (n'), e coeficiente de extinção (k'). O índice de refração, que determina a velocidade da luz no material, também determina a quantidade de luz refletida. O coeficiente de extinção determina a quantidade de luz absorvida.

Segundo a lei de Snell, representada pela Equação 29, o índice de refração é dado pela razão do seno do ângulo de incidência (i), pelo seno do ângulo de refração (θ_r). A Figura 10 mostra os feixes de luz incidentes, refletidos e refratados em um meio transparente.

$$\frac{\text{sen}(i)}{\text{sen}(\theta_r)} = \frac{n_r'}{n_i'} = n' \quad (29)$$

Figura 10 – Incidência de luz em um meio transparente



Fonte: adaptada de Goswami, Kreith e Kreider (2000, p. 87).

Em vidros para aplicações solares, é normalmente usado revestimento antirreflexo, reduzindo em cerca de 4 vezes as perdas por reflexão.

4.4.2 Conversão térmica

Quando uma superfície é exposta à luz do Sol, ela absorve a energia solar e aquece. Utilizando esse princípio, os coletores solares são expostos ao Sol, e a energia absorvida é transferida para um fluido de trabalho.

Parte da energia absorvida como calor é transferida para o fluido e parte é perdida para o ambiente por condução, convecção e radiação. As perdas de calor para as redondezas são minimizadas para aumentar a eficiência dos coletores solares, e o nível desse isolamento depende da aplicação (GUPTA, 2012).

Para reduzir perdas convectivas, a fim de aumentar o calor útil absorvido pelo

sistema, uma ou duas superfícies de vidro são postas anteriormente ou envolvendo a superfície absorvedora.

Em aplicações que se necessitam maiores valores de temperatura de saída, utilizam-se superfícies seletivas, com maiores valores de absorvidade, e tipos especiais de vidros, com melhores valores de transmitância. Além disso, é feito vácuo entre a superfície de vidro e o absorvedor ou entre as duas superfícies de vidro, a fim de excluir as perdas convectivas.

A utilização da energia solar térmica para propósitos de geração de baixas temperaturas é tecnicamente e economicamente viável, como aquecimento de águas residenciais e piscinas, além de ser atrativo para aquecimento de ambientes.

No caso de aplicações que necessitam altas temperaturas, como geração de energia, é necessário o uso de dispositivos para concentração de energia, aumentando a energia incidente sobre o absorvedor.

O alcance de temperatura é determinado pelo balanço entre a energia absorvida, a taxa de extração do fluido e as perdas de energia para o ambiente. Quanto maior a temperatura de trabalho maiores serão as perdas térmicas, que irão limitar a temperatura máxima alcançada. Isso também reduz a fração útil da energia absorvida. As mais altas temperaturas e o máximo de energia útil são alcançados com materiais de alta absorvância e bem isolados, expostos a altos níveis de radiação (RAJPUT, 2014).

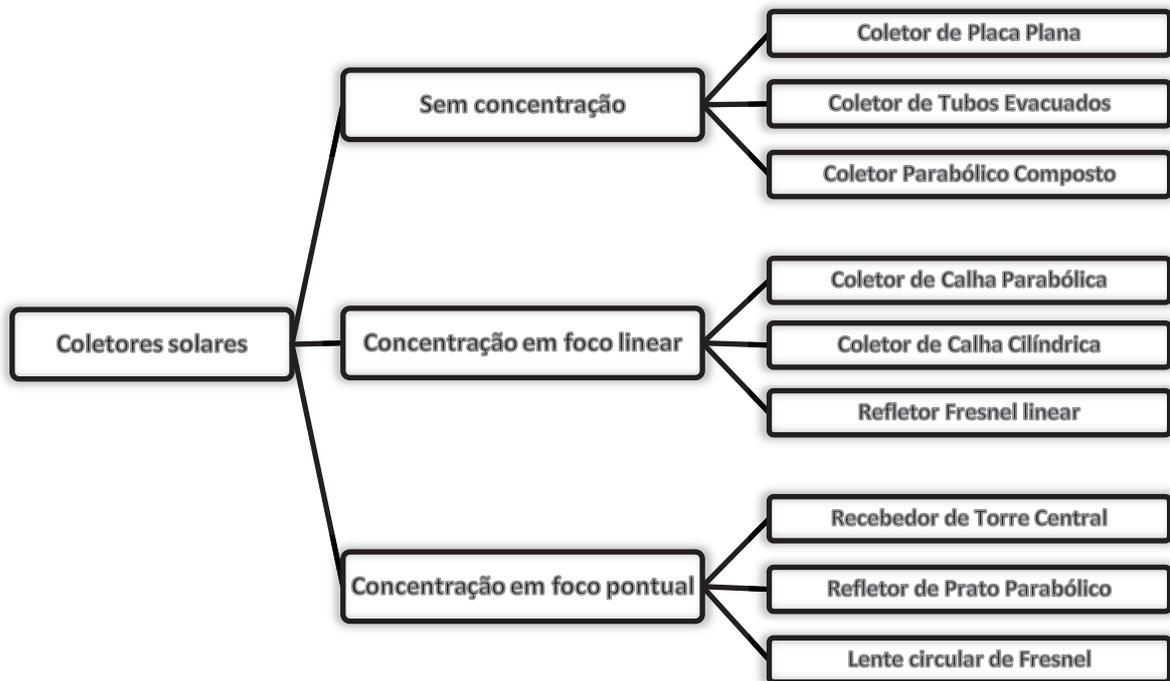
4.4.3 Tipos de coletores solares

O principal componente de qualquer sistema solar térmico é o coletor solar. Este é um dispositivo que absorve a radiação solar, converte em calor e transfere esse calor para um fluido (geralmente ar, água ou óleo) que escoar através do coletor. A energia solar é transportada do fluido circulante diretamente para a água quente ou equipamento de condicionamento do espaço, ou para um tanque de armazenamento de energia térmica, do qual pode ser extraída para uso durante a noite e/ou dias nublados (KALOGIROU, 2004).

Coletores solares são tipos especiais de trocadores de calor, que absorvem radiação solar por uma superfície de alta absorvância para uma faixa de comprimento de onda da energia radiante (GUPTA, 2012).

Não há um consenso em relação à divisão de tipos de coletores, devido à grande variedade existente, contudo, baseando-se nas tecnologias que utilizam ou não dispositivos de concentração de energia solar, os coletores podem ser classificados conforme a Figura 11.

Figura 11 – Tipos de coletores solares



Fonte: elaborada pelo autor.

4.4.4 Concentração de energia solar

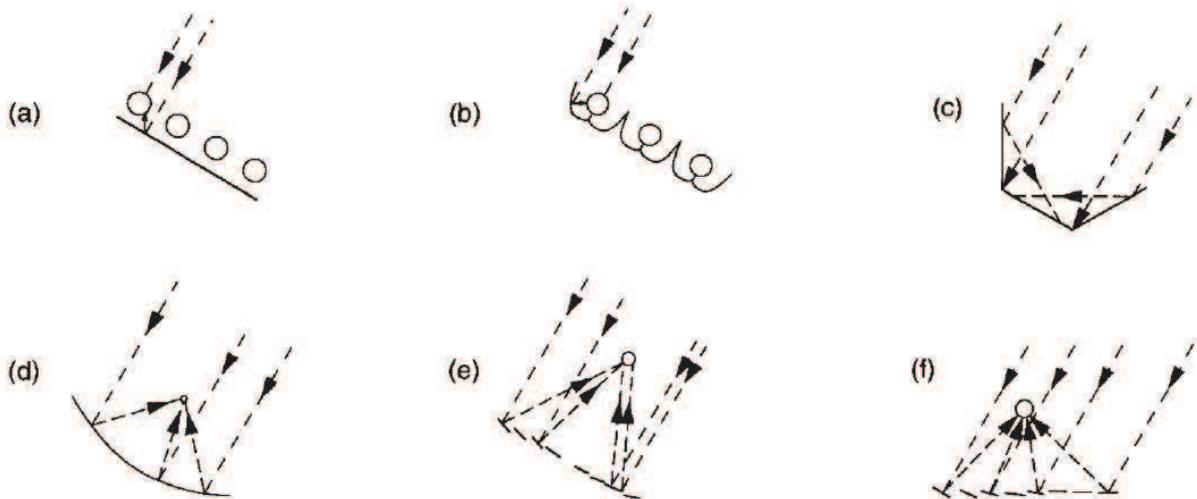
Se uma superfície é irradiada pela luz solar, ela irá aquecer até que as perdas para o ambiente compensem a entrada de energia pela radiação solar. Quando se extrai energia dessa superfície, sua temperatura irá cair. Assim, para se alcançar altas temperaturas é necessário reduzir as perdas para o ambiente e aumentar a energia recebida por unidade de área. Isso é possível ao aumentar a densidade energética dos coletores, utilizando absorvedor de menor área, e ao adicionar um dispositivo ótico entre a fonte de radiação e o recebedor.

Concentradores de energia solar podem ser refletores ou refratores, cilíndricos ou superfícies de revolução, e podem ser contínuos ou segmentados. Os recebedores podem ser convexos, planos ou côncavos, podendo ou não ser cobertos.

A Figura 12 mostra as possíveis configurações de coletores concentradores. Na Figura 12 (a) e (b) utilizam-se refletores difusos e refletores especulares, respectivamente. Esses geralmente são utilizados em aplicações com Coletores de Tubos Evacuados. Na Figura 12 (c), utilizam-se refletores planos para direcionar a radiação para o coletor, sendo utilizados, principalmente, em Coletores de Placa Plana e painéis fotovoltaicos. Na Figura 12 (d), utilizam-se refletores de secção parabólica, que podem ser de superfície cilíndrica ou de revolução.

Os concentradores parabólicos cilíndricos contínuos podem ser substituídos por um refletor Fresnel, que é formado por vários refletores planos em uma matriz de movimentação, como mostrado na Figura 12 (e). As facetas do refletor podem ainda ser individualmente montadas e orientadas de modo a refletir os raios solares para um ponto focal, como ocorre em usinas termossolares de torre central, como mostra na Figura 12 (f).

Figura 12 – Configuração de concentradores solares: (a) refletor difuso; (b) refletor especular; (c) refletor plano; (d) refletor parabólico; (e) refletor Fresnel; (f) matriz de heliostatos



Fonte: Duffie e Beckman (2006, p. 325).

Do ponto de vista de engenharia, os coletores concentradores possuem algumas desvantagens em relação aos Coletores de Placa Plana e de Tubos Evacuados. Como a radiação difusa não pode ser concentrada, eles trabalham majoritariamente com radiação direta, necessitando assim de um sistema de rastreamento para que o absorvedor sempre receba a maior quantidade de energia possível. É inviável sua instalação em zonas temperadas, em que a luz difusa chega a 40% ou mais da radiação global, e em áreas predominantemente nubladas (DUFFIE; BECKMAN, 2006; PALZ, 2002).

Além disso, cuidados em relação à manutenção são necessários, a fim de manter a qualidade dos dispositivos óticos por um longo período de tempo, sendo ainda necessário que o sistema possua uma boa resistência ao arraste provocado pelo vento, que pode ocasionar uma desorientação e, conseqüentemente, uma diminuição considerável na eficiência térmica dos coletores (DUFFIE; BECKMAN, 2006; PALZ, 2002).

O disco solar possui um tamanho finito, dessa forma nem todos os raios solares que atingem a Terra são paralelos uns aos outros. Com isso, existe uma limitação para o fator de concentração de energia solar em um ponto. Nesses casos, a energia solar é concentrada

em um ponto fixo, necessitando que as superfícies refletoras rastreiem o Sol em dois eixos, alcançando alguns milhares de Kelvin. Como alternativa é possível concentrar a radiação solar em uma linha de foco, necessitando de um rastreamento de um único eixo, porém o fator de concentração fica limitado a um valor consideravelmente inferior, sendo ainda suficiente para se alcançar várias centenas de Kelvin (PITZ-PAAL, 2008).

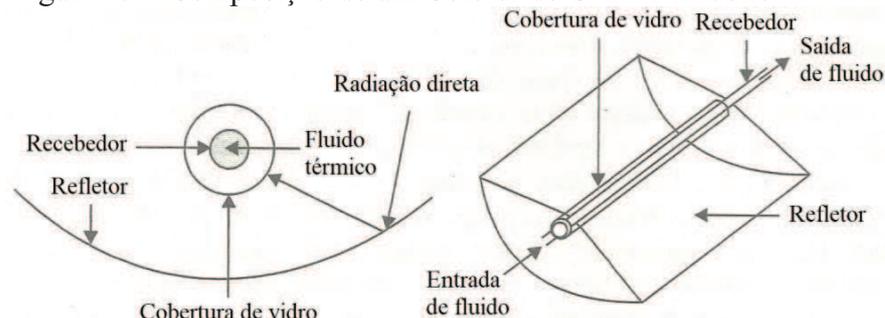
Estes coletores solares são divididos em dois grupos: com formação de imagem e sem formação de imagem.

4.4.4.1 Concentradores solares com formação de imagem

Os concentradores de formação de imagem são subdivididos entre concentração de foco linear (2-D) e de foco pontual (3-D). Os coletores são formados pelo concentrador, que pode ser com lentes ou espelhos, e pelo receptor, que pode ser térmico ou fotovoltaico.

Coletores de Calha Parabólica ou Coletores Cilíndricos Parabólicos são concentradores lineares que se movem, geralmente, em torno de um único eixo para acompanhar o movimento do Sol com o uso de rastreadores. Esses são os mais amplamente utilizados e desenvolvidos dentre os concentradores de foco linear, sendo compostos por um refletor especular com um formato de parábola cilíndrica e por um absorvedor, localizado no foco linear, envolvido por um tubo de vidro, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Composição de um Coletor de Calha Parabólica



Fonte: adaptada de Gupta (2012, p. 282).

Um tubo de vidro é geralmente colocado ao redor do tubo absorvedor para reduzir a perda de calor por convecção. Uma desvantagem do tubo de cobertura de vidro é que a luz refletida do concentrador deve passar através do vidro para alcançar o absorvedor, adicionando uma perda de transmissão de cerca de 10% quando o vidro está limpo. O envelope de vidro geralmente tem um revestimento antirreflexo para melhorar a transmissividade (KALOGIROU, 2004).

As temperaturas em PTCs alcançam até 400 °C para processos industriais de aplicação de calor e geração de energia sem sérios prejuízos à eficiência térmica do coletor. Nesses casos, é necessário vácuo no espaço anular entre o absorvedor e o tubo de vidro envolvente, a fim de alcançar altas temperaturas por reduzir as perdas térmicas convectivas (GUPTA, 2012; KALOGIROU, 2004).

Os PTCs com altas taxas de concentração são usados em aplicações que almejam altas temperaturas de saída do fluido circulante. No entanto, isso acarreta em um grande fluxo de calor não uniforme na parede externa do tubo absorvedor, levando à alta temperatura e ao alto gradiente de temperatura circunferencial no tubo absorvedor. Conseqüentemente, o PTC pode sofrer perdas de desempenho, por meio da degradação do fluido de transferência de calor em alta temperatura, do aumento significativo na perda de calor e do aumento de tensão térmica no tubo absorvedor, que pode dobrar o tubo e até romper a cobertura de vidro, reduzindo assim a vida útil do receptor (LIU *et al.*, 2019a, 2019b).

Técnicas de aprimoramento de transferência de calor, que visam aumentar a taxa de transferência de calor do absorvedor para o fluido de modo a reduzir a temperatura do tubo e atingir uma distribuição de temperatura circunferencial mais uniforme, são as estratégias mais praticáveis para melhorar o desempenho de um PTC (LIU *et al.*, 2019a).

Dependendo da temperatura requerida, o fluido de trabalho pode ser diferente. Geralmente são utilizados fluidos térmicos ou óleos de transferência de calor por terem um menor custo de instalação, operação e manutenção, já que podem trabalhar em baixas pressões, ao contrário do que ocorre com a utilização de água como fluido de trabalho.

PTCs podem ser orientados na direção norte-sul com rastreamento em leste-oeste ou na direção leste-oeste com rastreamento em norte-sul. Como um rastreamento de um único eixo é suficiente, longos módulos de coletores podem ser produzidos.

Coletores Fresnel linear são similares. Estes utilizam espelhos curvos ou mesmo planos para refletir a luz em um absorvedor linear posicionado acima dos espelhos (PITZ-PAAL, 2008).

Concentradores de prato parabólico são exemplos de concentradores de rastreamento em dois eixos. Consistem em um refletor prateado em formato de prato parabólico que concentra a radiação em um único ponto. Um receptor e um motor térmico ficam fixos no foco do coletor, movendo-se com ele. Devido à deformação causada pela força do vento na superfície refletora, a área do prato parabólico fica limitada a 100 m² e a sua energia de saída a 10 kW (PITZ-PAAL, 2008).

Como uma solução para esse problema foram desenvolvidos sistemas de

recebimento centrais, dividindo o tamanho dos pratos em vários outros espelhos planos menores. Esses heliostatos direcionam a radiação solar para uma torre central, onde será absorvida a energia.

Dois parâmetros importantes são descritos:

- Ângulo de aceitação, $2\theta_s$;
- Taxa ou fator de concentração, C .

O ângulo de aceitação é definido como o ângulo em que o sistema pode ser desalinhado sem grandes perdas na energia absorvida pelo receptor. Ele ajuda na determinação do limite superior da taxa de concentração de refletores. O fator de concentração é a relação entre a área de abertura da parábola e a área do absorvedor. Altos valores de concentração ocorrem para absorvedores de menores dimensões possíveis capazes de absorver toda a imagem formada pela superfície refletora (PALZ, 2002).

Apesar de existir uma diferença grande de temperatura entre o centro do Sol e seu extremo, cerca de 1000 °C, é desejável usar toda a imagem do disco solar para o cálculo do ângulo de aceitação. A temperatura cai exponencialmente à medida que vai se distanciando do disco solar, logo o ângulo de aceitação deve ser rigorosamente calculado e utilizado para desenvolvimento de um bom algoritmo de rastreamento, em casos de rastreamento não contínuo.

Existem duas definições de taxa de concentração da radiação solar. A primeira é a taxa de concentração ótica (C_o), que é a razão do fluxo de energia no receptor (I_r) sobre o fluxo de energia na área de abertura do concentrador (I_a), como mostrado na Equação 30 (GOSWAMI; KREITH; KREIDER, 2000). A segunda é a taxa de concentração geométrica (C), que é a razão da área de abertura (A_a) pela área do receptor (A_r), como mostrado na Equação 31 (DUFFIE; BECKMAN, 2006).

$$C_o = \frac{I_r}{I_a} \quad (30)$$

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (31)$$

O valor de C_o fornece a verdadeira taxa de concentração, pois ela leva em consideração as perdas óticas do sistema. Como esta taxa não tem relação com a área do receptor, ela não fornece uma percepção das perdas térmicas (GOSWAMI; KREITH;

KREIDER, 2000).

Limites termodinâmicos existem para esses valores de concentração, segundo as Equações 32 e 33, para concentradores 2-D e 3-D, respectivamente (DUFFIE; BECKMAN, 2006).

$$C_{\max 2D} = \frac{n'}{\sin \theta_s} \quad (32)$$

$$C_{\max 3D} = \frac{n'}{\sin^2 \theta_s} \quad (33)$$

No caso de a concentração ser feita no ar, n' é igual a 1. No caso de ser em vidro, n' é igual a 1,5.

O raio solar angular visto na Terra é de 16' ou $\approx 0,265^\circ$, logo esse é o meio ângulo de aceitação mínimo. Substituindo esse valor nas Equações 32 e 33, tem-se para concentradores 2-D e 3-D valores de concentrações máximos de 216 e 46.747, respectivamente.

A taxa de concentração ideal, na prática, nunca pode ser alcançada, devido às perdas óticas do sistema. Por exemplo, poeira sobre a superfície refletora pode levar a perdas de até 20% na refletividade. Uma taxa de concentração de 50 pode ser considerada boa para um espelho cilíndrico parabólico operacional (PALZ, 2002).

Em usinas geradoras de concentradores de foco linear, é necessário atingir temperaturas entre 200 °C e 300 °C, significando taxas de concentração da ordem de 30. Para isso, deve-se minimizar a área da superfície receptora e ter uma elevada precisão de concentração. Apesar disso, muitos sistemas funcionam satisfatoriamente com fatores de concentração entre 5 e 10, permitindo o uso de receptores de até 5 vezes a dimensão mínima. Nesses sistemas, em que a temperatura de funcionamento é inferior a 200 °C, a qualidade da superfície refletora e a precisão do rastreamento podem ser bem inferiores (PALZ, 2002).

Vários fatores fazem que seja impossível alcançar esses valores de concentração:

- a) forma do refletor e erros de alinhamento;
- b) refletividade da superfície refletora menor do que de um refletor perfeito;
- c) erros de rastreamento;
- d) dispersão atmosférica;
- e) absorção atmosférica.

4.4.4.1.1 Performance térmica de PTCs

O ganho de energia útil por unidade de comprimento do coletor (Q_u) é dado pela Equação 34.

$$Q_u = A_a S - A_r U_p (T_r - T_{amb}) \quad (34)$$

Em que U_p , T_r e T_{amb} são respectivamente o coeficiente global de perdas, a temperatura do receptor e a temperatura ambiente. O termo S é a energia absorvida no tubo absorvedor, considerando valores de refletância dos refletores, transmitância da superfície transparente e absortância do tubo absorvedor, sendo calculado pela Equação 35 (BEHAR *et al.*, 2015).

$$S = G_{dir,n} \cdot \eta_{o,n} \cdot k(\theta) \cdot \xi(\theta) \quad (35)$$

Em que $\eta_{o,n}$ é a eficiência ótica para a radiação incidente normal, determinada pela Equação 36, dependente da refletividade do refletor (ρ), absortividade do absorvedor (α), fator de interceptação (f_{int}) e transmissividade da superfície transparente (τ). Valores superiores a 0,9 são comuns para a transmissividade (DUFFIE; BECKMAN, 2006).

$$\eta_{o,n} = \rho(\tau\alpha f_{int})_n \quad (36)$$

O efeito do ângulo de incidência ($k(\theta)$), é determinado pela razão da eficiência ótica para θ e a eficiência ótica para $\theta = 0^\circ$, conforme a Equação 37 (GAUL; RABL, 1980).

$$k(\theta) = \frac{\eta_o(\theta)}{\eta_{o,n}} \quad (37)$$

As imperfeições microscópicas dos refletores, os erros de forma macroscópica durante a montagem e os parâmetros do local podem causar a reflexão de alguns raios solares no ângulo incorreto e, portanto, não alcançam o tubo absorvedor. Essas perdas são contabilizadas pelo fator de interceptação, f_{int} . Segundo Behar *et al.* (2015), este fator é uma multiplicação de seis parâmetros, em que valores de referência para o fator de interceptação para diferentes imperfeições são relatados na Tabela 3.

Tabela 3 – Fatores de imperfeição que afetam a eficiência do coletor solar

Propriedades óticas	Índice	Valor
Sombreamento do elemento de coleta de calor	$f_{int,1}$	0,974
Erro de rastreamento	$f_{int,2}$	0,994
Precisão geométrica dos espelhos coletores	$f_{int,3}$	0,980
Refletividade do espelho limpo	$f_{int,4}$	0,950
Sujeira no elemento de coleta de calor	$f_{int,5}$	0,980
Fatores diversos	$f_{int,6}$	0,960

Fonte: Behar *et al.* (2015).

O efeito do ângulo de incidência na área de abertura útil do coletor é chamado de perda final geométrica ($\xi(\theta)$). Esse fator, também conhecido como efeito final, é responsável pela fração do comprimento do receptor que não é iluminada pelos raios solares incidentes na abertura. Gaul e Rabl (1980) propuseram a Equação 38 para estimar o efeito final, em que l_{PTC} é o comprimento do coletor.

$$\xi(\theta) = 1 - \{(f/l_{PTC}) \cdot [1 + (A_a^2/(48 \cdot f^2))]\} \cdot \tan \theta \quad (38)$$

Segundo Duffie e Beckman (2006), a energia útil pode ser representada pela Equação 39 em termos da energia transferida para o fluido com temperatura T_f .

$$q'_u = \frac{(A_r/L)(T_r - T_f)}{\frac{D_e}{h_f D_i} + \left(\frac{D_e}{2k} \ln \frac{D_e}{D_i}\right)} \quad (39)$$

Em que q'_u é a energia útil por unidade de comprimento em W/m, D_e é o diâmetro externo do tubo absorvedor em metros, D_i é o diâmetro interno do tubo absorvedor em metros, k é o coeficiente de condutibilidade do tubo absorvedor em W/m.K e h_f é o coeficiente convectivo do fluido em W/m².K.

As perdas e o coeficiente de perdas, considerando convecção, radiação e condução pela estrutura de suporte são representadas pela Equação 40.

$$\begin{aligned} \frac{Q_p}{A_r} &= h_v (T_r - T_{amb}) + \varepsilon_r \sigma (T_r^4 - T_{amb}^4) + U_{cond} (T_r - T_{amb}) \\ &= (h_v + h_r + U_{cond})(T_r - T_{amb}) \\ &= U_p (T_r - T_{amb}) \end{aligned} \quad (40)$$

Em que h_v é o coeficiente convectivo do vento em $W/m^2.K$, h_r é o coeficiente de radiação em $W/m^2.K$, U_{cond} é o coeficiente de perdas por condução em $W/m^2.K$, ε_r é a emissividade do receptor e σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,6697 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$).

Concentradores lineares podem apresentar superfície de vidro envolvendo o tubo absorvedor. Nesse caso, conforme apresentado por Duffie e Beckman (2006), a transferência de calor, em um tubo de comprimento L , vai a partir do receptor com temperatura T_r para a região interna ao vidro com temperatura T_{vi} , Equação 41, através do vidro para a superfície externa com temperatura T_{ve} , Equação 42 e, por fim, para as redondezas a uma temperatura T_{amb} e a uma temperatura de céu $T_{céu}$, Equação 43.

$$Q_p = \frac{2\pi k_{eff} L}{\ln(D_{vi}/D_r)} (T_r - T_{vi}) + \frac{\pi D_r L \sigma (T_r^4 - T_{vi}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{1 - \varepsilon_v}{\varepsilon_v} \left(\frac{D_r}{D_{vi}}\right)} \quad (41)$$

$$Q_p = \frac{2\pi k_v L (T_{vi} - T_{ve})}{\ln(D_{ve}/D_{vi})} \quad (42)$$

$$Q_p = \pi D_{ve} L h_w (T_{ve} - T_{amb}) + \varepsilon_v \pi D_{ve} L \sigma (T_{ve}^4 - T_{céu}^4) \quad (43)$$

Em que D_{vi} é o diâmetro interno do vidro em metros, D_{ve} é o diâmetro externo do vidro em metros, D_r é o diâmetro do receptor em metros, k_v é a condutibilidade térmica do vidro em $W/m.K$ e ε_v é a emissividade térmica do vidro.

O termo (k_{eff}) é a condutibilidade efetiva para convecção entre o receptor e o vidro, calculada pela Equação 44:

$$\frac{k_{eff}}{k_v} = \max \left[1; 0,386 \left(\frac{Pr \times Ra^*}{0,861 + Pr} \right)^{1/4} \right] \quad (44)$$

Em que:

$$Ra^* = \frac{[\ln(D_{ve}/D_{vi})]^4}{d^3 (D_{vi}^{-3/5} + D_{ve}^{-3/5})^5} Ra \quad (45)$$

$$Ra = \frac{g\beta'\Delta T d^3}{\nu\alpha} \quad (46)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (47)$$

Os termos Ra e Pr são respectivamente os número de Rayleigh e Prandtl, g é a aceleração da gravidade, β' é o coeficiente de expansão térmica, d é a distância entre os cilindros, ν é a viscosidade cinemática e α é a difusividade térmica.

O cálculo dessas equações é feito, primeiramente, estimando o valor de T_{ve} , que será mais próximo de T_{amb} , a fim de se calcular Q_p pela Equação 43. Esses valores serão utilizados na Equação 42, a fim de se calcular T_{vi} . Os valores de temperatura serão utilizados na Equação 41 para se encontrar um novo valor de Q_p . A Equação 41 é usada para verificar se a estimativa inicial do valor de T_{ve} é correta, comparando o Q_p calculado por essa equação com o da Equação 43. O método é repetido até os valores convergirem.

A eficiência térmica do coletor (η_c) é calculada pela Equação 48. Pode-se representar a eficiência térmica em função da eficiência ótica (η_o) e da taxa de concentração geométrica, Equação 49 (GOSWAMI; KREITH; KREIDER, 2000).

$$\eta_c = \frac{Q_u}{G_{dir,n}A_a} \quad (48)$$

$$\eta_c = \eta_o - \frac{U_p(T_r - T_{amb})}{G_{dir,n}} \frac{1}{C} \quad (49)$$

No cálculo da eficiência térmica do coletor, em relação aos concentradores, geralmente se leva em consideração somente os valores de radiação solar direta, porém pode ser utilizado o valor da radiação solar global, a fim de se comparar diferentes tecnologias de coletores térmicos.

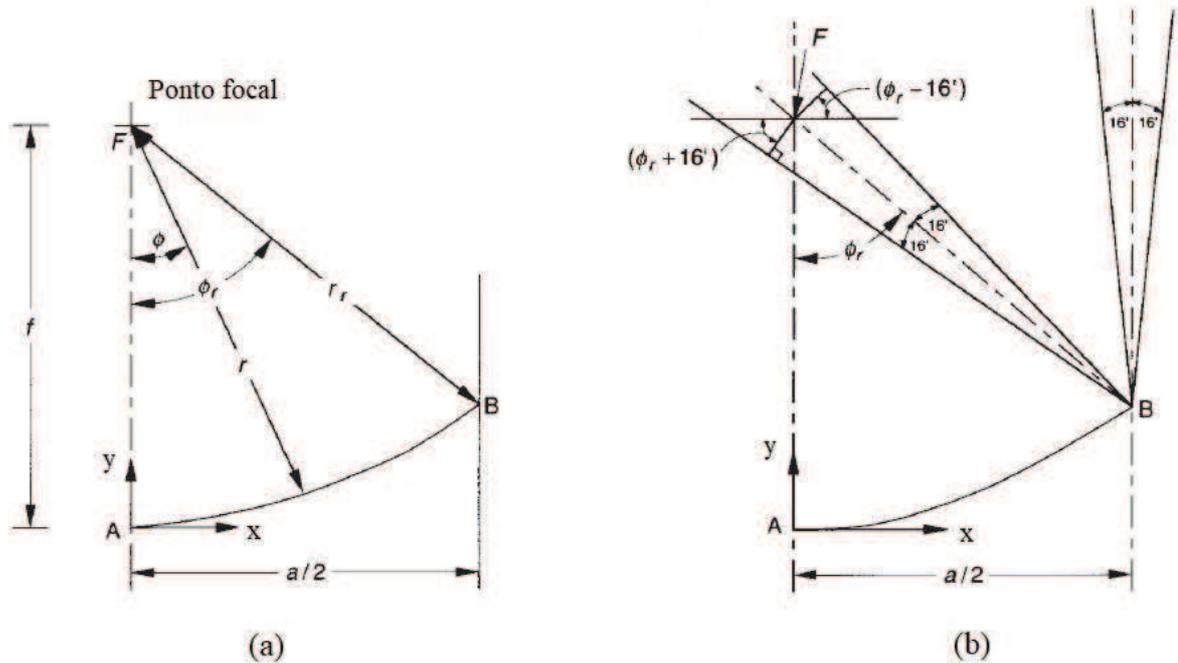
4.4.4.1.2 Características construtivas de PTCs

Para a determinação da energia S nos Coletores de Calha Parabólica, é necessário o conhecimento das características das imagens produzidas pelos refletores. A equação da parábola de concentradores cilíndricos parabólicos, em termos do sistema de coordenadas, é

mostrada pela Equação 50, sendo f a distância focal da base da parábola (DUFFIE; BECKMAN, 2006).

$$y = \frac{x^2}{4f} \quad (50)$$

Figura 14 – Aspectos construtivos de um PTC: (a) ângulo de borda; (b) ângulo de aceitação



Fonte: adaptada de Duffie e Beckman (2006, p. 354).

Na Figura 14 (a), a radiação direta incide no refletor no ponto B, em que o raio do espelho é máximo, formando o ângulo de borda (φ_r), que pode ser calculado pela Equação 51 (DUFFIE; BECKMAN, 2006). Segundo Behar *et al.* (2015), o ângulo de borda ótimo deve ser entre 70° a 110° .

$$\varphi_r = \tan^{-1} \left[\frac{8(f/a)}{16(f/a)^2 - 1} \right] = \sin^{-1} \left(\frac{a}{2r_r} \right) \quad (51)$$

O ângulo de aceitação é o alcance angular o qual todos os raios solares diretos que são refletidos pelo coletor alcançam o tubo absorvedor sem mover qualquer parte do coletor. A metade do ângulo de aceitação (θ_s) é função do diâmetro externo do absorvedor (D_e), da posição (x) e da distância focal (f), conforme a Equação 52.

$$\text{sen } \theta_s = \frac{D_e}{2f \left(1 + \left(\frac{x}{2f} \right)^2 \right)} \quad (52)$$

Segundo Duffie e Beckman (2006) e Behar *et al.* (2015), o ângulo mínimo de aceitação é de aproximadamente $0,53^\circ$. Esse valor é a média do ângulo que corresponde à esfera do Sol vista da Terra, portanto, quando um coletor é projetado com valores menores do que o mínimo, significa que uma parte da radiação solar não atingirá o absorvedor. Esse ângulo, para os coletores disponíveis no mercado, está entre 1° e 2° .

Um PTC com ângulo de aceitação menor do que 1° exige um sistema de rastreamento solar muito preciso e isso aumenta significativamente o custo de fabricação. Por outro lado, o ângulo mais alto reduz a taxa de concentração e reduz a temperatura de alcance do coletor (BEHAR *et al.*, 2015).

O raio em qualquer posição da parábola pode ser determinado pela Equação 53, em função do ângulo de abertura (φ) (DUFFIE; BECKMAN, 2006).

$$r = \frac{2f}{1 + \cos \varphi} \quad (53)$$

A Figura 14 (b) mostra como a radiação refletida da borda da parábola determina o comprimento da zona focal. O comprimento da imagem solar no plano focal aumenta com o aumento do ângulo de borda. Os comprimentos mínimos de um receptor plano, circular e semicircular, para interceptação de toda a radiação refletida, são mostrados.

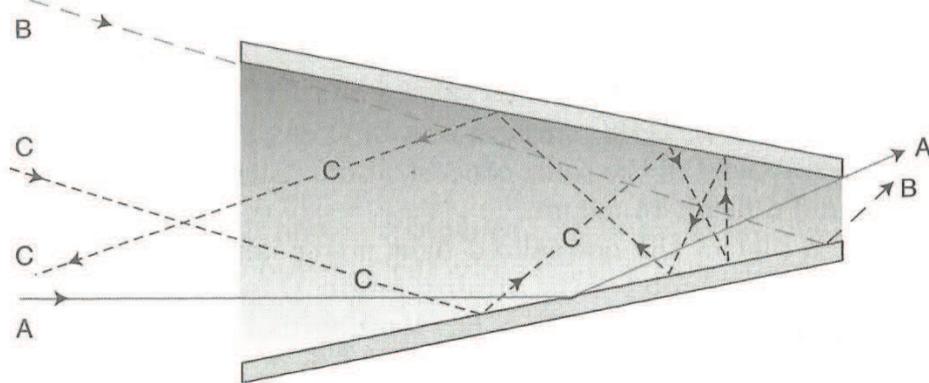
Para refletores parabólicos espaciais de forma e de alinhamento perfeitos, o diâmetro de um receptor cilíndrico parabólico para interceptar toda a imagem solar é calculado pela Equação 54 (DUFFIE; BECKMAN, 2006).

$$D_{r,\text{mín}} = 2r_r \text{sen } 0,267^\circ = \frac{a \text{sen } 0,267^\circ}{\text{sen } \varphi_r} \quad (54)$$

4.4.4.2 Concentradores solares sem formação de imagem

Concentradores mais simples têm a forma de um cone, Figura 15, em que todos os raios paralelos ao seu eixo na entrada são refletidos em uma abertura na saída. O ângulo de aceitação desses concentradores é pequeno.

Figura 15 – Caminho dos raios de luz em um concentrador em forma de cone



Fonte: Rosa (2009, p. 537).

Uma otimização desses concentradores é o uso de espelhos parabólicos ao invés de cone, formados por duas parábolas independentes. A área da superfície refletora é muito maior do que a de um foco paraboloide de mesma concentração, fazendo os mesmos serem mais pesados, caros e difíceis de montar.

4.4.5 Rastreamento

Alguns coletores solares rastreiam o Sol, alterando a sua orientação espacial, a fim de minimizar o ângulo de incidência da radiação direta em sua superfície e, assim, maximizar a quantidade de energia incidente.

O sistema de rastreamento é classificado pelas movimentações. A rotação pode ser feita em um único eixo ou em dois eixos. Para o desenvolvimento do algoritmo de rastreamento, utilizam-se os ângulos definidos na seção 4.3.1. O ângulo de referência para o rastreamento é o ângulo de incidência (θ), pois o objetivo é que esse ângulo seja zero ou o menor possível.

O rastreamento de dois eixos é empregado em concentradores 3-D, os quais rastreiam os ângulos de altura solar e azimute solar. É um tipo de rastreamento com custos mais elevados, pois exige uma complexidade maior do sistema de controle e atuação. É geralmente empregado em usinas termossolares de torre central, em que diversas superfícies refletoras (heliostatos) dispostas ao redor de uma torre recebedora direcionam a radiação solar para esta.

O rastreamento de um eixo é utilizado em usinas termossolares de Coletores de Calha Parabólica, que são os concentradores mais comumente comercializados. Eles são rotacionados sobre um único eixo, podendo ser norte-sul, leste-oeste, ou inclinado e paralelo

ao eixo da Terra. Existem diferenças significantes na quantidade de radiação direta incidente, velocidade angular e qualidade de imagem obtida por esses três modos diferentes de orientação (DUFFIE; BECKMAN, 2006). Como grandes filas com vários refletores conectados são usadas, dificulta-se a construção de uma estrutura de rastreamento em outro eixo, que acabaria tornando o sistema inviável economicamente (GOSWAMI; KREITH; KREIDER, 2000).

Para um concentrador orientado horizontalmente na direção norte-sul, algumas perdas são observadas nas extremidades dos espelhos, já que ao longo do ano o ângulo de declinação solar varia de $\pm 23,45^\circ$. Se possível, os coletores solares de rastreamento de um único eixo devem ser inclinados para o norte, caso estejam localizados em regiões no hemisfério sul, ou para o sul, em regiões no hemisfério norte, com um ângulo do valor de sua latitude (PALZ, 2002).

Para um concentrador orientado horizontalmente na direção leste-oeste, é necessário um algoritmo de rastreamento mais complexo, pois a velocidade angular ao longo do dia não terá um valor constante (PALZ, 2002).

Os sistemas de orientação podem ter ajuste contínuo ou aproximadamente contínuo. Para alguns concentradores lineares de baixa concentração, é possível realizar o ajuste de posição de forma intermitente, com mudanças semanais, mensais ou sazonais em alguns projetos (DUFFIE; BECKMAN, 2006).

O número de etapas de acionamento dos atuadores pode ser determinado através de um conjunto de testes pelo usuário. Geralmente é determinado quando o valor da energia extra coletada pelo menor intervalo de rastreamento em comparação ao intervalo anterior passa a ficar igual à energia consumida pelo rastreamento (KONAR; MANDAL, 1991).

O rastreamento intermitente pode ser útil para promover uma redução no gasto energético dos atuadores. Dependendo do ângulo de aceitação e da orientação geográfica do sistema, a atuação dos motores pode ser intensa ou não. Se os concentradores forem orientados leste-oeste, é requerida uma variação de $\pm 30^\circ/\text{dia}$ e, se orientados norte-sul, a variação é de $\approx 15^\circ/\text{hora}$ (GOSWAMI; KREITH; KREIDER, 2000).

O ajuste de orientação pode ser manual ou automático. O rastreamento manual depende de observações do operador e de suas habilidades para fazer as correções necessárias de posição. Pode ser um tipo de rastreamento adequado em casos com baixas taxas de concentração e com baixos recursos financeiros.

O rastreamento automático pode ser feito a partir de um algoritmo que imponha aos atuadores uma mudança de posição dos coletores com base em valores calculados pelas

equações da seção 4.3.1 ou, ao invés dos cálculos, pode-se desenvolver um algoritmo que leia os valores enviados por sensores de luminosidade dispostos sobre a superfície dos coletores ou sobre um equipamento acoplado que possua a mesma orientação e envie sinais para que o motor gire no sentido de rotação do lado de maior luminosidade.

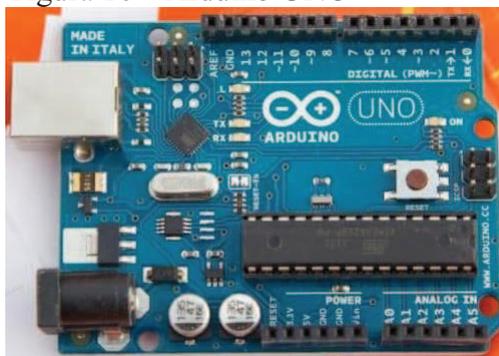
4.4.5.1 Microcontrolador Arduino

Arduino é um dispositivo barato, funcional e fácil de programar. Possui uma placa composta por um microcontrolador Atmel e circuitos de entrada/saída, podendo ser facilmente conectada a um computador e programada via *Integrated Development Environment (IDE)* ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado, que utiliza uma linguagem baseada em C/C++, sem a necessidade de equipamentos extras além de um cabo USB.

Um sistema com Arduino envolve utilização de componentes eletrônicos como motores, LEDs, sensores e outros. É uma plataforma de prototipagem aberta. Por esses motivos, o Arduino se mostra como uma opção, hoje, muito difundida desde entre usuários caseiros até em experimentos científicos de várias áreas como Física, Química e Engenharias (ALI *et al.*, 2016).

O Arduino UNO (Figura 16) é uma placa que possui um microcontrolador do modelo ATmega328P e tem quatorze saídas/entradas digitais, das quais seis podem ser utilizadas como saídas PWM, 6 entradas analógicas, cristal de quartzo de 16 MHz, conexão USB e uma entrada para fonte externa. A tensão de entrada pode ser de 7 a 12 V.

Figura 16 – Arduino UNO



Fonte: Souza (2013).

4.4.5.2 Sensor LDR

Light Dependent Resistor (LDR) ou Resistor Dependente de Luz (Figura 17) é

uma resistência elétrica que varia em função da intensidade luminosa que incide sobre uma superfície fotossensível.

Figura 17 – *Light Dependent Resistor*

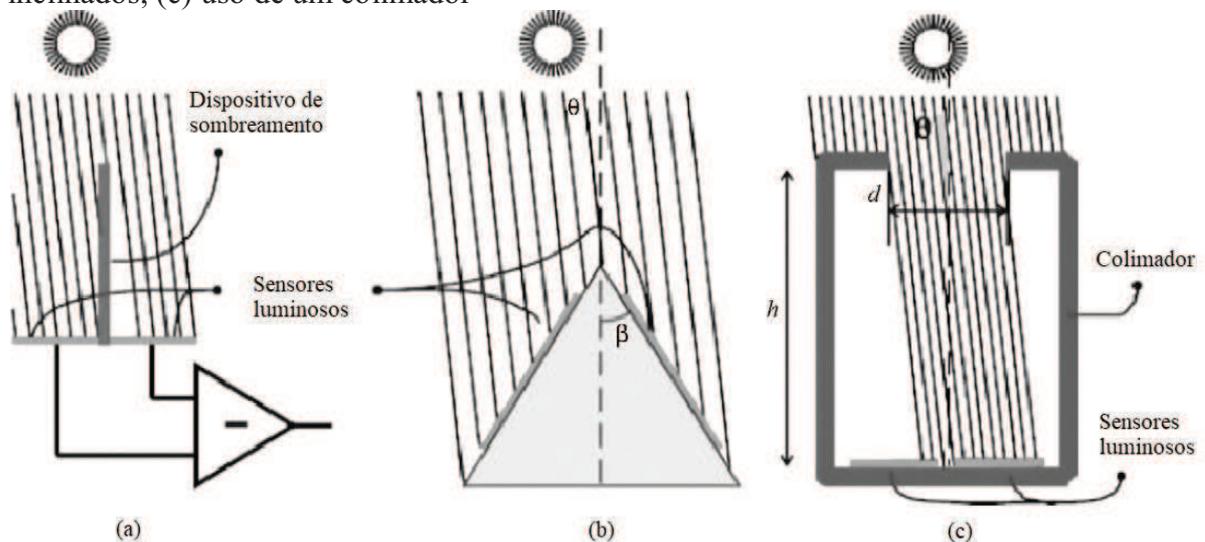


Fonte: Wendling (2010).

Um LDR é feito de materiais semicondutores, geralmente sulfeto de cádmio (CdS) ou seleneto de cádmio (CdSe), por esses compostos terem ótimas respostas para variações de luz. Seu funcionamento consiste em excitar as moléculas que constituem o LDR através de um fóton de luz. Se esse fóton tiver energia suficiente para deslocar um elétron, ele passará para uma banda de valência, deixando uma lacuna e diminuindo assim a condutividade do dispositivo. A variação da resistência pode chegar a $100\text{ M}\Omega$ no escuro e $100\ \Omega$ quando está sendo iluminado diretamente (BARBOSA, 2009).

A vantagem de usar esse dispositivo é o baixo custo aliado à facilidade de ser encontrado em qualquer loja de eletrônica, além de ter um sinal de tensão da ordem de magnitude do microcontrolador da plataforma Arduino. Na Figura 18, há as disposições que são geralmente utilizadas em sistemas de rastreamento que utilizam o LDR.

Figura 18 – Disposição de sensores luminosos: (a) apontados para o Sol; (b) sensores inclinados; (c) uso de um colimador

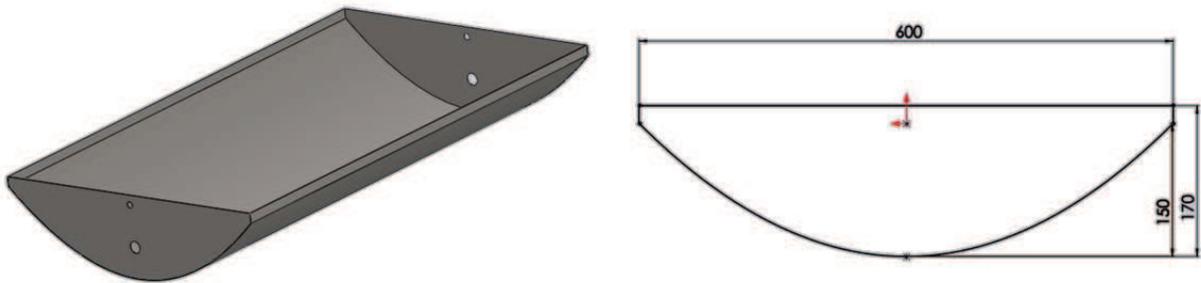


Fonte: adaptada de Mousazadeh *et al.* (2009).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização dos testes deste trabalho, procurou-se aprimorar a eficiência térmica de um Coletor de Calha Parabólica (PTC) de pequeno porte, por meio da alteração geométrica do tubo absorvedor. A parábola refletora do PTC foi construída com uma chapa de aço inox espelhada com as dimensões 1 mm x 689 mm x 1000 mm. As Figuras 19 e 20 mostram as dimensões do concentrador parabólico. Os valores apresentados estão em milímetros.

Figura 19 – Aspectos construtivos do PTC



Fonte: LESGN, 2014.

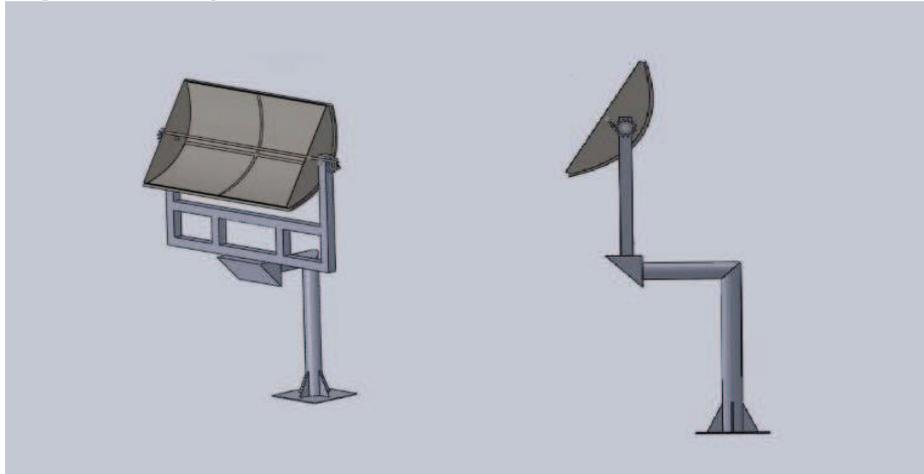
Figura 20 – Dimensões e distância entre furos no concentrador



Fonte: LESGN, 2014.

Dois perfis de aço foram soldados nas extremidades laterais, com furos em lados opostos de diâmetro de 12,7 mm na distância focal da parábola, a fim de receber o tubo absorvedor. A distância focal (f) do PTC é de 150 mm, sendo esta medida a partir da base do refletor parabólico. A área de abertura (A_a) é de 0,6 m² (0,6 m x 1,0 m). No centro de massa do concentrador, a uma distância de 64,17 mm da base da parábola, foi instalado um eixo de rotação, a fim de possibilitar a rotação do sistema coletor com uma maior eficiência. No limite do eixo, é instalada uma engrenagem, que será acoplada com a engrenagem do atuador. A Figura 21 mostra o projeto do PTC instalado com a estrutura de suporte.

Figura 21 – Projeto do PTC



Fonte: LESGN, 2014.

A construção da parábola foi baseada na Equação 50. Para a distância focal de 0,15 m, a relação das coordenadas x e y é representada pela Equação 55.

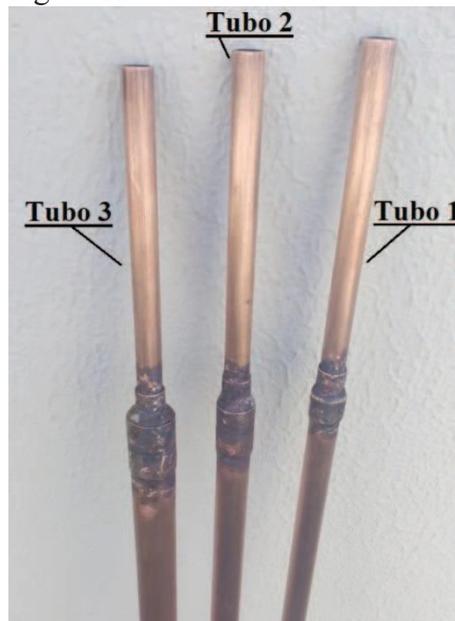
$$y = \frac{x^2}{0,6} \quad (55)$$

O ângulo de borda (φ_r) é de 90° e seu valor é determinado pela Equação 51, em que a é igual a 0,6 m. Rolim, Fraidenraich e Vilela (2012) analisaram a influência do ângulo de borda na eficiência térmica do sistema. Os resultados mostram melhores valores de eficiência para ângulos de borda em torno de 95° , próximo ao utilizado nesse projeto.

De acordo com a Equação 54, o diâmetro mínimo ($D_{r,min}$) para o tubo absorvedor interceptar toda a radiação refletida na parábola, tem relação com o ângulo de borda. O menor valor possível para completa interceptação é para ângulo de borda de 90° . O valor obtido para diâmetro mínimo é de 2,8 mm. Esta equação não leva em consideração erros construtivos da parábola, que fazem que nem todos os raios solares sejam refletidos para a linha de foco e sim para regiões próximas. Quanto maior o diâmetro do tubo maior a possibilidade de interceptar esses raios desviados por erros construtivos. Porém, além da taxa de concentração, o ângulo de aceitação ($2\theta_s$) também é influenciado por uma mudança no diâmetro do tubo absorvedor.

Foram fabricados 3 tubos absorvedores de cobre de diâmetros diferentes na parte interna da parábola. Foram soldados dois tubos de diâmetro 15 mm e comprimento 190 mm nas extremidades de tubos de diâmetros 19,05 mm (3/4 pol) e comprimento 890 mm (Tubo 1), 22,225 mm (7/8 pol) e comprimento 862 mm (Tubo 2) e 28 mm e comprimento 850 mm (Tubo 3), conforme mostra a Figura 22.

Figura 22 – Tubos absorvedores



Fonte: elaborada pelo autor.

Conforme mostrado, foi realizada uma expansão da área de secção transversal somente na área interna à parábola. A expansão e a redução de área foram feitas com o uso de um expansor e uma união soldáveis de cobre, como mostra na Figura 23. A solda foi feita com Oxi-Acetileno.

Figura 23 – Expansor e união



Fonte: elaborada pelo autor.

Após os tubos terem sido soldados, os mesmos foram lixados para deposição de um revestimento não-seletivo. O revestimento utilizado foi tinta *spray* preta fosca resistente a altas temperaturas (até 600 °C).

O meio ângulo de aceitação (θ_s) para cada tubo absorvedor fabricado foi de 1,82° para o Tubo 1, 2,12° para o Tubo 2 e 2,67° para o Tubo 3. Enquanto para o tubo de diâmetro 12,7 mm ou 1/2 pol (Tubo 0) foi de 1,21°. A Tabela 4 mostra os aspectos construtivos da parábola refletora e a Tabela 5 mostra aspectos relacionados ao tubo absorvedor.

Tabela 4 – Características do refletor

Descrição	Especificação
Material	Aço inox espelhado
Comprimento (mm)	1000
Largura (mm)	600
Distância focal (mm)	150
Área de abertura (m ²)	0,60
Ângulo de borda (φ_r)	90°
Refletividade (ρ)	0,93
Diâmetro mínimo abs (mm)	2,80
Taxa de concentração máx (C_{max})	68,21

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 5 – Características dos tubos absorvedores

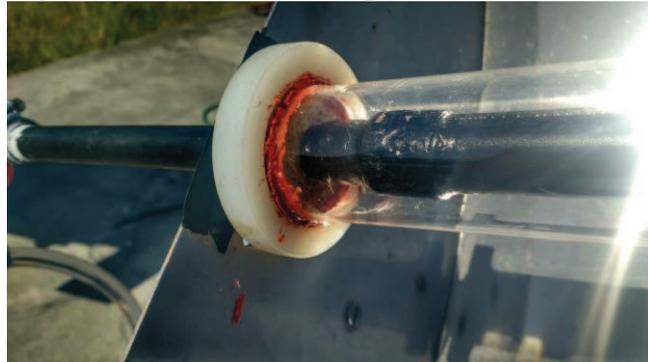
Descrição	Tubo 0	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3
Material absorvedor	Cobre	Cobre	Cobre	Cobre
Cond. térmica (W/m.K)	401	401	401	401
Revestimento	Tinta preta	Tinta preta	Tinta preta	Tinta preta
Absortividade do revest. (α)	0,9	0,9	0,9	0,9
Diâmetro externo (mm)	12,700	19,050	22,225	28,000
Espessura (mm)	1	1	1	1
Comprimento útil (mm)	974	974	974	974
Área útil de absorção (m ²)	0,038861	0,058499	0,067862	0,085326
Área superficial interna (m ²)	0,032741	0,052367	0,061728	0,079169
Taxa de concentração (C)	15,04	9,99	8,61	6,85
Meio ângulo de aceitação (θ_s)	1,21°	1,82°	2,12°	2,67°

Fonte: elaborada pelo autor.

A área útil de absorção é considerada a área de tubulação de cobre interna à parábola que irá receber a radiação refletida pelos refletores especulares. Essa área é calculada levando em consideração as uniões e os expansores presentes nos tubos, os quais irão receber a radiação, além de duas buchas de nylon de largura de 10 mm cada uma, que ficam internamente à parábola e que sustentam uma superfície envolvente de vidro.

Os tubos foram cobertos por um tubo de vidro borossilicato concêntrico de diâmetro externo 37 mm, espessura 1,7 mm e comprimento 984 mm, sustentado por duas buchas de nylon em cada extremidade. Devido à alta temperatura da estufa, foi utilizado silicone com resistência a temperaturas elevadas, a fim de a vedação não ser comprometida, como mostra a Figura 24.

Figura 24 – Tubo revestido por cobertura de vidro



Fonte: elaborada pelo autor.

Para cálculo da eficiência ótica do sistema, Equação 36, foram considerados valores de refletividade, absortividade e transmissividade dos materiais utilizados no projeto.

Segundo a Tabela 3, o valor do fator de interceptação é calculado pelo produto de seis fatores. A refletividade do refletor para os cálculos desse projeto foi considerada fora do fator de interceptação e com o valor de 0,93. Foram considerados os efeitos de sombreamento do elemento de coleta de calor, erro de rastreamento, precisão geométrica dos espelhos e sujeira no elemento de coleta de calor como influenciadores do fator de interceptação.

Os valores de efeito do ângulo de incidência ($k(\theta)$) e das perdas finais geométricas ($\xi(\theta)$) foram tidos como a unidade, pois são dependentes do ângulo de incidência (θ), que possui valor 0° nesse projeto. Dessa forma, a partir das propriedades dos materiais utilizados, a eficiência ótica é mostrada na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores para determinação da eficiência ótica

Descrição	Valores
Absortividade do cobre (α)	0,90
Refletividade do aço inox polido (ρ)	0,93
Transmissividade do vidro (τ)	0,90
Fator de interceptação (f_{int})	0,92982
Efeito do ângulo de incidência ($k(\theta)$)	1,00
Perdas finais geométricas ($\xi(\theta)$)	1,00
Eficiência ótica (η_o)	0,70

Fonte: elaborada pelo autor.

Dois termopares tipo K da marca Ômega foram utilizados para medição das temperaturas de entrada e saída do fluido. Eles foram conectados a um *datalogger* de modelo RDXL12SD do mesmo fabricante para gravação dos dados de temperatura durante o período de testes experimentais. A entrada e a saída da tubulação de cobre no coletor foram isoladas com espuma térmica preta de poliuretano expandido. O sistema é mostrado na Figura 25.

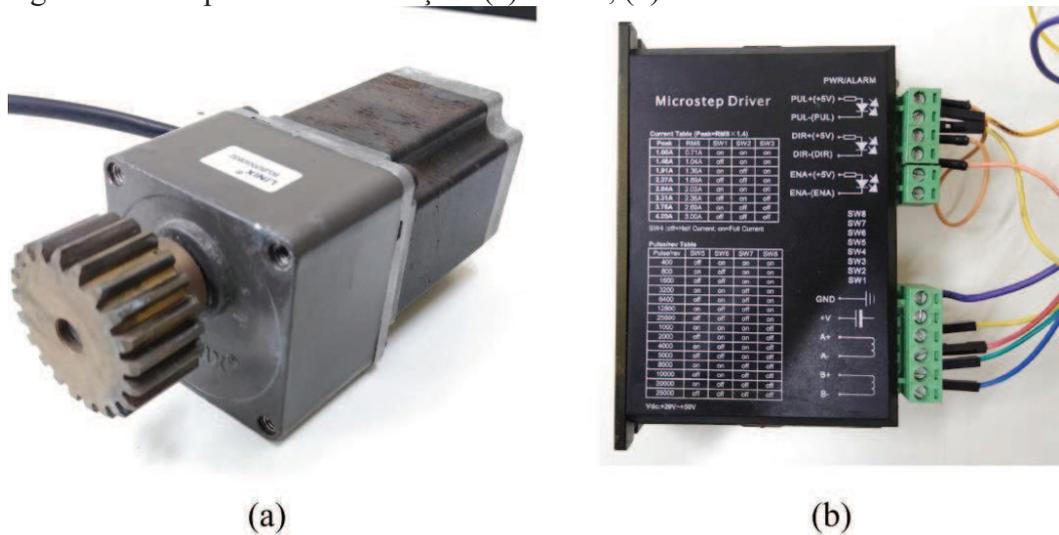
Figura 25 – Sistema instalado



Fonte: elaborada pelo autor.

O rastreamento automático leste-oeste foi realizado por um motor de passo NEMA 23 - 200 kgf.cm/3A da marca Linx com caixa de redução, Figura 26 (a), e um driver de modelo AKDMP16-4,2A da marca Neoyama, Figura 26 (b). Foram utilizados um Arduino Uno, Figura 27, para acionamento do motor e dois sensores LDR com um dispositivo de sombreamento para detecção do lado de maior luminosidade, dispostos conforme a Figura 28.

Figura 26 – Dispositivos de atuação: (a) Motor; (b) Driver



(a)

(b)

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 27 – Arduino UNO



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 28 – Disposição dos LDRs



Fonte: elaborada pelo autor.

O rastreamento manual norte-sul foi realizado por ajuste periódico com frequência diária da inclinação do PTC, por meio do acompanhamento do ângulo de declinação solar (δ). O ajuste do ângulo é feito por meio de um parafuso sextavado, o qual é apertado quando o coletor alcança o ângulo de inclinação necessário, encravado em uma base de suporte do PTC, conforme mostra a Figura 29. O ângulo de inclinação é calculado a partir do ângulo de declinação solar (δ) e da latitude local (ϕ), conforme a Equação 56.

$$\beta = \delta - \phi \quad (56)$$

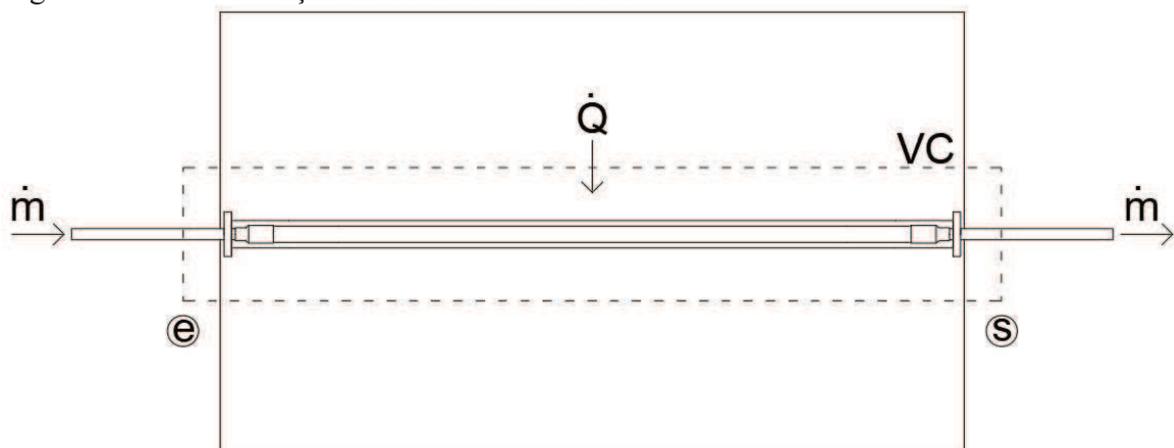
Figura 29 – Dispositivo de ajuste de inclinação



Fonte: elaborada pelo autor.

O volume de controle definido para o sistema abrange o tubo absorvedor, conforme mostrado, na Figura 30, pela área retangular tracejada. A partir dele é possível realizar o balanço de energia do sistema absorvedor, em que a energia total absorvida pelo fluido leva em consideração as variações de entalpia, de energia cinética e de energia potencial entre a entrada (e) e a saída (s) do volume de controle.

Figura 30 – Determinação do volume de controle



Fonte: elaborada pelo autor.

A partir da equação de conservação de massa, Equação 57, e da primeira lei da termodinâmica, Equação 58, o balanço de energia foi desenvolvido a fim de se permitir o cálculo da quantidade de energia total absorvida pelo fluido e, posteriormente, o cálculo da eficiência térmica do coletor.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \cdot dV + \int_{SC} \rho \cdot \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (57)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \int_{SC} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \rho \cdot \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (58)$$

As considerações foram de escoamento permanente e unidimensional, de propriedades uniformes na entrada e saída, de áreas perpendiculares à velocidade e sem realização ou consumo de trabalho. Dessa forma, a Equação 58 pode ser representada pela Equação 59, utilizada para cada intervalo de dois minutos de armazenamento de dados.

$$\dot{Q} = \dot{m} \left[c_{pm}(T_s - T_e) + \left(\frac{V_s^2 - V_e^2}{2} \right) + g(z_s - z_e) \right] \quad (59)$$

Os dados de radiação solar direta foram obtidos por um pireliômetro instalado no Laboratório de Energia Solar e Gás Natural (LESGN) da Universidade Federal do Ceará, mostrado na Figura 31. Os dados são medidos a cada dois segundos, sendo gravados por um valor médio a cada dois minutos; o mesmo tempo de gravação dos dados de temperatura.

Figura 31 – Pireliômetro instalado no LESGN



Fonte: elaborada pelo autor.

Os primeiros testes foram realizados a fim de comparar a eficiência do Coletor de Calha Parabólica com os tubos fabricados em relação ao resultado obtido com um tubo de

diâmetro 12,7 mm do projeto inicial do PTC. Foi utilizada uma vazão constante de 64 mL/min em circuito aberto, sendo controlada manualmente por uma válvula esfera instalada posteriormente ao PTC. Uma pressão constante da tubulação foi obtida por meio da utilização de um reservatório de água de uso exclusivo, com volume de água controlado por uma boia. Os valores de velocidade média do escoamento foram aproximadamente 11,86 mm/s (Tubo 0), 4,67 mm/s (Tubo 1), 3,32 mm/s (Tubo 2) e 2,01 mm/s (Tubo 3).

Nos testes seguintes, os tubos fabricados foram impostos a diferentes vazões a fim de se analisar o comportamento da eficiência térmica. As vazões analisadas foram de 50 mL/min, 75 mL/min e 100 mL/min. Para o Tubo 1, as velocidades médias foram aproximadamente 3,65 mm/s (50 mL/min), 5,47 mm/s (75 mL/min) e 7,3 mm/s (100 mL/min). Para o Tubo 2, as velocidades foram 2,59 mm/s (50 mL/min), 3,89 mm/s (75 mL/min) e 5,19 mm/s (100 mL/min). Para o Tubo 3, as velocidades foram 1,57 mm/s (50 mL/min), 2,35 mm/s (75 mL/min) e 3,14 mm/s (100 mL/min)

Os valores de temperatura média para cada intervalo de armazenamento de dados foram calculados a partir das temperaturas de entrada e de saída obtidas. Foi considerado um fluxo de calor constante (q'') em W/m^2 , Equação 60, incidindo na tubulação, para cada intervalo de 2 minutos, em que P é o perímetro interno, L é o comprimento útil de absorção e $T_{m,ent}$ é a temperatura média do fluido na entrada do volume de controle. Isso ocasiona um comportamento linear da variação de temperatura ao longo do tubo. A temperatura média é obtida pela Equação 61, em que x é metade do comprimento L .

$$q'' = \frac{Q}{(P \cdot L)} \quad (60)$$

$$T_m(x) = T_{m,ent} + \frac{q''P}{\dot{m}c_p} x \quad (61)$$

Os valores de temperatura ambiente foram obtidos a partir de dados da estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

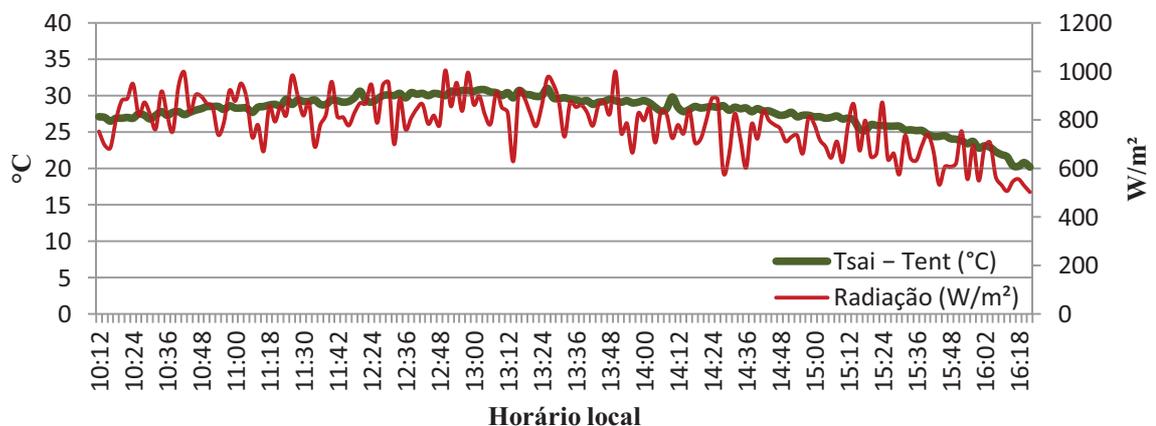
Este capítulo apresenta os resultados experimentais realizados com água como fluido de trabalho em circuito aberto, comparando o desempenho térmico dos tubos fabricados com o desempenho do tubo do projeto inicial de 12,7 mm de diâmetro externo em uma vazão de 64 mL/min e comparando o comportamento da eficiência térmica para os tubos fabricados nas vazões de 50 mL/min, 75 mL/min e 100 mL/min. Os testes foram realizados ao longo dos meses de agosto a dezembro de 2018 em dias ensolarados entre 10:00 e 17:00 horas.

6.1 Aumento de área de secção transversal em vazão de 64 mL/min

6.1.1 Tubo de 12,7 mm

Os resultados de diferença de temperatura entre a entrada e a saída do PTC e os dados de radiação solar direta estão apresentados no Gráfico 6. A maior diferença de temperatura de 31 °C foi obtida entre 12:30 e 13:30, período em que se observou os maiores valores de radiação. O valor médio de radiação solar direta durante o período de teste foi de 783,08 W/m². O número de Reynolds, no ponto médio entre a entrada e a saída, variou em torno de 208, caracterizando um escoamento laminar.

Gráfico 6 – Diferença de temperaturas e dados de radiação solar direta (Tubo 0)



Fonte: elaborado pelo autor.

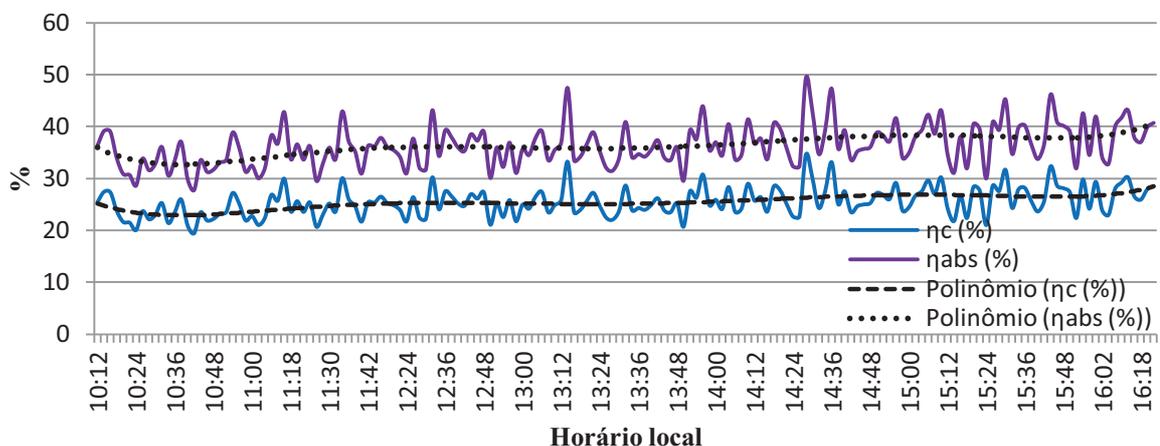
O comportamento da eficiência térmica ao longo do dia está apresentado pelo Gráfico 7, em que são representados os valores de eficiência do PTC em azul e do tubo

absorvedor em roxo. O cálculo do último considera somente a radiação que alcança o tubo, calculada pela Equação 35. Os valores foram representados por uma curva de tendência polinomial de sexta ordem, a fim de se poder perceber o período do dia em que se obtiveram os maiores e menores valores de eficiência. É possível perceber que, nos horários de maior insolação, a eficiência térmica possui valores menores. Isso é devido ao aumento das perdas térmicas nesses horários, pois o tubo absorvedor alcança valores maiores de temperatura superficial, aumentando assim a troca de calor com o ambiente.

Os valores médios de eficiência térmica para o PTC são de 25,10% e de 35,84% para o tubo absorvedor. Os comportamentos das duas curvas de eficiência são exatamente iguais, porém a curva da eficiência do tubo absorvedor possui uma maior amplitude. Isso se deve ao fato de os valores de energia incidente no tubo absorvedor (S) serem em torno de 70% dos valores de $G_{dir,n}$. Portanto, uma variação de S , no denominador da Equação 62, causa variações maiores na eficiência.

$$\eta_{abs} = \frac{\Delta Q}{S \cdot A_a} \quad (62)$$

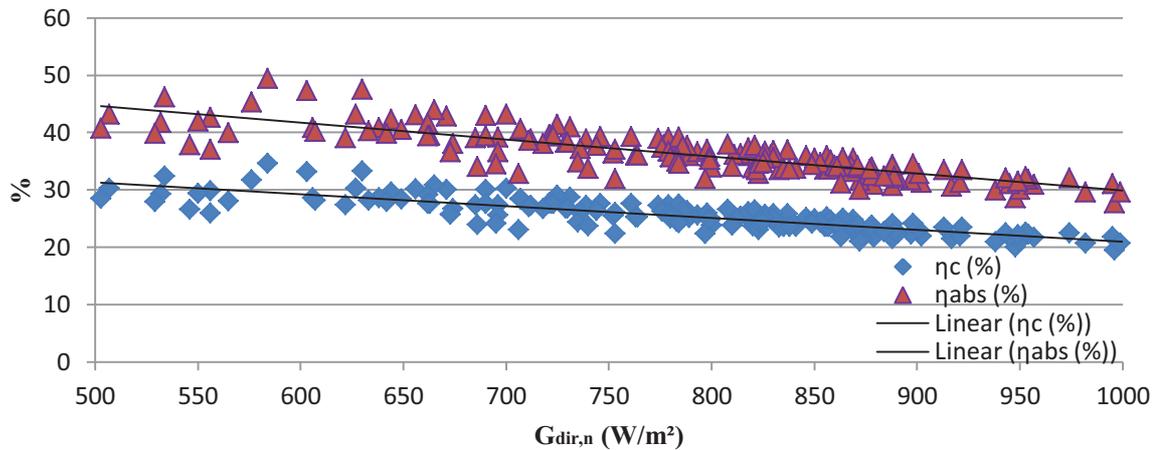
Gráfico 7 – Eficiência térmica ao longo do dia (Tubo 0)



Fonte: elaborado pelo autor.

Como, por meio do Gráfico 7, é possível perceber uma variação da eficiência em relação à radiação solar direta incidente, foi desenvolvido o Gráfico 8, em que os valores de eficiência para o PTC e para o tubo de 12,7 mm de diâmetro são representados por duas retas de tendência linear: $y = -0,0208x + 41,708$ para o PTC e $y = -0,0297x + 59,546$ para o tubo de 12,7 mm.

Gráfico 8 – Eficiência térmica em relação à radiação solar direta (Tubo 0)

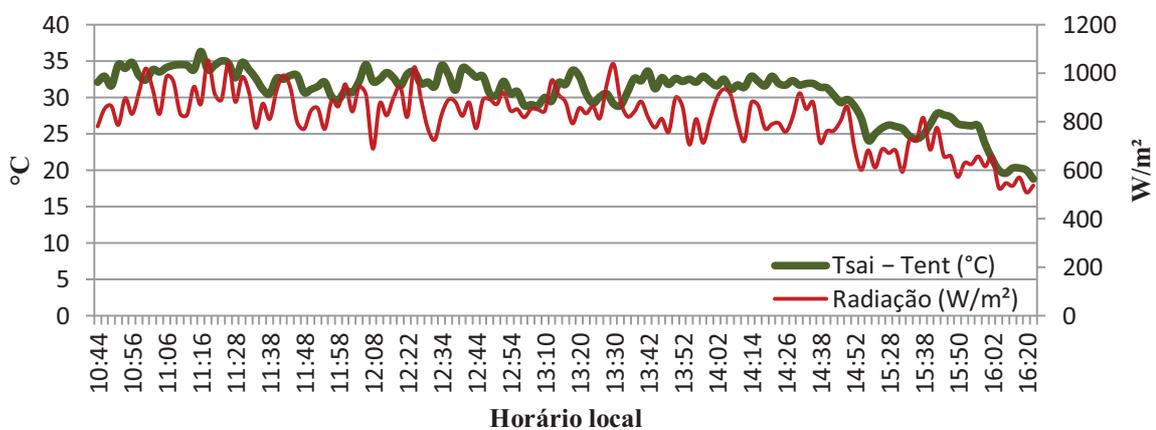


Fonte: elaborado pelo autor.

6.1.2 Tubo de 19,05 mm

Os resultados de diferença de temperatura entre a entrada e a saída do PTC e os dados de radiação solar direta estão apresentados no Gráfico 9. Podem-se perceber maiores valores de diferença entre as temperaturas de entrada e saída do absorvedor, em relação ao tubo de 12,7 mm de diâmetro, durante praticamente todo o período de teste, alcançando uma diferença de até 36,3 °C entre 11:00 e 11:30. O valor médio da radiação solar direta foi de 824,37 W/m². O número de Reynolds, no ponto médio entre a entrada e a saída, variou em torno de 142, caracterizando um escoamento laminar.

Gráfico 9 – Diferença de temperaturas e dados de radiação solar direta (Tubo 1)

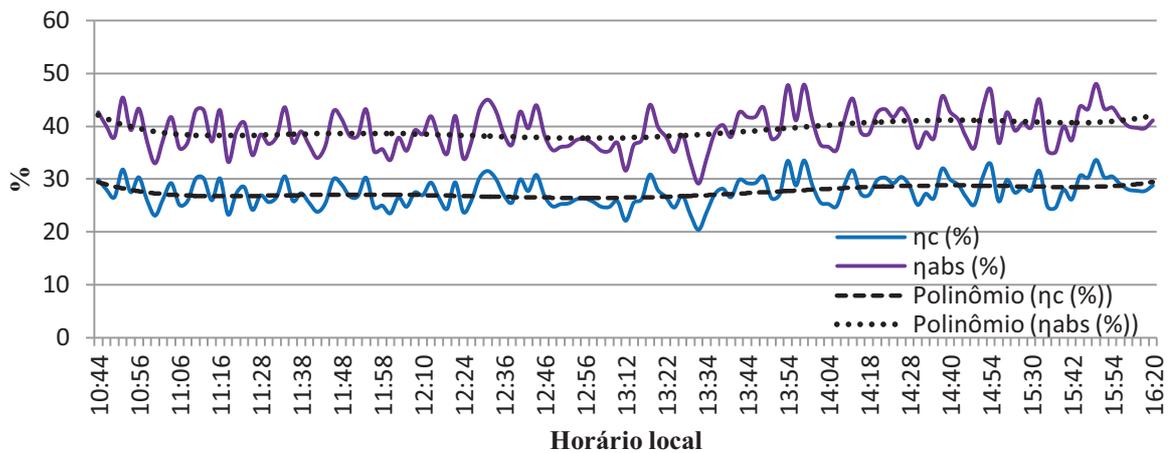


Fonte: elaborado pelo autor.

O comportamento da eficiência térmica ao longo do dia está apresentado pelo

Gráfico 10. Durante o período de 11:00 a 13:30, os valores de eficiência alcançaram os menores valores médios, representados pelas curvas de tendência polinomial. Pode-se perceber que os valores de eficiência térmica do PTC e do tubo de 19,05 mm possuíram maiores valores ao longo do dia em comparação com os resultados utilizando o tubo de 12,7 mm, apesar de o valor de radiação solar direta média ser maior. Os valores médios de eficiência térmica para o PTC são de 27,31% e de 39,00% para o tubo absorvedor.

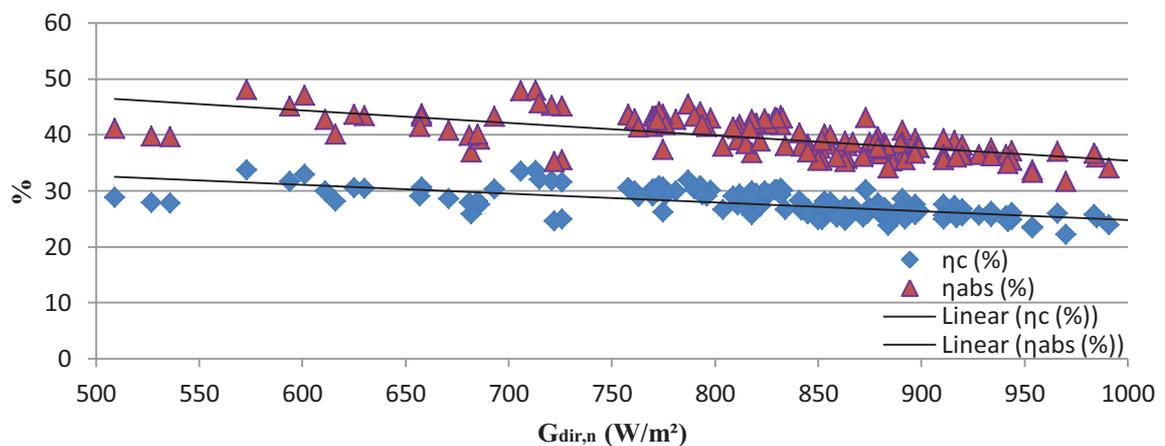
Gráfico 10 – Eficiência térmica ao longo do dia (Tubo 1)



Fonte: elaborado pelo autor.

Para saber a relação entre a eficiência térmica e a radiação solar direta incidente no coletor e no tubo absorvedor, foi desenvolvido o Gráfico 11, em que a eficiência é representada por uma tendência linear $y = -0,0158x + 40,588$ para o PTC e $y = -0,0226x + 57,948$ para o tubo absorvedor.

Gráfico 11 – Eficiência térmica em relação à radiação solar direta (Tubo 1)

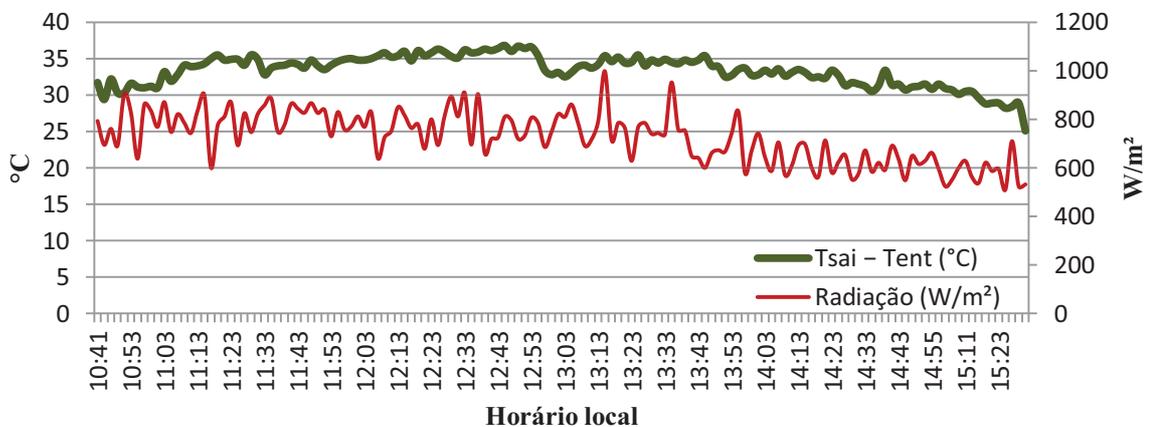


Fonte: elaborado pelo autor.

6.1.3 Tubo de 22,225 mm

Os resultados de diferença de temperatura entre a entrada e a saída do PTC e os dados de radiação solar direta estão apresentados no Gráfico 12. Podem-se observar maiores valores de variação de temperatura em relação aos tubos de 12,7 mm e de 19,05 mm, alcançando valores de até 36,8 °C entre 12:00 e 12:50, mesmo possuindo uma valor médio de radiação solar direta menor, 725,65 W/m². O número de Reynolds, no ponto médio entre a entrada e a saída, variou em torno de 124, caracterizando um escoamento laminar.

Gráfico 12 – Diferença de temperaturas e dados de radiação solar direta (Tubo 2)

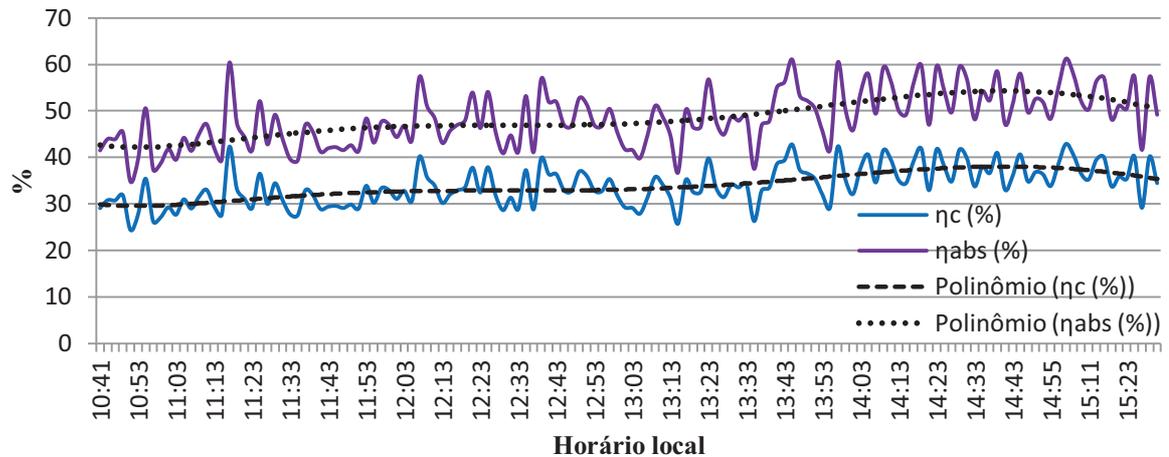


Fonte: elaborado pelo autor.

O comportamento das eficiências térmicas do PTC e do tubo absorvedor ao longo do dia está apresentado no Gráfico 13. Valores de eficiências superiores aos dos tubos de 12,7 mm e de 19,05 mm são observados, porém os valores de radiação direta incidente foram menores. Os valores médios de eficiência térmica para o PTC são de 33,37% e de 47,64% para o tubo absorvedor. São apresentados valores altos na eficiência média, porém o valor da radiação solar média foi menor em relação aos dias de teste dos outros tubos absorvedores.

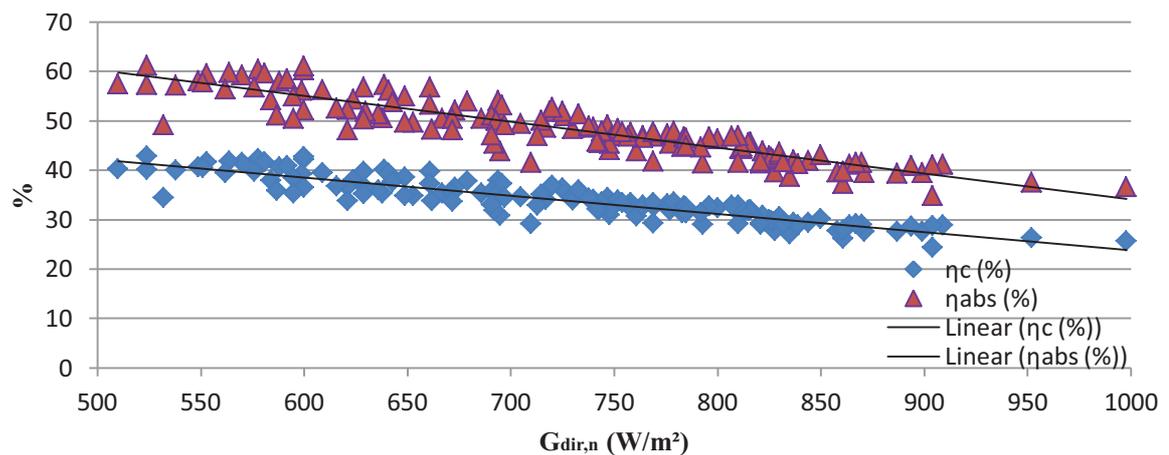
Para saber a relação entre as eficiências térmicas e a radiação solar direta incidente no PTC e no tubo absorvedor, foi desenvolvido o Gráfico 14, em que a relação é representada por uma tendência linear $y = -0,0367x + 60,569$ para a eficiência do PTC e $y = -0,0524x + 86,474$ para a eficiência do tubo absorvedor.

Gráfico 13 – Eficiência térmica ao longo do dia (Tubo 2)



Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 14 – Eficiência térmica em relação à radiação solar direta (Tubo 2)

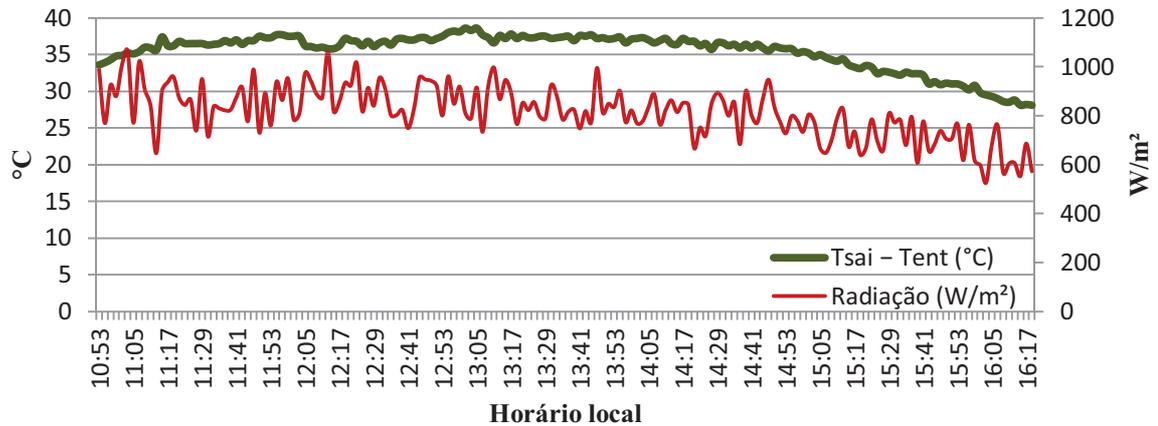


Fonte: elaborado pelo autor.

6.1.4 Tubo de 28 mm

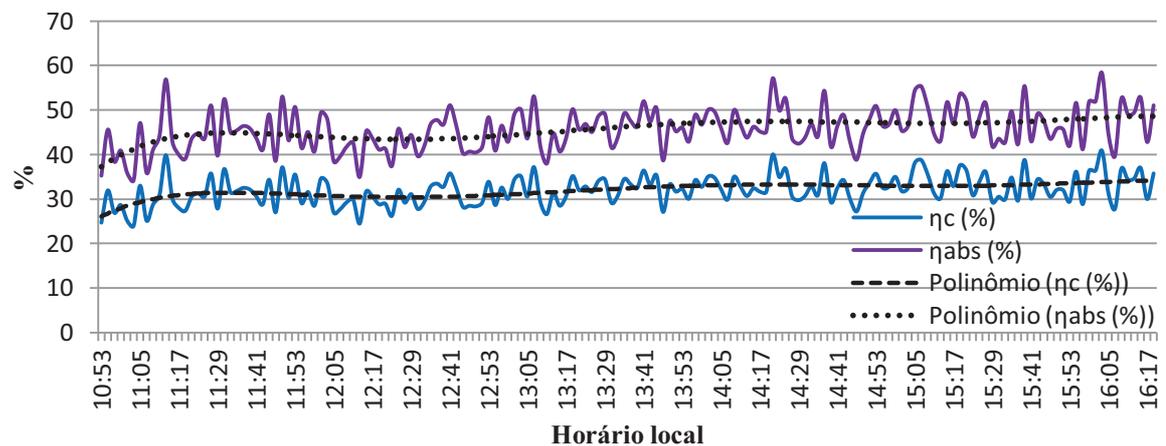
Os resultados de diferença de temperatura entre a entrada e a saída do PTC e os dados de radiação solar direta estão apresentados no Gráfico 15. Podem-se observar diferenças maiores entre as temperaturas de entrada e saída em comparação com os tubos de 12,7 mm, 19,05 mm e 22,225 mm, alcançando os maiores valores entre 11:30 e 13:50 de até 38,6 °C. O valor médio de radiação solar direta foi de 814,19 W/m^2 . O número de Reynolds, no ponto médio entre a entrada e a saída, variou em torno de 98, caracterizando um escoamento laminar.

Gráfico 15 – Diferença de temperaturas e dados de radiação solar direta (Tubo 3)



Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 16 – Eficiência térmica ao longo do dia (Tubo 3)

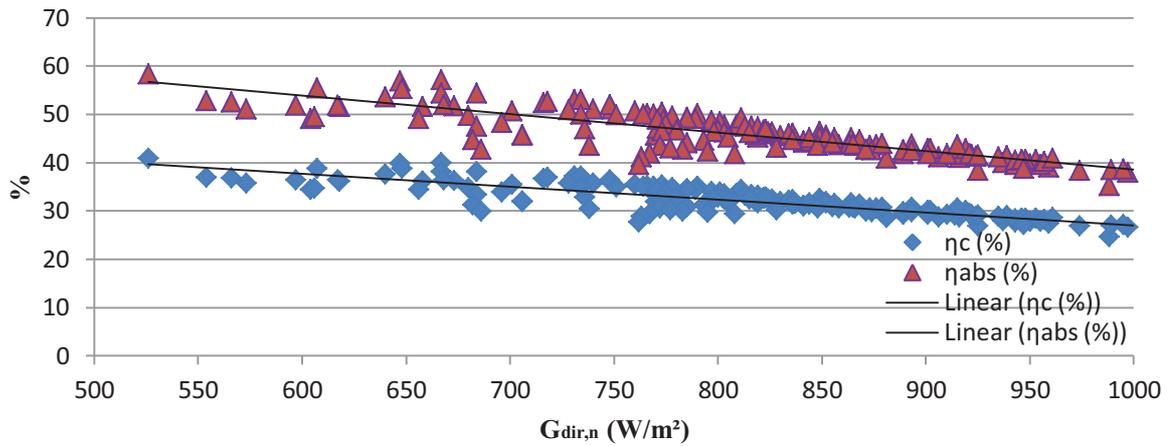


Fonte: elaborado pelo autor.

O comportamento das eficiências do PTC e do tubo absorvedor, ao longo do dia, está apresentado pelo Gráfico 16. Podem-se perceber valores mais semelhantes ao tubo de 22,225 mm, porém os valores de eficiência alcançados nos períodos de maior incidência de radiação solar são maiores. Os valores médios de eficiência térmica para o PTC são de 31,59% e de 45,11% para o tubo absorvedor.

Para avaliar a relação entre as eficiências do PTC e do tubo absorvedor e a radiação solar direta incidente no tubo absorvedor, foi desenvolvido o Gráfico 17, em que a relação é representada por uma tendência linear $y = -0,0269x + 53,837$ para o PTC e $y = -0,0383x + 76,863$ para o tubo absorvedor.

Gráfico 17 – Eficiência térmica em relação à radiação solar direta (Tubo 3)

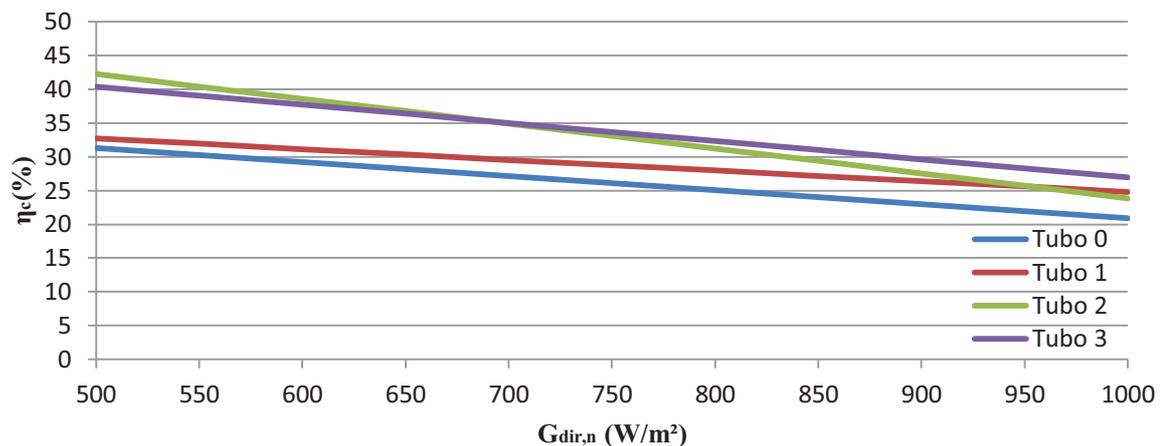


Fonte: elaborado pelo autor.

6.1.5 Resultados comparativos na vazão de 64 mL/min

Para realizar a comparação da eficiência térmica do PTC com diferentes tubos absorvedores foi analisado o comportamento da eficiência em relação à radiação solar direta incidente a partir das linhas de tendência. Dessa forma, foi desenvolvido o Gráfico 18 com as linhas de tendência dos quatro tubos analisados.

Gráfico 18 – Eficiência térmica do PTC com diferentes tubos absorvedores

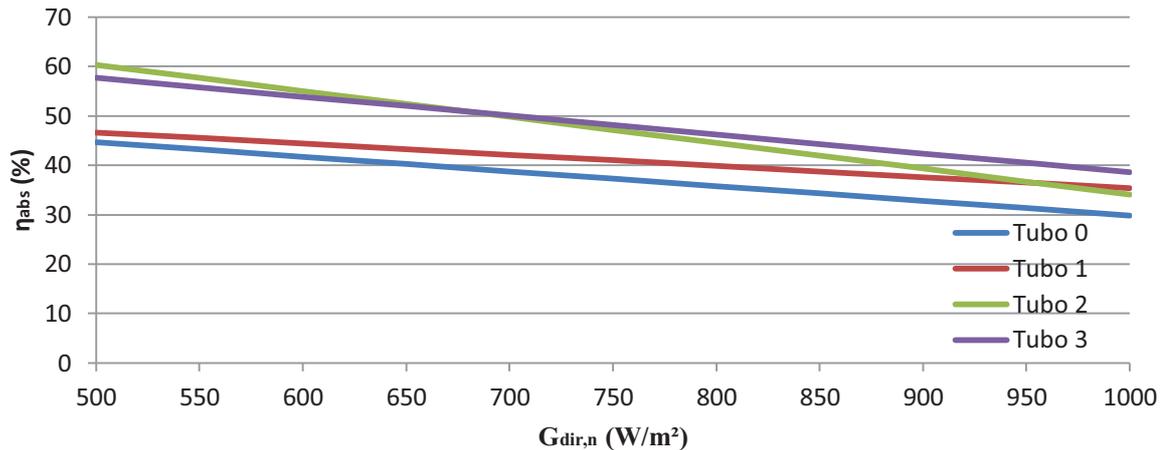


Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados mostram que, quanto maior a área da secção transversal interna à parábola, maior é o valor de eficiência térmica do coletor solar. Em períodos de sol intenso, em que a radiação solar varia entre 700 a 950 W/m², normalmente, com alguns picos em 1000 W/m², percebem-se maiores valores de eficiência para o tubo de 28 mm de diâmetro externo.

Em relação às eficiências dos tubos absorvedores, foi desenvolvido o Gráfico 19 para comparação. Os resultados mostram valores semelhantes para os tubos de 22,225 mm e de 28 mm, porém este último possui melhor desempenho em valores de radiação mais elevados.

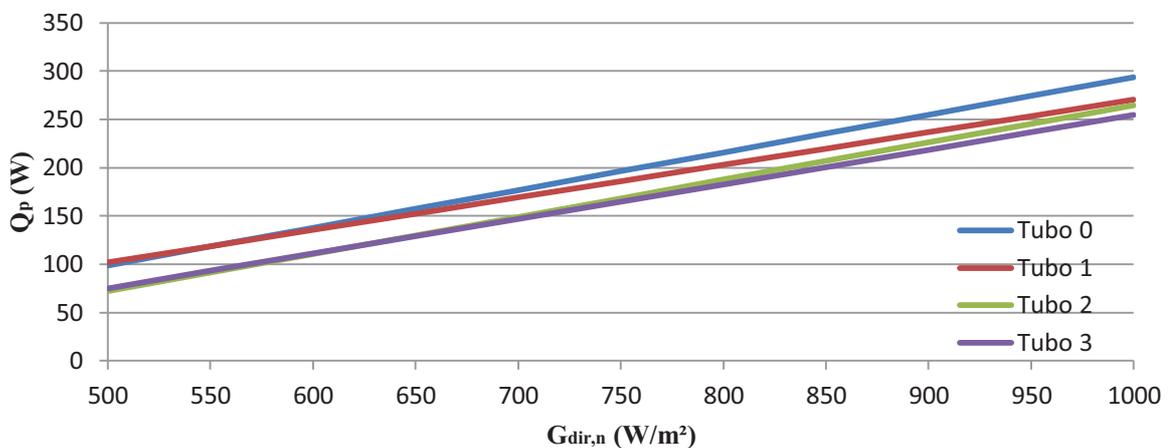
Gráfico 19 – Eficiência térmica de absorção dos tubos absorvedores



Fonte: elaborado pelo autor.

Para a comparação das perdas térmicas, devem ser levadas em consideração as perdas óticas do sistema, que impedem que toda a radiação solar direta seja devidamente absorvida pelo tubo. A eficiência ótica (η_o) independe da alteração geométrica dos tubos absorvedores, e seu valor é determinado pela Equação 36, alcançando o valor de 0,70. Assim, a partir da Equação 34 é determinado o valor das perdas (Q_p). O Gráfico 20 mostra a comparação das perdas para os tubos testados em relação à radiação solar direta.

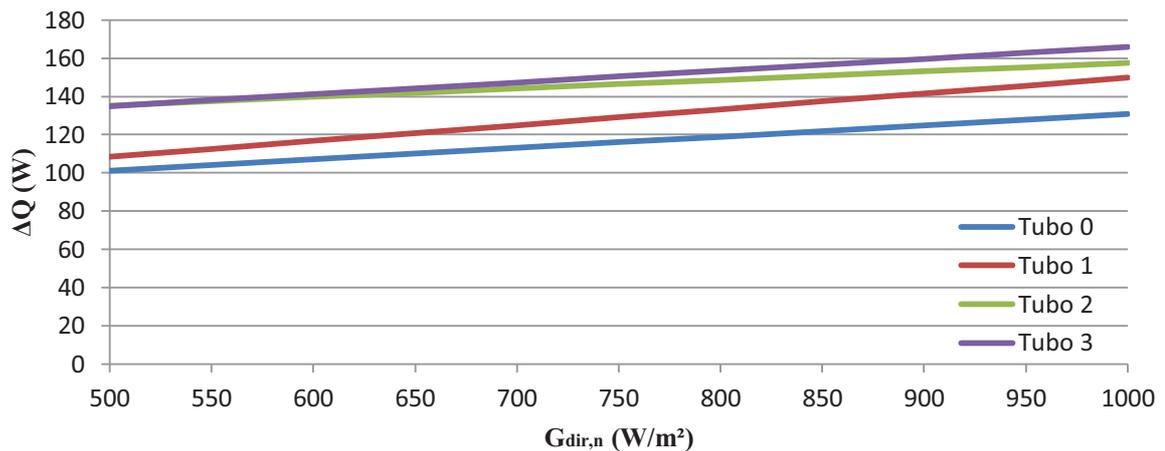
Gráfico 20 – Perdas de energia térmica dos tubos absorvedores



Fonte: elaborado pelo autor.

É observado que, mesmo com maior valor de área superficial externa para troca de calor com o ambiente, os valores das perdas térmicas são menores para os tubos de maior secção transversal. Isso se deve por um aumento do calor útil absorvido pelo fluido com o aumento da área superficial de troca interna, como pode ser observado no Gráfico 21.

Gráfico 21 – Energia útil transferida para o fluido com diferentes tubos absorvedores



Fonte: elaborado pelo autor.

A inclinação mais acentuada das retas de perdas térmicas em relação às retas de energia útil permite explicar o decréscimo da eficiência térmica em radiações incidentes mais elevadas.

Segundo Liu *et al.* (2019a), os PTCs com altas taxas de concentração acarretam em um grande e alto fluxo de calor não uniforme na parede externa do tubo absorvedor e assim levando a altas temperaturas e altos gradientes de temperatura circunferencial no tubo absorvedor. Temperaturas elevadas do tubo absorvedor provocam perdas de desempenho, por meio da degradação do fluido de transferência de calor em alta temperatura, aumento significativo na perda de calor, deformação térmica, perda de eficiência térmica e vida útil do tubo absorvedor.

Como mostram os resultados, a expansão de área de secção transversal na parte interna à parábola permite acréscimos nos valores de eficiência térmica. Para uma radiação solar direta média de $800 W/m^2$ os aumentos na eficiência do PTC e do tubo absorvedor foram, respectivamente, de 11,49% e 11,41% para o Tubo 1, 24,50% e 24,50% para o Tubo 2 e 28,92% e 29,16% para o Tubo 3 em relação ao Tubo 0.

Tubos com diâmetros maiores também são menos susceptíveis a perdas óticas ocasionadas por erros construtivos do coletor solar. Donga e Kumar (2019) realizaram

análises da influência de erros construtivos na eficiência do coletor. Os resultados mostraram que erro de inclinação e desalinhamento do tubo absorvedor provocam reduções menores na eficiência térmica em caso de tubos absorvedores de maiores áreas de secção transversal.

A relação de aumento de área útil de absorção, considerando a área dos expansores e a área do tubo que não recebe radiação por estar coberta pelas buchas de nylon que sustentam o vidro, em relação ao tubo de 12,7 mm, são de 50,53%, 74,63% e 119,57% para os tubos de 19,05 mm, 22,225 mm e 28 mm, respectivamente.

Uma expansão na área na parte interna do coletor permite que haja uma redução na velocidade do fluido, permitindo um maior tempo de troca de calor entre a parede interna e o fluido. Em comparação à velocidade de escoamento interno do tubo de diâmetro 12,7 mm (0,01186 m/s) a uma vazão de 64 mL/min, essas reduções são de 60,61%, 72,00% e 83,06% para os tubos de 19,05 mm, 22,225 mm e 28 mm, respectivamente.

6.2 Vazões de 50 mL/min, 75 mL/min e 100 mL/min

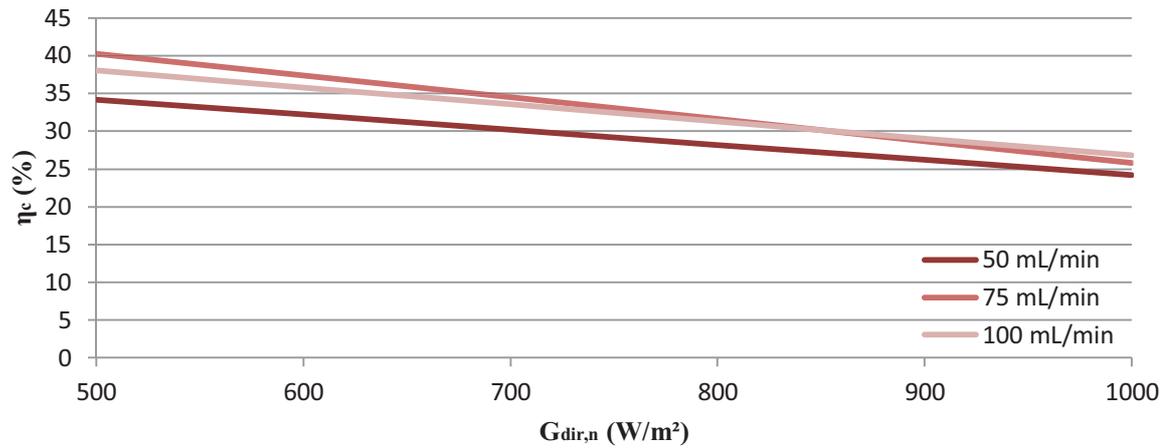
De acordo com Niknia e Yaghoubi (2013), o aumento de vazão mássica do fluido de circulação é um dos métodos principais para otimização de desempenho de um coletor solar térmico.

6.2.1 Tubo de 19,05 mm

Os Gráficos 22 e 23 foram desenvolvidos a fim de analisar o aumento da eficiência térmica do PTC e do tubo absorvedor com o aumento da vazão do fluido. Os resultados mostram que a duplicação do fluxo de massa de 50 mL/min para 100 mL/min, provoca um acréscimo de 10,98% na eficiência do PTC e de 10,82% na eficiência do tubo absorvedor, considerando uma radiação solar direta média de 800 W/m². Os números de Reynolds, no ponto médio entre a entrada e a saída, respectivamente, para as vazões de 50, 75 e 100 mL/min, variaram em torno de 116, 172 e 225.

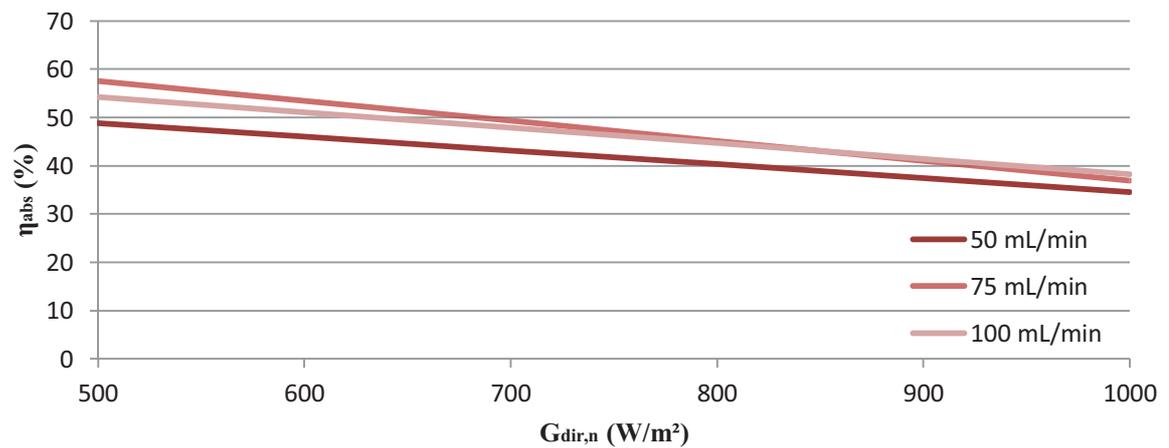
As perdas térmicas obtiveram redução à medida que houve um aumento de vazão de fluido, como mostra o Gráfico 24. Isso se deve ao aumento de transferência de calor interno, como pode ser observado pelo Gráfico 25.

Gráfico 22 – Eficiência térmica do PTC em diferentes vazões (Tubo 1)



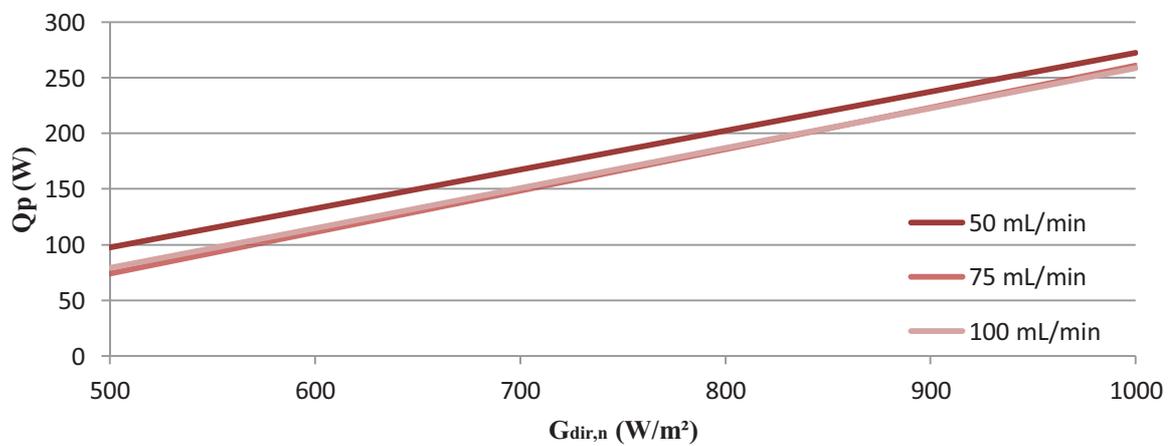
Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 23 – Eficiência térmica de absorção em diferentes vazões (Tubo 1)



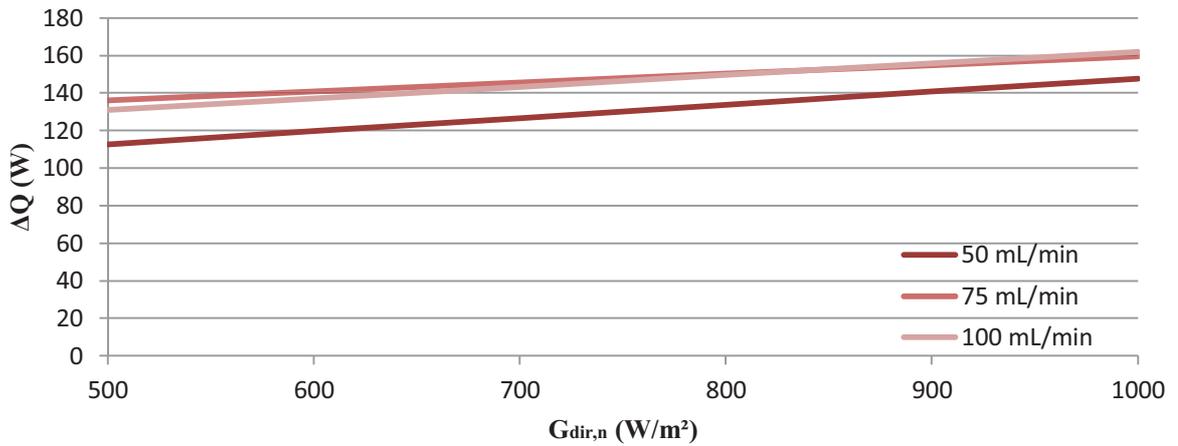
Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 24 – Perdas de energia térmica em diferentes vazões (Tubo 1)



Fonte: elaborado pelo autor.

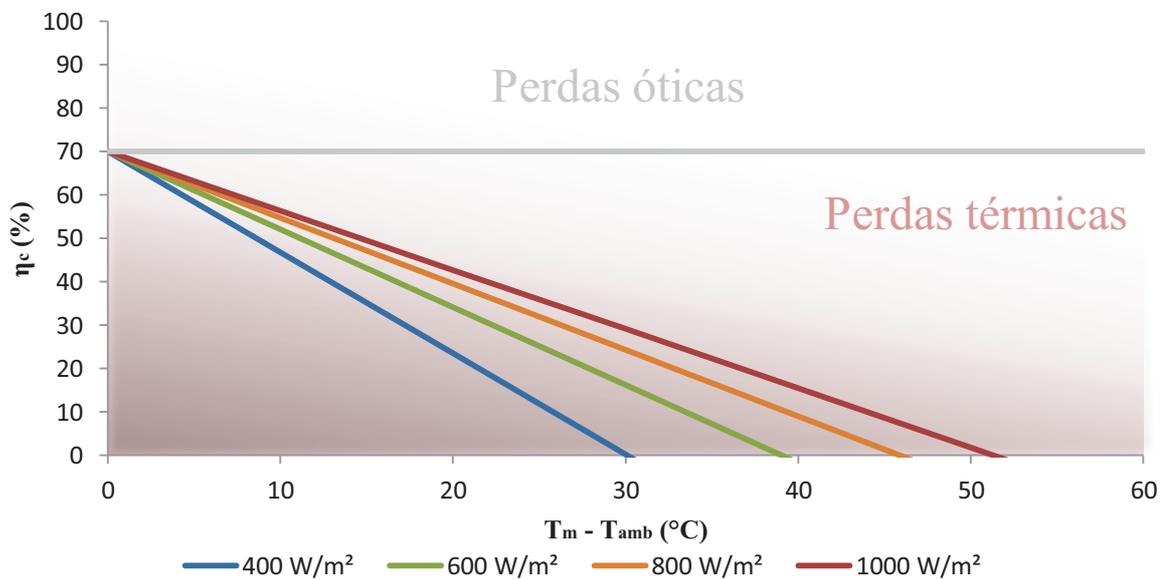
Gráfico 25 – Energia útil transferida para o fluido em diferentes vazões (Tubo 1)



Fonte: elaborado pelo autor.

O Gráfico 26 é a curva característica do Tubo 1, traçada a partir dos valores de eficiência térmica obtidos no experimento. Este representa as perdas e os valores de eficiência térmica para a cada diferença entre a temperatura média do fluido e a temperatura ambiente, o qual pode ser obtido variando a vazão de escoamento.

Gráfico 26 – Curva característica do Tubo 1



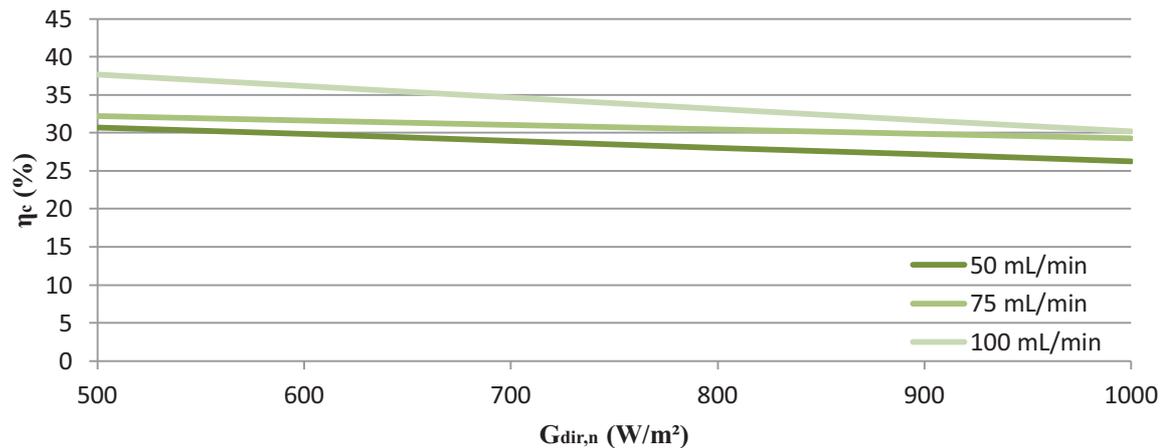
Fonte: elaborado pelo autor.

6.2.2 Tubo de 22,225 mm

Da mesma forma como observado para o tubo de 19,05 mm, os resultados mostram que o aumento do fluxo de massa provoca aumentos na eficiência do PTC e do tubo

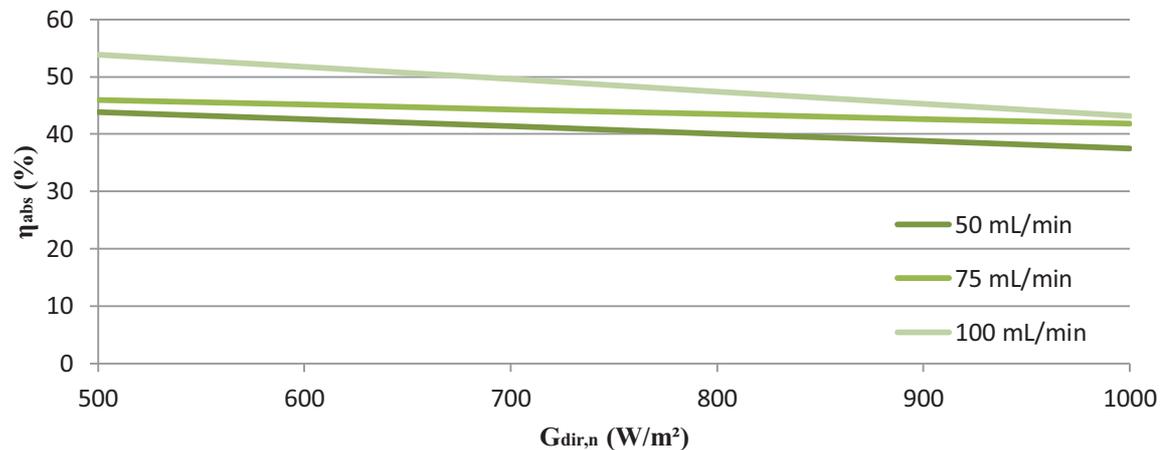
absorvedor, conforme mostram os Gráficos 27 e 28. Os aumentos foram de 18,26% e 18,36% respectivamente, aumentando em 100% a vazão volumétrica de 50 mL/min para 100 mL/min em uma radiação solar direta média de 800 W/m². Os números de Reynolds, no ponto médio entre a entrada e a saída, respectivamente, para as vazões de 50, 75 e 100 mL/min, variaram em torno de 103, 146 e 193.

Gráfico 27 – Eficiência térmica do PTC em diferentes vazões (Tubo 2)



Fonte: elaborado pelo autor.

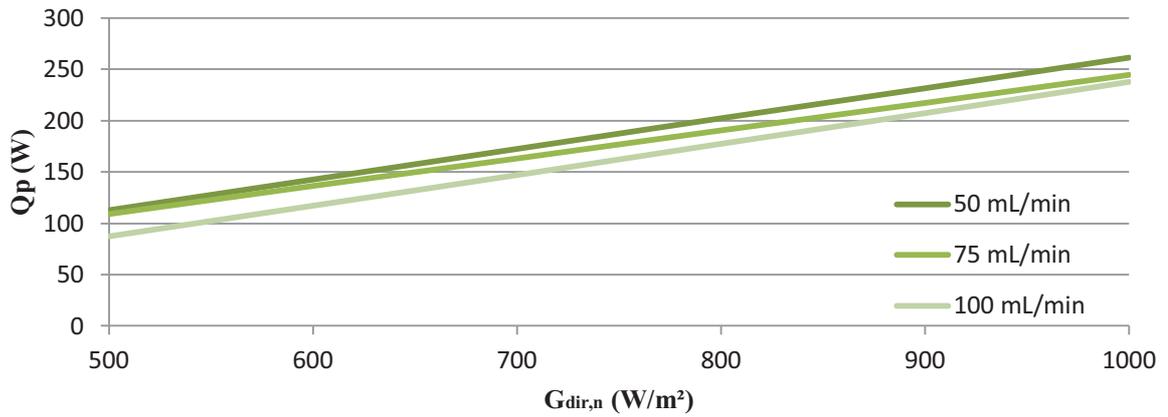
Gráfico 28 – Eficiência térmica de absorção em diferentes vazões (Tubo 2)



Fonte: elaborado pelo autor.

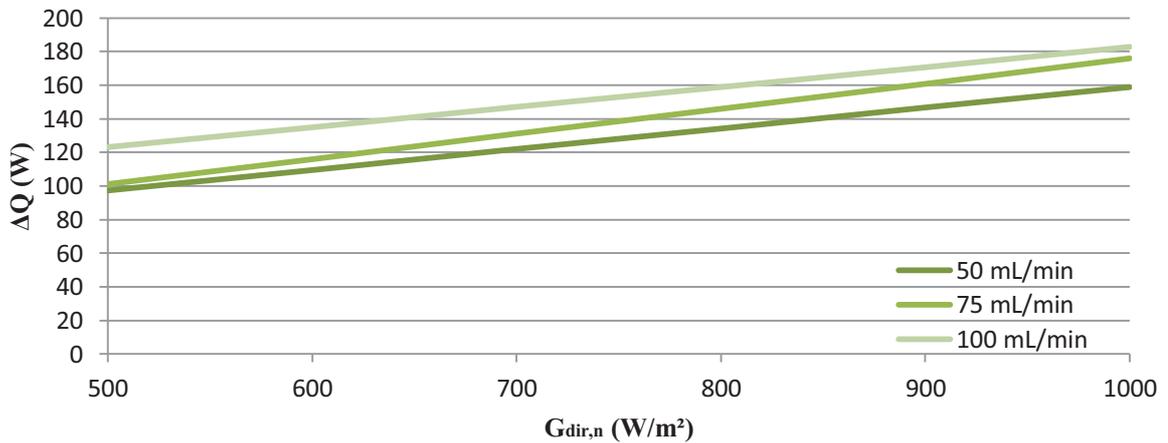
Os Gráficos 29 e 30 apresentam os resultados para as perdas térmicas e para o calor útil, respectivamente. O Gráfico 31 é a curva característica do Tubo 2, traçada a partir dos valores de eficiência térmica obtidos no experimento.

Gráfico 29 – Perdas de energia térmica em diferentes vazões (Tubo 2)



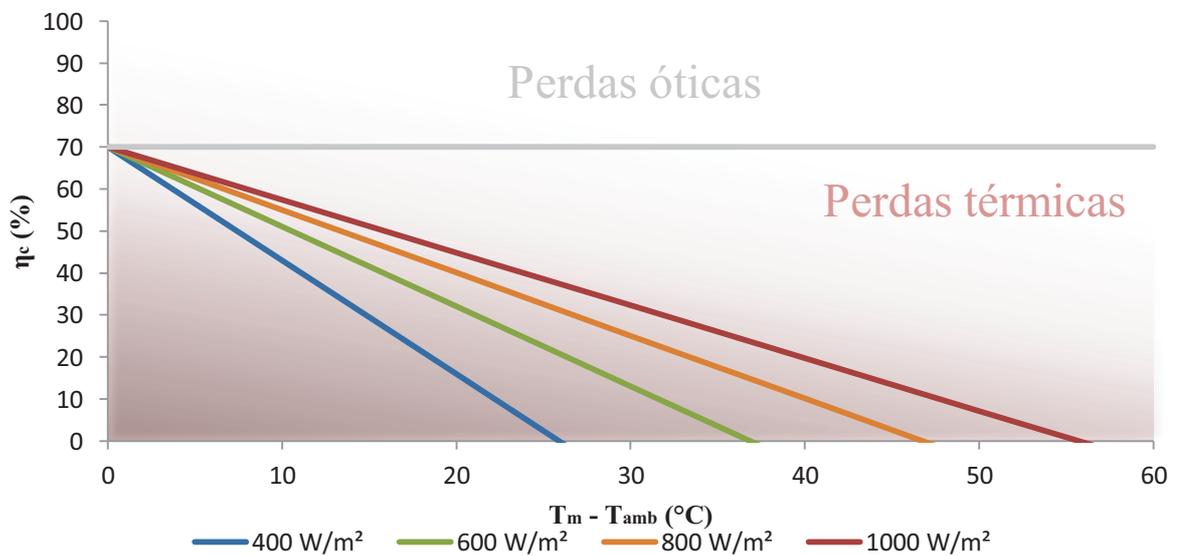
Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 30 – Energia útil transferida para o fluido em diferentes vazões (Tubo 2)



Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 31 – Curva característica do Tubo 2

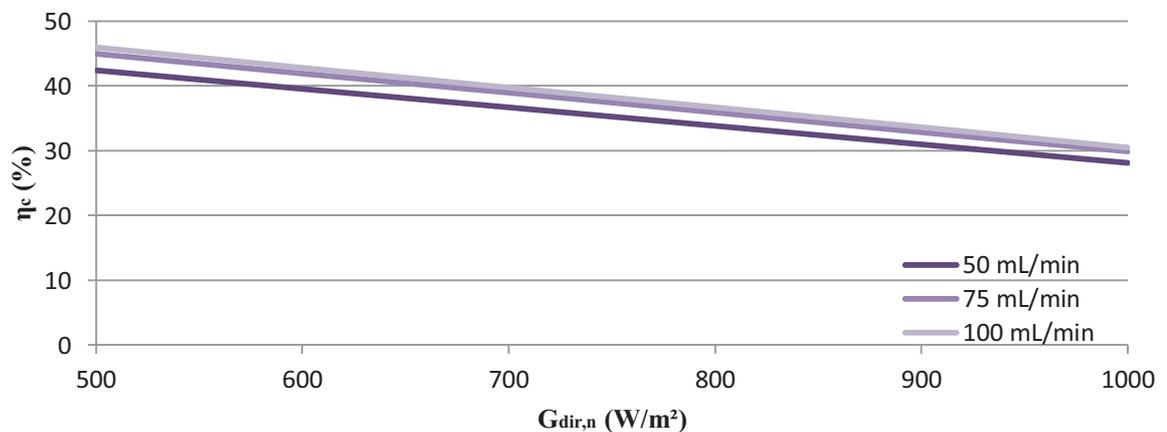


Fonte: elaborado pelo autor.

6.2.3 Tubo de 28 mm

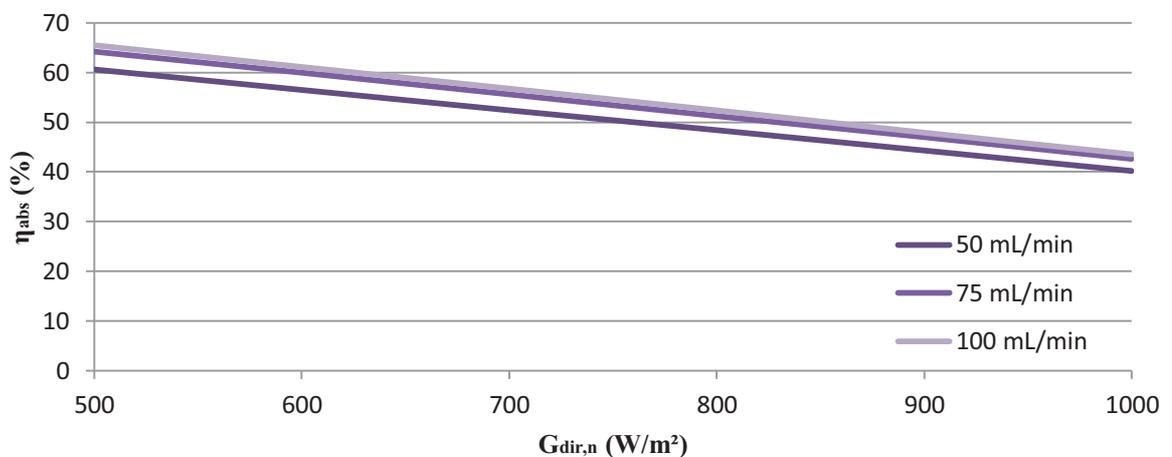
Os resultados para as vazões volumétricas de 75 mL/min e 100 mL/min obtiveram valores bem próximos, porém a vazão de 100 mL/min alcançou os melhores valores de eficiência, conforme os Gráficos 32 e 33. Aumentar a vazão volumétrica de 50 mL/min para 100 mL/min acarreta em um acréscimo de 8,37% e 8,27% na eficiência do coletor e do tubo absorvedor, respectivamente, em uma radiação solar direta média de 800 W/m². Os números de Reynolds, no ponto médio entre a entrada e a saída, respectivamente, para as vazões de 50, 75 e 100 mL/min, variaram em torno de 80, 117 e 155.

Gráfico 32 – Eficiência térmica do PTC em diferentes vazões (Tubo 3)



Fonte: elaborado pelo autor.

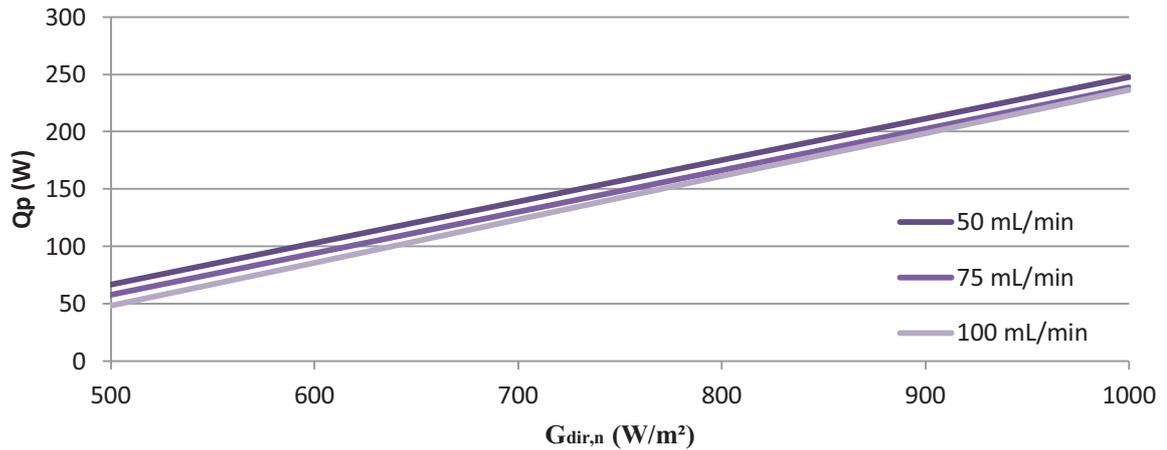
Gráfico 33 – Eficiência térmica de absorção em diferentes vazões (Tubo 3)



Fonte: elaborado pelo autor.

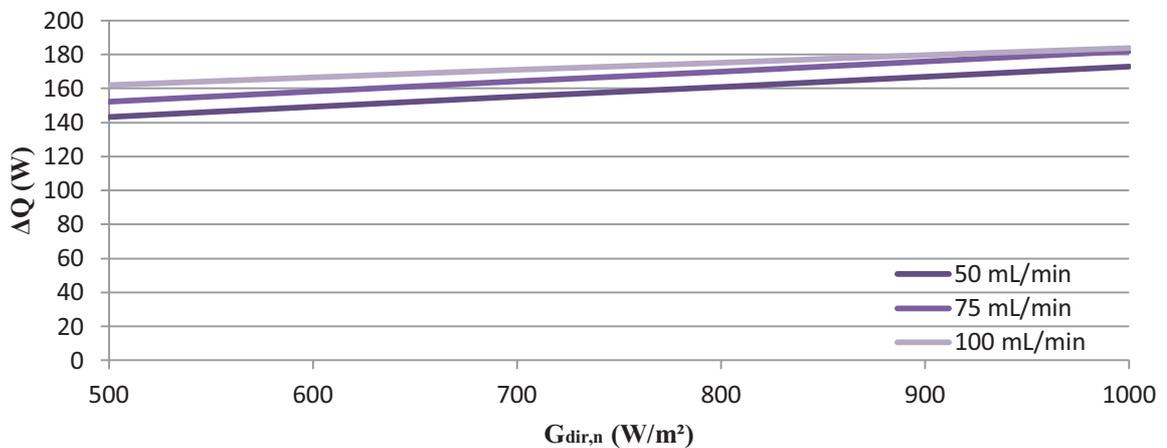
Os Gráficos 34 e 35 apresentam os resultados de perdas térmicas e calor útil para as diferentes vazões. Os resultados mostram que vazões maiores permitem menor quantidade de energia perdida para o ambiente, já que provoca aumento de troca térmica interna com o fluido de circulação, diminuindo a temperatura superficial do tubo absorvedor.

Gráfico 34 – Perdas de energia térmica em diferentes vazões (Tubo 3)



Fonte: elaborado pelo autor.

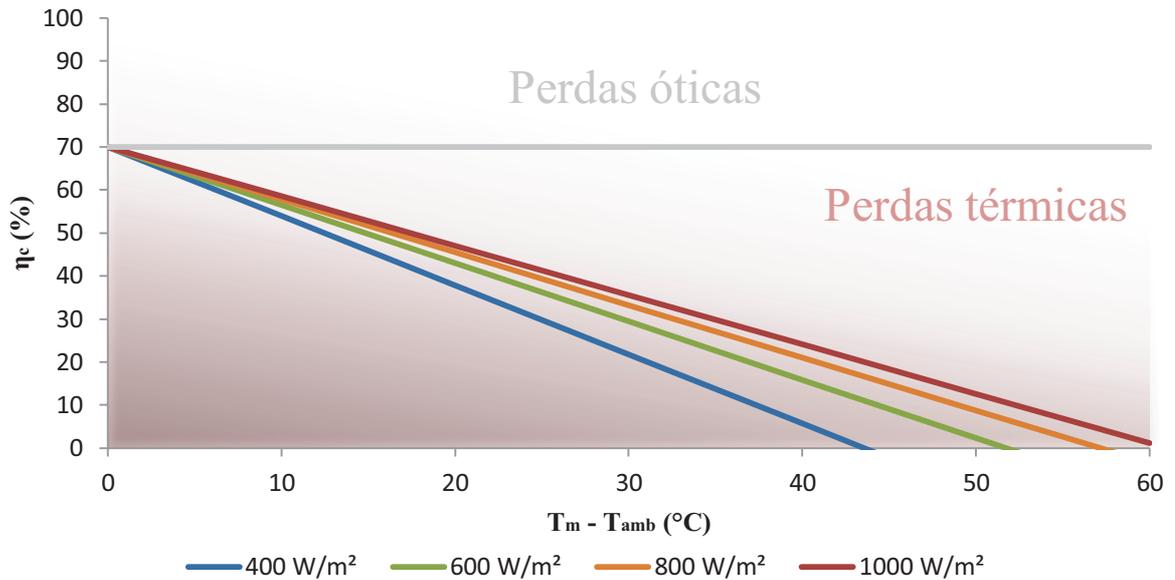
Gráfico 35 – Energia útil transferida para o fluido em diferentes vazões (Tubo 3)



Fonte: elaborado pelo autor.

O Gráfico 36 é a curva característica do Tubo 3, traçada a partir dos valores de eficiência térmica obtidos no experimento. Comparando com as curvas características dos Tubos 1 e 2, é possível perceber o alcance de maiores valores de temperatura média do fluido para o Tubo 3.

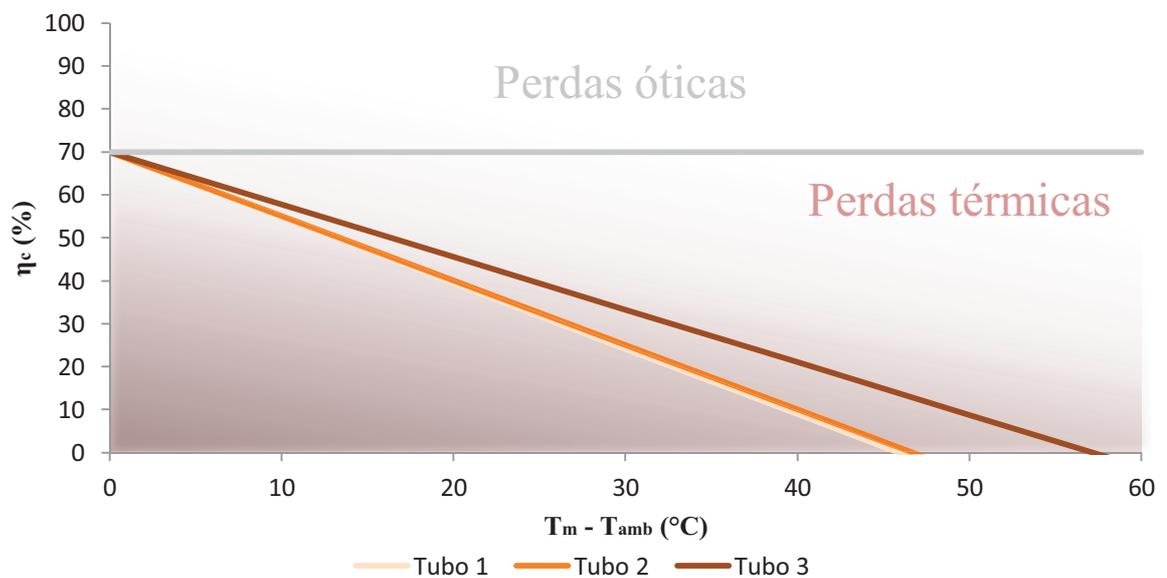
Gráfico 36 – Curva característica do Tubo 3



Fonte: elaborado pelo autor.

6.2.4 Resultados comparativos de eficiência térmica na radiação solar direta de 800 W/m²

As curvas características em uma radiação solar direta de 800 W/m² dos três tubos analisados foram traçadas no Gráfico 37. Os resultados mostram valores próximos de eficiência térmica entre os Tubos 1 e 2. É possível perceber menores valores de perdas térmicas para o Tubo 3, alcançando maiores valores de eficiência em relação aos Tubos 1 e 2.

Gráfico 37 – Curvas características na radiação solar direta de 800 W/m²

Fonte: elaborado pelo autor.

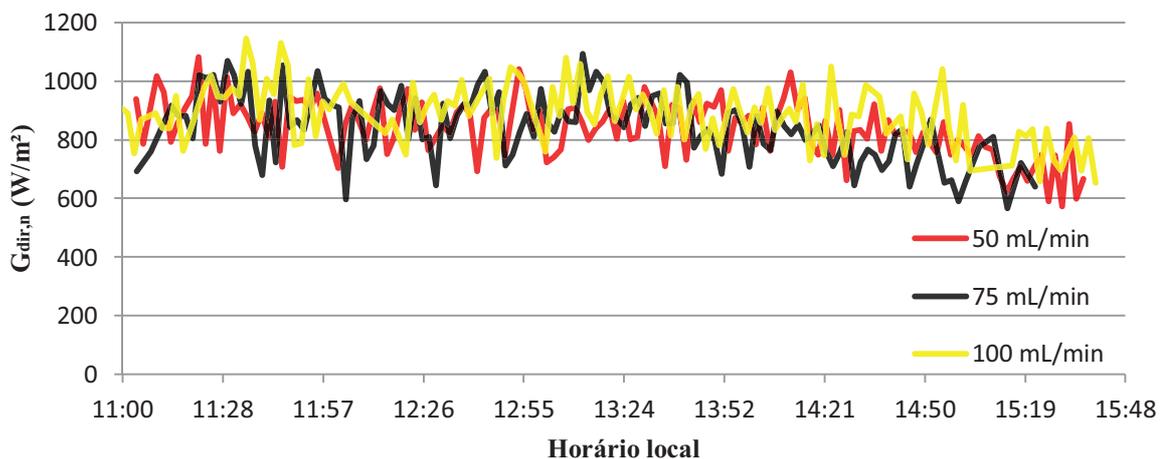
Considerando ambas as temperaturas de entrada do fluido e ambiente de 30 °C, a obtenção de uma temperatura de saída de 60 °C ($T_m - T_{amb} \approx 15$ °C), para fins de desinfestação de água de irrigação de áreas agrícolas, são observados acréscimos na eficiência térmica de 0,87% para o Tubo 2 e de 9,57% para o Tubo 3 em relação ao Tubo 1. Isso mostra que o Tubo 3 permite trabalhar com uma vazão maior do que os outros dois tubos, a fim de se alcançar a mesma diferença de temperatura entre a entrada e a saída do fluido no PTC.

6.2.5 Resultados para o tubo de 28 mm em diferentes vazões volumétricas

A estratégia de aumento de vazão pode ser utilizada visando à diminuição de temperatura superficial do tubo absorvedor, a fim de diminuir as perdas térmicas para o ambiente e de aumentar a eficiência do sistema. Entretanto, a temperatura de saída do fluido diminui. A partir disso, deve ser analisada a temperatura de trabalho do fluido de circulação que se almeja, a fim de se determinar o melhor valor de vazão volumétrica do projeto.

O Gráfico 38 apresenta resultados de radiação solar direta para os dias de testes com o tubo absorvedor de diâmetro externo de 28 mm em três vazões diferentes, e o Gráfico 39 mostra os resultados de diferença de temperatura entre a entrada e a saída do PTC.

Gráfico 38 – Dados de radiação solar direta para dias de testes com o Tubo 3



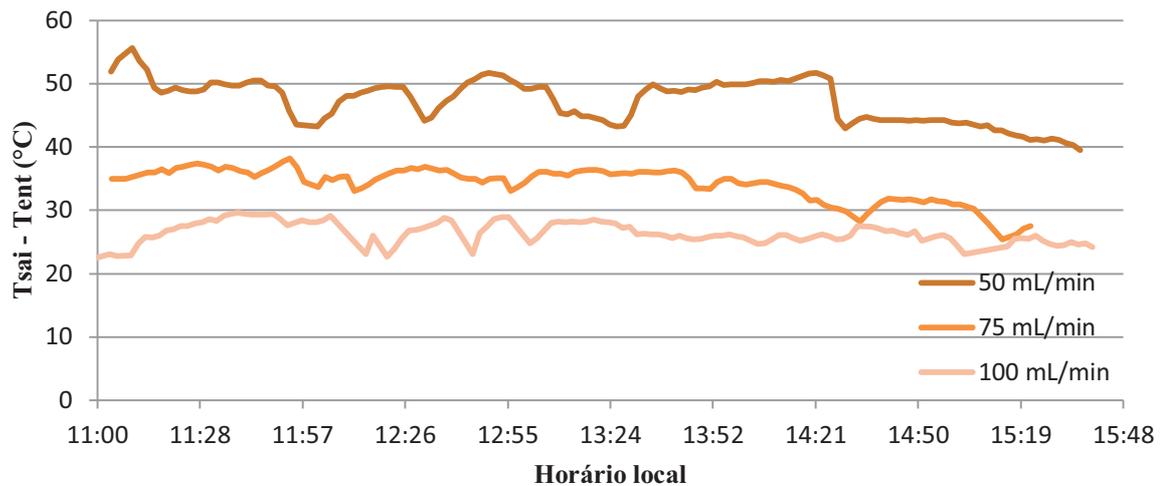
Fonte: elaborado pelo autor.

Os valores médios de radiação solar direta, considerando somente o período do experimento, para os três dias analisados, foram de 839,54 W/m^2 na vazão de 50 mL/min, 844,25 W/m^2 na vazão de 75 mL/min e 888,64 W/m^2 na vazão de 100 mL/min.

Os resultados mostrados no Gráfico 39 apresentam menores valores de diferença

de temperatura à medida que o valor da vazão volumétrica é aumentado, porém com percentual de redução menor do que o percentual de aumento do fluxo de massa. Dessa forma, os valores de eficiência térmica são maiores com o aumento de vazão, conforme apresentado nos Gráficos 32 e 33. Os valores de temperatura no ponto de entrada do fluido no PTC foram de $42,9\text{ °C} \pm 5\%$ e os valores de temperatura ambiente eram de aproximadamente $31\text{ °C} \pm 4\%$.

Gráfico 39 – Diferença de temperatura entre entrada e saída para o Tubo 3



Fonte: elaborado pelo autor.

Para uma vazão de 100 mL/min, uma temperatura média de saída de $71,2\text{ °C}$ é obtida, possibilitando a aplicação para termoterapia de água de armazenamento de sementes e de desinfestação de água de irrigação em cultivos agrícolas que necessitam de temperatura de 60 °C para eliminação de patógenos.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho visou analisar a influência da modificação geométrica dos tubos absorvedores na eficiência térmica do PTC. Foram fabricados três tubos absorvedores de diferentes áreas de secção transversal expandidas na região focal da parábola refletora de um coletor solar de pequeno porte. O PTC deste projeto possui rastreamento automático leste-oeste e ajuste de inclinação manual norte-sul; este último baseado no ângulo de declinação solar e de latitude local. O sistema de rastreamento foi desenvolvido com um Arduino UNO e um motor de passo NEMA 23 - 200 kgf.cm/3A com caixa de redução, sendo utilizados dois LDRs para detecção do lado de maior luminosidade do PTC.

A relação de aumento de área útil de absorção, considerando a área dos expansores e a área do tubo que não recebe radiação por estar coberta pelas buchas de nylon que sustentam o vidro, em relação ao tubo de 12,7 mm (Tubo 0) do projeto inicial, são de 50,53%, 74,63% e 119,57% para os tubos de 19,05 mm (Tubo 1), 22,225 mm (Tubo 2) e 28 mm (Tubo 3), respectivamente.

Uma expansão na área na parte interna do coletor permite que haja uma redução na velocidade do fluido, havendo um maior tempo de troca de calor entre a parede interna e o fluido. Em comparação à velocidade de escoamento interno do tubo de diâmetro 12,7 mm (0,01186 m/s) a uma vazão de 64 mL/min, essas reduções são de 60,61%, 72,00% e 83,06% para os tubos de 19,05 mm, 22,225 mm e 28 mm, respectivamente.

Os resultados mostram aumento dos valores de eficiência térmica do PTC e de absorção dos tubos absorvedores de maior área de secção transversal. Os acréscimos, respectivamente, foram de 11,49% e 11,41% para o Tubo 1, 24,50% e 24,50% para o Tubo 2 e 28,92% e 29,16% para o Tubo 3 em relação ao Tubo 0, na vazão de 64 mL/min, considerando uma radiação solar direta média de 800 W/m². A energia útil absorvida pelo fluido foi maior à medida que a área de secção transversal aumentava, conseqüentemente, as perdas térmicas apresentadas pelos tubos absorvedores foram menores. O tubo absorvedor de 28 mm apresentou o melhor comportamento de eficiência térmica em função da incidência de radiação solar, apesar de reduzir o fator de concentração em 54,46% em relação ao tubo de 12,7 mm.

Os tubos fabricados foram submetidos a testes experimentais nas vazões de 50 mL/min, 75 mL/min e 100 mL/min. Os resultados mostram que o aumento da vazão volumétrica do fluido escoante permite o aumento dos valores de eficiência térmica do PTC e de absorção para cada tubo absorvedor analisado. Os acréscimos, respectivamente, foram de

10,98% e 10,82% para o Tubo 1, de 18,26% e 18,36% para o Tubo 2 e de 8,37% e 8,27% para o Tubo 3 com um aumento em 100% da vazão volumétrica de 50 mL/min para 100 mL/min, considerando uma radiação solar direta média de 800 W/m².

As curvas características dos Tubos 1, 2 e 3 foram traçadas a partir dos valores de temperatura e de eficiência térmica obtidos através de cada vazão volumétrica analisada. Para aplicações agrícolas na termoterapia de sementes e desinfestação de água de irrigação, que necessitam de temperatura do fluido de saída de 60 °C para eliminação de patógenos, considerando ambas as temperaturas de entrada do fluido e ambiente de 30 °C, foram observados acréscimos na eficiência térmica de 0,87% para o Tubo 2 e de 9,57% para o Tubo 3 em relação ao Tubo 1 para a curva de 800 W/m².

Comparando as três vazões analisadas para o Tubo 3, os valores de temperatura de saída para a vazão de 100 mL/min variam em torno de 71,2 °C, podendo ser aplicada para eliminação de fitopatógenos, sendo possível a aplicação de uma vazão volumétrica maior para o alcance de uma temperatura média de 60 °C, que permitirá uma maior quantidade de fluido aquecido.

REFERÊNCIAS

- AI, B. *et al.* Calculation of the hourly and daily radiation incident on three step tracking planes. **Energy Conversion and Management**, v. 44, n. 12, p. 1999-2011, 2003.
- ALI, A. S. *et al.* Open source building science sensors (OSBSS): A low-cost Arduino-based platform for long-term indoor environmental data collection. **Building and Environment**, v. 100, p. 114-126, 2016.
- BAHLOL, H. Y.; SINHA, R.; HOHEISEL, G.; EHSANI, R.; KHOT, L. R. Efficacy evaluation of horticultural oil based thermotherapy for pear psylla management. **Crop Protection**, v. 113, p. 97-103, 2018.
- BARBOSA, E. de S. **Desenvolvimento de um sistema de controle de baixo custo para rastreamento de concentradores cilíndrico-parabólicos**. 2009. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.
- BEHAR, O., KHELLAF, A., MOHAMMEDI, K.. A novel parabolic trough solar collector model – Validation with experimental data and comparison to Engineering Equation Solver (EES). **Energy Conversion and Management**, v. 106, p. 268-281, 2015.
- BELLOS, E. *et al.* Thermal enhancement of solar parabolic trough collectors by using nanofluids and converging-diverging absorber tube. **Renewable Energy**, v. 94, p. 213-222, 2016.
- BELLOS, E.; TZIVANIDIS, C; ANTONOPOULOS, K. A. A detailed working fluid investigation for solar parabolic trough collectors. **Applied Thermal Engineering**, v. 114, p. 374-386, 2017.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2018: Ano Base 2017**. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2018. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2019.
- CAINENG, Z. *et al.* Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era. **Natural Gas Industry B**, v. 3, n. 1, p. 1-11, 2016.
- DONGA, R. K.; KUMAR, S. Thermal performance of parabolic trough collector with absorber tube misalignment and slope error. **Solar Energy**, v. 184, p. 249-259, 2019.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 3rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- ERDOGAN, A.; COLPAN, C. O.; CAKICI, D. M. Thermal design and analysis of a shell and tube heat exchanger integrating a geothermal based organic Rankine cycle and parabolic trough solar collectors. **Renewable Energy**, v. 109, p. 372-391, 2017.
- FRERIS, L. L.; INFIELD, D. G. **Renewable energy in power systems**. Chichester: John

Wiley & Sons, 2008.

GAUL, H.; RABL, A. Incidence-angle modifier and average optical efficiency of parabolic trough collectors. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 102, n. 1, p. 16-21, 1980.

GHATREHSAMANI, S.; ABDULRIDHA, J.; BALAFOUTIS, A.; ZHANG, X.; EHSANI, R.; AMPATZIDIS, Y. Development and evaluation of a mobile thermotherapy technology for in-field treatment of Huanglongbing (HLB) affected trees. **Biosystems Engineering**, v. 182, p. 1-15, 2019.

GHINI, R. Coletor solar para desinfestação de substratos para produção de mudas sadias. Technical report, **Embrapa-CNPME: Circular Técnica**, 2004.

GOSWAMI, D. Y.; KREITH, F.; KREIDER, J. F. **Principles of solar engineering**. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2000.

GUPTA, M. K. **Power plant engineering**. New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2012.

HOTTEL, H. C. A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. **Solar Energy**, v. 18, n. 2, p. 129-134, 1976.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, Banco de dados. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso em: 10 fev. 2019.

JAMAL-ABAD, M. T.; SAEDODIN, S.; AMINY, M. Experimental investigation on a solar parabolic trough collector for absorber tube filled with porous media. **Renewable Energy**, v. 107, p. 156-163, 2017.

JEBASINGH, V. K., HERBERT, G. M. J. A review of solar parabolic trough collector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 1085-1091, 2016.

KALOGIROU, S. A. Solar thermal collectors and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, n. 3, p. 231-295, 2004.

KALOGIROU, S. A.; LLOYD, S. Use of solar parabolic trough collectors for hot water production in Cyprus: A feasibility study. **Renewable energy**, v. 2, n. 2, p. 117-124, 1992.

KASAEIAN, A.; DANESHAZARIAN, R.; POURFAYAZ, F. Comparative study of different nanofluids applied in a trough collector with glass-glass absorber tube. **Journal of Molecular Liquids**, v. 234, p. 315-323, 2017.

KASAEIAN, A. *et al.* Experimental investigation on the thermal behavior of nanofluid direct absorption in a trough collector. **Journal of Cleaner Production**, v. 158, p. 276-284, 2017.

KOHL, H. Renewable energy sources on the rise. *In*: WENGENMAYR, R.; BÜHRKE, T. **Renewable energy: Sustainable Energy Concepts for the future**. Weinheim: WILEY-VCH, 2008. p. 4-13.

KONAR, A.; MANDAL, A. K. Microprocessor based automatic sun tracker. **IEE**

Proceedings A – Science, Measurement and Technology, v. 138, n. 4, p. 237-241, 1991.

LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR E GÁS NATURAL – LESGN. **Relatório de montagem do coletor solar parabólico**. 2014. 19 f. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

LI, Z.; LIU, X.; TANG, R. Optical performance of inclined south-north single-axis tracked solar panels. **Energy**, v. 35, n. 6, p. 2511-2516, 2010.

LIU, P. *et al.* Effects of rib arrangements on the performance of a parabolic trough receiver with ribbed absorber tube. **Applied Thermal Engineering**, v. 156, p. 1-13, 2019a.

LIU, P. *et al.* Thermal-hydraulic performance and entropy generation analysis of a parabolic trough receiver with conical strip inserts. **Energy Conversion and Management**, v. 179, p. 30-45, 2019b.

MOUSAZADEH, H. *et al.* A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 8, p. 1800-1818, 2009.

NIKNIA, I.; YAGHOUBI, M. Transient analysis of integrated Shiraz hybrid solar thermal power plant. **Renewable Energy**, v. 49, p. 216-221, 2013.

PALZ, W. **Energia solar e fontes alternativas**. São Paulo: Hemus, 2002.

PITZ-PAAL, R. How the sun gets into the power plant. *In*: WENGENMAYR, R.; BÜHRKE, T. **Renewable energy: Sustainable Energy Concepts for the future**. Weinheim: WILEY-VCH, 2008. p. 26-33.

QUASCHNING, V. **Understanding renewable energy systems**. London: Earthscan, 2005.

RAJPUT, Er. R. K. **Non-conventional energy sources and utilization: energy engineering**. 2nd ed. New Delhi: S. Chand, 2014.

RIZVI, A. A. *et al.* Sun position algorithm for sun tracking applications. *In*: IECON, 2014, Dallas. **Conferência**. Dallas: IEEE, 2014. p. 5595-5598.

ROLIM, M. M.; FRAIDENRAICH, N.; VILELA, O. de C. Otimização de parâmetros construtivos de coletores parabólicos lineares. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2012, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Abens, 2012. p. 1-8.

ROSA, A. V. da. **Fundamentals of renewable energy processes**. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2009.

SCHULZE, R. **Strahlenklima der Erde**. Darmstadt: Steinkoff, 1970.

SOUZA, F. **Arduino UNO**. Embarcados.com.br. 2013. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/arduino-uno/>> Acesso em: 01 fev. 2019. il.color.

SPENCER, J. W. Fourier series representation of the position of the sun. **Search**, v. 2, n. 5, p.

172, 1971.

SUMAN, S.; KHAN, M. K.; PATHAK, M. Performance enhancement of solar collectors - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 192-210, 2015.

TANAKA, M.; ITO, M.; BRAGA, C.; G., A. Tratamento térmico solar da água para controle de fitopatógenos. **Fitopatologia Brasileira**, v. 28, p. 386-393, Mar. 2003.

THE EPPLEY LABORATORY INC. **Shade disk kit**. Eppleylab.com. Newport. Disponível em: <<http://www.eppleylab.com/instrument-list/shade-disk-kit/>> Acesso em: 30 jan. 2019. il.color.

THE EPPLEY LABORATORY INC. **Normal incidence pyrheliometer**. Eppleylab.com. Newport. Disponível em: <<http://www.eppleylab.com/instrument-list/normal-incidence-pyrheliometer/>> Acesso em: 30 jan. 2019. il.color.

UMMADISINGU, A.; SONI, M. S. Concentrating solar power – Technology, potential and policy in India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 5169-5175, 2011.

VANDAELE, Nicole; PORTER, Wendell. Renewable energy in developing and developed nations: Outlooks to 2040. **UF Journal of Undergraduate Research**, v. 15, n. 3, p. 1-7, 2015.

VENEGAS-REYES, E. *et al.* Design, construction, and testing of a parabolic trough solar concentrator for hot water and low enthalpy steam generation. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 4, n. 5, 2012.

VEZMAR, S. *et al.* Positive and negative impacts of renewable energy sources. **International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems**, v. 5, n. 2, p. 15-23, 2014.

WENDLING, M. **Sensores**. Guaratinguetá, 2010. Disponível em: <<http://www2.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/4---sensores-v2.0.pdf>>. Acesso em: 30 jan. 2019. il.color.